



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería

Estudio de la variación en el módulo de ruptura del pavimento rígido
con inclusión de Poliestireno Expandido y Puzolanas Naturales

Tesis

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

Presenta

Ing. José Miguel Mendoza Gómez

Dirigido por:

Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza

Querétaro, Qro. a 30 de abril, 2021.



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

Estudio de la variación en el módulo de ruptura del pavimento rígido
con inclusión de Poliestireno Expandido y Puzolanas Naturales

Tesis

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

Presenta

Ing. Jose Miguel Mendoza Gómez

Dirigido por:

Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza

Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza

Presidente

Dr. Jaime Moisés Horta Rangel

Secretario

Dr. Saúl Antonio Obregón Biosca

Vocal

Dr. Francisco Javier García Rodríguez

Suplente

Dra. Teresa López Lara

Suplente

Centro Universitario, Querétaro, Qro.

30 de abril, 2021.

México

Tabla de Contenidos

Resumen	9
Abstract	10
Agradecimientos	11
1. Introducción	12
1.1. Descripción del problema	13
1.2. Justificación	14
1.3. Hipótesis	15
1.4. Objetivo	15
2. Marco Teórico	16
2.1. Pavimentos	16
2.1.1. Tipos de pavimentos	17
2.1.1.1. Pavimento Flexibles (Concreto Asfáltico)	18
2.1.1.1.1. Subrasante	18
2.1.1.1.2. Subbase	19
2.1.1.1.3. Base	19
2.1.1.1.4. Capa de Rodadura	19
2.1.1.2. Pavimento de Concreto Hidráulico	20
2.1.1.2.1. Subrasante	21
2.1.1.2.2. Subbase	21
2.1.1.2.3. Capa de Rodadura	22
2.2. Concreto Hidráulico y sus componentes	23
2.2.1. Cementantes	24
2.2.1.1. Cemento Tipo Portland	24

2.2.1.1.1. Producción del Cemento Portland	24
2.2.1.1.2. Tipos de Cemento Portland en México.....	27
2.2.1.2. Puzolanas	29
2.2.1.2.1. Puzolanas Artificiales	29
2.2.1.2.2. Puzolanas Naturales.....	29
2.2.1.3. Agregados Pétreos	30
2.2.1.1. Agregados Finos	31
2.2.1.2. Agregados Gruesos.....	33
2.3. Uso de Poliestireno Expandido y Puzolanas en Mezclas de Concreto.....	34
3. Metodología	37
3.1. Caracterización de los Materiales.....	38
3.1.1. Caracterización de los agregados pétreos.....	38
3.1.2. Granulometría de Agregado Fino.....	39
3.1.3. Pesos Volumétricos del Agregado Fino	40
3.1.4. Densidad y Absorción de la Arena.....	42
3.1.5. Contenido de Materia Orgánica de Agregado Fino.....	44
3.1.6. Equivalente de Arena	45
3.1.7. Granulometría de Agregado Grueso.....	47
3.1.8. Pesos Volumétricos del Agregado Grueso	48
3.1.9. Densidad, Densidad Relativa (Gravedad Especifica) y Absorción del Agregado Grueso	50
3.1.10. Desgaste de Los Ángeles.....	51
3.1.11. Caracterización de los Cementantes.....	53
3.1.12. Obtención y caracterización del Polietileno Expandido (EPS).....	53
3.2. Diseño de Mezcla por el método ASTM C-109 y método ACI.....	56

3.2.1. Diseño de Mezcla de Mortero por el Método ASTM C-109	56
3.2.2. Diseño de Mezcla de Concreto por el Metodo ACI 211.1	58
3.3. Ensayos de la mezcla diseñada.....	61
3.4. Análisis y resultados.....	62
4. Resultados y discusión.	62
4.1. Caracterización del agregado fino y grueso	62
4.2. Caracterización de la zeolita y cemento	66
4.3. Dosificación de Gránulos EPS en estado natural y tratados.....	67
4.4. Ensayo de Absorción de los especímenes cúbicos adicionado con gránulos de EPS en estado natural y tratados	70
4.5. Dosificación de mezcla de concreto para pavimento rígido método ACI 211.1	71
5. Conclusiones	80
Bibliografías o Referencias.....	82
Anexos	90

Índice de Tablas

Tabla

2.1 Tipos de losas para pavimentos rígidos	22
2.2 Fuentes de las materias primas usadas en la fabricación del Cemento Portland.	25
2.3 Proceso de fabricación del cemento portland.	26
2.4 Tipos de Cemento	27
2.5 Tipos de Resistencia	28
2.6 Características.....	28
2.7 Características de un buen agregado fino para concreto.	32
3.1 Normas ASTM Agregados Pétreos	38
3.2 Granulometrías de las muestras representativas	52
3.3 Norma Mexicana y ASTM para Cementantes	53

3.4	Revenimientos para diferentes tipos de construcción.....	59
3.5	Contenidos de aire para diferentes revenimientos	59
3.6	Relación Agua/Cemento para diferentes resistencias.....	60
3.7	Normas ASTM para Pruebas en Estado Fresco.....	61
3.8	Normas ASTM para Pruebas en Estado Seco.....	61
4.1	Granulometría del Agregado Fino	62
4.2	Granulometría del Agregado Fino	63
4.3	Densidad y absorción del agregado fino y grueso	64
4.4	Equivalente de arena en el agregado fino	65
4.5	Peso volumétrico seco suelto y compactado de los agregados.....	65
4.6	Resistencia a la abrasión (Desgaste de los Ángeles).....	66
4.7	Dosificación y fluidez de las mezclas de prueba.....	66
4.8	Resultados de resistencia a la compresión simples.....	67
4.9	Dosificación y fluidez de las mezclas de prueba adicionada con EPS estado natural.	68
4.10	Resultados de resistencia a la compresión simples (EPS en estado natural).	69
4.11	Dosificación y fluidez de las mezclas de prueba adicionada con EPS reforzado.....	70
4.12	Resultados de resistencia a la compresión simples (EPS reforzado).....	70
4.13	Resultados de absorción de las mezclas de mortero adicionadas.	71
4.14	Determinación del Revenimiento de la mezcla.	71
4.15	Determinación tamaño máximo del Agregado Fino.....	72
4.16	Obtención cantidad de agua para la mezcla.....	72
4.17	Obtención cantidad de cemento para la mezcla.....	73
4.18	Obtención cantidad de grava para la mezcla.	74
4.19	Determinación cantidad de arena para la mezcla.	74
4.20	Ajuste por absorción del agregado.	75
4.21	Mezcla final de diseño.	75
4.22	Resistencia a la flexión de la mezcla.	77

Índice de Figuras

Figura

2-1. Esquema del comportamiento de pavimentos flexibles y rígidos	16
2-2. Estructura del Pavimento Flexible.	18
2-3. Estructura del Pavimento Rígido.....	21
2-4. Componentes del Concreto Hidráulico.	23
2-5. Agregado Fino (Arena)	32
2-6. Agregados Gruesos (Piedra de río y triturada).....	34
3-1. Diagrama de Procedimientos.....	37
3-2 Proceso de cuarteo de la muestra de agregado fino.....	39
3-3. Tamices para ensayo de granulometría de agregado fino.	40
3-4. Enrasamiento de la arena.....	40
3-5. Proceso de apisonamiento de la arena.....	41
3-6. Proceso de apisonamiento de la arena.....	42
3-7. Tronco-cono de arena en condición S.S.S.....	43
3-8. Materiales para preparación del color patrón.	44
3-9. Interpretación del color de la solución contra el color patrón.	44
3-10. Solución de reserva previamente preparada.	45
3-11. Probeta 4” de solución de trabajo en probeta.	46
3-12 Proceso de cuarteo de la muestra de agregados gruesos.	47
3-13. Tamices para ensayo de granulometría de agregado grueso.	47
3-14. Llenado de recipiente hasta nivel de derrame.	48
3-15. Proceso de apisonamiento de la grava.....	49
3-16. Remoción de humedad superficial de las partículas.	50
3-17. Remoción de humedad superficial de las partículas.	51
3-18. Carga abrasiva para granulometría tipo B.....	52
3-19. Máquina utilizada para el proceso de trituración.	54
3-20. Proceso de recubrimiento de gránulos de EPS con Lechada 1:8.	54

3-21. Gránulos recubiertos con lechada 1:8.....	55
4-1. Grafica de Granulometría Agregado Fino.....	63
4-2. Grafica de Granulometría Agregado Grueso.....	64
4-3. Fabricación de vigas para ensaye a flexión.....	76
4-4. Falla a flexión en el tercio medio de las vigas para ensaye a flexión.....	77
4-5. Grafica comparación de resistencia entre mezclas.....	78
4-6. Curva de resistencia con respecto al tiempo.	79

Índice de Ecuaciones

Ecuación 1. Obtención de Fluidez de la Mezcla.....	57
Ecuación 2. Relación Agua/Cemento de la Mezcla.....	73

Resumen

El concreto es uno de los materiales más utilizados para la construcción debido a su bajo costo de producción; pero también considerado uno de los materiales que más aporta al calentamiento global, esto debido a los materiales que se utilizan durante su producción; los cuales son extraídos mediante explotación de bancos, provocando gran emisión de CO₂. Debido a esto, la presente investigación tuvo como fin principal aumentar o mantener la resistencia a la compresión simple y el módulo de ruptura de un concreto hidráulico para uso en pavimento rígido mediante la inclusión de puzolana naturales, como la Zeolita, y sustitución de agregado fino por gránulos reciclados de poliestireno expandido, material para el cual existen pocas opciones de reciclaje y cuenta con características que mejoran el comportamiento mecánico del concreto. Para el proceso de sustitución se estableció un porcentaje entre el 10% y 50% del volumen de la mezcla, tanto para la Zeolita, como para la inclusión de los gránulos de poliestireno expandido. Este trabajo de investigación se realizó mediante un proceso de 4 etapas que consistía en obtención y preparación de los materiales, caracterización de los cementantes y agregados con base a la Normativa Mexicana N-CMT y la Normativa Americana ASTM, diseño de la mezcla de control y modificadas, con base al método del *American Concrete Institute* ACI 211 y pruebas de las mezclas como ser pruebas revenimiento, resistencia a la compresión y flexión. La inclusión de Zeolita como cementante y gránulos de poliestireno expandido reforzados como agregado presentaron resultados favorables, mejorando la resistencia a la compresión 16% pero reduciendo la resistencia a la flexión en un 11% a los 28 días manteniendo una tendencia al alza de 7.5% a través del tiempo, determinando un porcentaje óptimo del 10% de inclusión de Zeolita y gránulos de Poliestireno Expandido Tratados.

Abstract

Concrete is one of the most used material for construction due to its low production cost; but at the same time it is considered one of the materials that contributes the most to global warming, this because large amounts of cement, water, fine and coarse aggregates are used during the production of concrete; which are extracted through the operation of material banks, causing large CO₂ emissions. Due to this, the present investigation had as main objective to increase or maintain the resistance to simple compression and the modulus of rupture of a hydraulic concrete for use in rigid pavement by the inclusion of natural pozzolan, such as Zeolite, and substitution of fine aggregate by recycled granules of expanded polystyrene, material for which there are few recycling options and features characteristics that improve the mechanical behavior of concrete.

For the substitution process a percentage was established between 10% and 50% of the volume of the mixture, both for the Zeolite, and for the inclusion of the expanded polystyrene granules.

This research work was carried out through a 4-stage process that consisted of obtaining and preparing the materials, characterization of the cementitious materials and aggregates, based on the Mexican N-CMT Regulations and the ASTM American Regulations, design of the control mixture and modified, based on the method of the American Concrete Institute ACI 211 and tests of the mixtures such as slump test, compressive and flexural strength test.

The inclusion of Zeolite as a cementitious agent and reinforced granules of expanded polystyrene granules as aggregate showed favorable results, improving the compressive strength by 16% but reducing the flexural strength by 11% at 28 days, maintaining an upward trend of 7.5% to over time, determining an optimum percentage of 10% inclusion of Zeolite and Treated Expanded

Agradecimientos

Primero quiero agradecer a Dios por haberme cuidado de mí durante esta oportunidad que se presentó, de estudiar lejos de mi país Honduras.

Quiero agradecer a mis padres, Jose Miguel Mendoza Andero y Claudia Patricia Gómez Rodríguez, por brindarme su apoyo incondicionalmente y por ser un gran ejemplo.

A mi tía Mirian Yolanda Gómez Rodríguez, quien cumplió un papel muy importante, convirtiéndose en una segunda madre para mí, hasta el cielo un gran abrazo.

A mi novia, Diana Nicole Lozano Varela, por todo el tiempo presente en mi vida, gracias por tu ayuda constante y sobre todo por tu apoyo a pesar de lo difícil que ha sido estar lejos.

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

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

Agradecimientos a Grupo TCDN. S.A. de C.V., por proporcionarme la zeolita para realizar esta investigación, por brindarme buena atención y por su interés en el seguimiento de la investigación.

A mi equipo tutorial por todas las observaciones, recomendaciones, revisiones y correcciones brindadas.

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

Finalmente agradecer a todos aquellos guerreros que se encuentran en la primera línea de trabajo enfrentando esta pandemia del Covid-19. A ustedes ¡Gracias Héroes!

1. Introducción

El medio ambiente se ha visto afectado por los desechos sólidos que se generan diariamente; esto ha generado el interés de los investigadores en estudiar las posibilidades y beneficios de crear materiales amigables con el medio ambiente, mediante la incorporación de desechos en materiales para la construcción, como el concreto, y así buscar reducir la contaminación. Khatib *et al.* (2019) y Kaya y Kar (2015) afirman que el uso del agregado de poliestireno expandido puede ser un material potencial para construcción y simultáneamente solventar un problema ambiental mediante el reciclado de desechos sólidos.

Se han realizado experimentos en concretos que contienen cenizas y gránulos de poliestireno expandido (Expanded Polystyrene “EPS”) como sustituto de agregados, en dosificaciones que rondan entre el 20% y 100% del volumen. Los experimentos resaltaron que las características del concreto se vieron influenciados por los gránulos de poliestireno EPS, mejorando la trabajabilidad del concreto fresco y reduciendo la densidad (Cadere *et al.*, 2017). Por ejemplo, Hernández *et al.* (2013) comentan que se obtuvieron densidades entre 1500 a 2000 kg/m³, con resistencias variables entre 10 a 21 Mpa al momento de utilizar gránulos de poliestireno expandido EPS y combinación de ceniza de sílice y cemento como cementantes; esta combinación de cementantes demostró que mejora el enlazamiento entre los gránulos de poliestireno expandido EPS y la pasta cementante, además de un incremento en la resistencia a compresión del concreto adicionado con gránulos de poliestireno expandido EPS. Por otra parte, Ferrándiz-Mas y García-Alcocel (2012) concluyeron que existe una correlación negativa entre el aumento en la dosificación del poliestireno expandido EPS y la consistencia.

Chung *et al.* (2017) argumentan que el efecto sobre las propiedades del concreto depende del tamaño de los gránulos de poliestireno expandido EPS, ya que agregar partículas de menor tamaño puede contribuir a mejorar la resistencia a la compresión, mientras la conductividad térmica disminuye. Liu y Chen (2014) afirman que la relación entre la resistencia a la compresión y la fracción de volumen de concreto con

poliestireno expandido EPS siguen una caída exponencial, la cual está relacionada con los tamaños de las partículas y su composición.

1.1. Descripción del problema

El poliestireno expandido es uno de los mayores contaminantes ambientales, después del PET; Según la IHS Markit (2018), en su publicación de la *Chemical Economics Handbook* acerca del Poliestireno, comentan que actualmente se consumen aproximadamente 6,197 Kton de EPS a nivel mundial, siendo Asia el mayor consumidor con un 53%, seguido por Europa con un 27%, Norte América con un 11% y el resto del mundo con un 9%, convirtiendo el EPS en uno de los mayores contaminantes ambientales debido a su característica no biodegradable y del cual, hasta la fecha, hay muy pocas maneras prácticas de reciclarlo, causando la permanencia indefinida en el medio natural y graves daños al medio marino, ya que su descomposición se presenta en pequeñas esferas, que al ser ingeridas por la fauna marina, causa dificultades alimenticias y por ende, la muerte a la misma.

Existe la necesidad de disminuir el impacto ambiental causado por las grandes masas de residuos de materiales no biodegradables como el EPS. Materiales que no cuentan con un proceso de reciclado y disposición final definida. Con base a lo anterior, se estudiará la posibilidad de utilizar adición de gránulos de poliestireno expandido reciclado a una mezcla de concreto hidráulico para pavimento y así reducir en gran escala los residuos de EPS y el uso de agregado pétreo. Para lograr esto es vital estudiar la interacción entre los agregados pétreos, el EPS y el cemento, este último será combinado con puzolana natural para poder garantizar un módulo de ruptura apto para una carretera.

1.2. Justificación

Hoy en día la necesidad de obtener mezclas de concreto económicas y resistentes ha provocado la reducción del cemento y grava que la componen, mediante adición de materiales reciclados. Miled *et al.* (2007) y Sayadi *et al.* (2016) afirman que recientemente se está empleando EPS para reemplazar los agregados pétreos utilizados en las mezclas de concreto. Por su parte Saradhi *et al.* (2005) y Cadere *et al.* (2017) recomiendan la reducción de cemento mediante adición de puzolanas artificiales, como cenizas volátiles para poder contrarrestar la segregación durante el mezclado del EPS. Es el caso de Ganesh y Saradhi (2003), quienes sustituyeron el 50% del cemento con cenizas volátiles y consideraron diferentes tamaños y porcentajes de gránulos de EPS, obteniendo incrementos de resistencia a la compresión de 35%, entre 7 a 28 días, evitando la segregación del EPS.

Por otra parte, Liu y Chen (2014) y Chung *et al.* (2017) concluyeron que el tamaño de los gránulos de EPS agregado afectan las propiedades del concreto. Le Roy *et al.* (2005) indican que la resistencia a la compresión del concreto con EPS aumenta a medida se utilizan gránulos de menor tamaño. Por lo tanto, para lograr una distribución óptima; que proporcione un módulo de ruptura adecuado para uso como pavimento rígido; se harán diferentes mezclas de porcentaje Cemento-Puzolana, como cementante y adición de gránulos de EPS en tamaños 4 mm. a 20 mm.

1.3. Hipótesis

La inclusión de gránulos reciclados de Poliestireno Expandido de tamaños entre 4 mm a 20 mm y el uso de puzolana natural como ligante entre 10% - 50% del volumen de la mezcla, proporcionará un aumento superior al 15% del módulo de ruptura.

1.4. Objetivo

Aumentar al menos el 15% el módulo de ruptura para pavimento rígido a partir de la inclusión de gránulos reciclados de poliestireno expandido (*Expanded Polystyrene* “EPS”) y puzolanas naturales.

Dirección General de Bibliotecas de la UAO

2. Marco Teórico

2.1. Pavimentos

Es muy importante entender que es un pavimento y que tipos existen, por ejemplo, Rico (1992) define pavimento como la superestructura de la obra vial comprendida entre el nivel superior de la terracería y la superficie de rodadura, que hace posible el tránsito expedito de los vehículos con la comodidad, seguridad y economía previstos del proyecto. Esta superestructura que se comenta puede estar constituida por una gran variedad de configuraciones, ya que puede contar con una tan sola capa o en varios casos de dos o más capas, a la vez estas capas pueden estar conformadas por materiales naturales o sometidos a diversos tratamientos. La capa superior de las estructuras de pavimentos se denomina losa de rodadura o superficie de rodamiento y puede estar constituida por materiales de mezclas asfálticas o concreto hidráulico, es importante mencionar que la diferencia entre ambos tipos de pavimentos no solamente es física debido son las capas y materiales con los cuales se construyen, también cuentan con una variación mecánica al momento que la carga es aplicada sobre la superficie de rodadura, ya que el pavimento rígido produce una mejor distribución de las cargas, dando como resultado tensiones muy bajas en la subrasante, como se presenta en la Figura 2-1 .

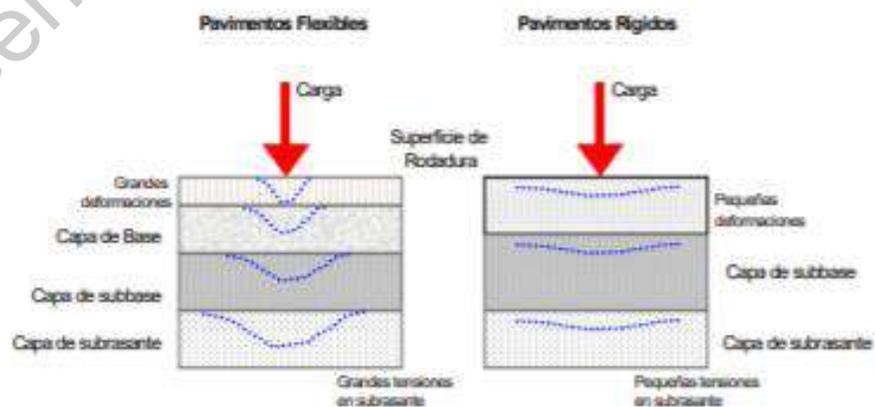


Figura 2-1. Esquema del comportamiento de pavimentos flexibles y rígidos

Fuente: Pacheco *et al.* (2018)

En la Ingeniería de las vías terrestres, se manejan dos tipos de estructuras de pavimentos convencionales; los cuales se identifican como flexible o asfáltico y rígido o concreto hidráulico. Para poder determinar qué tipo de pavimento se diseñará es necesario considerar diferentes aspectos o necesidades de la obra. En ese sentido Pacheco *et al.* (2018) comentan que actualmente ha aumentado el interés en el uso de concreto hidráulico para la construcción de carreteras, debido a que este tipo de pavimento rígido presenta ventajas con relación a los demás tipos de pavimentos y menor impacto ambiental en relación con los derivados del petróleo. Entre las ventajas se puede mencionar mayor vida útil, mayor serviciabilidad, mayor resistencia a condiciones climáticas desfavorables, menor requerimiento de la subestructura de soporte y menor necesidad de mantenimiento, esto último debido a que las presiones transmitidas a la estructura de terracerías son menores en los pavimentos de concreto hidráulico.

2.1.1. Tipos de pavimentos

AASHTO(1993) menciona en su manual de diseño de pavimentos que los materiales utilizados para la construcción de la estructura de pavimentos puede ser dividida en dos clases generales; aquellos que son utilizados para pavimentos flexibles (Concreto Asfáltico) y los que son utilizados para pavimentos rígidos (Concreto Hidráulico); considerando que algunos materiales podrán ser utilizados en ambos tipos de estructuras; como ser las capas subrasante, sub-base y base. Los tipos de pavimentos al igual que los materiales utilizados serán discutidos a continuación:

2.1.1.1. Pavimento Flexibles (Concreto Asfáltico)

Montejo (2008) define pavimento flexible a aquel pavimento que está formado por una capa bituminosa apoyada generalmente sobre dos capas no rígidos, la base y la subbase. Es importante comentar que esta configuración de capas puede variar dependiendo de las necesidades particulares de cada obra. Por otra parte, Sun (2016) comenta que las capas de la estructura de pavimento deben ser capaces de soportar la grandes cargas y condiciones climáticas presentes, entre sus principales requerimientos se encuentran la durabilidad, suavidad y seguridad (resistencia al deslizamiento). Debido a que durabilidad significa mayor vida útil, la estructura de pavimento debe garantizar la mayor resistencia posible a la deformación. La estructuración típica del pavimento flexible se muestra en la Figura 2-2.



Figura 2-2 Estructura del Pavimento Flexible.

Fuente: Olivera (2009)

2.1.1.1.1. Subrasante

Esta es la capa inicial o de terreno natural que soportará toda la estructura del pavimento, se puede decir que será la capa de cimentación de la estructura, esta capa puede estar formada en terraplén de relleno o corte. La calidad del material natural es muy importante ya que de este dependerá el espesor de la estructura del diseño, en caso de requerir una mejor calidad de material, se podrá hacer cualquier tipo de mejora mediante estabilización o sustitución parcial del mismo.

2.1.1.1.2. Subbase

Esta capa colocada entre la subrasante y la capa de base es considerada como material de transición en los pavimentos flexibles, ya que está destinada a soportar, transmitir y distribuir uniformemente las cargas aplicadas a la superficie de rodadura, de tal manera que la subrasante pueda soportar las variaciones inherentes que puedan afectar la subbase, además debe controlar los cambios de volumen y elasticidad que puedan afectar el pavimento. Por lo general en la subbase se utiliza materiales granulares ya que además de las funciones previamente discutidas, esta capa funciona como capa protectora o de drenaje, evitando la ascensión capilar de agua que pueda dañar la estructura superior del pavimento.

2.1.1.1.3. Base

Esta capa sobre la cual se coloca la capa de rodadura y está por encima de la subbase tiene como función principal, distribuir y transmitir las cargas ocasionadas por el tránsito, a la subrasante mediante transición de la subbase. Normalmente esta capa también se le denomina base granular debido a que está constituido por material tipo piedra de buena calidad, triturada y combinada con material de relleno o mediante combinación de grava, arena y suelo natural. En caso de requerir un mejor tipo de material y no contar con él en sitio, se podrá realizar el proceso de mejoramiento aplicando diferentes técnicas de estabilización como ser la adición de cemento portland.

2.1.1.1.4. Capa de Rodadura

La capa de rodadura es la última capa de la estructura de pavimento y es colocada sobre la capa de base. Su objetivo principal es proteger la estructura inferior de pavimento, impermeabilizar la superficie evitando la filtración de agua que dañe las capas inferiores, al igual que evita que el tránsito de vehículos desgaste o desintegre las capas subyacentes. Esta superficie de rodadura también absorbe carga, por lo que también contribuye a aumentar la capacidad soportante del pavimento, siempre y cuando sea una capa con espesor mayor de 4 cm.

El material empleado para la construcción de esta capa es el asfalto, material natural, que al mezclar con arena o gravilla se utiliza para pavimentar la capa de rodadura. Plati (2019) comenta que el asfalto, también llamado bitumen proviene del refinamiento del petróleo, lo que lo convierte en un material poco amigable con el ambiente, debido a que el petróleo es una fuente de energía no renovable, por lo que económicamente el asfalto se ha encarecido producto del alza en los costos del petróleo. Por lo que en la actualidad se están realizando estudios de materiales que puedan utilizarse para reducir o sustituir el uso de asfalto en capas de rodadura del pavimento flexible.

2.1.1.2. Pavimento de Concreto Hidráulico

Rico (1992) define al pavimento rígido al pavimento que tiene como elemento estructural fundamental una losa de concreto colocada sobre una capa de material seleccionado, a la que se da el nombre de subbase del pavimento rígido; cuando la subrasante del pavimento cuente con calidad suficientemente buena, la losa de concreto podrá ser colocada directamente sobre la subrasante, eliminando la capa de subbase de la estructura, esto debido a la alta rigidez del concreto hidráulico así como de su elevado coeficiente de elasticidad, la distribución de los esfuerzos se produce en una zona muy amplia a comparación del pavimento flexible. Por otra parte, Montejo (2008) comenta que el concreto es capaz de resistir, en cierto grado, esfuerzos a la tensión, el comportamiento de un pavimento rígido es suficientemente satisfactorio aun cuando existan zonas débiles en la subrasante. Por lo que se puede concluir que la capacidad estructural de un pavimento rígido depende principalmente de la resistencia de las losas, por lo tanto, las capas inferiores no generan mucha influencia al momento de realizar los espesores de la estructura del pavimento. La estructuración típica del pavimento rígido se muestra en la Figura 2-3.

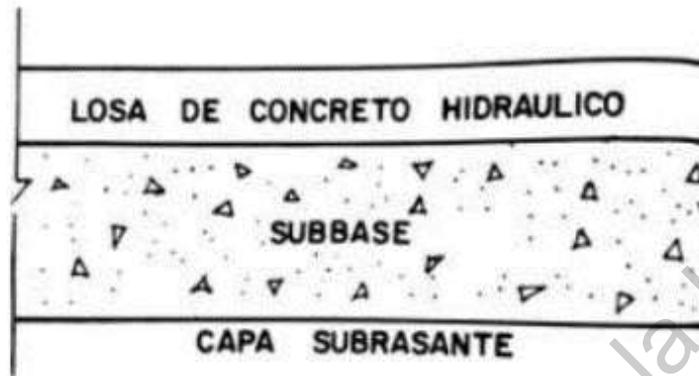


Figura 2-3. Estructura del Pavimento Rígido.

Fuente: Olivera (2009)

2.1.1.2.1. Subrasante

Al igual que el pavimento flexible esta es la capa inicial o de terreno natural que soportará toda la estructura del pavimento, se puede decir que será la capa de cimentación de la estructura, esta capa puede estar formada en terraplén de relleno o corte. La calidad del material natural es muy importante ya que de este dependerá el espesor de la estructura del diseño, en caso de requerir una mejor calidad de material, se podrá hacer cualquier tipo de mejora mediante estabilización o sustitución parcial del mismo.

2.1.1.2.2. Subbase

La función más importante es impedir la fluencia de material fino con agua fuera de la estructura del pavimento, esto debido a la infiltración de agua por las juntas de las losas. El agua que penetra a través de las juntas licua el suelo fino de la subrasante facilitando así su evacuación a la superficie bajo la presión ejercida por las cargas circulantes a través de las losas. Esta capa también ayuda a controlar los cambios volumétricos de la subrasante y disminuir al mínimo la acción superficial de tales cambios volumétricos sobre el pavimento, además de mejorar la capacidad de soporte del suelo de la subrasante.

2.1.1.2.3. Capa de Rodadura

Esta capa puede ser colocada sobre la subbase o directamente sobre la subrasante, la capa de rodadura en el pavimento rígido es una losa de concreto cuyas funciones son iguales a las del pavimento flexible, más la función de soportar y transmitir en niveles adecuados los esfuerzos que se le apliquen. Rico (1989) comenta que los concretos que se utilizan en la losa suelen ser de resistencia relativamente alta, comprendida entre 200 y 400 kg/cm². Los tipos de losas para pavimentos rígidos se presentan en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Tipos de losas para pavimentos rígidos

Tipo de losas	Características
Concreto hidráulico simple	No contiene armadura en la losa y el espaciamiento entre juntas es pequeño (entre 2.50 a 4.50 metros). Las juntas pueden o no tener dispositivos de transferencia de carga (dovelas).
Concreto hidráulico reforzado	Tienen espaciamientos mayores entre juntas (entre 6.10 y 36.60 metros) y llevan armadura distribuida en la losa a efecto de controlar y mantener cerradas las fisuras de contracción.
Concreto hidráulico reforzado continuo	Tiene armadura continua longitudinal y no tiene juntas transversales, excepto juntas de construcción. La armadura transversal es opcional en este caso. Estos pavimentos tienen más armadura que las juntas armadas y el objetivo de esta armadura es mantener un espaciamiento adecuado entre fisuras y que éstas permanezcan cerradas.

Es importante mencionar que, al momento del diseño de los espesores de la losa, estos se ven afectados principalmente por el nivel de carga que han de soportar, las presiones de inflado de las llantas de los vehículos, el módulo de reacción del suelo de apoyo y las propiedades mecánicas del concreto que en ellas se utilice.

2.2. Concreto Hidráulico y sus componentes

Kosmatka *et al.* (2004) nos definen el concreto (hormigón) como una mezcla de componentes (Figura 2-4): Pasta, la cual está compuesta comúnmente de cemento portland y agua, aunque otros materiales cementantes y adiciones minerales pueden ser incluidas; esta pasta une los agregados, normalmente arena y grava, creando una masa similar a una roca. Este proceso ocurre debido al endurecimiento producido por una reacción química llamada hidratación del cemento portland al momento de tener contacto con el agua.

Bolden *et al.* (2013) y Najimi *et al.* (2012) comentan que el concreto es el material más utilizado en la industria de la construcción debido a su bajo costo de producción, propiedades mecánicas, durabilidad y facilidad de adaptar diferentes formas y tamaños; durante la fabricación de este se emplea una gran cantidad de recursos naturales como ser cemento, agregados pétreos y agua, además de una gran emisión de CO₂, generando un impacto negativo al medio ambiente, por lo que la implementación de desechos sólidos en la mezcla es de gran beneficio para la protección ambiental.



Figura 2-4. Componentes del Concreto Hidráulico.

Fuente: Kosmatka et al. (2004)

2.2.1. Cementantes

2.2.1.1. Cemento Tipo Portland

A lo largo de los años la industria de la construcción ha experimentado con diferentes materiales, siendo el más antiguo el uso del concreto. Al momento de hablar del concreto se nos viene a la mente una mezcla o combinación de diferentes materiales que son extraídos de ambientes naturales; entre los cuales podemos mencionar los cementantes, o puntualmente el cemento tipo portland. Plati (2019) nos comenta que el cemento portland convencional constituye parte fundamental de los materiales estructurales, el cual es utilizado en una amplia variedad de infraestructura como ingrediente básico.

Podemos definir el cemento como un conglomerante hidráulico, es decir, un material inorgánico finamente molido que, al tener contacto con agua, forma una pasta cementante que fragua y endurece por medio de una reacción química llamada hidratación, este endurecimiento se debe principalmente a la hidratación de silicatos de calcio. Este proceso de endurecimiento aporta características importantes a las propiedades mecánicas de la mezcla, estas propiedades pueden ser la resistencia, durabilidad y resistencia a la fatiga.

2.2.1.1.1. Producción del Cemento Portland

Damtoft *et al.* (2008) comentan que la producción de cemento tipo portland, considerado como el cementante de mayor uso para el concreto hidráulico emite alrededor del 8% de carbono en el mundo y usa alrededor del 3% de la energía mundial, esto debido a que el cemento portland es un material que surge luego de un proceso de combinación de diferentes minerales obtenidos de canteras.

En la literatura encontramos la composición del cemento portland, por ejemplo, Kosmatka *et al.* (2004) nos comentan que el cemento portland se produce luego de realizar la pulverización del Clinker; el cual consiste principalmente en silicatos de calcio hidráulicos. Otros minerales contenidos en el Clinker son algunos aluminatos de calcio y ferro aluminatos de calcio y una o más formas de sulfato de calcio o yeso que son molidos en conjunto para la fabricación final del cemento portland. Las fuentes de las materias primas usadas en la fabricación del cemento se muestran en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Fuentes de las materias primas usadas en la fabricación del Cemento Portland.

<u>Cal, CaO</u>	<u>Hierro Fe₂O₃</u>	<u>Sílice Si O₂</u>	<u>Alúmina Al₂ O₃</u>	<u>Yeso o Sulfato, CaSO₄.2H₂O</u>
Desechos industriales	Polvo de humo de horno de fundición	Silicato de calcio	Mineral de aluminio*	Anhidrita
Aragonita*	Arcilla*	Roca calcárea	Bauxita	Sulfato de calcio
Calcita*	Mineral de hierro*	Arcilla*	Roca calcárea	Yeso*
Polvo del horno de cemento	Costras de laminado*	Ceniza volante	Arcilla*	
Roca calcárea	Lavaduras de mineral	Greda	Escoria de cobre	
Creta	Cenizas de piritas	Caliza	Ceniza volante*	
Arcilla	Esquisto	Loes	Greda	
Greda		Marga*	Granodiorita	
Caliza*		Lavaduras de mineral	Caliza	
Mármol		Cuarcita	Loes	
Marga*		Ceniza de arroz	Lavaduras de mineral	
Coquilla		Arena*	Esquisto*	
Esquisto*		Arenisca	Escoria	
Escoria		Esquisto*	Estaurolita	
		Basalto		

Nota: Muchos subproductos industriales tienen potencial como materia prima para la producción del cemento portland.

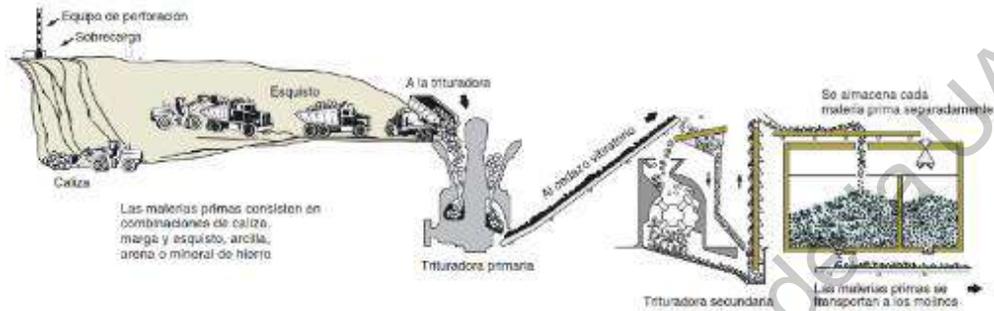
* Las fuentes más comunes

Fuente: Kosmatka *et al.* (2004)

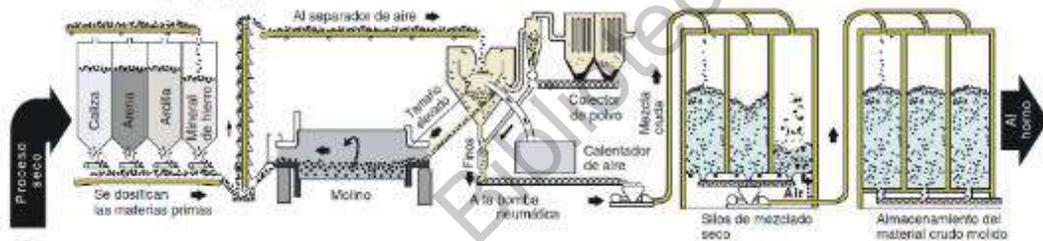
Durante el proceso de fabricación del cemento es muy importante realizar análisis químicos con frecuencia a todos los materiales utilizados, ya que estos deben contener cantidades apropiadas de los compuestos de calcio (CaO), sílice (SiO₂), alúmina (Al₂O₃) y hierro (Fe₂O₃). El proceso de fabricación del cemento portland se muestra en las Tablas 2.3.

Tabla 2.3 Proceso de fabricación del cemento portland.

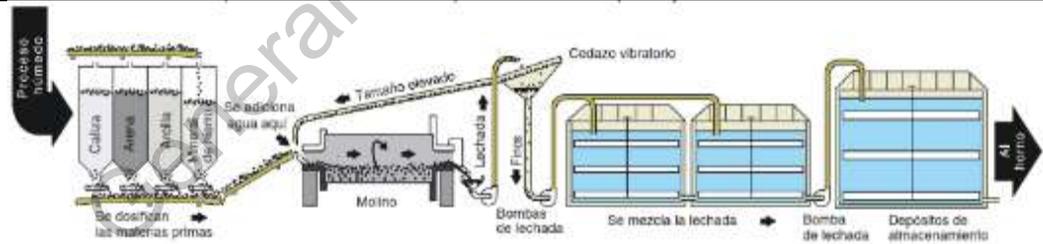
1. La roca se reduce primero hasta un tamaño de 125 mm (5 pulg.) y después a un tamaño de 20 mm (3/4 pulg.) para entonces ser almacenada.



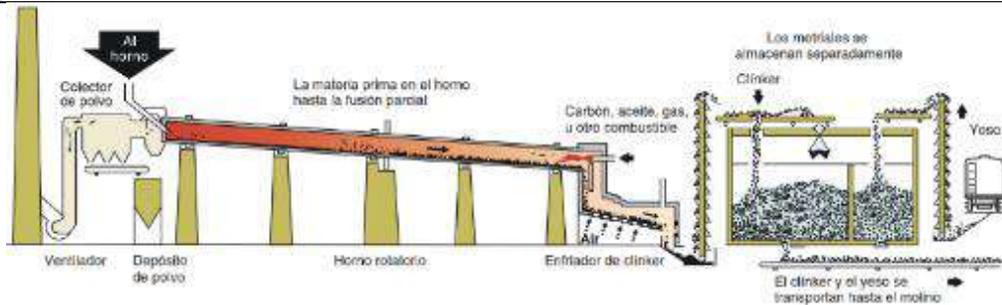
2. Las materias primas se muelen hasta que se vuelven en polvo y se las mezcla. (Proceso Seco)



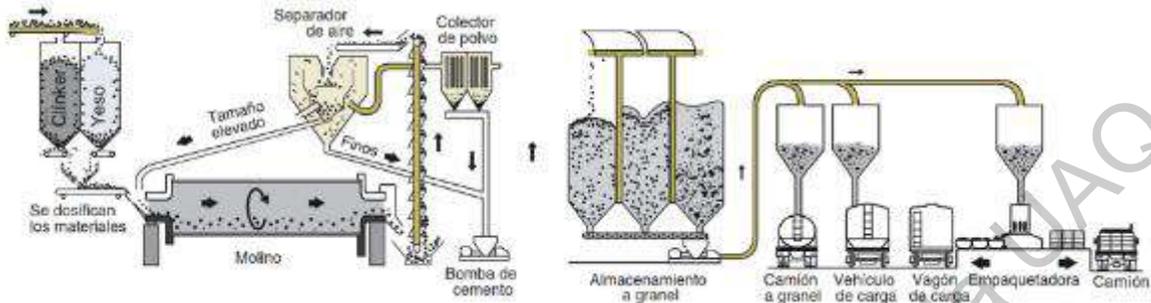
3. Las materias primas se muelen, se mezclan con el agua para formar una lechada y se mezclan. (Proceso Humedo)



4. La calcinación transforma químicamente las materias primas en el clinker de cemento.



5. Se muele el clinker junto con el yeso para convertirlos en cemento Portland.



2.2.1.1.2. Tipos de Cemento Portland en México

Debido a que el Cemento Portland es el material cementante más utilizado a nivel mundial en múltiples tipos de estructuras de concreto, es muy importante fabricar diferentes tipos de cementos para satisfacer los diferentes requisitos físicos y químicos para aplicaciones específicas en estas múltiples estructuras. Estos cementos se producen de acuerdo con especificaciones internacionales como ser la ASTM C150 (2019), AASHTO M85 (2015) o ASTM C 1157 (2017). En el caso de México, los diferentes tipos de cementos se encuentran especificados y divididos en la Norma Mexicana (NMX-C-414-ONNCCE-2014), la clasificación se hace con base a sus componentes y siguiendo las especificaciones internacionales, estas clasificaciones se muestran en las Tablas 2.4, 2.5, 2.6.

Tabla 2.4 Tipos de Cemento

Tipo	Denominación
CPO	Cemento Portland Ordinario
CPP	Cemento Portland Puzolánico
CPEG	Cemento Portland con Escoria Granulada de Alto Horno
CPC	Cemento Portland Compuesto
CPS	Cemento Portland con Humo de Sílice
CEG	Cemento con Escoria Granulada de Alto Horno

Fuente: NMX-C-414-ONNCCE-2014

Tabla 2.5 Tipos de Resistencia

Clase Resistente
20
30
30 R
40
40 R

Fuente: NMX-C-414-ONNCCE-2014

Tabla 2.6 Características

Características Especiales
RS – Resistente a los sulfatos
BRA – Baja Reactividad Alkali Agregado
BCH – Bajo Calor de Hidratación
B – Blanco

Fuente: NMX-C-414-ONNCCE-2014

2.2.1.2. Puzolanas

Ahmadi y Shekarchi (2010) comentan que el termino puzolana estaba asociado originalmente con cenizas volcánicas naturales, pero en los últimos años se ha comenzado a considerar como puzolana a todos los materiales silicatos y aluminosilicatos que eventualmente con la presencia de agua; pueden presentar una reacción química al hidróxido de calcio Ca(OH)_2 formando un compuesto con propiedades cementantes, logrando que esta acción resulte en el desarrollo de una mejor resistencia a la compresión, reducción en el calor de hidratación y reducción de poros en la mezcla causados por los agregados; es importante conocer los dos tipos de puzolanas que existen, las naturales y artificiales, entre las naturales podemos encontrar las pumitas, diatomita, ceniza volcánica, zeolita, entre otros y en las artificiales encontramos las perlitas, arcilla, cenizas volantes, esquisto expandido, entre otros (Miled et al. 2007).

2.2.1.2.1. Puzolanas Artificiales

Las puzolanas artificiales las cuales provienen del resultado de diversos procesos industriales y agrícolas, generalmente como subproductos, en la actualidad la incorporación de las puzolanas al concreto se encuentra normado por parte de la American Society for Testing and Materials (ASTM) en su designación ASTM C618, por lo que es importante garantizar el proceso de incorporación y calidad del material a emplear en el diseño de mezcla basado en las especificaciones establecidas en dicha norma.

2.2.1.2.2. Puzolanas Naturales

Las puzolanas naturales se han utilizado desde hace siglos, el termino puzolana según Kosmatka *et al.* (2004) viene de una ceniza volcánica extraída en Pozzuoli, un pueblo de Nápoles, Italia. Por otra parte la American Society for Testing and

Materials(ASTM) presenta la siguiente definición sobre las puzolanas naturales, las cuales son materiales silicios o silico-aluminosos que por sí solos poseen poco o nulo valor cementante, pero finamente divididos, en presencia de humedad, reaccionan químicamente con la portlandita a temperatura ordinaria formando compuestos con propiedades cementante, por otra parte Deboucha *et al* (2017) , Ghrici *et al* (2006), Babu y Babu (2003) y Demirboga y Gül (2003), concuerdan en sus investigaciones que las puzolanas naturales además de brindar mejoras en las propiedades cementantes las puzolanas naturales también mejora la impermeabilidad y resistencia química de las mezclas, además de reducir la evolución térmica y aumentar la resistencia a la compresión.

2.2.1.3. Agregados Pétreos

León y Ramírez (2010) nos mencionan que los agregados pétreos son los componentes fundamentales del concreto hidráulico, del concreto asfáltico y de las bases granulares; esto debido a que sus características afectan no solo las propiedades del concreto en estado fresco y endurecido, sino también el costo de este. Por su parte, Gutiérrez (2003) afirma que los agregados constituyen un factor determinante en la economía, durabilidad y estabilidad en las obras civiles, esto ya que pueden ocupar un volumen muy importante. Es por esto por lo que la importancia del uso del tipo y de la calidad correcta del agregado no se puede subestimar. Por ejemplo, el volumen que toman los agregados en una mezcla de concreto hidráulico es de un 65% a 85%, en el concreto asfáltico es del 92% al 96%, en los pavimentos del 75% al 90%.

Los agregados pétreos para el concreto hidráulico, se denominan: fino, para la arena y grueso, para la grava. Estos agregados se pueden obtener mediante explotación de canteras, yacimientos naturales y lechos de ríos, para luego ser triturados, refinados y clasificados por tamaños. Quiroga y Fowler (2003), nos comenta la importancia de la clasificación por características de los agregados en cuanto a su forma, textura y gradación debido a que estas influyen en la trabajabilidad, en el acabado, en la

exudación y en la segregación del concreto fresco y afectan la resistencia, la rigidez, la retracción, la densidad, la permeabilidad y durabilidad del concreto en estado sólido.

Actualmente, a nivel mundial, la explotación de los materiales pétreos es regulada por entes gubernamentales de protección al medio ambiente. Esto mediante la expedición de licencias de explotación, en el caso de Querétaro, existe un reglamento de ley de protección ambiental para el desarrollo sustentable en materia de explotación de bancos de materiales, la aplicación de este reglamento compete a la Secretaría de Desarrollo Sustentable (*SEDESU*) y la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (*SEMARNAT*). En el mundo actualmente hay empresas que realizan la explotación de bancos de materiales sin los permisos necesarios, por lo que la existencia de normas, reglamentos o leyes no garantizan la protección ambiental al 100%.

2.2.1.1. Agregados Finos

Los agregados finos (Figura 2-5) generalmente consisten en arena natural o piedra triturada con partículas de tamaño que oscilan entre 4.76 mm y 0.074 mm (74 micras), estos tamaños se obtienen luego de realizar un proceso de cribado o tamizado, separando todo el material que pasa el tamiz No. 4 y retenido en la malla No.200, aunque pueden contener finos de menor tamaño, el fin principal del agregado fino o arena es llenar los espacios en la mezcla, básicamente funciona como un llenante de la mezcla, además de facilitar el movimiento de los agregados pétreos dándole manejabilidad a la mezcla del concreto.



Figura 2-5. Agregado Fino (Arena).

Fuente: Kosmatka *et al.* (2004)

La dosificación del agregado fino es muy importante al momento del diseño de la mezcla, Gutiérrez (2003) nos comenta que una falta de arena se refleja en la aspereza de la mezcla y que un exceso de agregado fino nos resultará en una demanda mayor de agua y cemento para poder conservar una determinada relación agua/cemento que nos garantice una manejabilidad o revenimiento adecuado, ya que entre mayor cantidad de arena en la mezcla mayor cohesión existirá. Para poder obtener una buena mezcla de concreto hidráulico, Gutiérrez (2003) nos presenta una serie de características de un buen agregado fino para concreto; las cuales se muestran en la Tabla 2.7.

Tabla 2.7 Características de un buen agregado fino para concreto.

Características del Agregado Fino

1. El agregado fino debe ser bien graduado para que pueda llenar todos los espacios y producir mezclas más compactas.
 2. Según especificaciones se permite un porcentaje de pase tamiz No.50 entre el 10 y 30%; recomendando el límite inferior cuando la colocación del concreto es fácil o cuando los acabados se hacen mecánicamente, como en los pavimentos.
 3. El módulo de finura del agregado fino utilizado en la elaboración de mezclas de concreto deberá estar entre 2.3 y 3.1 para evitar segregación del agregado grueso cuando la arena es muy fina; cuando la arena es muy gruesa se tienen mezclas ásperas.
 4. La presencia de materia orgánica en la arena que va a utilizar en la mezcla de concreto puede llegar a interrumpir parcial o totalmente el proceso de fraguado del cemento.
-

2.2.1.2. Agregados Gruesos

Los agregados gruesos, materia prima del concreto hidráulico, consisten en la combinación de gravas o piedras trituradas con partículas de tamaño que oscilan entre 7.6 cm y 4.6 cm, estos agregados normalmente se excavan o dragan de una mina, de un río o lago; para luego proceder a la trituración de la piedra la cual puede ser roca de cantera, roca canto rodado, guijarros o gravas grandes. Kosmatka *et al.* (2004) nos comenta que cerca de la mitad de los agregados gruesos en el concreto hidráulico en Norteamérica es grava, la mayoría del resto es piedra triturada, esto debido a las resistencias necesarias de diseño.

El agregado grueso al igual que el agregado fino cuenta con una serie de características y propiedades que deben ser consideradas al momento de la selección del material a utilizar en el diseño de mezcla, en el caso del agregado grueso entre las propiedades más importantes encontramos la textura y forma, características que se derivan indirectamente de la roca madre y es responsable de la adherencia del agregado y de la fluidez de las mezclas, el agregado grueso podemos dividirlo según su textura superficial en liso o pulido para los materiales de río y áspero para los materiales triturados tal como se observa en la Figura 2-6 y según su forma, estos se pueden dividir en redondeada, cúbica, alargada o aplanada. Para el caso de la caracterización con base a su textura Mehta y Monteiro (1993) comentan que la textura de los agregados afecta la forma de la curva esfuerzo-deformación del concreto ya que la morfología de los agregados causa la generación de micro fisuras en la zona de transición, por otra parte, Shilstone (1999) asegura que los concretos producidos con agregados de forma redondeada y cúbica tienden a producir mayores resistencias que agregados alargados y aplanados.

Otra propiedad muy importante es la porosidad y absorción, las cuales están directamente relacionadas a la adherencia y resistencia a la compresión y flexión de las partículas la porosidad está asociada a la capacidad de absorción de agua u otros

líquidos que tienen los agregados, esta capacidad de absorción depende del número y tamaño de los poros y la continuidad de estos.



Figura 2-6. Agregados Gruesos (Piedra de río y triturada)
Fuente: Kosmatka *et al.* (2004)

2.3. Uso de Poliestireno Expandido y Puzolanas en Mezclas de Concreto

El medio ambiente se ha visto afectado por los desechos sólidos que se generan diariamente; esto ha generado el interés de los investigadores en estudiar las posibilidades y beneficios de crear materiales amigables con el medio ambiente, mediante la incorporación de desechos en materiales para la construcción, como el concreto, y así buscar reducir la contaminación. Kaya y Kar (2015) afirman que el uso del agregado de poliestireno expandido puede ser un material potencial para construcción y simultáneamente solventar un problema ambiental mediante el reciclado de desechos sólidos.

Ferrándiz-Mas y García-Alcocel (2012) mencionan que el poliestireno expandido EPS representa el 0.1% del total de los residuos sólidos urbanos, por lo que más de 30 países han suscrito un acuerdo internacional sobre el reciclado comprometiéndose a promover el uso del EPS reciclado en la más amplia gama de aplicaciones posibles.

Se han realizado experimentos en concretos que contienen cenizas y gránulos de poliestireno expandido (*Expanded Polystyrene* “EPS”) como sustituto de agregados, en dosificaciones que rondan entre el 20% y 100% del volumen. Los experimentos resaltaron que las características del concreto se vieron influenciados por los gránulos de poliestireno EPS, mejorando la trabajabilidad del concreto fresco y reduciendo la

densidad (Cadere *et al.*, 2017). Por ejemplo, Hernández *et al.* (2013) comentan que se obtuvieron densidades entre 1500 a 2000 kg/m³, con resistencias variables entre 10 a 21 Mpa al momento de utilizar gránulos de poliestireno expandido EPS y combinación de ceniza de sílice y cemento como cementantes; esta combinación de cementantes demostró que mejora el enlazamiento entre los gránulos de poliestireno expandido EPS y la pasta cementante, además de un incremento en la resistencia a compresión del concreto adicionado con gránulos de poliestireno expandido EPS. Por otra parte, Ferrándiz-Mas y García-Alcocel (2012) concluyeron que existe una correlación negativa entre el aumento en la dosificación del poliestireno expandido EPS y la consistencia.

Chung *et al.* (2017) argumentan que el efecto sobre las propiedades del concreto depende del tamaño de los gránulos de poliestireno expandido EPS, ya que agregar partículas de menor tamaño, puede contribuir a mejorar la resistencia a la compresión, mientras la conductividad térmica disminuye. Liu y Chen (2014) afirman que la relación entre la resistencia a la compresión y la fracción de volumen de concreto con poliestireno expandido EPS siguen una caída exponencial, la cual está relacionada con los tamaños de las partículas y su composición.

Actualmente se han realizado diferentes investigaciones considerando el EPS en mezclas de concreto hidráulico para estructuras obteniendo buenos resultados, por ejemplo, Nikbin y Goldshekan (2017) estudiaron las propiedades mecánicas y de fractura del concreto adicionado con EPS en porcentajes de volumen del 0%, 10%, 20%, 30%, 40% y las relaciones agua/cemento 0.4 y 0.5, obteniendo como resultado que a mayor porcentaje de EPS agregado menor resistencia a compresión obtenida. Por otra parte Chung *et al.* (2017) realizaron el estudio del impacto que tiene el tamaño de los gránulos de EPS sobre las propiedades mecánicas del concreto, por lo que consideró esferas de EPS de tamaños de 1", 0.4667", 0.2583", y 0.1667", concluyendo que a mayor tamaño de esfera de EPS adicionada, se obtendrán menores resistencias, por lo que es importante tomar en cuenta los parámetros de dosificación

y tamaños de los gránulos para lograr obtener resultados que nos garanticen una mezcla de concreto hidráulico óptima para pavimento rígido.

La inclusión de EPS reciclado en el concreto de pavimentos es una alternativa interesante que provee una idea innovadora de uso de los residuos de EPS una vez haya sido utilizado, esta alternativa permite reducir la cantidad de desechos sólidos acumulados y a la vez nos ayuda a disminuir el volumen de materia prima a utilizar en nuevas carreteras por lo que es de beneficio para contrarrestar el impacto ambiental provocado por la explotación de bancos de material.

Dirección General de Bibliotecas de la UAO

3. Metodología

En la Figura 3-1 se presentan los procedimientos a llevarse a cabo para analizar el comportamiento de la adición de EPS y puzolana en la mezcla de concreto hidráulico convencional:

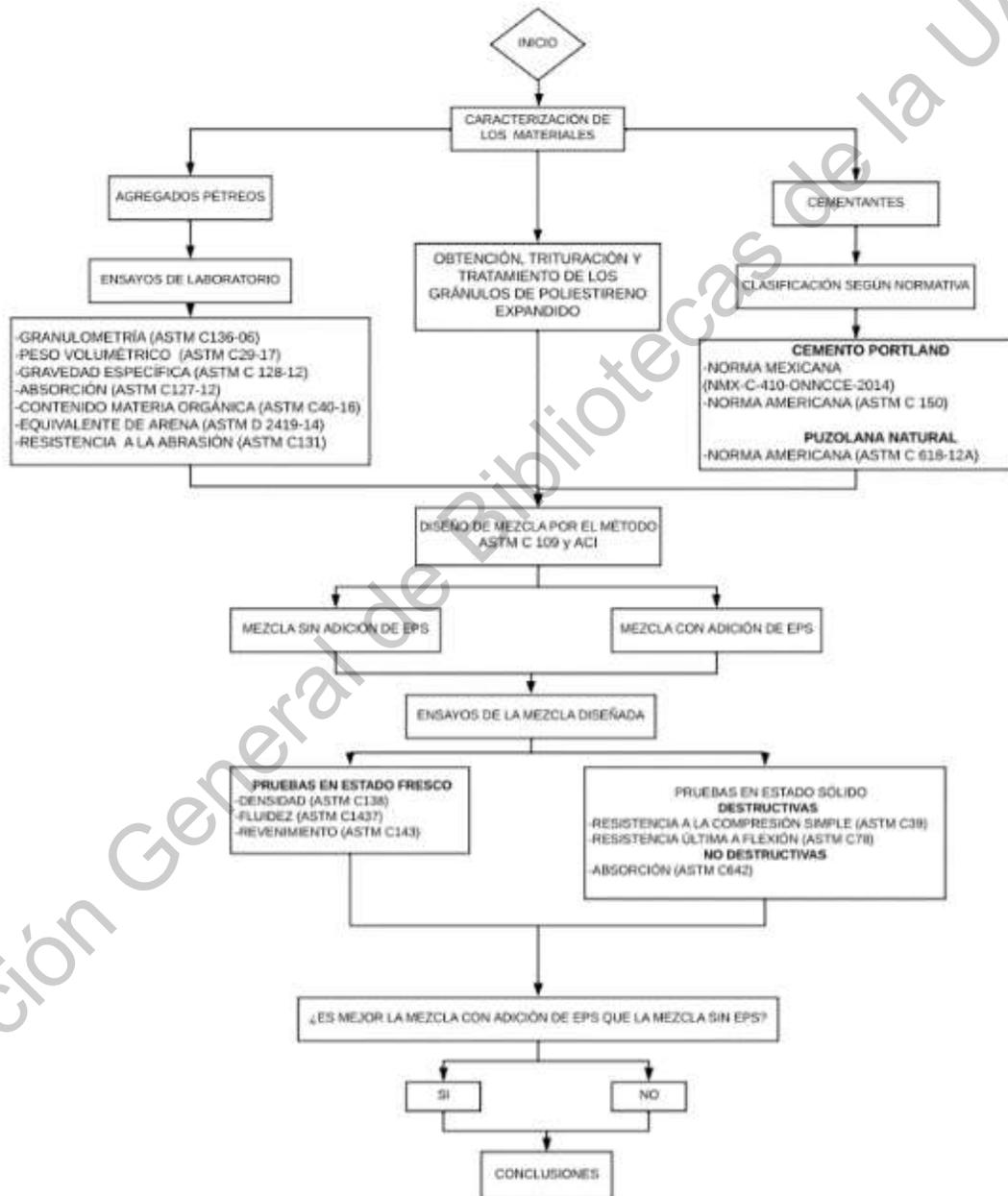


Figura 3-1. Diagrama de Procedimientos
Fuente: Propia

3.1. Caracterización de los Materiales.

En esta etapa del proceso se conocerán las características y calidad de los materiales con los que se cuentan para el diseño de la mezcla de concreto hidráulico, esta etapa es muy importante ya que marcará el inicio del proceso de diseño y pruebas para lograr comprobar la hipótesis de esta investigación, por lo que se llevará a cabo en las siguientes etapas:

3.1.1. Caracterización de los agregados pétreos.

Durante esta etapa se deberán obtener los agregados de un banco de materiales en la zona de Querétaro que se encuentre dentro del inventario de banco de materiales de la SCT para luego proceder a obtener las características y propiedades de los agregados mediante granulometría, abrasión, peso específico y porcentaje de absorción, aplicando las respectivas normas ASTM que se muestran en la Tabla 3.1 para garantizar la calidad de estos.

Tabla 3.1 Normas ASTM Agregados Pétreos

Ensayo	Norma Reguladora
Granulometría de agregados finos y gruesos	Norma Americana ASTM C 136 (2014)
Peso Volumétrico del agregado Fino y Grueso	Norma Americana ASTM C 29 (2017)
Gravedad específica y absorción para agregado fino	Norma Americana ASTM C 128 (2015)
Gravedad específica y absorción para agregado grueso	Norma Americana ASTM C 127 (2015)
Contenido de materia orgánica del agregado fino	Norma Americana ASTM C 40 (2016)
Equivalente de Arena	Norma Americana ASTM D 2419 (2014)
Resistencia a la abrasión del árido grueso	Norma Americana ASTM C 131 (2014)

Fuente: Elaboración propia en base a Normativa ASTM

3.1.2. Granulometría de Agregado Fino

Procedimiento

1. Se realizó la preparación de la muestra, para el caso de los agregados se procedió a realizar el secado a temperatura constante con ayuda de la estufa, ya que no se realizará análisis de materia orgánica que pudiera ser calcinada y afecte el proceso de caracterización.
2. Se realizó el cuarteo con base a la práctica ASTM C702 (2018) para obtener una mezcla partículas adecuada de la muestra como se muestra en la Figura 3-2.



Figura 3-2 Proceso de cuarteo de la muestra de agregado fino

3. Se procedió a obtener el tamaño o peso de la muestra de ensayo con ayuda de una báscula digital, para el caso del árido fino, después del secado, deberá ser de 300g, como mínimo.
4. Se procedió a realizar el proceso de tamizado con base a la Norma Americana ASTM 136 (2014), utilizando el orden de tamices que se presenta en la normativa (Figura 3-3).



Figura 3-3. Tamices para ensayo de granulometría de agregado fino.

3.1.3. Pesos Volumétricos del Agregado Fino

A. Peso Volumétrico Suelto

Procedimiento

1. Se cuarteó al material.
2. En forma representativa se tomó material con el cucharon y con la brocha se recogieron y depositaron los finos en un recipiente con una altura de caída de 0.0cm, se llenó hasta el nivel de derrame. El depósito del material se realizó con ayuda de la mano impidiendo que el material saliera del cucharon con la finalidad de minimizar la altura de caída.
3. Se enrasó la arena con la mano compensando los huecos con las salientes tal como se muestra en la Figura 3-4.



Figura 3-4. Enrasamiento de la arena

4. Se pesó el recipiente con el material.
5. Se realizó tres veces el procedimiento con el objeto de obtener al menos tres datos. Se repetirá la prueba si la diferencia excede de 10.0 kg/m³ entre el valor menor y el mayor.

B. Peso Volumétrico Compactado

1. Se cuarteó el material.
2. Se tomó el material con el cucharón en forma representativa y se depositó en el recipiente disminuyendo el material de forma uniforme, el llenado inicial fue hasta 1/3 del volumen del recipiente.
3. Se aplicaron 25 golpes (piquetes) con la varilla punta de bala distribuida en toda el área. la velocidad de aplicación de los piquetes deberá ser moderada (ni muy rápidos, ni muy lentos).
4. Se llenó a 2/3 partes del volumen del recipiente, se aplicaron 25 golpes (piquetes) con la varilla punta de bala distribuidos en toda el área. sin penetrar en su totalidad la primera capa (± 1 cm) como se muestra en la Figura 3-5.



Figura 3-5. Proceso de apisonamiento de la arena

5. Se llenó hasta el nivel de derrame y se varilló como se indica en los incisos anteriores
6. Se enrasó la grava con la yema de los dedos sin hacer presión compensando los huecos llenándolos de grava.
7. Se pesó el molde con el material.

8. Se realizó tres veces el procedimiento con el objeto de obtener al menos tres datos. se repetirá la prueba si la diferencia excede de 10.0 kg/m³ el peso volumétrico obtenido en la arena.

3.1.4. Densidad y Absorción de la Arena

Procedimiento

1. Primero se calibró el matraz a utilizar mediante el llenado con agua hasta el nivel de aforo, y después se pasó a determinar su temperatura y peso (Figura 3-6).



Figura 3-6. Proceso de apisonamiento de la arena

2. Se homogeneizó la muestra formando un cono, se truncó el cono y se llevó a cabo el procedimiento de cuarteo.
3. Se obtuvo una muestra representativa de más o menos 2 kg de material que pasó por la malla No. 4 (4.75 mm), después de haber cuarteado la muestra.
4. Se colocó el material en la charola rectangular y se saturó con agua a temperatura ambiente durante 24 hrs.
5. Después de cumplirse el tiempo de saturación, se colocó la charola sobre la parrilla empezando a evaporar el agua por medio de la ebullición hasta lograr que no se observe agua libre, pero si humedad aparente. Fue necesario remover constantemente el material de la charola con espátula con el fin de evitar la calcinación de las partículas finas.
6. Después de que ya no se observó agua libre, se retiró la charola de la parrilla y con la espátula se siguió evaporando agua tratando de buscar condición de saturación y superficialmente seco.

7. Se colocó arena húmeda dentro del modelo troncocónico para verificar la existencia de humedad libre, compactando 25 veces con el pisón sin hacer presión, es decir la compactación se realizó por peso propio del pisón y en una sola capa levantando el molde en forma vertical y la forma del tronco-cono será retenida por la arena, en caso de que este sobre saturada.
8. Se colocó nuevamente la charola sobre la parrilla a fuego lento y se siguió aplicando aire para evaporar agua de tal manera que después de varios intentos la arena no retuviera la forma del tronco-cono y se formará un cono tal como se observa en la Figura 3-7, debido a que la muestra estará en la condición de saturada y superficialmente seco (S.S.S.).



Figura 3-7. Tronco-cono de arena en condición S.S.S.

9. Se tomaron 200 gr de arena en condición (S.S.S.) y en una charola redonda se procedió a secar el material, por el método de fuego directo, hasta obtener el peso constante (peso seco).
10. Simultáneamente se colocaron 200 gr de arena en el matraz aforado de 500c.c. Vaciando la arena con un embudo. En el matraz el contenido de agua fue la mitad de su volumen.
11. Se colocó al matraz en la bomba de vacío para extraerle el aire y después aforarlo hasta el nivel de aforo, luego se procedió a pesar el matraz con el material y el agua.
12. Se verificó nuevamente la temperatura antes de pesar y se revisó que el matraz no estuviera húmedo por fuera y parte superior del nivel de aforo, por dentro.

3.1.5. Contenido de Materia Orgánica de Agregado Fino

Procedimiento

1. Preparación del color patrón en el orden siguiente
2. Se pesó exacto y rápido el NaOH y agregarlo al agua (H₂O).
3. El NaOH (Figura 3-8) se diluyó por medio de movimientos rotatorios producidos manualmente con el mismo recipiente que lo contiene, se recomienda no utilizar ningún instrumento, ya que podría alterar el resultado.



Figura 3-8. Materiales para preparación del color patrón.

4. Se colocó en el biberón 4 onzas de arena que pasó por la malla No. 4 y se agregó solución al 3% de NaOH hasta 7.5 onzas. Agitar vigorosamente y reponer la solución si es necesario.
5. Se dejó en reposo 24 hrs. al cabo de las cuales se observó el color de la solución arriba de la arena, el resultado se observa en la Figura 3-9.

Color patrón	Solución Prueba	Interpretación del color de la solución contra el color patrón	Referencia.
	Yellow	Color más claro. Poca o nula presencia de M.O.	M.O. < 3
	Brown	Color igual. Cantidades aceptables de M.O.	M.O. = 3
	Dark Brown	Color oscuro. Excesivas cantidades de M.O.	M.O. > 3



Figura 3-9. Interpretación del color de la solución contra el color patrón.

3.1.6. Equivalente de Arena

Procedimiento

Solución de reserva y de trabajo:

1. Preparación de la solución de reserva en el siguiente orden.
2. Se colocó 454.0 gr de CaCl en 1.89 lts de agua destilada. Al preparar esta solución se generó calor, se dejó enfriar, y se pasó a través de papel filtro del No. 12.
3. Se agregaron 47 gr de solución volumétrica al 40% de formaldehído R.A (solución comercial) + 2050 gr de glicerina + agua destilado hasta completar 3.78 lts. (1 galón) y se agitó para homogenizar.



Figura 3-10. Solución de reserva previamente preparada.

4. Una vez preparada la solución de reserva se procedió a preparar la solución de trabajo en el siguiente orden.
5. En una botella de 3.78 lts se colocó 85 c.c. \pm 5 c.c. de solución de reserva, se llenó la botella con agua destilada y se agitó para obtener una solución homogénea.

Solución de reserva y de trabajo:

6. Se obtuvo en forma representativa 80 c.c. de arena que pase la malla No. 4.
7. Se colocó en la probeta 4" la solución de trabajo (Figura 3-11).



Figura 3-11. Probeta 4" de solución de trabajo en probeta.

8. Se agregó la arena en la probeta utilizando un embudo para mayor facilidad, agitándola ligeramente y golpeando en la parte inferior para expulsar el aire y luego se dejó en reposo durante 10 minutos.
9. Después de este lapso, se tapó la probeta con un tapón de hule y se agitó 90 ciclos en 30 segundos con solo el movimiento de los brazos. Se debe tomar en cuenta que el ciclo es el movimiento de ida y vuelta de los brazos.
10. Se llenó hasta 15", lavando las paredes de la probeta e introduciendo el irrigador hasta el fondo para provocar la suspensión de los finos. Se dejó la muestra en reposo 20 minutos.
11. Finalmente se tomó las lecturas de los niveles de finos y arena, este último con la ayuda de un pisón.

3.1.7. Granulometría de Agregado Grueso

Procedimiento

1. Se realizó la preparación de la muestra, para el caso de los agregados se procedió a realizar el secado a temperatura constante con ayuda de la estufa ya que no se realizará análisis de materia orgánica que pudiera ser calcinada y afecte el proceso de caracterización.
2. Se realizó el cuarteo con base a la práctica ASTM C702 (2018) para obtener una mezcla partículas adecuada de la muestra como se muestra en la Figura 3-12.



Figura 3-12 Proceso de cuarteo de la muestra de agregados gruesos.

3. Se procedió a obtener el tamaño o peso de la muestra de ensayo con ayuda de una báscula digital, para el caso del agregado grueso con tamaño nominal de 1", el tamaño de la muestra de ensayo debe concordar con 10 kg, como mínimo.
4. Se procedió a realizar el proceso de tamizado con base a la Norma Americana ASTM 136 (2014), utilizando el orden de tamices que se presenta en la normativa (Figura 3-13).



Figura 3-13. Tamices para ensayo de granulometría de agregado grueso.

3.1.8. Pesos Volumétricos del Agregado Grueso

A. Peso Volumétrico Suelto

Procedimiento

1. Se cuarteó al material.
2. En forma representativa se tomó material con el cacharon y con la brocha se recogieron y se depositan los finos en un recipiente con una altura de caída de 0.0 cm (Figura 3-14), se llenó hasta el nivel de derrame, el depósito del material se realizó con ayuda de la mano impidiendo que el material saliera del cucharon minimizando la altura de caída.



Figura 3-14. Llenado de recipiente hasta nivel de derrame.

3. Se enrasó la grava con la mano compensando los huecos con las salientes.
4. Se pesó el recipiente con el material.
5. Se realizó tres veces el procedimiento con el objeto de obtener al menos tres datos. Se repetirá la prueba si la diferencia excede de 30.0 kg/m³ el peso volumétrico obtenido en la grava entre el valor menor y el mayor.

B. Peso Volumétrico Compactado

1. Se cuarteó el material.
2. Se tomó el material con le cucharon en forma representativa y se depositó en el recipiente disminuyendo el material de forma uniforme, el llenado inicial fue hasta $1/3$ del volumen del recipiente.
3. Se aplicaron 25 golpes (piquetes) con la varilla punta de bala distribuida en toda el área. la velocidad de aplicación de los piquetes deberá ser moderada (ni muy rápidos, ni muy lentos).
4. Se llenó a $2/3$ partes del volumen del recipiente, se aplicaron 25 golpes (piquetes) con la varilla punta de bala distribuidos en toda el área. sin penetrar en su totalidad la primera capa (± 1 cm) tal como se muestra en la Figura 3-15.



Figura 3-15. Proceso de apisonamiento de la grava.

5. Se llenó hasta el nivel de derrame y se varilló como se indicó en los incisos anteriores
6. Se enrasó la grava con la yema de los dedos sin hacer presión compensando los huecos llenándolos de grava.
7. Se pesó el molde con el material.
8. Se realizó tres veces el procedimiento con el objeto de obtener al menos tres datos. se repetirá la prueba si la diferencia excede de 30.0 kg/m^3 el peso volumétrico obtenido en la grava y 10.0 kg/m^3 el peso volumétrico obtenido en la grava y 10.0 kg/m^3 en la arena

3.1.9. Densidad, Densidad Relativa (Gravedad Especifica) y Absorción del Agregado Grueso

Procedimiento

1. Se comenzó secando la muestra de prueba hasta masa constante a una temperatura de $110\pm 5^{\circ}\text{C}$.
2. Se enfrió mediante un cuarto ventilado por un lapso de 1 a 3 horas a una temperatura confortable para manejar el agregado.
3. Seguidamente se sumergió el agregado en agua a temperatura ambiente por un lapso de 24 ± 4 h.
4. Se retiró la muestra de ensayo del agua y se procedió a remover con una tela absorbente la película visible de agua en todas las partículas como se observa en la Figura 3-16.



Figura 3-16. Remoción de humedad superficial de las partículas.

5. Se procedió a determinar la masa de la muestra en el aire en condición de saturada y superficialmente seco (S.S.S.).
6. Luego se procedió a colocar la muestra en una canastilla y determinar la masa aparente de la muestra en agua a $23\pm^{\circ}\text{C}$ en su estado saturado (Figura 3-17). Removiendo las partículas en el agua para que se escape todo el aire atrapado.



Figura 3-17. Remoción de humedad superficial de las partículas.

7. Se secó la muestra de ensayo hasta masa constante a una temperatura de $110 \pm 5^\circ\text{C}$, y luego se dejó enfriar a temperatura ambiente por 1 a 2 horas.
8. Finalmente se determinó la masa de la muestra seca con una precisión de 0.5gr.

3.1.10. Desgaste de Los Ángeles

Procedimiento

1. Se seleccionó de la tabla el tipo de muestra y los demás requisitos de la prueba, en función de la granulometría de proyecto, la granulometría que corresponda al material de acuerdo con el uso que se le pretenda dar, o bien a la de la muestra original. En cada caso se seleccionó también el número de esferas para formar la carga abrasiva, tomando en cuenta el tipo de la muestra de prueba seleccionado.
2. Se obtuvo una muestra representativa cuarteando el material para las cantidades que se expresan en la Tabla 3.2. Las cuales representan a la granulometría tipo “B” requerida para materiales con tamaño máximo de $\frac{3}{4}$ ” y retenido en la malla No 4. El material retenido en la malla de $\frac{3}{4}$ ” y que pasa por la malla de $\frac{3}{8}$ ”, se desecha.

Tabla 3.2 Granulometrías de las muestras representativas

TABLE 1 Gradings of Test Samples

Sieve Size (Square Openings)		Mass of Indicated Sizes, g			
Passing	Retained on	Grading			
		A	B	C	D
37.5 mm (1½ in.)	25.0 mm (1 in.)	1 250 ± 25	---	---	---
25.0 mm (1 in.)	19.0 mm (¾ in.)	1 250 ± 25	---	---	---
19.0 mm (¾ in.)	12.5 mm (½ in.)	1 250 ± 10	2 500 ± 10	---	---
12.5 mm (½ in.)	9.5 mm (⅜ in.)	1 250 ± 10	2 500 ± 10	---	---
9.5 mm (⅜ in.)	6.3 mm (¼ in.)	---	---	2 500 ± 10	---
6.3 mm (¼ in.)	4.75 mm (No. 4)	---	---	2 500 ± 10	---
4.75 mm (No. 4)	2.36 mm (No. 6)	---	---	---	5 000 ± 10
Total		5 000 ± 10	5 000 ± 10	5 000 ± 10	5 000 ± 10

Fuente: Normativa ASTM C 131 (2014)

3. A continuación, se colocaron en el cilindro de la máquina de los Ángeles la muestra con peso predeterminado y con la carga abrasiva correspondiente (Figura 3-18), se instala su cubierta y se cierra herméticamente.



Figura 3-18. Carga abrasiva para granulometría tipo B.

4. Se hizo funcionar la máquina para que girara a una velocidad uniforme (de 30 a 33rev/min) hasta completar 500 revoluciones para las de los tipos E, F y G.
Nota: El tiempo para las 500 revoluciones se calculó por regla de tres la relación fue de 1 minuto = No de revoluciones. x minutos = 500 revoluciones.
5. Se extrajo el material de la máquina y se cribó por la malla No 12, protegiéndola con malla No 4, al terminar se lavó energéticamente decantando el agua en la malla No12.
6. Después de este procedimiento se secó el material a fuego lento sobre una parrilla hasta peso constante.

3.1.11. Caracterización de los Cementantes.

Para el diseño de la mezcla de concreto se consideró el uso de Cemento Portland y puzolana natural como cementantes; estos materiales deben cumplir con ciertos requerimientos, características químicas y controles de calidad ya estipulados en normas. Las normas para clasificación de los cementantes que se utilizarán para la comprobación de calidad de los cementantes se muestran en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3 Norma Mexicana y ASTM para Cementantes

Tipo de cementante regulado	Norma Reguladora
Cemento Portland	Norma Mexicana (NMX-C-414-ONNCCE-2014) Norma Americana ASTM C 150 (2019)
Puzolana Natural Calcinada	Norma Americana ASTM C 618 (2019)

Fuente: Elaboración propia en base a Normativa Mexicana y ASTM.

Para el diseño de mezcla se planteó el uso de un Cemento Portland Tipo II Compuesto (CPC 30R RS) obtenido de la zona de Querétaro, y Zeolita natural de la zona de Puebla.

3.1.12. Obtención y caracterización del Polietileno Expandido (EPS).

Para poder obtener los gránulos de EPS se realizó un proceso de recolección de poliestireno de desperdicios como envases y embalajes, para luego proceder a la trituración de este con ayuda de una máquina trituradora de EPS; creada por docentes y alumnos de la maestría en diseño e innovación de la Universidad Autónoma de Querétaro la cual se muestra en la Figura 3-19. Una vez triturado se procedió a realizar el tamizado de los gránulos a través del tamiz No.4 para obtener solamente los gránulos de EPS con tamaños menores a 4.76 mm, separando las muestras que iban a ser tratados de las que iban a ser adicionados en estado natural.



Figura 3-19. Máquina utilizada para el proceso de trititación.

Los gránulos de EPS que fueron reforzados se sometieron a una deshidratación inicial mediante horno de secado previo a ser recubiertos con la lechada de cemento; esta lechada de cemento (Figura 3-20); tuvo una relación 1:8, 1 parte de cemento (500 gramos) y 8 partes de agua (4 litros).



Figura 3-20. Proceso de recubrimiento de gránulos de EPS con Lechada 1:8.

Una vez recubiertos los gránulos se procedió a realizar el secado final en dos etapas, la primera etapa denominada secado rápido se realizó inmediatamente después del recubrimiento y fue mediante colocación de los gránulos recubiertos en horno de secado por 30 minutos a temperatura de 135°C. La segunda etapa la cual consistió en realizar el secado al aire durante una semana con la finalidad de garantizar el secado adecuado, deshidratación y evitar el desprendimiento de la capa de recubrimiento. El resultado final de los gránulos recubiertos se observa en la Figura 3-21.



Figura 3-21. Gránulos recubiertos con lechada 1:8.

3.2. Diseño de Mezcla por el método ASTM C-109 y método ACI

Actualmente se cuenta con normativas o manuales de diseño que nos especifican las diferentes metodologías para poder diseñar mezclas de concreto con respecto a la edificación que se desea construir. Para el caso de esta investigación se realizó un diseño de mezcla de concreto hidráulico previsto para una losa de rodadura en un pavimento hidráulico. El American Concrete Institute (ACI) cuenta con un método de diseño, el cual nos describe paso a paso las consideraciones que debemos tomar en cuenta al momento de realizar una mezcla de concreto, este manual se complementa con la normativa ASTM C-109 (2016) que nos especifica los requerimientos necesarios con los que debe contar un mortero y sus resistencias.

3.2.1. Diseño de Mezcla de Mortero por el Método ASTM C-109

Dosificación de los Materiales

El diseño de la mezcla de mortero se realizó con base a la dosificación de las proporciones de material para realizar la prueba estandarizada de la resistencia a la compresión de especímenes cúbicos de mortero que se encuentra especificada en normativa americana ASTM C 109 (2016) y debe ser una parte de cemento por cada 2.75 partes de arena con granulometría estandarizada, en peso. Utilizando una relación agua-cemento de 0.485 para todos los cementos portland.

Mezclado de la mezcla de mortero

El mezclado del mortero se realizó de manera mecánica con ayuda de una mezcladora para mortero siguiendo el procedimiento especificado en la normativa americana ASTM C 305 (2020).

Obtención de la fluidez del mortero de cemento

Para obtener la fluidez de la mezcla con base a la normativa americana ASTM C 1437 (2015), se debe utilizar una mesa de flujo especificada en la normativa americana ASTM C 230 (2014). Previo a realizar la prueba se humedeció cuidadosamente la superficie

superior de la tabla, luego se colocó el molde de fluidez en el centro de la tabla de fluidez y se procedió a realizar el llenado con mortero en 2 capas, la primera hasta una altura de 25mm y siendo apisonado 20 veces con ayuda de un apisonador. La carga de apisonamiento debe ser la suficiente para garantizar el llenado uniforme del molde. En la segunda capa se procedió a realizar el llenado completo del molde repitiendo el proceso de apisonamiento de la primera capa. Una vez el molde se encuentre completamente lleno se procedió enrasar la parte superior y limpiar la mesa de flujo teniendo cuidado de eliminar el agua alrededor del borde del molde de flujo. Se levantó el molde aproximadamente 1 minuto después de finalizar e inmediatamente se dejó caer la mesa de flujo 25 veces en 15 segundos.

Debido a que no se contaba con el molde de flujo especificado en la Normativa americana ASTM C 230 (2014), se procedió a obtener los resultados siguiendo el procedimiento que la ASTM C 1437 (2015) nos proporciona en caso de utilizar otro molde diferente al especificado en norma, el cual consisten en medir el diámetro del mortero en las cuatro líneas existentes en la mesa de flujo, se debe medir individualmente y al milímetro más cercano. Una vez capturados los 4 diámetros se procede a utilizar la siguiente ecuación:

$$F\% = \frac{A}{D_{bi}} \times 100 \quad (1)$$

F%= Porcentaje de Fluidez

A= Promedio de lectura de los 4 diámetros – Diámetro interior de la base del molde

D_{bi}= Diámetro interior de la base del molde

Preparación de los especímenes cúbicos de mortero.

La normativa americana ASTM C 109 (2016) especifica el proceso de preparación de los moldes cúbicos y proceso de llenado y compactación de los moldes, por lo que se siguió el proceso descrito en dicha norma iniciando con la preparación de los moldes mediante la aplicación de un agente de lubricación que facilite el proceso desmoldante, el lubricante que se utilizó fue aceite vehicular. Una vez aplicado el agente de lubricación se procedió a limpiar el cualquier exceso de lubricante con ayuda de un paño para limpieza. Una vez se finalizó el proceso de mezclado, se comenzó a moldear las muestras

dentro de un tiempo total transcurrido de no más de 2 min y 30s después de dar por finalizado el proceso de mezcla del mortero, siguiendo el siguiente proceso:

1. Se Colocó una capa de mortero de aproximadamente 25 mm (aproximadamente la mitad de la profundidad del Molde).
2. Se apisonó el mortero en 4 rondas de 8 golpes haciendo un total de 32 golpes en cada compartimiento del molde siguiendo la secuencia de la Figura 3-22.

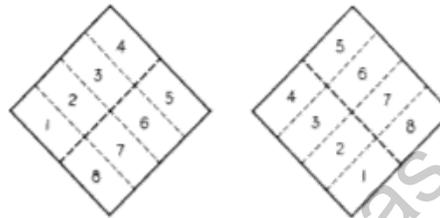


Figura 3-22. Secuencia de apisonamiento durante preparación de especímenes.

Fuente: Normativa ASTM C109 (2016)

3. Una vez finalizado el proceso de apisonado se procedió a realizar el enrasamiento de la parte superior de cada molde y la limpieza de excedente de mortero en los moldes.
4. Siguiendo el proceso establecido en la Normativa ASTM C192 (2018), los especímenes cúbicos permanecieron en los moldes por un lapso de 24 horas, luego que este tiempo transcurrió se procedió a desmoldar y sumergir en agua para realizar el proceso de curado hasta la fecha de ensaye a compresión, las cuales fueron a los 7, 14 y 28 días. Se realizaron 5 especímenes cúbicos por cada edad de ensaye, haciendo un total de 15 especímenes por dosificación.

3.2.2. Diseño de Mezcla de Concreto por el Metodo ACI 211.1

Una vez obtenidos la dosificación y resultados de la mezcla de mortero que mejores características presentó se procederá a realizar el diseño del concreto para pavimento utilizando el método de diseño ACI 211.1. Para realizar un diseño de mezcla de concreto hidráulico según método del American Concrete Institute (ACI), se debe determinar primero el tipo de estructura para la cual se empleará la mezcla, al igual que la resistencia a la compresión que se desea obtener y el revenimiento adecuado en base al tipo de estructura. Para el caso de esta investigación la estructura en la cual

se utilizará la mezcla de concreto es un pavimento por lo que el ACI recomienda un revenimiento máximo de 7.5 y mínimo de 2.5 cm, los pasos de diseño se presentan a continuación:

1. Se seleccionó la resistencia a compresión a los 28 días de edad que se desea obtener.
2. Se definió el revenimiento requerido en base al tipo de estructura a construir con base a la Tabla 3.4.

Tabla 3.4 Revenimientos para diferentes tipos de construcción

Tipos de Construcción	Revenimiento, cm.	
	Máximo	Mínimo
Muros de cimentación y zapatas, cajones de cimentación y muros de sub-estructura sencillos	7.50	2.50
Vigas y muros reforzados	10	2.5
Columnas para edificios	10	2.5
Pavimentos y losas	7.5	2.5
Concreto Masivo	7.5	2.5

Fuente: ACI 211.1.

3. Se verificó el tamaño máximo del agregado grueso (Según granulometría).
4. Se determinó el contenido de aire de la mezcla con base a la Tabla 3.5.

Tabla 3.5 Contenidos de aire para diferentes revenimientos

Revenimiento, cm	Agua, kg/m ³ concreto para TMG, mm							
	9.5	12.5	19	25	38	50	75	150
Concreto sin aire incluido								
De 2.5 a 5.0	207	199	190	179	166	154	130	113
De 7.5 a 10	228	216	205	193	181	169	145	124
De 15 a 17.5	243	228	216	202	190	178	160	---
Cantidad aprox. Aire atrapado	3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3	0.2
Concreto con aire incluido								
De 2.5 a 5.0	181	175	168	160	150	142	122	107
De 7.5 a 10	202	193	184	175	165	157	133	119
De 15 a 17.5	216	205	197	174	174	166	154	---
Promedio recomendado de aire por incluir por exposición								
Exposición ligera	4.5	4.0	3.5	3.0	2.5	2.0	1.5	1.0
Exposición moderada	6.0	5.5	5.0	4.5	4.5	4.0	3.5	3.0
Exposición severa	7.5	7.0	6.0	6.0	5.5	5.0	4.5	4.0

Fuente: ACI 211.1.

5. Se determinó el contenido de agua (Utilizando la Tabla 3.5) al igual que el proceso anterior).
6. Se determinó la relación agua/cemento siguiendo los valores mostrados en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6 Relación Agua/Cemento para diferentes resistencias.

Resistencia a la compresión a los 28 días kg/cm ²	Relación agua / cemento por peso	
	Concreto sin aire incluido	Concreto con aire incluido
420	0.41	--
350	0.48	0.40
280	0.57	0.48
210	0.68	0.59
140	0.82	0.74

Fuente: ACI 211.1.

7. Se determinó la cantidad de cemento a utilizar.
8. Se determinó la cantidad de arena a utilizar. Para la obtención de la cantidad de arena se utilizó el procedimiento que implica conocer los volúmenes absolutos de los componentes. En este caso, la suma de los volúmenes de los demás componentes conocidos se restó del volumen unitario del concreto para obtener el volumen del agregado fino, multiplicando el volumen determinado de la arena por su densidad y obteniendo la cantidad de la arena necesaria.
9. Se realizó la corrección de agua de mezclado.
10. Se calcularon las proporciones finales.

3.3. Ensayos de la mezcla diseñada

Una vez realizado el diseño de la mezcla de concreto, se procedió a elaborar una mezcla de prueba, que fue sometida a diferentes pruebas en estado fresco y seco, para el caso de las pruebas en estado fresco se utilizaron las que se muestran en la Tabla 3.7:

Tabla 3.7 Normas ASTM para Pruebas en Estado Fresco

Ensayo	Norma Reguladora
Densidad	Norma Americana ASTM C 138 (2017)
Revenimiento	Norma Americana ASTM C 143 (2015)
Fluidez	Norma Americana ASTM C 1437 (2015)

Fuente: Elaboración propia en base a Normativa ASTM

Una vez obtenidos los resultados de las pruebas de la mezcla en estado fresco se procedió a realizar vigas de muestreo que cumplan con las especificaciones ASTM C192 (2018) y ASTM C 78 (2018) para someter el concreto hidráulico a pruebas en su estado seco. Los ensayos en estado seco pueden ser destructivos o no destructivos y tal como se muestran en la Tabla 3.8.

Tabla 3.8 Normas ASTM para Pruebas en Estado Seco

Ensayo	Norma Reguladora
Pruebas Destructivas	
Resistencia a la compresión simple	Norma Americana ASTM C 39 (2018)
Resistencia última a flexión (Punto Tercio)	Norma Americana ASTM C 78 (2018)
Pruebas No Destructivas	
Absorción	Norma Americana ASTM C 642 (2013)

Fuente: Elaboración propia en base a Normativa ASTM

Los resultados obtenidos de estas pruebas mostraron el desempeño que la mezcla de diseño tuvo, es muy importante mencionar que para el caso del concreto hidráulico la resistencia a la compresión es muy importante y va relacionado con la resistencia última a flexión en las mezclas para pavimentos, ya que mediante este último se determina el módulo de ruptura de las mezclas para pavimentos rígidos.

3.4. Análisis y resultados

Una vez obtenido el diseño óptimo de la mezcla de concreto hidráulico y respaldada mediante los resultados debidamente analizados, podemos determinar que el proceso de diseño ha culminado, dando paso a la presentación de la mezcla con adición de puzolana natural y gránulos de poliestireno expandido que presente un desempeño adecuado con relación a una mezcla convencional para pavimento rígido.

4. Resultados y discusión.

4.1. Caracterización del agregado fino y grueso

4.1.1. Granulometría agregado fino

La granulometría cumplió con la que establece la norma americana ASTM C 136 (2014) y mexicana M-MMP-2-02-020, en cuanto a granulometría para agregados finos que se van a utilizar en una mezcla de concreto, En la Tabla 4.1 se muestran los resultados de granulometría, los cuales se ven representados en la Figura 4-1 con relación a los límites que establece la norma.

Tabla 4.1 Granulometría del Agregado Fino

Tamiz	Abertura (mm)	Peso suelo retenido (gr)	Porcentaje Parcial retenido (%)	Porcentaje Acumulado (%)	
				Retenido	Pasante
3/8"	9.52	0.00	0.00	0.00	100.00
No 4	4.75	8.60	1.71	1.71	98.29
N° 8	2.360	54.40	10.81	12.51	87.48
N° 16	1.180	116.20	23.09	35.61	64.39
N° 30	0.60	107.70	21.40	57.01	42.99
N° 50	0.30	90.10	17.90	74.91	25.09
N° 100	0.15	88.50	17.58	92.49	7.51
N° 200	0.075	33.40	6.64	99.13	0.87
Pasa 200	---	4.40	0.87		

Peso total de muestra (gramos) = 503.30
Módulo de finura = 2.74

Fuente: Elaboración propia

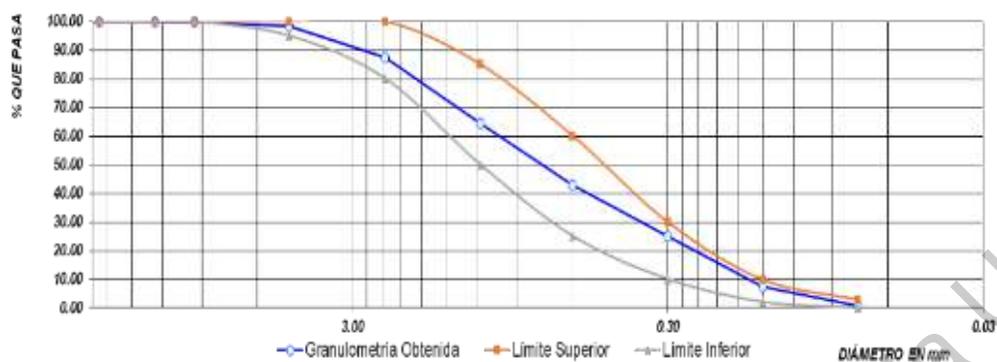


Figura 4-1. Grafica de Granulometría Agregado Fino.
Fuente: Elaboración propia

4.1.2. Granulometría agregado grueso

La granulometría cumplió con la que establece la norma americana ASTM C 136 (2014) y mexicana M-MMP-2-02-020, en cuanto a granulometría para agregados gruesos que se van a utilizar en una mezcla de concreto. En la Tabla 4.2 se muestran los resultados de granulometría, los cuales se ven representados en la Figura 4-2 con relación a los límites que establece la norma.

Tabla 4.2 Granulometría del Agregado Fino

Tamiz	Abertura (mm)	Peso suelo retenido (gr)	Porcentaje Parcial retenido (%)	Porcentaje Acumulado (%)	
				Retenido	Pasante
2"	50.80	0.00	0.00	0.00	100.00
1 1/2"	38.10	0.00	0.00	0.00	100.00
1"	25.40	110.20	0.92	0.92	99.08
3/4"	19.05	4566.50	38.15	39.07	60.93
1/2"	12.70	6567.60	54.87	93.94	6.06
3/8"	9.52	489.10	4.09	98.03	1.98
N° 4	4.75	168.10	1.40	99.43	0.57
Peso total de muestra (gramos) =			11970.00		

Fuente: Elaboración propia

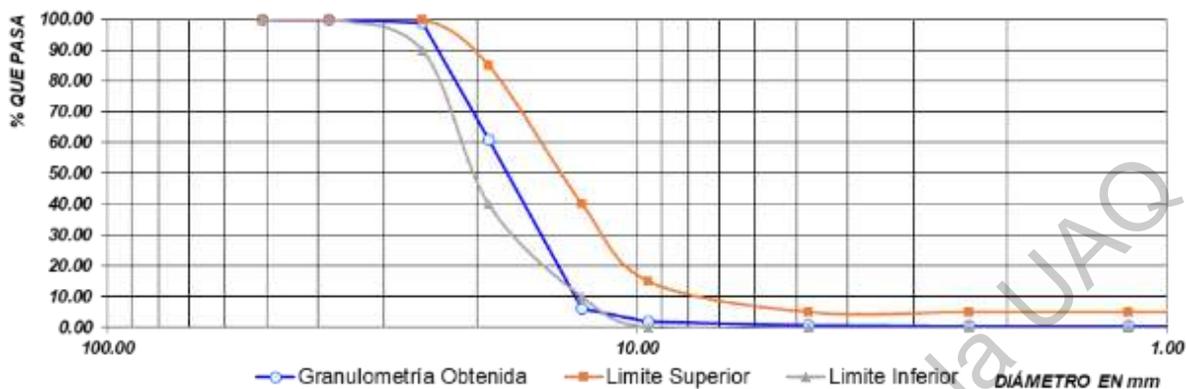


Figura 4-2. Grafica de Granulometría Agregado Grueso.

Fuente: Elaboración propia

Los datos obtenidos demuestran que los agregados pétreos obtenidos cumplen con requerimientos de granulometría y módulo de finura por lo que pueden ser utilizados para la mezcla de concreto a realizar durante esta investigación.

4.1.3. Densidad y absorción del agregado fino y grueso

Siguiendo los lineamientos de la normativa americana ASTM C 127 (2015) para agregados gruesos y ASTM 128 (2015) agregados finos se obtuvieron las propiedades de densidad y absorción de los agregados a utilizar en el diseño de la mezcla de concreto. En la Tabla 4.3 se puede ver la densidad y absorción de la grava y arena. Los resultados obtenidos para la absorción presentan un valor fuera del rango de absorción máxima recomendada para la arena, por lo que se tomará en cuenta al momento de realizar ajuste del agua requerida en la mezcla.

Tabla 4.3 Densidad y absorción del agregado fino y grueso

Material	Densidad	Absorción (%)	Absorción máxima recomendada (%)
Arena	2.08	6.50	5.00
Grava	2.76	1.73	3.00

Fuente: Elaboración propia

4.1.4. Equivalente de arenas

Siguiendo los lineamientos de la normativa americana ASTM D 2419 (2014) para el ensaye de equivalente de arena en el agregado fino se obtuvieron los resultados que se presentan en la Tabla 4.4, como se observa el valor obtenido es superior al equivalente de arena mínimo establecido por la normativa, por lo que se determina que la arena cuenta con el equivalente de arena adecuado para ser utilizada en la mezcla de concreto.

Tabla 4.4 Equivalente de arena en el agregado fino

Material	E.A. (%)	E.A. Min. según normativa (%)
Arena	95	80

Fuente: Elaboración propia

4.1.5. Peso volumétrico seco suelto y compacto del agregado fino y grueso

Siguiendo los lineamientos de la normativa americana ASTM C 29 (2017) se obtuvieron los siguientes resultados de la prueba de pesos volumétricos que se muestran en la Tabla 4.5, estos valores son necesarios para poder realizar el diseño de la mezcla de concreto.

Tabla 4.5 Peso volumétrico seco suelto y compactado de los agregados

Material	P.V.S.S (kg/m ³)	P.V.S.C (kg/m ³)
Arena	1387.16	1495.86
Grava	1913.49	2030.89

Fuente: Elaboración propia

4.1.6. Desgaste de los ángeles

Con los resultados que se presentan en la Tabla 4.6, se llega a la conclusión de que el agregado tiene una resistencia adecuada a la abrasión o trituración para ser utilizado en una mezcla de concreto hidráulico para pavimento. En los agregados gruesos esta es una de las propiedades físicas más importantes debido a que nos permite saber el estado del agregado, la durabilidad y la resistencia que tendrá el concreto, el valor de desgaste máximo está normado en la Norma Americana ASTM C 131 (2014), la cual establece el 30% de desgaste como desgaste máximo.

Tabla 4.6 Resistencia a la abrasión (Desgaste de los Ángeles)

Material	D.A. (%)	D.A. Max. según normativa (%)
Grava	16	30

Fuente: Elaboración propia

4.2. Caracterización de la zeolita y cemento

4.2.1. Obtención dosificación óptima de Zeolita

Las dosificaciones para una mezcla base establecida en la Norma Americana ASTM C109 (2016), al igual que las diferentes mezclas de prueba utilizadas para la obtención de la dosificación óptima para diseño y sus respectivos resultados de fluidez se muestran en la Tabla 4.7

Tabla 4.7 Dosificación y fluidez de las mezclas de prueba.

Mezcla	Cemento (gramos)	Zeolita (Gramos)	Arena (gramos)	Agua (mililitros)	Fluidez (%)
Base	1,240.00	0.00	3,410.00	1,200.00	143.65%
CPC90 + Zeo10	1,116.00	124.00	3,410.00	1,200.00	91.06%
CPC80 + Zeo20	992.00	248.00	3,410.00	1,200.00	128.26%
CPC70 + Zeo30	868.00	372.00	3,410.00	1,200.00	108.94%
CPC60 + Zeo40	744.00	496.00	3,410.00	1,200.00	110.73%
CPC50 + Zeo50	620.00	620.00	3,410.00	1,200.00	121.11%

Fuente: Elaboración propia

4.2.2. Ensayo de resistencia a la compresión simple

La Tabla 4.8 muestra las variaciones en resistencia a la compresión entre la mezcla de mortero base y una mezcla adicionada con 10%, 20%, 30%, 40% y 50% de zeolita natural como aglutinante. Es muy importante mencionar que debido a la adición de la zeolita se realizó una variación en la relación agua-cemento especificada en la normativa ASTM C109 (2016), incrementándose de 0.485 a 0.967 esto debido a la capacidad de absorción de la zeolita y el agregado fino que se utilizó en la mezcla.

Tabla 4.8 Resultados de resistencia a la compresión simples.

Mezcla	Resistencia a la compresión simple		
	Kg/cm ²		
	7 días	14 días	28 días
Base	31.52	47.35	88.12
CPC90 + Zeo10	33.50	50.99	104.88
CPC80 + Zeo20	25.49	59.00	90.31
CPC70 + Zeo30	26.94	50.26	79.39
CPC60 + Zeo40	21.12	37.15	92.50
CPC50 + Zeo50	10.92	29.13	69.63

Fuente: Elaboración propia

La resistencia a la compresión simple al igual que la fluidez presentaron una variación a favor de la mezcla de mortero adicionada con 10% de zeolita. Los resultados de los especímenes a los 7 y 14 días presentaron una resistencia superior entre 6.00% y 7.00% de la mezcla adicionada con zeolita al 10% sobre la mezcla base. Los resultados a los 28 días presentaron un incremento de la resistencia a la compresión simple de aproximadamente 50.00% en todas las mezclas con relación a los resultados de resistencia obtenidos a 14 días, resultando superior la resistencia de la mezcla con adición de 10% de zeolita en 16.00% sobre la mezcla base. Luego de analizar estos resultados se determinó que la dosificación de cementante que se utilizaría para las pruebas de resistencia del mortero adicionado con gránulos de EPS sería 90% cemento y 10% zeolita.

4.3. Dosificación de Gránulos EPS en estado natural y tratados.

4.3.1. Obtención dosificación óptima de EPS en Estado Natural

La dosificación de los gránulos de EPS se realizó en dos etapas. Siendo la primera etapa la adición de gránulos de EPS en estado natural y la segunda etapa adición de gránulos tratados. Las dosificaciones para una mezcla base establecida al igual que las diferentes mezclas de prueba utilizadas para la obtención de la dosificación óptima de EPS para diseño de la primera etapa y sus respectivos resultados de fluidez se muestran en la Tabla 4.9

Los diámetros obtenidos para medir la fluidez fueron registrados entre 132 mm y 134 mm para la mezcla CPC+90Zeo10+EPS0; y 150 mm y 154 mm para la mezcla CPC90+Zeo10+EPS10. Se observó un incremento de la fluidez en un 22.20% entre la mezcla de mortero base y la mezcla de mortero con arena sustituida al 10% de gránulos de EPS sin tratamiento; Este incremento está relacionado a la sustitución de arena, con 6.50% de absorción; por 10% de gránulos de EPS, cuyas características hidrófobas generan una absorción nula, y al no modificar la relación agua-cemento permite la disponibilidad de mayor cantidad de agua libre en la mezcla.

Tabla 4.9 Dosificación y fluidez de las mezclas de prueba adicionada con EPS estado natural.

Mezcla	Cemento (gramos)	Zeolita (Gramos)	Arena (Centímetros Cúbicos)	EPS (Centímetros Cúbicos)	Agua (mililitros)	Fluidez (%)
Base	1,116.00	124.00	3,410.00	0.00	1,200.00	91.06%
CPC90 + Zeo10 + EPS10	1,116.00	124.00	3,114.00	346.00	1,200.00	117.00%
CPC90 + Zeo10 + EPS20	1,116.00	124.00	2,776.00	694.00	1,200.00	123.00%
CPC90 + Zeo10 + EPS30	1,116.00	124.00	2,400.00	1,030.00	1,200.00	177.00%

Fuente: Elaboración propia

4.3.1.1. Ensayo de resistencia a la compresión simple

La Tabla 4.10 muestra las variaciones en resistencia a la compresión entre la mezcla de mortero base (CPC90+Zeo10+EPS0), cuyos resultados son los obtenidos en la Tabla 4.8 con mezcla 90% Cemento Portland Compuesto (CPC), 10% Zeolita Natural y 0% EPS; y el primer escenario de investigación que consistió en adicionar gránulos de EPS en estado natural. Para ambas etapas de investigación se mantuvo la misma relación agua-cemento de 0.967. obteniendo los mejores resultados en la primera etapa la mezcla con Dosificación 90% Cemento Portland (CPC), 10% Zeolita Natural y 10% gránulos de EPS en estado natural (CPC+90Zeo10+EPS10).

La resistencia a la compresión simple al igual que la fluidez presentaron una variación a favor de la CPC90+Zeo10+EPS10. Los resultados de los especímenes CPC90Zeo10+EPS10 a los 7 días presentaron una resistencia inferior en un 46.90% con relación a la mezcla CPC90+Zeo10+EPS0, incrementando su resistencia de 2.24MPa a

7.21MPa a los 14 días. Los resultados a los 28 días presentaron un incremento de la resistencia a la compresión simple entre 45.00% y 50.00% en ambas mezclas con relación a los resultados resistencia a 14 días, resultando superior la resistencia de la mezcla CPC90+Zeo10+EPS10 en 1.60% sobre la mezcla base (CPC90+Zeo10+EPS0).

Tabla 4.10 Resultados de resistencia a la compresión simples (EPS en estado natural).

Mezcla	Resistencia a la compresión simple		
	Kg/cm ²		
	7 días	14 días	28 días
Base	33.50	50.99	104.93
CPC90 + Zeo10 + EPS10	22.82	73.52	106.56
CPC90 + Zeo10 + EPS20	17.83	61.17	88.72
CPC90 + Zeo10 + EPS30	7.15	35.69	51.80

Fuente: Elaboración propia

4.3.2. Obtención dosificación óptima de EPS reforzados con Doble Tratamiento

Las dosificaciones y resultados de fluidez obtenidos en el segundo escenario se muestran en la Tabla 4.11. Este segundo escenario de investigación consistió en adicionar gránulos de EPS reforzados superficialmente con lechada de cemento 1:8. Resultando con mejores características la mezcla con Dosificación 90% Cemento Portland Compuesto (CPC), 10% Zeolita Natural y 10% gránulos de EPS con reforzamiento superficial (CPC90+Zeo10+EPST10).

Los diámetros obtenidos para medir la fluidez fueron registrados entre 132 mm y 134 mm para la mezcla de mortero base; y 136 mm y 138 mm para la mezcla de mortero CPC90+Zeo10+EPST10. Se observó un incremento de la fluidez en un 5.50% entre la mezcla CPC90+Zeo10+EPS0 y la mezcla CPC90+Zeo10+EPST10. Este incremento al igual que el incremento en la fluidez del primer escenario está relacionado con la sustitución de la arena, en el segundo escenario se ve un menor incremento debido al tratamiento que se le aplicó a los gránulos de EPS, ya que el recubrimiento superficial de los gránulos absorbe un porcentaje de agua libre en la mezcla.

Tabla 4.11 Dosificación y fluidez de las mezclas de prueba adicionada con EPS reforzado.

Mezcla	Cemento (gramos)	Zeolita (Gramos)	Arena (Centímetros Cúbicos)	EPS (Centímetros Cúbicos)	Agua (mililitros)	Fluidez (%)
Base	1,116.00	124.00	3,410.00	0.00	1,200.00	91.06%
CPC90 + Zeo10 + EPST10	1,116.00	124.00	3,015.00	335.00	1,200.00	96.00%
CPC90 + Zeo10 + EPST20	1,116.00	124.00	2,896.00	724.00	1,200.00	108.00%
CPC90 + Zeo10 + EPST30	1,116.00	124.00	2,429.00	1,041.00	1,200.00	122.00%

Fuente: Elaboración propia

4.3.2.1. Ensayo de resistencia a la compresión simple

Al igual que el primer escenario, la mezcla con sustitución en un 10% de arena por gránulos de EPS, fue la que mejores resultados de resistencia a la compresión simple obtuvo tal como se muestra en la Tabla 4.12. Los resultados de los especímenes CPC90+Zeo10+EPST10 a los 7 días presentaron una resistencia inferior en un 42.00% con relación a la mezcla CPC90+Zeo10+EPS0, incrementando su resistencia de 2.31 MPa a 7.44 MPa a los 14 días. Los resultados a los 28 días presentaron un incremento de la resistencia a la compresión simple entre 45.00% y 50.00% en ambas mezclas con relación a los resultados resistencia a 14 días, resultando superior la resistencia de la mezcla CPC90+Zeo10+EPST10 en 4.76% sobre la mezcla base (CPC90+Zeo10+EPS0).

Tabla 4.12 Resultados de resistencia a la compresión simples (EPS reforzado).

Mezcla	Resistencia a la compresión simple		
	Kg/cm ²		
	7 días	14 días	28 días
Base	33.50	50.99	104.93
CPC90 + Zeo10 + EPS10	23.55	75.85	109.93
CPC90 + Zeo10 + EPS20	18.56	59.73	86.68
CPC90 + Zeo10 + EPS30	11.42	34.23	49.66

Fuente: Elaboración propia

4.4. Ensayo de Absorción de los especímenes cúbicos adicionado con gránulos de EPS en estado natural y tratados

Se obtuvieron los diferentes porcentajes de absorción para ambos escenarios de investigación, los cuales se presentan en la Tabla 4.13. Al momento de comparar ambos

escenarios es importante recordar que la mezcla base CPC90+Zeo10+EPS0 para ambos fue la misma, la única variación fueron los gránulos adicionados. Obteniendo una mezcla más resistente en un 3.16%, con mayor fluidez en un 21.88% y con 0.45% mayor absorción al momento de sustituir 10% de arena por gránulos reforzados superficialmente con lechada 1:8.

Tabla 4.13 Resultados de absorción de las mezclas de mortero adicionadas.

Mezcla	Absorción %		
	7 días	14 días	28 días
CPC90Zeo10 + EPST10	2.99%	3.59%	4.31%
CPC90Zeo10 + EPS10	2.81%	3.51%	3.86%
CPC90Zeo10 + EPST20	2.87%	3.46%	4.15%
CPC90Zeo10 + EPS20	2.79%	3.09%	3.42%
CPC90Zeo10 + EPST30	2.95%	3.56%	4.27%
CPC90Zeo10 + EPS30	2.76%	3.47%	3.83%

Fuente: Elaboración propia

4.5. Dosificación de mezcla de concreto para pavimento rígido método ACI 211.1

1. El primer paso fue seleccionar la resistencia a la compresión simple que mejor se adaptara a un concreto para losa de rodadura, en el caso de esta investigación se consideró un concreto con resistencia de 280 kg/cm².
2. Definir el revenimiento requerido en base al tipo de estructura a construir, para el caso de esta investigación, el concreto se diseñará para un pavimento rígido por lo que el revenimiento a obtener según la Tabla 4.14 deberá estar entre un mínimo de 2.5 cm y un máximo de 10 cm.

Tabla 4.14 Determinación del Revenimiento de la mezcla.

Tipos de Construcción	Revenimiento, cm.	
	Máximo	Mínimo
Muros de cimentación y zapatas, cajones de cimentación y muros de sub-estructura sencillos	7.50	2.50
Vigas y muros reforzados	10	2.5
Columnas para edificios	10	2.5
Pavimentos y losas	7.5	2.5
Concreto Masivo	7.5	2.5

Fuente: ACI 211.1

3. Determinar y/o verificar el tamaño máximo del agregado grueso. Según granulometría el tamaño máximo del agregado grueso es de 1" como se muestra en la Tabla 4.15.

Tabla 4.15 Determinación tamaño máximo del Agregado Fino

Tamiz	Abertura (mm)	Peso suelo retenido (gr)	Porcentaje Parcial retenido (%)	Porcentaje Acumulado (%)	
				Retenido	Pasante
2"	50.80	0.00	0.00	0.00	100.00
1 1/2"	38.10	0.00	0.00	0.00	100.00
1"	25.40	110.20	0.92	0.92	99.08
3/4"	19.05	4566.50	38.15	39.07	60.93
1/2"	12.70	6567.60	54.87	93.94	6.06
3/8"	9.52	489.10	4.09	98.03	1.98
Nº 4	4.75	168.10	1.40	99.43	0.57
Peso total de muestra (gramos) =			11970.00		

Fuente: Elaboración Propia

4. Con base al tamaño máximo del agregado, el cual se obtuvo de 1" (25 mm) y el revenimiento de diseño entre 2.5 a 5.0 cm, sin aire incluido, se obtiene con base a la Tabla 4.16, que se utilizaran 179 litros por m³ de mezcla.

Tabla 4.16 Obtención cantidad de agua para la mezcla

Revenimiento, cm	Agua, kg/m ³ concreto para TMG, mm							
	9.5	12.5	19	25	38	50	75	150
Concreto sin aire incluido								
De 2.5 a 5.0	207	199	190	179	166	154	130	113
De 7.5 a 10	228	216	205	193	181	169	145	124
De 15 a 17.5	243	228	216	202	190	178	160	---
Cantidad aprox. Aire atrapado	3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3	0.2
Concreto con aire incluido								
De 2.5 a 5.0	181	175	168	160	150	142	122	107
De 7.5 a 10	202	193	184	175	165	157	133	119
De 15 a 17.5	216	205	197	174	174	166	154	---
Promedio recomendado de aire por incluir por exposición								
Exposición ligera	4.5	4.0	3.5	3.0	2.5	2.0	1.5	1.0
Exposición moderada	6.0	5.5	5.0	4.5	4.5	4.0	3.5	3.0
Exposición severa	7.5	7.0	6.0	6.0	5.5	5.0	4.5	4.0

Fuente: ACI 211.1

5. La resistencia a la compresión simple de diseño que se consideró para esta investigación fue de 280 kg/cm², además que no se incluirá aire al concreto por lo que con base a la Tabla 4.17, se obtiene que la relación Agua/cemento debe ser de 0.57.

Tabla 4.17 Obtención cantidad de cemento para la mezcla.

Resistencia a la compresión a los 28 días kg/cm ²	Relación agua / cemento por peso	
	Concreto sin aire incluido	Concreto con aire incluido
420	0.41	--
350	0.48	0.40
280	0.57	0.48
210	0.68	0.59
140	0.82	0.74

Fuente: ACI 211.1

6. La cantidad de cemento a utilizar se calculó con base a la siguiente ecuación:

$$C = \frac{A}{A/C} \quad (2)$$

Donde:

C= Cantidad de Cemento por m³ a Utilizar

A/C= Relación Agua/Cemento obtenida

A= Cantidad de Agua por m³ Obtenida

Sustituyendo los valores obtenidos en la Ecuación 2, se obtiene el siguiente resultado:

$$C = \frac{179 \text{ lts/m}^3}{0.57} = 314.04 \text{ kg/m}^3$$

Por lo tanto, se obtuvo que según diseño se requiere de 314.04 kg de cemento por cada m³ de mezcla.

7. De la Tabla 4.18 se estimó la cantidad de grava; para un módulo de finura de 2.74, un tamaño máximo de grava de 25 mm (1”), puede emplearse por medio de interpolación 0.68 metros cúbicos de grava, por lo tanto, el peso de la grava es de 1914 x 0.68 = 1301.52 kg/m³.

Tabla 4.18 Obtención cantidad de grava para la mezcla.

Tamaño máximo de agregado, mm	Volumen de agregado grueso varillado en seco, por volumen unitario de concreto para distintos módulos de finura de la arena			
	2.40	2.60	2.80	3.00
9.5 (3/8")	0.50	0.48	0.46	0.44
12.5 (1/2")	0.59	0.57	0.55	0.53
19 (3/4")	0.66	0.64	0.62	0.60
25 (1")	0.71	0.69	0.67	0.65
37.5 (1 1/2")	0.75	0.73	0.71	0.69
50 (2")	0.78	0.76	0.74	0.72
75 (3")	0.82	0.80	0.78	0.76
150 (6")	0.87	0.85	0.83	0.81

Fuente: ACI 211.1

8. La cantidad de arena obtenida luego de obtener las diferencias de volúmenes resultó en 516 kg por cada m³ de mezcla, este valor se obtuvo luego de obtener las diferencias de la Tabla 4.19.

Tabla 4.19 Determinación cantidad de arena para la mezcla.

Material	Peso (kg)	Densidad	Volumen (lts)
Agua	179	1	179
Aire	0	---	15
Cemento	314	3.15	100
Agregado Grueso	1301.52	2.84	458
Agregado Fino	---	---	---
Total	1795	1	752

Fuente: Elaboración Propia

Volumen de Arena Requerido = $1000 - 752 = 248$ lts.

Peso de la arena que se requiere = $248 \times 2.08 = 516$ Kg.

9. Corrección por humedad y absorción: debido a que se utilizó gránulos de EPS los cuales tienen propiedades hidrófobas y zeolita natural, la cual absorbe una cantidad considerable de agua en la mezcla para luego liberarla secuencialmente; no se realizó ajuste por humedad. Solamente se consideró el ajuste por absorción de los agregados, el cual es de 6.5% para la arena y 1.73% para la grava, tal como se muestra en la Tabla 4.20.

Tabla 4.20 Ajuste por absorción del agregado.

Material	Base	Absorción %	Peso Ajuste Kg	Peso Ajustado Kg
Agua	179	0	0	179
Cemento	314	0	0	314
Agregado Grueso	1301.52	1.73	- 22.50	1279
Agregado Fino	516	6.50	- 33.50	483

Fuente: Elaboración Propia

10. Cálculo de proporciones: para esta investigación se realizaron 15 vigas con dimensiones 50cm x 15cm x 15cm, las cuales fueron ensayadas a tensión siguiendo el procedimiento de la normativa americana ASTM C 78. Las dosificaciones utilizadas para la elaboración de la mezcla base y Mezcla de ensayo con adición de 10% zeolita natural y 10% gránulos de EPS con doble recubrimiento se presenta en la Tabla 4.21.

Tabla 4.21 Mezcla final de diseño.

Material	Base kg	Mezcla Zeo10 + EPST10 Kg
Agua	30	30
Cemento	53	48
Agregado Grueso	217	217
Agregado Fino	82	74

Fuente: Elaboración Propia

4.6. Ensayo de resistencia a la flexión

Para realizar las pruebas a la flexión se realizaron 4 vigas rectangulares por día de ensaye (7, 14 y 28 días); con dimensiones de 150 x 150 x 500 mm como se observan en la Figura 4-3.; tanto para la mezcla base como para la mezcla que mejores resultados presentó en los ensayos de compresión simple con dosificación CPC90 + Zeo10 + EPST10. Los resultados y las fallas obtenidas se muestran en la Tabla 4.21 , Figura 4-4 y Figura 4-5. Se puede observar que el comportamiento de la resistencia en la mezcla base se muestra en un crecimiento uniforme de aproximadamente el 3% entre día de ensaye logrando una resistencia de 45.51 kg/cm² a los 28 días; Resistencia que es superior 13% en comparación a la resistencia de 40.34 kg/cm² obtenida a los 28 días para la mezcla CPC90 + Zeo10+EPST10.



Figura 4-3. Fabricación de vigas para ensaye a flexión

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.22 Resistencia a la flexión de la mezcla.

Mezcla	Resistencia a la flexión Kg/cm ²		
	7 días	14 días	28 días
Base	42.85	43.81	45.51
CPC90 + Zeo10 + EPST10	27.16	37.57	40.34

Fuente: Elaboración Propia.



Figura 4-4. Falla a flexión en el tercio medio de las vigas para ensaye a flexión

Fuente: Elaboración propia

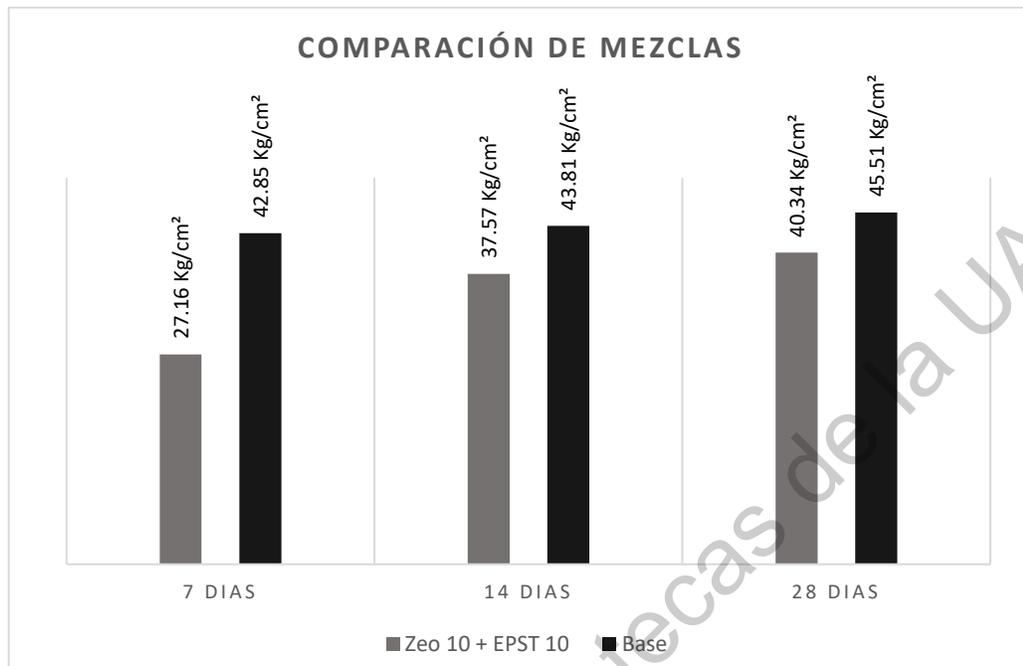


Figura 4-5. Grafica comparación de resistencia entre mezclas.
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 4-4 se pueden visualizar las curvas de resistencia a la flexión contra tiempo. En esta se observa que el concreto de la mezcla base obtiene más del 90% de su resistencia de diseño en los primeros 14 días y a partir de ese momento tiene un leve incremento de aproximadamente 3% hasta lograr la resistencia máxima de diseño en 45 kg/cm² a los 28 días; a diferencia de la mezcla propuesta CPC90 + Zeo10+EPST10, la cual apenas logra aproximadamente el 84% de la resistencia máxima de diseño a los 14 días, pero se observa un mayor crecimiento a través del tiempo de un aproximado de 7.5% lo que confirma que la zeolita retrasa un poco la reacción química de la mezcla, lo que ocasiona que posiblemente se obtengan la resistencia de diseño a los 40 días si los resultados siguen la línea de tendencia mostrada en la Figura 4-6.

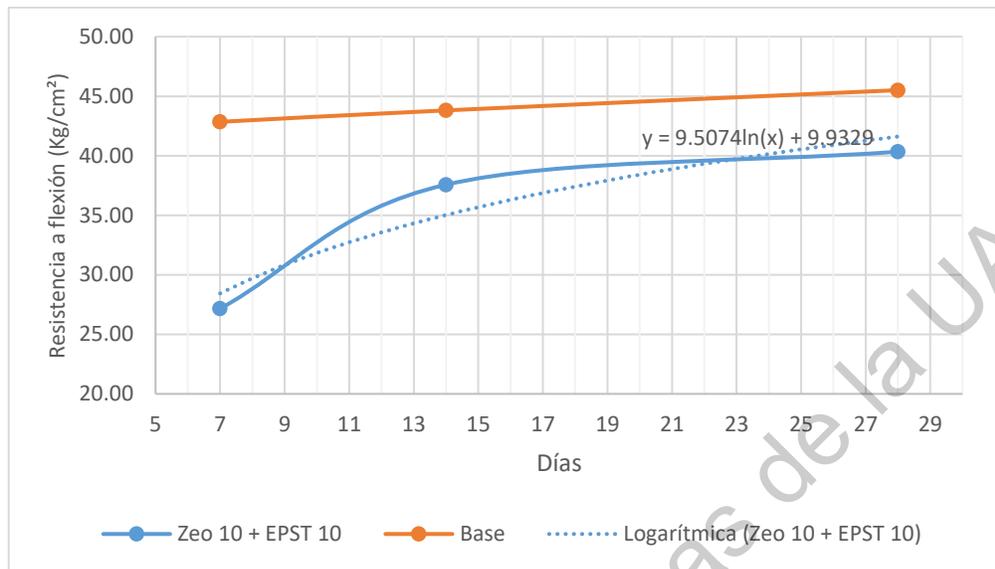


Figura 4-6. Curva de resistencia con respecto al tiempo.
Fuente: Elaboración propia

5. Conclusiones

La implementación de materiales reciclados es una idea innovadora para la industria de la construcción y en esta investigación se reforzó la teoría que a medida se incrementa el porcentaje de adición de zeolita o gránulos de EPS, es mayor la cantidad de propiedades mecánicas que son influenciadas. Es por esto que se obtiene la necesidad de conseguir una dosificación óptima en la cual las propiedades mecánicas de la mezcla presentaran un incremento que respalde la implementación de estos aditivos a una mezcla de concreto para uso en el pavimento rígido.

Se obtiene una resistencia a la compresión simple de 104.88 kg/cm^3 en la mezcla de mortero adicionado con 10% zeolita resultando en un incremento del 16% en comparación a la mezcla base con 88.12 kg/cm^2 . Adicionalmente se observa un incremento en la relación agua-cemento en las mezclas adicionadas con zeolita, debido a que estas mezclas generan una mayor absorción en comparación a una mezcla sin este material; esto se debe a la propiedad absorbente que tiene y que induce en un fraguado más rápido dentro del mortero. La fluidez disminuyó hasta un máximo del 19% a medida los porcentajes de adición de zeolita incrementaban rondando en fluidez de entre 121 y 143%. La planificación de las etapas en las cuales se trabajó la investigación inició con la sustitución de cemento portland por Zeolita natural. Las sustituciones rondan entre el 10% y 50% del volumen del cemento, siendo 10% la que otorga mejores resultados.

Al utilizar un 10% de Zeolita y 10% Gránulos de Poliestireno recubiertos con lechada 1:8 se obtiene una resistencia a la compresión simple superior en un 4.76% con respecto a la mezcla solamente adicionada con 10% Zeolita, reduciendo la relación agua-cemento y la fluidez de las mezclas. Como resultado final se puede determinar que la adición de Zeolita y Gránulos de Poliestireno expandido recubiertos, presentan una resistencia a la compresión 24% mayor y una fluidez 50% inferior, respecto a una mezcla de concreto sin ningún tipo de adición

En el caso de la resistencia a flexión del concreto se observa que, a los 28 días, tiempo en el cual se busca la resistencia máxima de diseño de 45 kg/cm^2 , la adición de Zeolita

y Gránulos de Poliestireno expandido reforzados, en porcentaje de 10%, genera una disminución del 13% en la resistencia a flexión, respecto a la resistencia de diseño. Por lo anterior es necesario reforzar la línea de investigación analizando un periodo de curado mayor para obtener la resistencia de diseño a la flexión, ya que el concreto continúa ganando resistencia con el paso del tiempo y la zeolita favorecerá a ese proceso. Con base a los resultados obtenidos se puede determinar que este tipo de mezcla puede ser un material innovador para utilizarse en la industria de la construcción debido a la implementación de materiales que se consideran desperdicio y modifican satisfactoriamente las propiedades mecánicas de un concreto.

Bibliografías o Referencias

- AASHTO M85, (2015). Specification for Portland Cement, *American Association of State Highway and Transportation Officials*, United States of America.
- AASHTO, (1993). AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, *American Association of State Highway and Transportation Officials*, United States of America.
- Ahmadi, B., & Shekarchi, M., (2010). Use of natural zeolite as a supplementary cementitious material. *Cement & Concrete Composites*, Vol. 32. Pp 34-141.
- ASTM C109, (2016). Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars, *Annual Book of ASTM Standards*.
- ASTM C1157, (2017). Standard Performance Specification for Hydraulic Cement, *Annual Book of ASTM Standards*.
- ASTM C127, (2015). Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate, *Annual Book of ASTM Standards*.
- ASTM C128, (2015). Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate, *Annual Book of ASTM Standards*.
- ASTM C131, (2014). Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine, *Annual Book of ASTM Standards*.

- ASTM C136, (2014). Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates, *Annual Book of ASTM Standards*.
- ASTM C138, (2017). Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete, *Annual Book of ASTM Standards*.
- ASTM C143, (2015). Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete, *Annual Book of ASTM Standards*.
- ASTM C1437, (2015). Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar, *Annual Book of ASTM Standards*.
- ASTM C150, (2019). Standard Specification for Portland Cement, *Annual Book of ASTM Standards*.
- ASTM C192, (2018). Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory, *Annual Book of ASTM Standards*.
- ASTM C230, (2014). Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement, *Annual Book of ASTM Standards*.
- ASTM C29, (2017). Standard Test Method for Bulk Density and Voids in Aggregate, *Annual Book of ASTM Standards*.
- ASTM C305, (2020). Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency, *Annual Book of ASTM Standards*.

- ASTM C39, (2018). Método de Ensayo Normalizado para Resistencia a la Compresión de Especímenes Cilíndricos de Concreto, *Libro Annual de estandarización ASTM*.
- ASTM C40, (2016). Standard Test Method for Organic Impurities in Fine Aggregates for Concrete, *Annual Book of ASTM Standards*.
- ASTM C618, (2019). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, *Annual Book of ASTM Standards*.
- ASTM C642, (2013). Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete, *Annual Book of ASTM Standards*.
- ASTM C702, (2018). Standard Practice for Reducing Samples of Aggregate to Testing Size, *Annual Book of ASTM Standards*.
- ASTM C78, (2018). Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading), *Annual Book of ASTM Standards*.
- ASTM D2419, (2014). Standard Test Method for Sand Equivalent Value of Soils and Fine Aggregate, *Annual Book of ASTM Standards*.
- Babu, K.G., & Babu, D.S., (2003). Behavior of lightweight expanded polystyrene concrete containing silica fume. *Cement and Concrete Research*, Vol. 33. Pp 755-762.

- Bolden, J., Abu-Lebdeh, T., & Fini, E. (2013) Utilization of recycled and waste materials in various construction applications. *American Journal of Environmental Science*, Vol. 9. Pp 14-24.
- Cadere, C. A., Barbuta, M., Rosca, B., Serbanoiu, A. A., Burlacu, A., & Oancea, I. (2017). Engineering properties of concrete with polystyrene granules. “Gheorghe Asachi” Technical University of Iasi. Romania.
- Chung, S., Abd Elrahman, M., & Stephan, M. (2017). Effects of expanded polystyrene (EPS) sizes and arrangements on the properties of lightweight concrete. *Materials and Structures*, Pp 51-57.
- Damtoft, J.S., Lukasik, J., Herfort, D., Sorrentino, D., & Gartner, E.M. (2008). Sustainable development and climate change initiatives. *Cement and Concrete Research*, Vol. 38. Pp 115–127.
- Deboucha, W., Leklou, N., Khelidj, A., & Oudjit, M.N. (2017). Natural pozzolana addition effect on compressive strength and capillary water absorption mortar. *Energy Procedia*, Vol. 139. Pp 689-695.
- Demirboga, R., & Gül, R.R., (2003). The effects of expanded perlite aggregate, silica fume and fly ash on the thermal conductivity of lightweight concrete. *Cement and Concrete Research*, Vol. 33. Pp 723-727.
- Ferrándiz-Mas, V., & García-Alcocel, E. (2012). Caracterización física y mecánica de morteros de cemento Portland fabricado con adición de partículas de poliestireno expandido (EPS). *Materiales de Construcción*, Vol. 62, 308. Pp 547-566.

- Ganesh, K., & Saradhi, D. (2003). Behaviour of lightweight expanded polystyrene concrete containing silica fume. *Cement and concrete research* Vol. 33. Pp 755-762.
- Ghrici, M., Kenai, S., & Meziane, E. (2006). Mechanical and durability properties of cement mortar with Algerian natural pozzolana. *Materials Science*, Vol. 41. Pp 6965-72.
- Ghrici, M., Kenai, S., & Said-Monsour, M. (2007). Mechanical properties and durability of cement mortar and concrete containing natural pozzolana and limestone blended cements. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 29. Pp 542-549.
- Gutiérrez De López, L. (2003). El Concreto y Otros Materiales Para la Construcción. *Universidad Nacional de Colombia*, 2da Edición. Colombia.
- Hernández-Zaragoza, J., López-Lara, T., Horta-Rangel, J., López-Cajún, C., Rojas-González, E., García-Rodríguez, F., & Adué, J. (2013). Cellular Concrete Bricks with Recycled Expanded Polystyrene Aggregate. *Advances in Materials Science and Engineering*, Vol. 2013. Pp 1-5.
- Kaya, A., & Kar, F. (2015). Properties of concrete containing waste expanded polystyrene and natural resin. *Construction and Building Materials*, Vol. 105. Pp 572-578.
- Khatib, J.M., Herki, B.A., & Elkordi, A., (2019). Characteristics of concrete containing EPS. *Use of Recycled Plastics in Eco-efficient Concrete*. Pp 137-165.

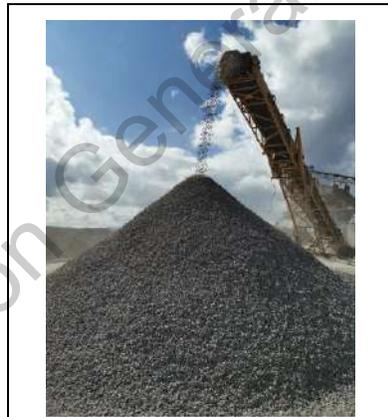
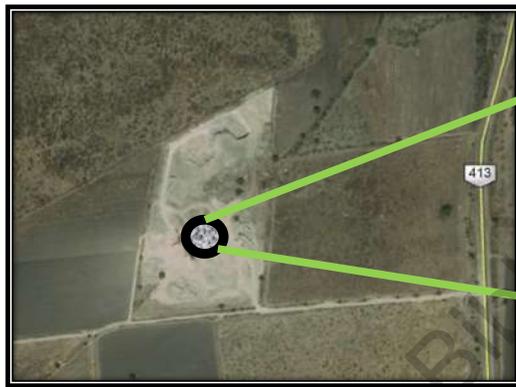
- Kosmatka, S.H., Kerkhoff, B., Panarese, W.C., & Tanesi, J. (2004). Diseño y Control de Mezclas de Concreto. *Boletín de Ingeniería Portland Cement Association*. EE. UU.
- Le Roy, R., Parant, E., & Boulay, C. (2005) Taking into account the inclusions' size in lightweight concrete compressive strength prediction. *Cement and Concrete Research* Vol. 35. Pp 770–775.
- León, M.P., & Ramirez, F. (2010). Caracterización morfológica de agregados para concreto mediante el análisis de imágenes. *Revista Ingeniería de Construcción*, Vol. 25. Pp 215-240.
- Liu, N., & Chen, B. (2014). Experimental study of the influence of EPS particle size on the mechanical properties of EPS lightweight concrete. *Construction and Building Materials*, Vol. 68. Pp 227-232.
- Mehta, K., & Monteiro, P. (1993). Concrete: Structure, Properties, and materials. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J.
- Miled, K., Roy, R.L., Sab, K., & Boulay, C. (2007) Compressive behavior of an idealized EPS lightweight concrete: size effects and failure mode. *Mechanics of Materials* Vol. 36. Pp 1031-1046.
- Montejo, A. (2008). Ingeniería de Pavimentos Tomo 1. *Universidad Católica de Colombia*, 3ª Edición. Colombia.

- Najimi, M., Sobhani, J., Ahmadi, B., & Shekarchi, M., (2012). An experimental study on durability properties of concrete containing zeolite as highly reactive pozzolan. *Construction and Building Materials*, Vol. 35. Pp 1023-1033.
- Nikbin, I., & Goldshekan, M. (2017). The effect of expanded polystyrene particles on the fracture parameters, brittleness and mechanical properties of concrete. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Vol. 94. Pp 160-172.
- Olivera Bustamante, F. (2009). Estructuración de Vías Terrestres. Grupo Editorial Patria, 10ª Edición. México.
- Pacheco Torres, R., Cerro Prada, E., Escolano, F., & Varela, F. (2018) Fatigue performance of waste rubber concrete for rigid road pavements. *Construction and Building Materials* Vol. 176. Pp 539-548.
- Plati, C. (2019) Sustainability factors in pavement materials, design, and preservation strategies: A literature review. *Construction and Building Materials*, Vol. 211. Pp 539-555.
- Quiroga, P.N., & Fowler, D.W. (2003). The Effects of Aggregate Characteristics on the Performance of Portland Cement Concrete. *Research Report International Center for Aggregates Research*.
- Rico, A., & Castillo. H. (1992). La Ingeniería de suelos en las vías terrestres. México D.F: Editorial Limusa.

- Saradhi, D., Ganesh, K., & Wee, T. (2005). Properties of lightweight expanded polystyrene aggregate concretes containing fly ash. *Cement and concrete research*, Vol. 35. Pp 1218-1223.
- Sayadi, A., Tapia, J., Neitzert, T., & Clifton, G. (2016). Effects of expanded polystyrene (EPS) particles on fire resistance, thermal conductivity and compressive strength of foamed concrete. *Construction and Building Materials*, Vol. 112. Pp 716-724.
- Shilstone, J. (1999). The Aggregate: The Most Important Value-Adding Component in Concrete. *International Center for Aggregates Research; Memorias del Simposio Internacional* Austin, Texas.
- Sun, L. (2016). Structural Behavior of Asphalt Pavements. *Butterworth-Heinemann*. 1^a Edition. United Kingdom. ISBN 978-0-12-849908-5.

Anexos

Nombre del Proceso:	Obtención de materiales para la mezcla de concreto
Material Obtenido:	Agregado Grueso (Grava)
Procedencia:	Material Obtenido mediante trituración
Observaciones:	El agregado grueso o grava se obtuvo luego de un proceso de trituración, mediante una trituradora de impacto propiedad de la Constructora TLACHCO, esta trituradora está ubicada en el banco de material llamado "La Cueva", con coordenadas UTM: Zona 14Q, Norte=2263647.00, Este=350311.00

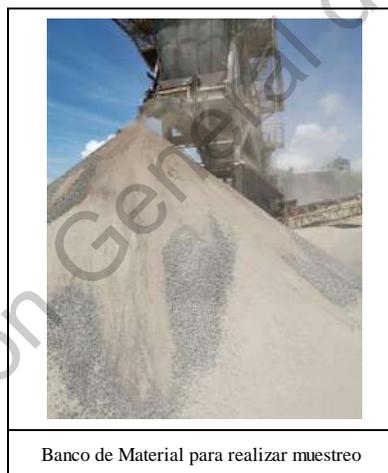
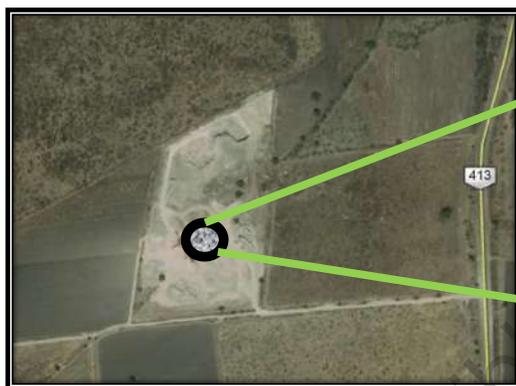


Banco de Material para realizar muestreo



Proceso de toma de muestra del agregado

Nombre del Proceso:	Obtención de materiales para la mezcla de concreto
Material Obtenido:	Agregado Fino (Arena)
Procedencia:	Material Obtenido mediante trituración
Observaciones:	El agregado fino o arena se obtuvo luego de un proceso de trituración, mediante una trituradora de impacto propiedad de la Constructora TLACHCO, esta trituradora está ubicada en el banco de material llamado "La Cueva", con coordenadas UTM: Zona 14Q, Norte=2263647.00, Este=350311.00



Nombre del Proceso:	Obtención de materiales para la mezcla de concreto
Material Obtenido:	Gránulos de Poliestireno Expandido (EPS)
Procedencia:	Materia 100% reciclada
Observaciones:	El material obtenido proviene en su totalidad de materia reciclado obtenido de embalajes de electrodomésticos, repuestos y vasos o platos, se procedió a realizar la trituración con ayuda de una maquina trituradora de EPS diseñada por la alumna Griseldis de la maestría innovación y el maestro Pitol docente de la facultad de Ingeniería de la UAQ

