

Ing. Dulce Valeria Guzmán
Ortiz

Concreto Hidráulico Utilizando agregados de Reciclado de
Pavimento Asfáltico para un Pavimento Rígido

2020



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería

Concreto Hidráulico Utilizando Agregados de Reciclado de Pavimento Asfáltico para un Pavimento Rígido

Tesis

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

Presenta:

Ing. Dulce Valeria Guzmán Ortiz

Dirigido por:

Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza

C.U., Querétaro, Qro., septiembre 2020



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

Concreto Hidráulico Utilizando Agregados de Reciclado de Pavimento
Asfáltico para un Pavimento Rígido

Opción de titulación

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de
Maestría en Ingeniería

Presenta:

Ing. Dulce Valeria Guzmán Ortiz

Dirigido por:

Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza

Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza

Presidente

Dr. Jaime Moisés Horta Rangel

Secretario

Dra. María de la Luz Pérez Rea

Vocal

Dr. Saúl Antonio Obregón Biosca

Suplente

Dra. Teresa López Lara

Suplente

Centro Universitario

Querétaro, Qro.

Fecha: septiembre 2020

RESUMEN

En el territorio mexicano, existe un grave problema sobre las vialidades por el incremento de tránsito en intensidad y frecuencia disminuyendo el confort, serviciabilidad y seguridad de los usuarios, así mismo, la rehabilitación de las carreteras consume muchos recursos naturales. Una de las técnicas utilizadas a nivel mundial para reducir el consumo de estos recursos es la utilización del agregado de reciclado de pavimento asfáltico conocido también como *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP, por sus siglas en inglés). Por lo anterior, al emplear materiales reciclados de la estructura de un pavimento, se abren posibilidades para su uso, generando que los desechos de RAP sean aplicables a vialidades, y a su vez dicho proceso pueda ser realizado en planta o en sitio. El objetivo de esta investigación es reutilizar los agregados finos de RAP implementando la separación de impregnación del material asfáltico empleando la Máquina de Desgaste de Los Ángeles para la **fabricación de concreto hidráulico** de los pavimentos rígidos. Mediante el ensaye de resistencia a la tensión indirecta en cilindros de concreto se evaluó el desempeño de los agregados en conjunto, y no solamente dando uso de agregados RAP, sino que trabaja de manera similar que los agregados vírgenes de arena. Incrementando un 7.3 % la resistencia promedio a la tensión indirecta generando una mejora en el concreto. Con ello, se busca reducir el consumo de recursos naturales, acercarse a su vida útil reutilizando los agregados ya existentes, RAP, una vez que han cumplido su vida útil.

Palabras Clave: agregados, RAP, resistencia, tensión indirecta, concreto hidráulico.

SUMMARY

In the Mexican territory, there is a serious problem about the roads due to the increase of traffic in intensity and frequency, decreasing the comfort, serviceability and safety of the users, likewise, the rehabilitation of the same consumes many natural resources. One of the techniques used worldwide to reduce the consumption of these resources is the use of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP). The use of recycled materials from a pavement structure opens up possibilities for its use, generating RAP waste that can be applied to roads, and this process can be carried out in plant or on site. The objective of this research is to reuse the fine aggregates of RAP by implementing the separation of impregnation of the asphalt material using the Los Angeles Wearing Machine for the manufacture in the hydraulic concrete layer of the rigid pavements. By testing the indirect tensile strength in concrete cylinders, the performance of the aggregates as a whole was evaluated, and not only using RAP aggregates, but also working in a similar way as virgin sand aggregate. Increasing the average indirect tensile strength by 7.3% resulted in an improvement in the concrete. With this, we seek to reduce the consumption of natural resources, approaching its useful life by reusing the already existing aggregates, RAP, once they have completed their useful life.

Keywords: aggregates, RAP, resistance, indirect tension, hydraulic concrete.

Dirección General de Bibliotecas de la UAQ

A mis padres que siempre me han guiado y apoyado en cada momento:

Jesús Guzmán Serrano
Ma. Francisca Ortiz López

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma de Querétaro, que me dio la oportunidad de alcanzar este sueño profesional de hacer una maestría en mi vida.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por financiar mi investigación tanto nacional como la pasantía en el extranjero.

Al grupo de Investigación Procesos Físicoquímicos Aplicados PFA, adscritos a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia, en Medellín, Colombia por abrirme las puertas para realizar mi estancia de movilidad académica.

A mis padres por ser la base y pilar de mi vida, con su comprensión, apoyo y amor incondicional me han apoyado en mis estudios y el objetivo logrado de concluir esta etapa también es suyo.

A mis hermanos, que con sus consejos inigualables siempre me han alentado para seguir adelante en todos los sentidos.

A Abraham Miranda, por ser mi complemento y apoyo incondicional en esta etapa, pero sobre todo en la vida.

Al Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza por el apoyo en la dirección de esta investigación, por su dedicación y entusiasmo de poder adquirir nuevos conocimientos.

A la Dra. María de la Luz Pérez Rea, por su enseñanza y conocimiento compartido, por la paciencia y motivación para lograr la culminación de esta investigación a tiempo.

Al Dr. Jaime Moisés Horta Rangel por su valioso conocimiento transmitido y sus comentarios contribuidos a esta investigación.

Al Dr. Saúl Antonio Obregón Biosca por el impulso de lograr una investigación de calidad y por el conocimiento transmitido durante las horas clases y a lo largo de la investigación.

A la Dra. Teresa López Lara por su asesoría y enseñanzas.

A la Dra. Gloria María Restrepo Vasquez por abrirme las puertas en la PFA de la Universidad de Antioquia para la realización de mi estancia de movilidad académica y por todo su apoyo durante esta.

Al Ing. Diego Alberto Giralda Posada por su aportación y apoyo durante mi estancia de movilidad académica que con sus conocimientos, dedicación y aportación a esta pudo ser posible concluir mi investigación.

Al grupo de laboratoristas de la empresa Pavimentar S.A de C.V., por poner a disposición lo necesario para realizar parte de esta investigación durante mi estancia de movilidad académica en Bello, Medellín, Colombia.

Finalmente, pero no por ello menos importante, a mis amigos Luis Ángel y Laura Martínez por creer en mí y motivarme con sus palabras, por el apoyo incondicional que recibí para alcanzar esta meta.

ÍNDICE

Capítulo	Página
SUMMARY	IV
AGRADECIMIENTOS	VI
ÍNDICE	VIII
ÍNDICE DE TABLAS	XI
ÍNDICE DE FIGURAS	XIII
1. INTRODUCCIÓN.....	8
1.1 ANTECEDENTES.....	8
1.2 JUSTIFICACIÓN.....	10
1.3 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	11
1.4 HIPÓTESIS	12
1.5 OBJETIVO	12
2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	13
2.1 TIPOS DE PAVIMENTOS.....	13
2.1.1 Pavimentos flexibles.....	13
2.1.2 Pavimento rígido	14
2.2 CONCRETO HIDRÁULICO.....	15
2.2.1 Cemento Portland.....	15
2.3 RECICLADO DE AGREGADOS	17
2.3.1 Reciclado de Pavimento Asfáltico (RAP).....	17
2.4 EFECTOS DE SOBRE CARGA EN LOS PAVIMENTOS	19
2.4.2 Deformaciones en los pavimentos rígidos.....	22
2.5 CONCRETO HIDRÁULICO UTILIZANDO RAP	23
2.6 COMPORTAMIENTO DE FIBRAS EN EL CONCRETO	27
2.6.1 Uso de fibras en el concreto	27

2.6.3	<i>Fibras aplicadas al concreto hidráulico</i>	28
2.7	OBTENCIÓN INDUSTRIAL DE AGREGADOS	30
2.7.1	<i>Productos empleados para la trituración</i>	30
2.7.2	<i>Proceso de cantera y su desarrollo</i>	32
2.7.3	<i>Selección de los equipos de trituración</i>	33
3.	CAPITULO 3. METODOLOGÍA	35
3.2.1	<i>Selección del material</i>	36
3.3	SEPARACIÓN DEL LIGANTE ASFÁLTICO	38
3.4	CARACTERIZACIÓN DE AGREGADOS	39
3.4.1	<i>Agregados Gruesos</i>	39
3.4.2	<i>Agregado Fino</i>	44
3.5	FABRICACIÓN DE MORTEROS	49
3.6	DISEÑO DE LA MEZCLA	49
10.	CORRECCIÓN POR HUMEDAD	52
3.7	MEDICIÓN DEL REVENIMIENTO	53
3.7	ELABORACIÓN DE ESPECÍMENES	54
3.9	EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE LA MEZCLA	55
3.9.1	<i>Resistencia a la compresión</i>	55
3.9.2	<i>Resistencia a la tensión</i>	56
	CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	58
4.1	AGREGADOS NATURALES Y RAP CO	60
4.1.1	<i>Granulometría</i>	60
4.2	OBTENCIÓN DEL MATERIAL ASFÁLTICO Y AGREGADO	60
4.3	CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS	64
4.4	DISEÑO DE LA MEZCLA	67
4.5	RESISTENCIAS A LA COMPRESIÓN Y TENSIÓN DE MORTEROS	67
4.5.1	RESISTENCIA MATERIAL 1	67
4.5.2	<i>Resistencias del Material 2</i>	68
4.6	RESISTENCIAS A LA COMPRESIÓN Y TENSIÓN DE CONCRETOS	70
4.6.1	<i>Resistencia a la compresión</i>	70

4.6.2 Resistencia a la tensión	71
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES	73
CAPÍTULO 6. REFERENCIAS	75

Dirección General de Bibliotecas de la UAQ

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla		Página
2.1	Granulometría admisible para el reciclado de pavimento asfáltico	19
2.2	Deterioros de pavimento flexible	21
2.3	Deterioros de pavimento rígido.....	22
2.4	Resumen de estudios realizados de concreto con RAP.....	27
2.5	Propiedades de diseño con fibras metálicas	29
3.1	Revenimientos recomendados para varios tipos de construcciones.....	50
3.2	Cantidad de agua para los diferentes tamaños máximos de agregado y el revenimiento	51
3.3	Selección de la relación agua / cemento	51
3.4.	Cantidad de grava en volumen.....	52
4.1	Caracterización de Material 1 MC	64
4.2	Material 1 RAP CO ₁	65
4.3	Material 1 RAP SL1	65
4.4	Material 1 RAP LAV1	65
4.5	Material 2 CO ₂	66
4.6	Material 2 SL2.....	66
4.7	Material 2 LAV2.....	67
4.8	Diseño de mezcla para concretos	67

4.9	Resultados de resistencias del Material 1.....	68
4.10	Resultado de resistencias del Material 2.....	69
4.11	Evolución de los concretos a compresión.....	70
4.12	Evolución de los concretos a tensión.....	71
4.13	Resumen de las resistencias a compression y tension de los concretos.....	72

Dirección General de Bibliotecas de la UAG

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura		Página
1.1	Porcentaje de vehículos sobrecargados a nivel nacional.....	11
2.1	Sección típica de un pavimento flexible.....	14
2.2	Sección típica de un pavimento rígido.....	15
2.3	Cemento Portland.....	16
2.4	Agregados Pétreos para el concreto hidráulico.....	16
2.5	Mejora Ambiental – Económica – Ingenieril (AEI) del reciclado.....	18
2.6	Representación de cargas en los pavimentos.	20
2.7	Esquema de programa experimental.....	26
2.8	Resultados de prueba a la compresión.....	29
2.9	Trituradoras por compression.....	31
2.10	Trituradoras cono y giratorias.....	31
2.11	Trituradoras de impacto.....	32
2.12	Proceso de cantera.....	33
3.1	Matriz de experimentación.....	35
3.2	Método de cuarteo.....	36
3.3	Proceso de cuarteo.....	37
3.4	Muestreo de materiales al tamaño de la muestra.....	37

3.5	Vista de máquina de Desgaste de Los Ángeles con RAP.....	38
3.6	Proceso de obtención de agregado LAV y SL	39
3.7	Ensayo de distribución granulométrica del agregado grueso.....	40
3.8	Ensayo de masa volumétrica del agregado grueso.....	41
3.9	Determinación del contenido de agua del agregado grueso.....	42
3.10	Ensayo de densidad y absorción del agregado grueso	43
3.11	Ensayo de distribución Granulométrica de Agregados Finos	44
3.12	Masa volumétrica compacta del agregado fino.....	46
3.13	Contenido de agua del agregado fino.....	47
3.14	Densidad y absorción del agregado fino.....	48
3.15	Fabricación de morteros.....	49
3.16	Medición del revenimiento en el concreto	53
3.17	Morteros de concreto.....	54
3.18	Ensayo de resistencia a la compresión de morteros	55
3.19	Ensayo de resistencia a la compresión de concretos	56
3.20	Resistencia a la tensión por compresión diametral en morteros	56
3.21	Resistencia a la tensión por compresión diametral en concretos	57
4.1	Diseño Experimental.....	59
4.2	Granulometría del material RAP en condición original.....	60
4.3	Curva Granulométrica del material RAP CO y RAP SL	61

4.4	Curva Granulométrica del material RAP CO y RAP LAV.....	61
4.5	Material RAP después de desgaste.	62
4.6	Resumen de distribución granulométrica de los agregados	63
4.7	Evolución de la resistencia a la compresión de los concretos	70
4.8	Evolución de resistencias a la tensión en concretos.....	71

Dirección General de Bibliotecas de la UAG

1. INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

El crecimiento de la población en los últimos años ha traído como consecuencia el aumento del parque vehicular de acuerdo con la base de datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2018), esto es una de las causas del deterioro de los pavimentos, lo cual ha ocasionado la construcción y rehabilitación de nuevas carreteras (Campos, 2017), así como el consumo de numerosos de recursos natural.

Según Rondón & Reyes (2015), los pavimentos están constituidos por un conjunto de capas superpuestas relativamente horizontales compuestas por distintos materiales; de manera general existen dos principales tipos, los pavimentos rígidos y los flexibles. Por un lado, los pavimentos rígidos están constituidos por una losa de concreto hidráulico, que distribuyen las cargas de los vehículos hacia las capas inferiores por medio de toda la superficie de la losa y las contiguas (Montejo 2002). Por otro lado, Montejo (2010) en su libro define a los pavimentos flexibles como una carpeta asfáltica constituida de agregados pétreos y ligante asfáltico la cual se apoya generalmente sobre dos capas no rígidas, la base y la subbase.

Dentro de la historia del pavimento, es importante mencionar que reciclar el pavimento no es algo novedoso, debido a que existen indicios de reciclaje de pavimento asfáltico cerca del año 1900 (Izaks *et al.*, 2015). Hacia la década de los 70, Newcomb *et al.* (2007) menciona que en derivación del aumento del costo del petróleo se dio la necesidad de reciclar los pavimentos asfálticos, sin embargo, para esa década no existía experiencia RAP, y debido a esto, prácticamente los pavimentos procesados con RAP eran desconocidos.

El pavimento flexible como bien ya se mencionó está formado de agregados pétreos y ligante asfáltico. Rodríguez *et al.* (2001) mencionan que el ligante asfáltico fue conocido cerca del año 2500 a.C. en Egipto, siendo México uno de los primeros países en trabajarlas hacia los años 70. Se han realizado investigaciones sobre los métodos de remoción en pavimentos flexibles, entre los que destacan el fresado y la escarificación (Fabela *et al.*, 1999).

En consecuencia, del crecimiento del territorio mexicano y el parque vehicular, es importante mencionar que mundialmente la reducción de los recursos de pavimentos flexibles se hace mediante el reciclado de pavimento asfáltico Reclaimed Asphalt Pavement (RAP). El RAP, según Isola *et al.* (2013), es el material recién fresado de un pavimento flexible durante la rehabilitación y construcción de éste. Por ejemplo, en Hong-Kong, He y Wong (2006), señalan que se importa asfalto del extranjero, y cada año se fresan cerca de 200,000 toneladas de mezcla asfáltica de las carreteras, los cuales pueden ser aprovechados en la construcción y/o rehabilitación de las mismas.

De acuerdo con Marini (2006), el RAP presenta ciertas ventajas, de acuerdo y estima una baja del 25% en costos, y 7000 toneladas por kilómetro recuperando de los pavimentos flexibles con métodos de reciclado. Delwar *et al.* (1997), realizaron uno de los primeros estudios sobre el uso del RAP en los pavimentos rígidos, donde investigaron la factibilidad de usar RAP como agregado en un concreto rígido. Martínez *et al.* (2013), indican que el concreto rígido a base de Cemento Portland (CPP), es el material más utilizado para construcciones en el mundo. Es de señalar que la presencia de la película de asfalto que cubre a los agregados de RAP ha sido reportada como el principal factor que reduce las propiedades del concreto hidráulico inclusivo con RAP (Singh *et al.*, 2017). Para ello, existen diferentes técnicas para la separación del agregado producto de RAP y el ligante asfáltico, los cuales son: Destilación y Rotavapor.

Según Zollo (1997), existen estudios realizados al concreto hidráulico desde los años 60, conociéndose con el nombre de Fiber Reinforced Concrete (FRC). Por un lado, en los estudios de Singh *et al.* (2017), mediante el método de Abrasión y Desgaste, se mejora el comportamiento del RAP con concreto hidráulico, incrementando la resistencia a la compresión del concreto en un 9.74%, la tensión en un 20.66% y a la flexión en un 6.05% en comparación con el empleo de concreto inclusivo lavado (WRAP) y sucio (DRAP). Por otro lado, se ha encontrado que las fibras añadidas al concreto optimizan la resistencia a la tensión, fatiga, al impacto y abrasión (Zollo, 1997). Así mismo, investigaciones muestran que la adición de pequeñas de fibras de PET al concreto, aumenta la resistencia y retarda el

agrietamiento, puesto que la geometría que tienen las fibras ayuda a ligar el concreto con sus secciones fisuradas (Foti, 2011).

Los estudios de Mendoza *et al.* (2011) indican que las fibras de polipropileno adicionadas en diferentes contenidos al concreto incrementan la resistencia a la compresión. Hoyos *et al.* (2015) concluyen que se limita la rigidez al 4 % tratado con RAP, y sugiere que se estudien más a fondo las dosificaciones de distintas fibras al cemento Portland con RAP.

1.2 JUSTIFICACIÓN

La Federación Europea de Carreteras, 2009 (ERF, por sus siglas en inglés) define a las carreteras sustentables como aquellas que son eficaces y eficientemente planeadas, diseñadas, construidas, modernizadas y conservadas, a través de políticas integradas con respecto al medio ambiente y conservan el beneficio socio-económico esperado en términos de movilidad y seguridad.

En la actualidad, existe la necesidad de reutilizar el RAP debido a que se generan altos contenidos de recursos por reconstrucción o rehabilitación de carreteras (Okafor, 2010), así mismo, en los últimos años en los países desarrollados se ha implementado la reutilización de materiales reciclados con el fin de implementar uno de los tantos temas ambientales, tal es el caso del uso del RAP que ha sido originado por la European Asphalt Pavement Association (EAPA).

Dentro de la necesidad de realizar la presente investigación se encuentra conocer la vialidad, confiabilidad y metodología de separación del material RAP verificando el comportamiento de la mezcla con agregado de RAP y concreto hidráulico. Es necesario conocer los valores de Módulo de Ruptura, MR, para materiales que serán utilizados para un pavimento rígido, por lo que se harán pruebas de Resistencia a la tensión directa y Resistencia a la flexión para correlacionar los datos con el MR, debido a que existen pocas investigaciones pero que se correlacionan que los valores de resistencias del concreto disminuye con el agregado RAP, surge la necesidad de evaluar el desempeño de la mezcla implementando la separación del ligante asfáltico por medio de la Máquina de Desgaste de Los Ángeles, llevando a cabo una

metodología adecuada para que pueda marcar la pauta y control de calidad debido a que no se cuenta con alguna normativa para la evaluación del mismo.

1.3 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

En México se cuentan con 169, 078 km de carreteras pavimentadas según datos recabados por la Secretaria de Comunicaciones y Transporte (SCT), el Instituto Mexicano del Transporte (IMT) y el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Por un lado, desde la década de 1960, la Ley de Vías Generales de Comunicación (LVGC) regula el peso y dimensiones de los vehículos de carga en México. Por otro lado, en 1992 el Instituto Mexicano del Transporte (IMT) publicó el primer estudio de pesos y dimensiones de los vehículos de carga con el fin de conocer estos, y posteriormente Gutiérrez *et al.* (2017) a fin de analizar el porcentaje de vehículos sobrecargados instalaron estaciones a nivel nacional (ver Figura 1.1), de los datos expuestos, se concluye que en consecuencia al aumento de la sobrecarga de los vehículos incrementan los esfuerzos que se distribuyen en los pavimentos, lo cual, ocasiona uno de los tantos temas de deformaciones y deterioros de pavimentos.

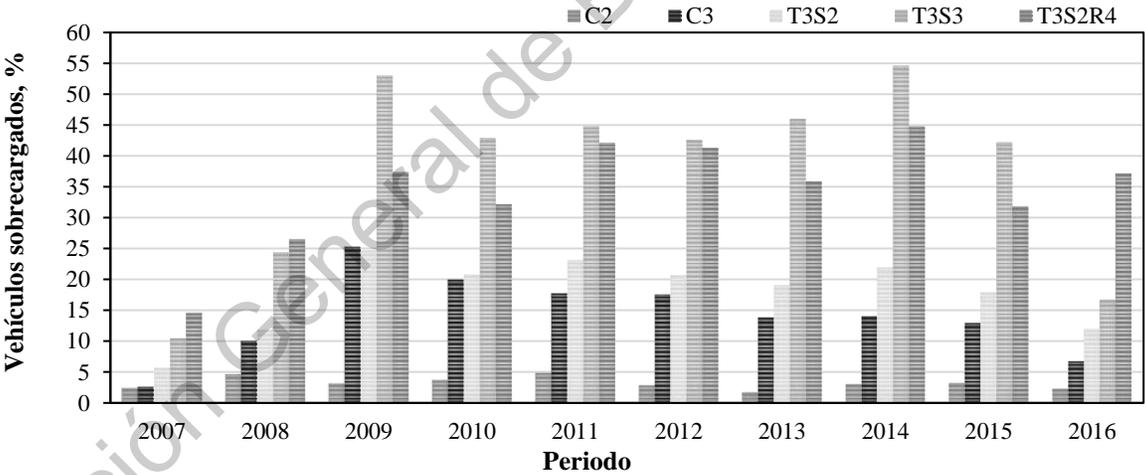


Figura 1.1 Porcentaje de vehículos sobrecargados a nivel nacional

Fuente: Elaboración propia a partir de Gutiérrez *et al.* (2017)

Además, el aumento de la práctica de rehabilitación o construcción de carreteras, se debe a lo expuesto en el párrafo anterior, esto implica la utilización de una gran cantidad de agregados (gravas y arenas) con características adecuadas a fin de mejorar y cumplir con lo

especificado para los pavimentos y bases. Esto ha traído consecuencias de degradación al medio ambiente, debido a la explotación de bancos de materiales; que, además, al ya no ser usados, en ocasiones son rellenos con basura o en ocasiones con materiales peligrosos. Así mismo, se genera gran cantidad de producto del reciclado de pavimento asfáltico conocido también como *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP), por sus siglas en inglés, procedentes de proyectos de reconstrucción de carreteras, el cual lo toman como material de desecho. En México no es usual usar el reciclado de pavimento asfáltico (RAP) en la construcción de carreteras, debido a la falta de conocimiento de las propiedades de dichos materiales. Una de las posibles maneras de ampliar el uso del reciclado de la carpeta asfáltica (RAP) sería incorporar el agregado en el cemento portland (Okafor, 2010). Por otro lado, aprovechar el reciclado de pavimento asfáltico (RAP) reduce significativamente la explotación de los recursos naturales, ahorros energéticos y fondos económicos necesarios para la rehabilitación o construcción de las carreteras. En consecuencia, a lo anterior y al material desecho producto de RAP, la presente investigación pretende reutilizar el agregado RAP con el fin de disminuir la explotación de los recursos naturales, aprovechar el material RAP como agregado en el concreto hidráulico brindando una aportación a la sostenibilidad de las carreteras incrementando la resistencia a la tensión de un pavimento rígido.

1.4 HIPÓTESIS

El Reciclado de Pavimento Asfáltico como agregado para el concreto hidráulico de un pavimento rígido incrementará su resistencia a la tensión.

1.5 OBJETIVO

Incrementar la resistencia a la tensión del concreto hidráulico de un pavimento con agregados del Reciclado de Pavimento Asfáltico.

2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

El presente capítulo acopia conocimientos que fueron obtenidos preliminarmente al estudio experimental para efectuar en esta investigación. En primera instancia se presenta la estructura de una carretera, sus características y los efectos de las cargas en estos. En segunda instancia, se presenta publicaciones que hablan sobre el Reciclado de Pavimento Asfáltico (RAP) y el cemento hidráulico que es el material conglomerante utilizado, así como la utilización de materiales reciclados de otra índole utilizados en el concreto hidráulico.

2.1 TIPOS DE PAVIMENTOS

Por un lado, Rondón & Reyes (2015) definen al pavimento como un conjunto de capas superpuestas horizontalmente, que han de resistir adecuadamente los esfuerzos que transmiten las cargas a la superficie de rodadura por las sollicitaciones del tráfico, de modo que esta, sea cómoda y segura para los usuarios. Por otro lado, Montejo *et al.* (2010) mencionan que en existen dos tipos principales de pavimento conformado por la superficie de rodadura flexible o rígida.

2.1.1 Pavimentos flexibles

Los pavimentos flexibles o asfálticos según Montejo *et al.* (2010) están conformados por una serie de capas constituidas por materiales adecuados, la parte superior del pavimento está conformado de una carpeta asfáltica que proporciona la superficie de rodamiento, una superficie uniforme y estable al tránsito transmitiendo las cargas a las capas inferiores, y esta resistir los efectos abrasivos del tránsito (Figura 2.1).

La carpeta asfáltica de un pavimento flexible se construye con ligante asfáltico, mezclas de arena y asfalto o por tratamientos superficiales de riegos bituminosos. La capa base se compone generalmente de agregados que se han tratado o no con cemento portland, asfalto, cal u otros estabilizantes.



Figura 2.1 Sección típica de un pavimento flexible

Fuente: Elaboración propia a partir del Catálogo de Secciones Estructurales de Pavimentos para las Carreteras de la República Mexicana (SCT)

2.1.2 Pavimento rígido

Los pavimentos rígidos según Montejo *et al.* (2010) están constituidos por una losa de concreto hidráulico, distribuyendo las cargas de los vehículos hacia las capas inferiores por medio de toda la superficie de la losa y las adyacentes. La capacidad estructural de un pavimento rígido depende de la resistencia de las losas y, por lo tanto, el apoyo de las capas subyacentes ejerce poca influencia en el diseño del espesor del pavimento. La sección transversal de un pavimento rígido está constituida por la losa de concreto hidráulico, y la base hidráulica, que se construyen sobre la subrasante y el terraplén (Figura 2.2).

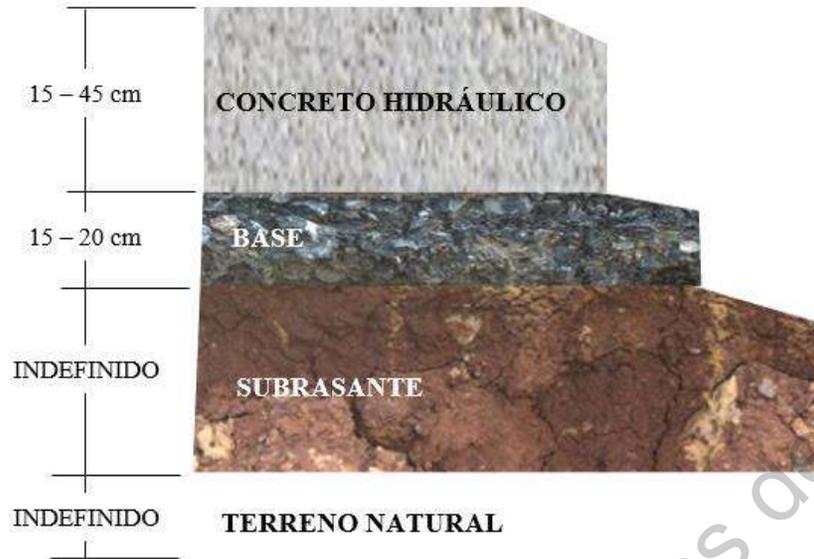


Figura 2.2 Sección típica de un pavimento rígido

Fuente: Elaboración propia a partir del Catálogo de Secciones Estructurales de Pavimentos para las Carreteras de la República Mexicana (SCT)

2.2 CONCRETO HIDRÁULICO

Con base a la Norma Mexicana de Calidad del Concreto Hidráulico (N.CMT.2.02/005, 2004) existen tres elementos importantes que deben ser considerados al establecer el concreto hidráulico, Cemento Portland, Agregado Pétreo, agua y en ocasiones aditivos, para formar mezclas moldeables que al fraguar forman un elemento rígido y resistente con el que se puede formar el pavimento rígido, los cuales los define de la siguiente manera:

2.2.1 Cemento Portland

De acuerdo a la Norma Mexicana (N.CMT.02.02.001, 2002) el Cemento Pórtland (Figura 2.3) es un conglomerante con propiedades de cohesión y adherencia que al ser hidratado se solidifica y endurece, estas permiten unir fragmentos entre sí para formar un todo con resistencia y durabilidad adecuada.



Figura 2.3 Cemento Portland

Fuente: Elaboración propia

2.2.1.1 Agregados pétreos

Los agregados pétreos (Figura 2.4) contribuyen a la estabilidad mecánica, soportan la carga del tráfico y al mismo tiempo transmiten la carga a la base hidráulica. Desde el punto de vista de su tamaño, los agregados se clasifican en agregado fino y agregado grueso. (Neville, 1999). Según la Norma Mexicana (N.CMT.02.002, 2002), por un lado, el agregado fino es arena natural obtenida mediante trituración y cribado con tamaño de partícula que van desde 4.75 mm hasta mayores a 75 μm , por otro lado, el agregado grueso es grava seleccionada o triturada con partículas son mayores a 4.75 mm hasta 3".



Figura 2.4 Agregados Pétreos para el concreto hidráulico

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con su masa volumétrica los agregados se dividen en diferentes clases, estas diferencias los hacen aptos para producir concreto con cierta variedad en la masa volumétrica (Alatorre & Uribe, 1998), así mismo, la norma mexicana, N·CMT·2·02·005/04 (2004) los define de la siguiente manera:

1. Concreto hidráulica clase 1: concreto cuya masa volumétrica en estado fresco está comprendida entre 2, 200 y 2, 400 kg/m³, que, al alcanzar su fraguado final, tendrá una resistencia a la compresión ($f'c$) de 250 kg/cm² o mayor.
2. Concreto hidráulica clase 2: concreto cuya masa volumétrica en estado fresco está comprendida entre 1, 800 y 2, 200 kg/m³, que, al alcanzar su fraguado final, tendrá una resistencia a la compresión ($f'c$) menor a 250 kg/cm².

2.3 RECICLADO DE AGREGADOS

Los materiales residuales provienen de la demolición, restauración, rehabilitación de construcciones de edificios, infraestructura y carreteras, los cuales son de materia inerte. En este trabajo se presenta especialmente el caso del RAP, obtenido y transportado al área de reciclaje. La mayor parte de estos residuos son llevados a vertederos o lugares establecidos, creando un impacto ambiental negativo, además de desechar materias que si se le diera un adecuado tratamiento y procesamiento podrían ser reutilizados.

Para lograr un material reciclado con propiedades de calidad de acuerdo a los especificado en las normas, es necesario implementar y desarrollar técnicas apropiadas para el proceso de obtención de los materiales a utilizar.

2.3.1 Reciclado de Pavimento Asfáltico (RAP)

Al implementar el uso del material RAP es posible reutilizar la capa de rodamiento, e incluso los materiales existentes en la estructura de pavimento, lo que representa: economía en el mantenimiento y rehabilitación de los pavimentos en servicio. Por ende, se reducen los acarrees, costos por explotación de bancos de materiales y recursos naturales. Lo cual concuerda con lo mencionado por Newcomb *et al.*, (2007) donde señala que los dos factores

principales que influyen a utilizar el RAP son los ahorros económicos y beneficios ambientales.

Con base en lo anterior, dicha alternativa de reciclaje comienza a incursionarse con mayor frecuencia en diferentes países del mundo, e incluso, ha alcanzado promoverse en gran medida por la European Asphalt Pavement Association (EAPA, 2016). En donde el hecho de implementar materiales reciclados, ha sido una de las tantas cuestiones ecológicas para concientizar a través de los últimos años. De la misma manera la Federal Highways Administration de los EE.UU. (Aschenbrener, 2013) describe en su conferencia que el reciclaje de pavimento propicia a una mejora Ambiental-Económica-Ingenieril (AEI) tal lo muestra la Figura 2.5. Es decir, 3E's Environmental, Economic, Engineering por sus siglas en inglés.



Figura 2.5 Mejora Ambiental – Económica – Ingenieril (AEI) del reciclado.

Fuente: Elaboración propia con base en Aschenbrener (2013).

Además, cabe señalar que, al utilizar los materiales reciclados de la estructura de pavimentos de los pavimentos existentes, se abre un amplio abanico de posibilidades para su uso. Los cuales, van de acuerdo a la aplicación o diseño final del material recuperado; éstos a su vez pueden ser clasificados de acuerdo a su temperatura, es decir pueden ser reciclados en frío o

en caliente, y a su vez realizar dicho proceso de reciclaje en planta o en sitio. Considerando que el proceso del RAP consiste en retirarlo de las carreteras con la técnica de fresado, dejando la superficie a reparar nivelada y uniforme a la profundidad requerida, que puede llegar hasta 25 cm por cada capa pasada o ciclo recorrido. Este tipo de reciclado de material está formado por el agregado y el recubrimiento del asfalto, resistente al desgaste y a la abrasión. Así mismo, los agregados producto de RAP presentan propiedades similares a las del concreto, pero con una absorción de agua menor y una densidad máxima de compactación mayor, así mismo, debe caracterizarse desde dos puntos de vista distintos. En la Tabla 2.1 se muestra la granulometría admisible para un pavimento con reciclado de pavimento asfáltico.

Tabla 2.1 Granulometría admisible para el reciclado de pavimento asfáltico

(mm)	Tamiz	U.S Estándar	Porcentaje que pasa
37.5		1 ½ "	100
25.0		1"	75 – 100
19.0		¾ "	65 – 100
9.5		3/8 "	45 – 75
4.75		No. 4	30 – 60
2.00		No. 10	20 – 45
0.43		No. 40	10 – 30
0.075		No. 200	5 - 20

Fuente: Elaboración propia

2.4 EFECTOS DE SOBRE CARGA EN LOS PAVIMENTOS

La aplicación de las sobrecargas como bien ya se había mencionado en el capítulo anterior, es una afectación que tiene como consecuencia las deformaciones en los pavimentos flexibles (Figura 2.6a) o en los pavimentos rígidos (Figura 2.6b) las cuales cuentan con distintas capas y sus cargas son distribuidas de diferente manera, véase Figura 2.6.

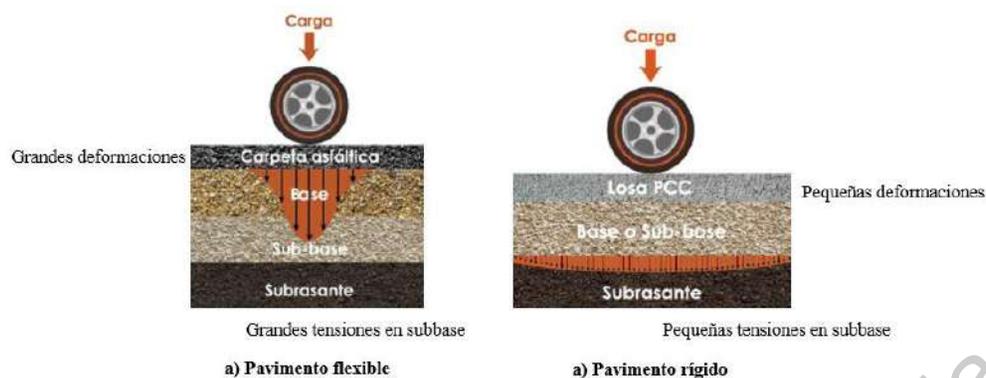


Figura 2.6 Representación de cargas en los pavimentos.

Fuente: Elaboración propia modificada a partir de www.cement.ca.

La diferencia de transmisión de cargas se debe a como se transmite a la subrasante. El pavimento flexible, debido al tipo de materiales con el que está construido la carpeta asfáltica y que son menos rígidos que el concreto hidráulico, da una mayor deformación a la subrasante, por lo tanto, distribuye las cargas en menos área de apoyo. Por lo contrario, debido a la rigidez de la losa de concreto hidráulico se comporta como una placa y esto le permite distribuir las cargas en un área mayor sobre la subrasante. Por lo tanto, el pavimento flexible requiere de más capas y mayores espesores para resistir así las cargas a la subrasante y el pavimento rígido manteniendo la carga en un espacio más amplio mantiene la misma presión en la subrasante.

2.4.1 Deformaciones en los pavimentos flexibles

Distress Identification Manual (DIM, 2014) y el Catálogo de Deterioros de Pavimentos Flexibles Iberoamericano (2002) coinciden que existen cinco diferentes grupos más relevantes para dividir los deterioros (ver Tabla 2.2).

Tabla 2.2 Deterioros de pavimento flexible

Deformación/ Característica	Ejemplo
<p>A.- AGIETAMIENTOS</p> <p>Fisuras interconectadas, generalmente ubicadas en zonas donde hay repeticiones de carga. Algunas causas son el espesor estructural insuficiente, deformaciones en la subrasante, rigidización de la mezcla asfáltica.</p>	
<p>B.- DESPRENDIMIENTOS</p> <p>Desprendimiento del agregado debido al ligante o agregado inadecuado, agregado sucio, compactación deficiente, envejecimiento del ligante, dosificación insuficiente del ligante, entre otras</p>	
<p>C.- DEFORMACIONES SUPERFICIALES</p> <p>Deformación por hundimiento transversal a lo largo de las roderas, elevación de áreas debido a falta de capacidad estructural, uso de ligante blando, exceso de ligante, compactación.</p>	
<p>D.- DETERIOROS SUPERFICIALES</p> <p>Presencia de alisamiento debido a la exudación del ligante o desgaste de los agregados causado por el exceso de ligante, derrame de solventes, uso de agregados susceptibles al pulimento, entre otros.</p>	

E.- DETERIOROS CONSTRUCTIVOS

Se producen debido al mal proceso constructivo, mostrándose como asentamientos localizados, grietas longitudinales o transversales.



Fuente: Elaboración propia a partir de DMI (2014)

2.4.2 Deformaciones en los pavimentos rígidos

De acuerdo con la DMI (2012) los pavimentos flexibles sufren deformaciones clasificados en 4 grupos: Agrietamientos, deficiencia en juntas, deterioros superficiales y otros criterios (ver Tabla 2.3).

Tabla 2.3 Deterioros de pavimento rígido

Deformación	Característica	Ejemplo
A.- AGRIETAMIENTOS		
Este deterioro se identifica por el rompimiento en esquinas, en forma de “D”, grietas longitudinales y transversales, algunas de las causas son falta de compactación en las capas inferiores.		
B. DEFICIENCIA EN JUNTAS		
Se producen debido a la falta de adherencia o cohesión, endurecimiento de los materiales		

D. DETERIOROS SUPERFICIALES

Grietas que se extienden sobre la superficie de la losa, deterioro de la parte superior del pavimento, algunas de las causas son mal proceso constructivo, agregados de mala calidad, diseño de mezcla inadecuado, entre otros.



E. OTROS CRITEIOS

Deterioros como levantamiento de la carpeta, falla de juntas transversales, hombro caído o separación del hombro de carril se deben en general al inadecuado proceso constructivo.



Fuente: Elaboración propia a partir de DMI (2014)

2.5 CONCRETO HIDRÁULICO UTILIZANDO RAP

Los estudios hechos por Delwar *et al.* (1997), Al-Oraimi *et al.* (2009), Okafor *et al.* (2010), Hossiney *et al.* (2012) han coincidido que la adición del ligante asfáltico al RAP reduce la resistencia de concreto.

Okafor *et al.* (2010) analizaron dos proporciones de 1:2:4 y 1:3:6 de cemento, arena y agregado RAP con relaciones de agua/cemento de 0.50, 0.60 y 0.70, estas mezclas las analizaron a compresión y flexión, teniendo como resultado que a medida que aumentan el contenido de agua/cemento la resistencia a la compresión disminuye en un 4.2 MPa y 1.5 MPa para la relación agua/cemento de 0.50 y 0.70. Concluyeron que la disminución de la resistencia comparadas con el concreto hidráulico patrón se debe a la debilidad de unión entre el concreto hidráulico y el ligante asfáltico adherido al agregado, así mismo, concluyen que el agregado RAP tiene menor gravedad específica y absorción de agua en comparación al agregado natural, eso se debe a la adherencia del ligante asfáltico, también mencionan que la

resistencia a la compresión que encontraron con agregado RAP fue de 25 MPa, y evidencian que el RAP es factible para usar en el concreto y puede convertirse viable para la generación de agregados de media y baja resistencia.

Al-Oraimi *et al.* (2009) llevaron por tema en su investigación Reciclado de Pavimento Asfáltico en concreto de Cemento Portland, hicieron dos mezclas de control con relación agua/cemento de 0.45 y 0.50 a evaluar a 28 días. Utilizaron fracción gruesa de RAP a diferentes porcentajes (25, 50, 75 y 100%).

Hossiney *et al.* (2012), investigaron la aportación de resistencia a la tensión, compresión, flexión y módulo elástico. Declararon que los materiales de pavimento de asfalto reciclado (RAP) se han utilizado en mezclas de pavimento de asfalto reciclado en Florida, lo que ha dado como resultado ahorros sustanciales en el costo y la conservación de los agregados y el asfalto. Sin embargo, con la adopción del método de diseño de mezcla Superpave es más riguroso en los últimos años, comentan que un porcentaje más pequeño de RAP está siendo usado ahora en las mezclas de asfalto reciclado. Esto ha dado como resultado un exceso de RAP que debe ser puesto en buen uso. Mencionan que el posible uso de RAP en pavimentos de concreto no sólo ayudaría a eliminar el exceso de RAP, sino que también podría proporcionar con un concreto que podría mejorar el rendimiento y la rentabilidad de nuestros productos. La hipótesis de su tema menciona que el uso de RAP como sustituto de los agregados en el concreto puede reducir el módulo elástico del concreto y, por lo tanto, reducir las tensiones inducidas por la carga y la temperatura en el concreto. Los porcentajes los evaluaron a 7, 14, 28 y 90 días, así mismo, el análisis de las tensiones máximas inducidas por la carga y la temperatura en pavimentos de concreto típicos lo realizaron utilizando el programa FEACONS IV en condiciones de carga críticas en Florida. El enfoque de su investigación se basó en una revisión literaria para caracterizar la granulometría del agregado a utilizar, así como, las propiedades del RAP, siguiendo con la selección del material RAP a utilizar, haciendo ensayos de viscosidad del ligante asfáltico y las propiedades de los agregados, su diseño de mezcla de concreto con RAP se basó en 4 porcentajes (20, 40, 70 y 100%), las cuales se realizaron a 7, 14, 28 y 90 días de acuerdo con las normas ASTM Y AASHTO se hicieron ensayos de resistencia a la compresión, resistencia a la tensión, módulo

de elasticidad, resistencia a la flexión, contracción de secado, coeficiente de expansión térmica. Concluyeron de su investigación que las propiedades del concreto con RAP a medida que aumentaba el porcentaje de RAP disminuían sus resistencias, así mismo, resalta que las tensiones máximas en el concreto de cemento Pórtland disminuyeron a medida que se aumentaba el contenido de RAP, indicando que el uso del RAP podría ser una alternativa para mejorar las propiedades en el pavimento de concreto.

Los estudios más recientes hechos por Fredigo *et al.* (2018) evaluaron el módulo de elasticidad de una mezcla tratada con cemento de reciclado de pavimento asfáltico y agregados triturados utilizando ensayos de tracción indirecta, triaxial y de flexión. En su primera etapa de estudio, hicieron una evaluación de RAP y agregado triturado que las ensayaron a resistencia a la compresión no confinada, resistencia a la tensión indirecta y módulo de elasticidad a la tensión indirecta. Las consideraciones tomadas fueron en referencia al contenido de RAP (20 y 50%), contenido de cemento (2, 4 y 6%) con un tiempo de curado de 3, 7 y 14 días, así mismo, la segunda etapa consistió en la evaluación de triaxiales y flexión, e hicieron una comparación con los módulos mediante esfuerzos confinados, en la Figura 2.7 se muestra el esquema de metodología para llevar a cabo.

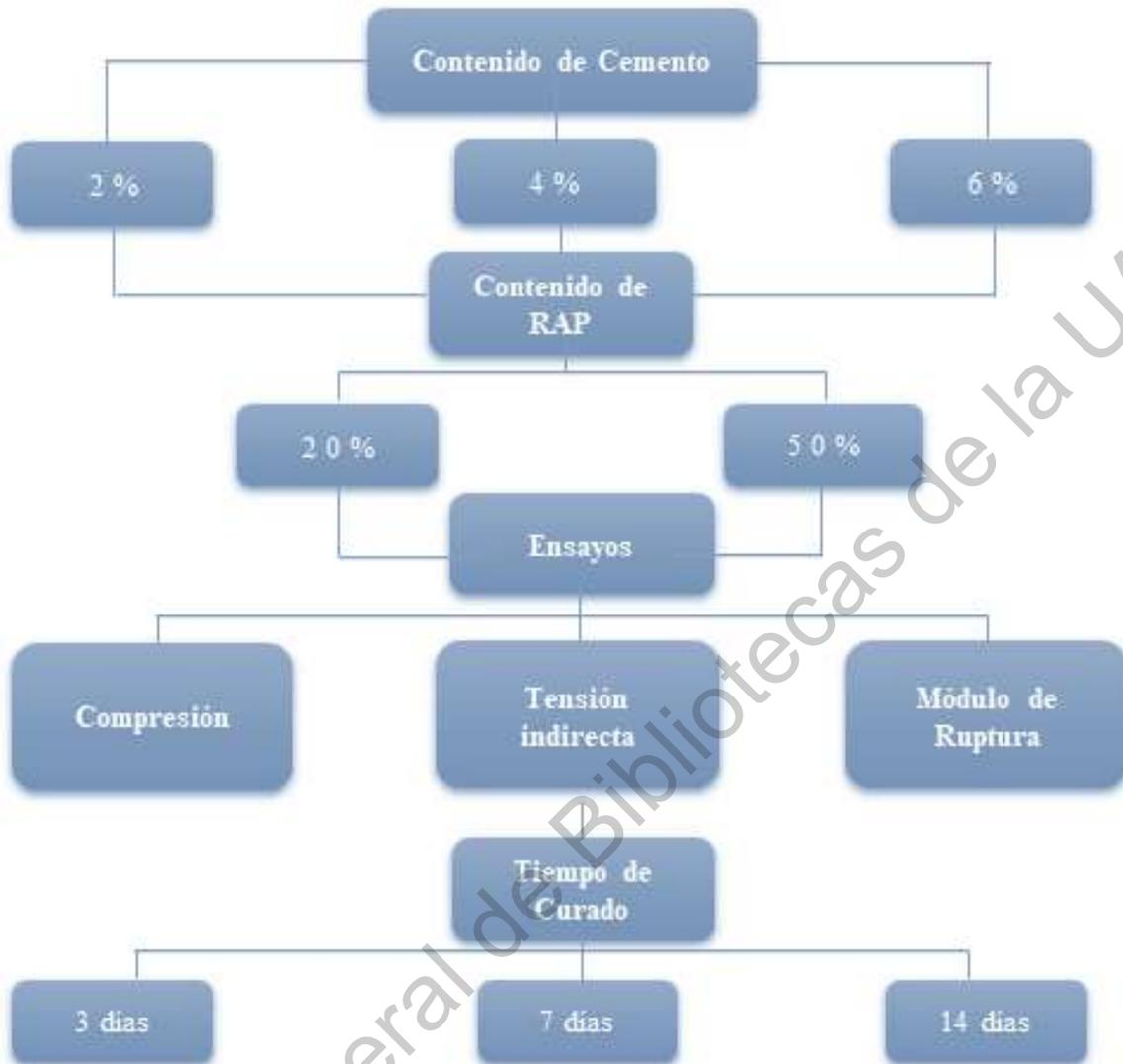


Figura 2.7 Esquema de programa experimental

Fuente: Elaboración propia a partir de Fredigo *et al.* (2018)

Los autores concluyeron que influye la disminución de resistencias debido al contenido de cemento que se le ponga, así mismo, la resistencia y rigidez aumentaron con el contenido de cemento logrado con contenido bajo de cemento (2 y 4%).

En relación al contenido de RAP mostraron que puede ser posible la utilización de RAP para producir base rígida, incluso cuando haya un contenido de RAP del %, tomando en cuenta el esfuerzo de compactación para aumentar la resistencia y capacidad de carga, compensando un menor uso de cemento con ahorro y ventajas de construcción.

Tabla 2.4 Resumen de estudios realizados de concreto con RAP

Autor	Ensayos	Características y Conclusiones
Al-Orami <i>et al.</i> (2009)	Resistencia a la compresión, resistencia a la flexión, módulo de elasticidad, durabilidad,	RAP grueso a 25, 50, 75 y 100% Disminución de las resistencias debido al ligante asfáltico. Superficie no afectada por RAP Limitación de RAP de acuerdo a la aplicación.
Okafor <i>et al.</i> (2010)	Resistencia a la compresión, resistencia a la flexión, módulo de elasticidad	Menor gravedad específica y absorción Resistencia a la compresión de 25 MPa Disminución de las resistencias debido al ligante asfáltico
Hossiney <i>et al.</i> (2012)	Resistencia a la compresión, resistencia a la flexión, módulo de elasticidad	A mayor porcentaje de RAP, menor resistencia. Factibilidad de usar RAP Disminución de las resistencias debido al ligante asfáltico Influencia del cemento a medida que disminuye con la adición del RAP
Fredigo <i>et al.</i> (2018)	Resistencia a la compresión, resistencia a la flexión, módulo de elasticidad	Compactación mayor para aumentar resistencia del RAP Ahorro y ventajas en construcción Disminución de las resistencias debido al ligante asfáltico

Fuente: Elaboración propia

2.6 COMPORTAMIENTO DE FIBRAS EN EL CONCRETO

2.6.1 Uso de fibras en el concreto

El uso de fibras en el concreto ayuda a asumir esfuerzos de tensión confiriendo una menor fisuración al elemento aplicado. Así mismo, las fibras como refuerzo se pueden clasificar por dos tipos: por su material (fibras metálicas, fibras sintéticas, fibras de vidrio o fibras naturales) y por su funcionalidad, geometría y dosificación (microfibras y macrofibras).

2.6.2 Tipo de fibras

Las microfibras evitan la fisuración en estado fresco del concreto dosificándose en cantidades pequeñas pero que a su vez son eficientes para evitar la fisuración del concreto. Las macrofibras previenen la fisuración en estado endurecido, éstas al incluirlas al concreto tienen la finalidad de incrementar la tenacidad del material, siendo que el material soporte cargas antes de que se colapse. Un ejemplo es tomar los extremos de una liga con dos dedos de cada mano y tensionarla, cada vez que se estira más la liga tendrá una tensión mayor, pero con una deformación mayor, así el nivel de esfuerzo interno al momento de que falla la liga es más bajo, pero la deformación sigue siendo más grande, por lo que las fibras son capaces de “absorber” enormes cantidades de energía.

Por un lado, el comportamiento de las fibras dependerá del tipo de fibra a utilizar, por otro lado, dependerá de las propiedades y forma en que las cargas se transmiten a la fibra por medio de matriz. Es importante mencionar que la adhesión entre el material a utilizar y la fibra sea de suficiente atracción para soportar los esfuerzos de tracción. Por otro lado, la influencia que tiene la orientación de las fibras dependerá de la disposición, concentración y distribución puesto que influirá radicalmente en las propiedades del material que se va a reforzar. Existen diferentes características de la fibra las cuales están dadas por resistencia a la tensión mayor, capacidad de resistir deformaciones, módulo de elasticidad alta para aumentar el soporte de un elemento bajo carga, adherencia adecuada con el material a analizar, entre otras características.

2.6.3 Fibras aplicadas al concreto hidráulico

Hoyos (2011) presenta la caracterización de un concreto tratado con fibra de vidrio y RAP donde los resultados a compresión (ver Figura 2.8) incrementan a medida que el porcentaje de dosificación aumenta, así mismo se puede hacer una comparación entre el RAP y el RAP con fibra los cuales en relación a sus resultados son similares. Por otro lado, al evaluar el módulo de elasticidad se dio cuenta que la inclusión de las fibras tuvo un efecto positivo en el cemento-RAP aumentando su módulo elástico. Concluyen que en general la utilización de RAP tratado con fibras de vidrio es factible para utilizarlos en base y subbase.

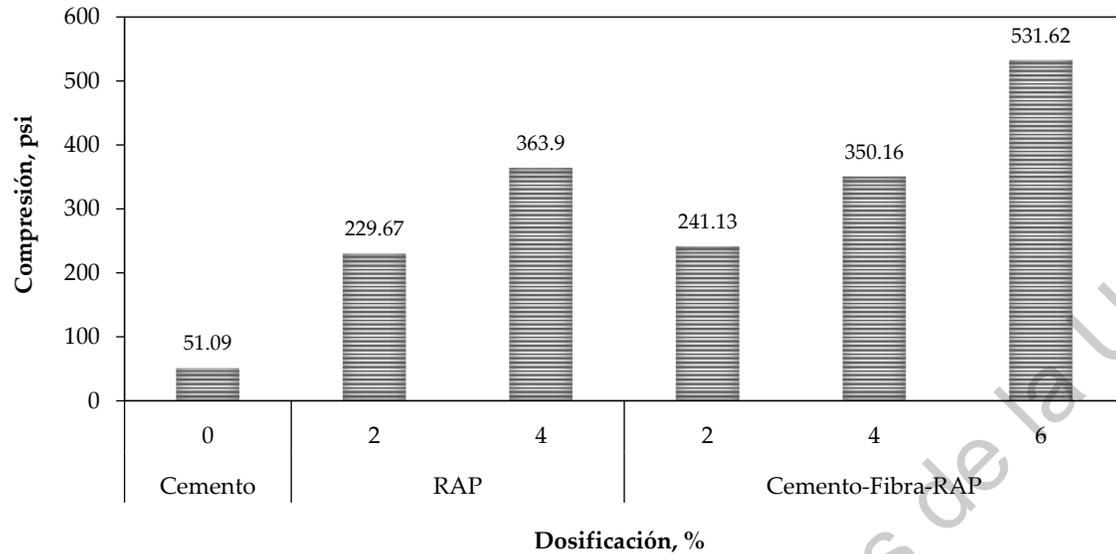


Figura 2.8 Resultados de prueba a la compresión

Fuente: Elaboración propia a partir de Hoyos *et al.* (2011)

Karen (2017) estudio las propiedades mecánicas del concreto reforzado con fibras metálicas, menciona que las fibras de acero cosen las fisuras del concreto formando un puente entre los agregados gruesos permitiendo una formación controlada de las fisuras, siendo el comportamiento del concreto dúctil después de la fisuración inicial. En la Tabla 2.5 se muestra las propiedades de diseño para elaboración de los concretos reforzados con fibras.

Tabla 2. 5 Propiedades de diseño con fibras metálicas

Componentes de la mezcla	Tamaño máximo del agregado		
	10 mm	20 mm	40 mm
Cemento	350 - 600	300 - 530	280 - 415
Agua/Cemento	0.35 - 0.45	0.35 - 0.50	0.35 - 0.55
% de agregado fino	45 - 60	45 - 55	40 - 55
% de contenido de aire	4.0 - 8.0	4.0 - 6.0	4.0 - 5.0
% Contenido de fibras deformadas	0.40 - 1.0	0.30 - 0.80	0.20 - 0.70
Fibras lisas	0.80 - 2.0	0.60 - 1.60	0.40 - 1.40

Fuente: Elaboración a partir de Karen 2017

El uso del ligante asfáltico de la película de RAP no ha tenido investigaciones y los resultados expuestos en varios de los autores anteriores exponen que es el ligante el que disminuye las resistencias. Tomando como referencia estos factores, en este estudio se pretende analizar que el refuerzo separado del agregado RAP podría funcionar como fibra debido a que se harán pequeñas partículas y podría ser una factibilidad para utilizarlo en base y así aumentar su resistencia del concreto hidráulico. Concluyó que las fibras metálicas aumentan la resistencia a la flexión, sin embargo, se mantienen casi constantes comparando con la resistencia a la compresión, así mismo menciona que es un soporte tradicional a altos esfuerzos.

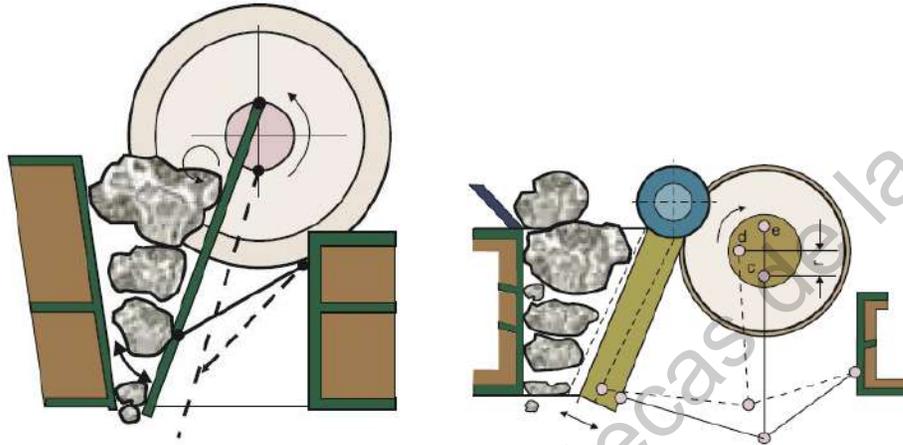
2.7 OBTENCIÓN INDUSTRIAL DE AGREGADOS

De acuerdo con el Manual de trituración y cribado (Metso), la roca es el recurso natural más usado en el mundo. Los agregados principales son la roca triturada y la grava y arena, ya que estos son los principales ingredientes de un pavimento asfáltico e hidráulico para llevar a cabo la obtención de estos agregados es necesario la explotación de canteras, a continuación, se enlistan los productos empleados para llevar el proceso de trituración de la roca para la obtención de los agregados.

2.7.1 Productos empleados para la trituración

1. **Alimentadores**, son diseñados para absorber el impacto, la carga de materiales y eliminación de finos.
2. **Trituradoras primarias**, son diseñadas para trituración primaria de alta capacidad en aplicación de roca dura.
3. **Trituración de mandíbulas**, es la triturado mayor empleada debido a su alta tasa de reducción del producto y diseñado para servicio pesado.
4. **Trituradora de cono**, diseñada para trituración, primaria, secundaria, terciaria y cuaternaria.
5. **Trituradoras de impacto**. Trituración primaria y secundaria, elevadas tasas de reducción que pueden suprimir la etapa terciaria.
6. **Trituradoras por compresión**.

- a. Mandíbulas. Se usan principalmente como trituradoras primarias, su objetivo es poder transportar el material por las bandas transportadoras para su siguiente proceso. Existe dos tipos de trituradoras por mandíbulas que es Figura 2.9 a y Figura 2.9 b.



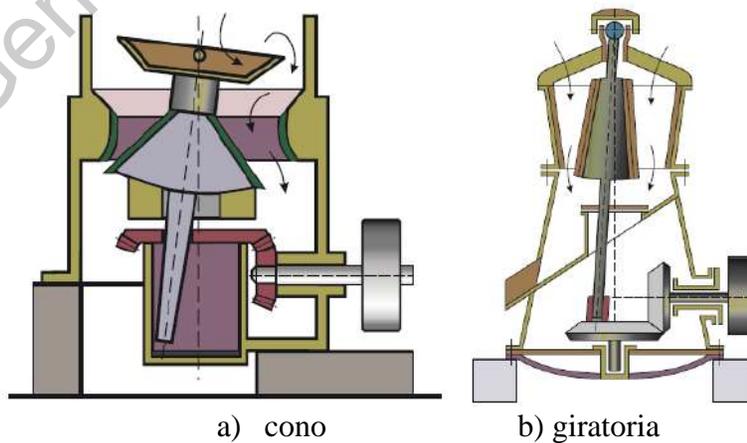
a) Trituradora efecto simple

b) Trituradora efecto doble

Figura 2.9 Trituradoras por compresión

Fuente: Metso 2019

- b. De cono y giratorias. El material es triturado entre un elemento fijo y un interior móvil. La fragmentación ocurre de la compresión continua que existe entre los forros en un menor desgaste. En la Figura 2.10 a) y Figura 2.10 b) se pueden observar los tipos de trituradoras de cono y giratorias.



a) cono

b) giratoria

Figura 2.10 Trituradoras cono y giratorias

Fuente: Metso 2019

7. **Trituradoras de impacto.** Los dos tipos principales (trituradoras de impactos de eje horizontal y de eje vertical) se caracterizan por una elevada tasa de reducción y por la propiedad de dar forma cúbica al producto. Estas trituradoras también pueden usarse para trituración selectiva. Existen dos tipos de trituradoras de impacto los cuales se pueden ver en la Figura 2.11 a) y Figura 2.12 b).

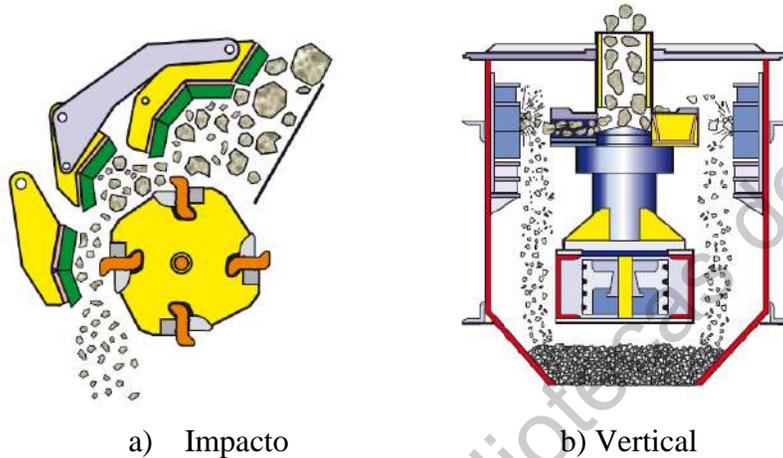


Figura 2.11 Trituradoras de impacto

Fuente: Metso 2019

8. **Cribas fijas.** Amplia gama de cribado para precibado, cribado en circuito cerrado, clasificación final y drenaje.
9. **Lavado de arena y grava.** Para producir materiales de roca de calidad especial para proyectos de construcción exigentes.

2.7.2 Proceso de cantera y su desarrollo

Las principales acciones en la explotación de canteras son: perforación, voladura, manipulación de bloques, trituración y cribado, carga de material y transporte como se puede observar en la Figura 2.11.

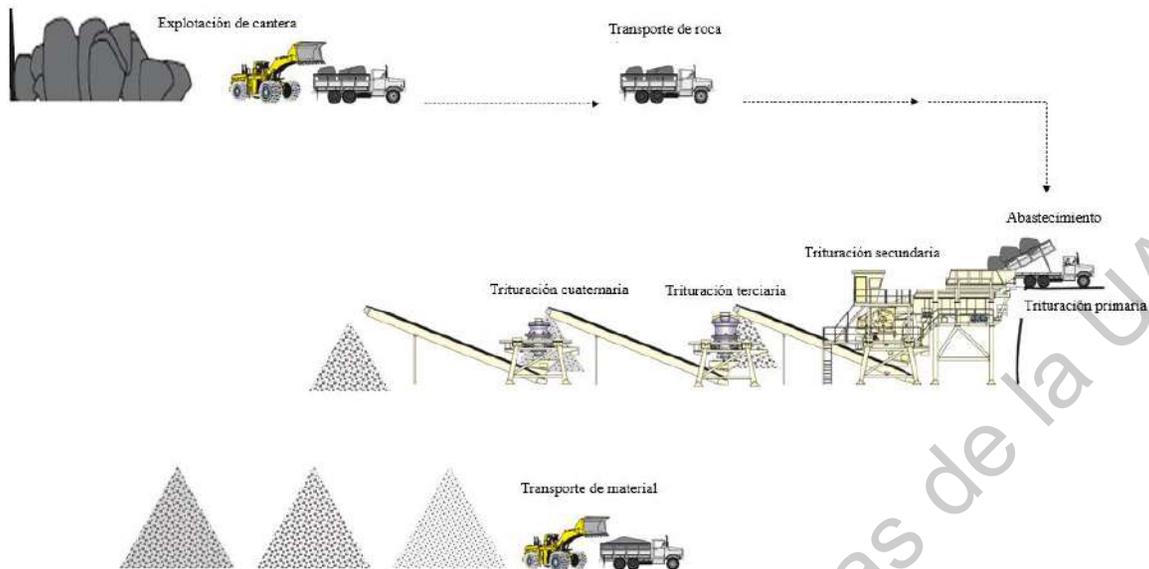


Figura 2.12 Proceso de cantera

Fuente: Modificada a partir de Metso 2019

2.7.3 Selección de los equipos de trituración

2.7.3.1 Trituración primaria

El propósito de la trituración primaria es reducir el material a un tamaño que permita su transporte en cintas transportadoras. En la mayor parte de las instalaciones productoras de áridos, la trituración primaria se hace con una trituradora de mandíbulas. Plantas con capacidades muy elevadas usan normalmente una trituradora giratoria primaria. Cuando el material es fácil de triturar y no muy abrasivo, una trituradora de impactos puede ser la mejor solución para la trituración primaria.

2.7.3.2 Trituración secundaria

El propósito de la trituración intermedia es producir varios productos gruesos. En la mayoría de los casos, el objetivo es obtener la mayor reducción posible con los menores costes. Debido a su alta capacidad y bajos costes de operación, es muy frecuente el uso de trituradoras de cono para trituración intermedia.

2.7.3.3 Trituración terciaria: fina y cubicidad

Estas etapas del proceso de trituración determinan la calidad del producto final. Las especificaciones de calidad son exactas para los productos finales, especialmente en la industria de agregados. Los dos tipos principales para esta etapa son la trituradora de cono y trituradora de impacto.

Dirección General de Bibliotecas de la UAQ

CAPITULO 3. METODOLOGÍA

Este capítulo presenta los materiales que se utilizaron en la investigación de este estudio y la caracterización del mismo (reciclado de pavimento asfáltico), también los ensayos correspondientes para conocer los parámetros de mayor importancia en los mismos. De igual manera exponer el procedimiento de preparación, fabricación de las diferentes muestras, así como los ensayos realizados para conocer el comportamiento mecánico y explicar el fin de cada uno de ellos.

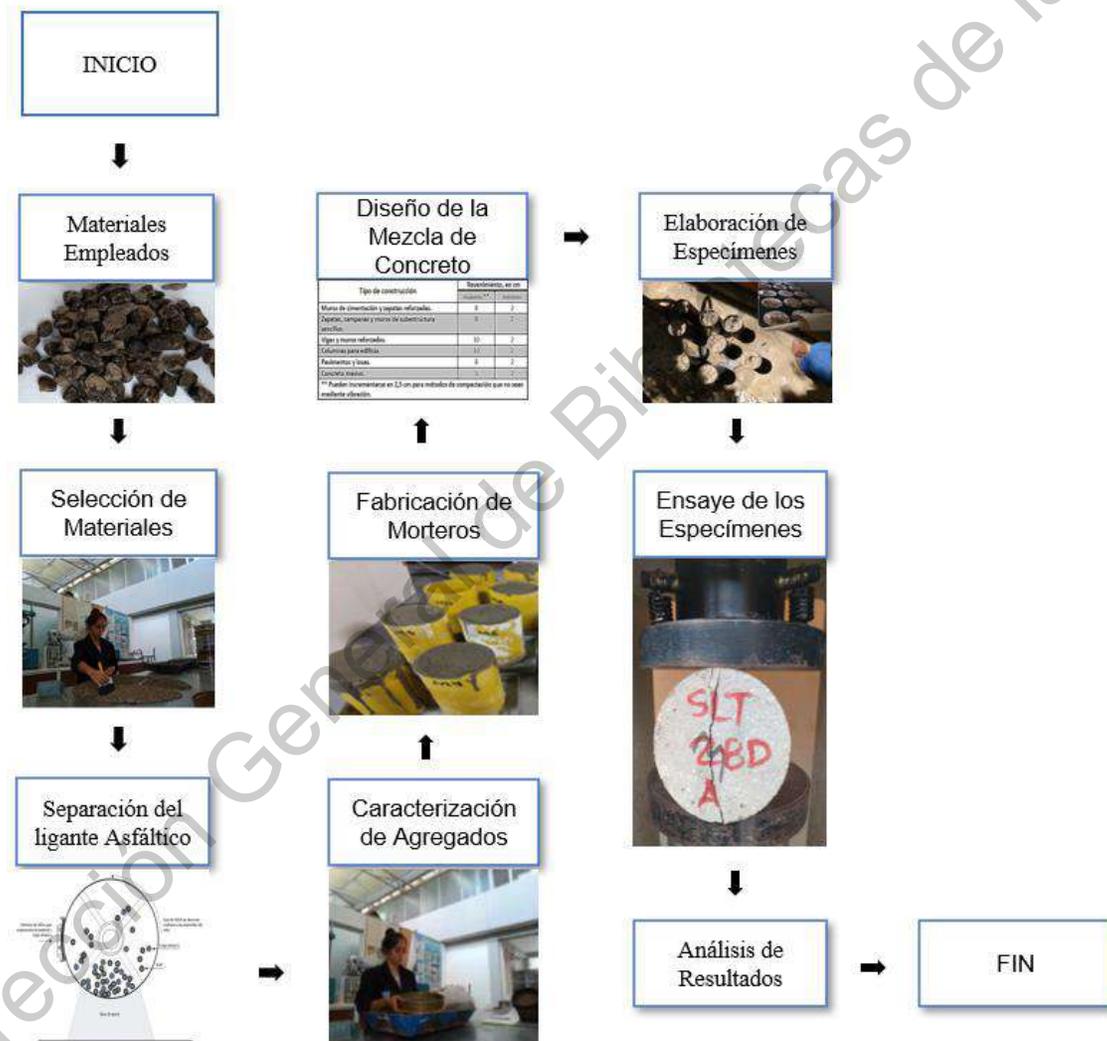


Figura 3. 1 Matriz de experimentación
Fuente: Elaboración propia

3.1 MATERIALES EMPLEADOS

Los materiales empleados para la elaboración de concreto son los que comúnmente se utilizan en la fabricación de concreto hidráulico: arena, grava y Cemento Portland ordinario. Para la obtención de los agregados pétreos (arena y grava) se realizó una búsqueda intensiva en la Ciudad de Querétaro y Ciudad de Medellín Antioquia, Colombia, para la obtención de estos agregados vírgenes y RAP, los cuales tuvieran antecedentes de cumplir con la normativa vigente local, mismos que se evaluaron posteriormente con la norma mexicana de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) (N.CMT.2.02.002, 2019) el banco seleccionado para el agregado fino seleccionado en la Ciudad de Querétaro fue del banco de materiales Saldarriaga y el RAP obtenido de la dependencia de Infraestructura. Para los materiales tanto para el agregado grueso como para el agregado fino y el agregado RAP en la Ciudad de Medellín, fue la planta de la región Bello de la empresa PAVIMENTAR. El tipo de cemento utilizado fue el Argos gris de uso general, por ser el más utilizado en las obras de construcción.

3.2.1 Selección del material

El muestreo consistió en primera instancia, limpiar el lugar para hacer el método de cuarteo de acuerdo con la norma ASTM D75, se empleó una pala para llevar a cabo el método, Figura 3.2 y Figura 3.3, y llevar a cabo el proceso adecuado.

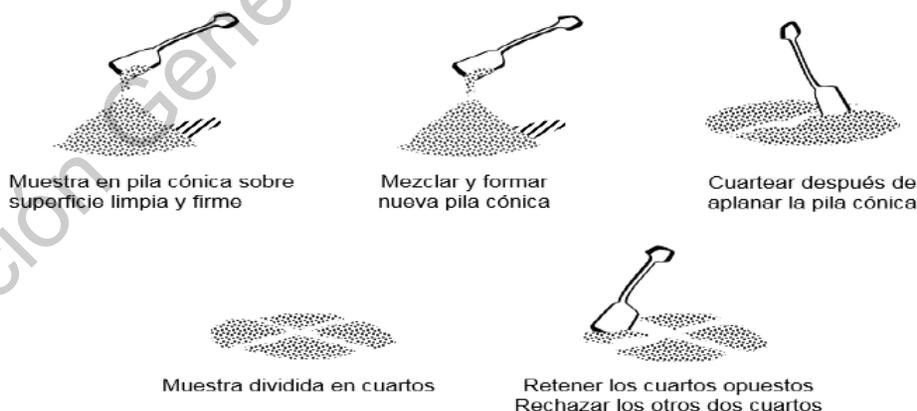


Figura 3.2 Método de cuarteo

Fuente: Elaboración propia



Figura 3.3 Proceso de cuarteo
Fuente: Elaboración propia

Resumen de la prueba. Se dividió la muestra en cuatro cuarteos iguales haciendo uso de la pala, posteriormente se dividió la muestra en dos partes iguales para hacer el cuarteo removiendo y apartando dos cuarteos diagonalmente opuestos, cuidando en tirar el material fino.



Figura 3.4 Muestreo de materiales al tamaño de la muestra
Fuente: Elaboración propia

3.3 SEPARACIÓN DEL LIGANTE ASFÁLTICO

Esta etapa consistió en llevar a cabo la separación del material por medio de la Máquina de Desgaste de los Ángeles, en el cual el agregado del RAP se puso en contacto con esferas según especifica la norma el cual fomentó el golpeteo del agregado con estas y la separación del ligante asfáltico. Una vez terminado el tiempo, según especifique la norma, se procederá a hacer un lavado por el tamiz No. 4 recuperando el material asfáltico y el agregado retenido en el tamiz, para ser evaluado en el concreto hidráulico. Este método de separación como bien se fundamentó en los antecedentes según Sing (2017) es aplicable para hacer una separación, así mismo, siguiendo las especificaciones de la norma ASTM C131 (Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine). La Figura 3.5, muestra el esquema vista de la puesta en marcha del Desgaste de Los Ángeles, así mismo, en la Figura 3.6 se puede observar el proceso para obtención del agregado fino RAP para emplear la condición RAP Recuperado Lavado (LAV) y RAP Recuperado sin Lavar (SL).

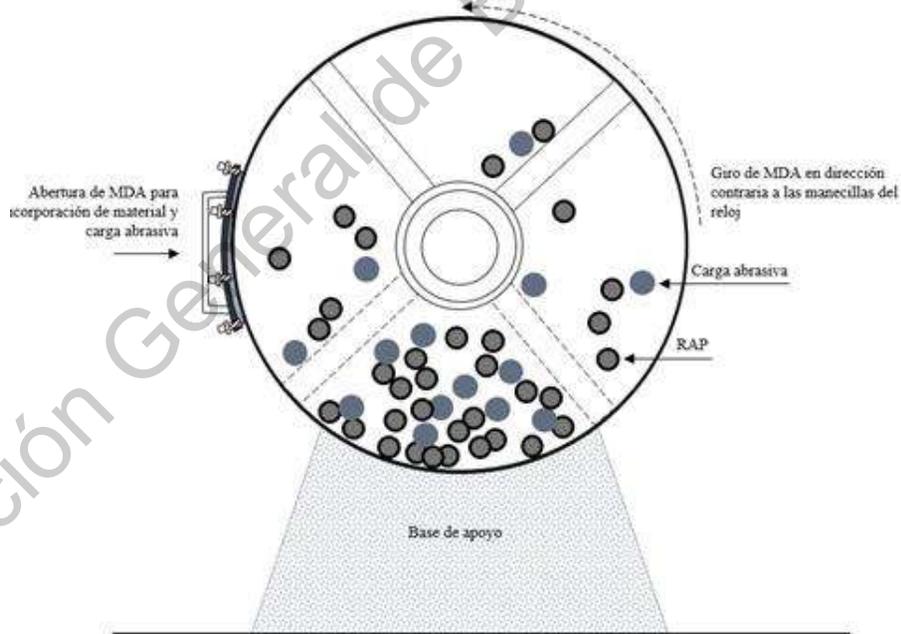


Figura 3.5 Vista de máquina de Desgaste de Los Ángeles con RAP
Fuente: Elaboración propia



Figura 3. 6 Proceso de obtención de agregado LAV y SL
Fuente: Elaboración propia

3.4 CARACTERIZACIÓN DE AGREGADOS

La caracterización de los agregados se realizó de acuerdo con las normas: ASTM C136 para la granulometría de los agregados pétreos, (M.MMP.2.02.023, 2018) para la masa volumétrica de los agregados pétreos, ASTM C131 para la resistencia a la degradación del agregado grueso mediante la máquina de Los Ángeles, (M.MMP.1.04, 2003) para el contenido de agua, ASTM D4791 para las densidades relativas y absorción.

3.4.1 Agregados Gruesos

La grava estuvo comprendida desde el tamaño nominal de ¾" hasta el retenido en la malla No. 4., para ello se hizo el ensayo de granulometría de los agregados gruesos y finos del material virgen y RAP.

3.4.1.1 Granulometría de los Agregados Gruesos

De acuerdo con la norma ASTM C136 se evaluó la granulometría de los agregados grueso, esta norma permitió determinar la distribución de los agregados que fueron empleados en la mezcla de concreto hidráulico.

Resumen de la prueba.

1. Reducir la muestra al tamaño de la prueba de acuerdo al tamaño máximo del agregado (TMA).
2. Secar la muestra en el horno a una temperatura de 110 ± 5 °C hasta masa constante y se determina la masa (W_{PP}),
3. Depositar la porción del agregado a partir de la malla del TMA hasta el tamiz No. 4.
4. Pasar el material hasta que no pase más del 1% de la masa del material retenido por cada tamiz.
5. Para el cálculo, se usa la masa del material retenido acumulado en cada tamiz i (R_i), y la masa del material retenido en el tamiz i , g, (W_{Ri}) es posible determinar la distribución granulométrica de los agregados de la siguiente manera (Ecuación 3.1):

$$R_i = \frac{\sum W_{Ri-1} + W_{Ri}}{W_{PP}} * 100 \quad 3.1$$



Figura 3.7 Ensayo de distribución granulométrica del agregado grueso

Fuente: Elaboración propia

3.4.1.2 Masa volumétrica del agregado grueso

Conforme a la norma M.MMP.2.02.023/18 se determinó la masa volumétrica de los agregados gruesos que fueron empleados para la elaboración del concreto hidráulico.

Resumen de la prueba.

1. Pesar el recipiente vacío (W_v), en kg.
2. Se coloca la muestra dentro del recipiente hasta $\frac{1}{3}$ del volumen del recipiente.
3. Se aplican 25 penetraciones distribuidas uniformemente sobre la superficie del material.
4. Colocar una segunda capa aplicando nuevamente 25 penetraciones.
5. Aplicar una tercera capa compactando 25 penetraciones.
6. Enrasar con la regla el material y pesar el recipiente con el material (W_i), en kg.
7. Determinar la masa del agregado pétreo (W_a) mediante la diferencia de la masa del recipiente lleno con el agregado (W_i) y la masa del recipiente vacío (W_v) de la siguiente manera (Ecuación 3.2).

$$W_a = W_i - W_v \quad 3.2$$



Figura 3.8 Ensayo de masa volumétrica del agregado grueso

Fuente: Elaboración propia

3.4.1.3 Contenido de agua del agregado grueso

Conforme al manual M.MMP.1.04/03 se determinó el contenido de agua en los agregados gruesos a emplear para el concreto hidráulico, con el fin de obtener una idea cualitativa de su consistencia o su probable comportamiento.

Resumen de la prueba.

1. Secar una muestra del material en el horno y determinar el porcentaje de la masa del agua.
2. Determinar el contenido de agua pesando el material húmedo (W_1) menos el material seco (W_2) en porcentaje, de la siguiente manera (Ecuación 3.4).

$$w = \frac{W_1}{W_2} * 100 \quad 3.3$$



Figura 3.9 Determinación del contenido de agua del agregado grueso

Fuente: Elaboración propia

3.4.1.4 Densidad relativa y absorción del agregado grueso

Se determinó la densidad relativa y absorción del agregado grueso de acuerdo con el proceso que indica la norma ASTM C127, esta prueba permitió determinar la relación de masa-volumen de los materiales respecto a la relación masa-volumen del agua, así como la absorción del material y se utilizó para calcular los volúmenes ocupados por el material o mezcla en sus diferentes condiciones de contenidos de agua.

Resumen de la prueba.

1. Tomar aproximadamente 5 kg de la muestra retenida en la Malla No. 4, lavar y secar a una temperatura de 105 ± 5 °C hasta masa constante.
2. Sumergir en agua la muestra durante 24 horas, retirar la muestra y determinar la masa saturada superficialmente seca (A), en gramos.
3. Colocar la muestra en la canastilla y sumergir en el baño de agua a temperatura de 23 ± 2 °C, agitar la canastilla para retirar las burbujas atrapadas y registrar el peso sumergido (B), en gramos.
4. Secar la muestra en una charola hasta masa durante 24 horas o hasta masa constante y registrar el peso (C), en gramos.
5. Determinar la densidad relativa (Ecuación 3.5) y absorción (Ecuación 3.6).

$$G_{sb} = \frac{C}{A-B} \quad 3.4$$

$$\% \text{ absorción} = \frac{A-C}{C} \quad 3.5$$



Figura 3.10 Ensayo de densidad y absorción del agregado grueso

Fuente: Elaboración propia

3.4.2 Agregado Fino

3.4.2.1 Granulometría de los Agregados Finos

De acuerdo con la norma ASTM C136 se evaluó la granulometría de los agregados finos, esta norma permitió determinar la distribución de los agregados que fueron empleados en la mezcla de concreto hidráulico.

Resumen de la prueba.

1. Reducir la muestra al tamaño de la prueba de acuerdo al tamaño máximo del agregado (TMA).
2. Secar la muestra en el horno a una temperatura de 110 ± 5 °C hasta masa constante y se determina la masa (W_{PP}),
3. Depositar la porción del agregado a partir del tamiz No. 4 hasta el tamiz No.200.
4. Pasar el material hasta que no pase más del 1% de la masa del material retenido por cada tamiz.
5. Para el cálculo, se usa la masa del material retenido acumulado en cada tamiz i (R_i), y la masa del material retenido en el tamiz i , g , (W_{Ri}) es posible determinar la distribución granulométrica de los agregados de la siguiente manera (Ecuación 3.7):

$$R_i = \frac{\sum W_{Ri-1} + W_{Ri}}{W_{PP}} * 100 \quad 3.6$$



Figura 3.11 Ensayo de distribución Granulométrica de Agregados Finos

Fuente: Elaboración propia

3.4.2.2 Módulo de Finura

El módulo de finura de los agregados (M_{SF}) se determina como la suma de los retenidos acumulados de cada malla (R_i) que se utilizaron para determinar su granulometría, de la siguiente manera (Ecuación 3.8):

$$M_{SF} = \frac{\sum R_i}{100} \quad 3.7$$

Las mallas que indica la normativa mexicana de la SCT N.CMT.2.02.002/19 para la determinación de la granulometría y el módulo de finura, de acuerdo con su designación, son: 3/8", No. 4, No. 8, No. 16, No. 30, No. 50 y No. 100.

3.4.2.3 Masa volumétrica del agregado fino

Conforme a la norma M.MMP.2.02.023/18 se determinó la masa volumétrica de los agregados fino que fueron empleados para la elaboración del concreto hidráulico.

Resumen de la prueba.

1. Pesar el recipiente vacío (W_v), en kg.
2. Se coloca la muestra dentro del recipiente hasta $1/3$ del volumen del recipiente.
3. Se aplican 25 penetraciones distribuidas uniformemente sobre la superficie del material.
4. Colocar una segunda capa aplicando nuevamente 25 penetraciones.
5. Aplicar una tercera capa compactando 25 penetraciones.
6. Enrasar con la regla el material y pesar el recipiente con el material (W_i), en kg.
7. Determinar la masa del agregado pétreo (W_a) mediante la diferencia de la masa del recipiente lleno con el agregado (W_i) y la masa del recipiente vacío (W_v) de la siguiente manera (Ecuación 3.2).

$$W_a = W_i - W_v \quad 3.8$$



Figura 3.12 Masa volumétrica compacta del agregado fino

Fuente: Elaboración propia

3.4.2.4 Contenido de agua del agregado fino

Conforme al manual M.MMP.1.04/03 se determinó el contenido de agua en los agregados finos a emplear para el concreto hidráulico, con el fin de obtener una idea cualitativa de su consistencia o su probable comportamiento.

Resumen de la prueba.

1. Secar una muestra del material en el horno y determinar el porcentaje de la masa del agua.
2. Determinar el contenido de agua pesando el material húmedo (W_1) menos el material seco (W_2) en porcentaje, de la siguiente manera (Ecuación 3.10).

$$w = \frac{W_1}{W_2} * 100$$

3.9



Figura 3.13 Contenido de agua del agregado fino

Fuente: Elaboración propia

3.4.2.5 Densidad relativa y absorción del agregado fino

Conforme al manual ASTM C128 se determinó la densidad relativa y absorción del agregado fino, esta prueba permite determinar la relación de masa-volumen de los materiales respecto a la relación masa-volumen del agua, así como la absorción del material y se utiliza para calcular los volúmenes ocupados por el material o mezcla en sus diferentes condiciones de contenidos de agua.

Resumen de la prueba.

1. Colocar una muestra de al menos 1 kg y secar hasta masa constante a una temperatura de 110 °C.
2. Agregar a la muestra al menos 6% de humedad y reposar durante 24 horas.
3. Remover la muestra y vaciar en el cono, compactar con 25 golpes con el pisón.
4. Levantar el cono y si existe una caída ligera del agregado se obtiene la masa saturada superficialmente seca (S).
5. Colocar la muestra de 500 g en el picnómetro y llenar con agua hasta un 90%.

6. Eliminar las burbujas atrapadas y pesar el picnómetro con la muestra (C).
7. Retirar el material y verter en una charola para secar en horno a una temperatura de 110°C o hasta masa constante, determinar la masa seca (A),
8. Determinar el peso del picnómetro hasta la marca graduada (B).
9. Calcular la densidad relativa (Ecuación 3.11) y absorción (Ecuación 3.12).

$$G_{sb} = \frac{A}{B + S - C} \quad 3.10$$

$$\% \text{ absorción} = \frac{S - A}{A} * 100 \quad 3.11$$



Figura 3.14 Densidad y absorción del agregado fino

Fuente: Elaboración propia

3.5 FABRICACIÓN DE MORTEROS

De acuerdo con la norma NMX-C-159-ONNCE se trabajó en el diseño y elaboración de morteros de 5x10 cm llegando a una proporción de cemento: arena 1;6 con una relación agua: cemento de 0.90.



Figura 3. 15 Fabricación de morteros

Fuente: Elaboración propia

3.6 DISEÑO DE LA MEZCLA

El diseño de la mezcla se realizó mediante el método ACI 211.1-91 (*American Concrete Institute*, por sus siglas en inglés) con una resistencia a la compresión ($f'c$) de 250 kg/cm². El método toma en cuenta el tamaño máximo del agregado grueso, densidades de la grava, arena y cemento, masas volumétricas de la grava y arena, módulo de finura de la arena y relación agua/cemento para alcanzar la resistencia a la compresión deseada, así como el revenimiento esperado de la mezcla. A partir del diseño de mezcla, se obtuvo la proporción, en peso, de: cemento, arena, grava y agua; para el volumen calculado de concreto para cada muestra de 9 cilindros de concreto de 10x20 cm. A continuación, se muestran las consideraciones y tablas que contempla el método:

1. Selección del revenimiento de proyecto, de acuerdo con lo recomendado en la Tabla 3.1; **Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Tabla 3.1 Revenimientos recomendados para varios tipos de construcciones

Tipo de construcción	Revenimiento, cm	
	Máximo **	mínimo
Muros de cimentación y zapatas reforzadas	8	2
Zapatas, campanas y muros de subestructura sencillos	8	2
Vigas y muros reforzados	10	2
Columnas para edificio	10	2
Pavimento y losas	8	2
Concreto masivo	5	2

** Pueden incrementarse en 2.5 cm para métodos de compactación que no sean mediante vibración

Fuente: Elaboración propia a partir de ACI

2. Determinar el tamaño máximo nominal: El tamaño máximo nominal (TMN) conforme a lo determinado en la granulometría fue de ¾" igual a 19.05 mm.
3. Estimar la cantidad de agua en función del tamaño máximo nominal y del revenimiento de proyecto (ver Tabla 3.2).
4. Determinar la relación agua/cemento a partir de la resistencia de proyecto, de acuerdo con la Tabla 3.3 se determinó que la selección de agua fue de 0.62.
5. Calcular la cantidad de cemento en masa (kg) para 1 m³ de concreto hidráulico (Ecuación 3.13).

$$\text{Cemento (kg)} = \text{agua (kg)} / \text{relación agua-cemento} \quad 3.13$$

6. Seleccionar de la cantidad de grava en volumen (m³) para 1 m³ de concreto hidráulico en función del tamaño máximo nominal y el módulo de finura de la arena (ver Tabla 3.4).

7. Calcular la cantidad de grava en masa (kg) para 1 m³ de concreto hidráulico (Ecuación 3.14):

$$\text{Grava (kg)} = \text{grava (m}^3\text{)} / \text{masa vol. grava (kg/m}^3\text{)} \quad 3.14$$

Tabla 3.2 Cantidad de agua para los diferentes tamaños máximos de agregado y el revenimiento

Revenimiento, cm	Agua kg/m ³							
	Tamaño máximo de agregado							
	10	12.5	20	25	40	50	70	150
Concreto sin aire incluido								
De 3 a 5	205	200	185	180	160	155	145	125
De 8 a 10	225	215	200	195	175	170	160	140
De 15 a 18	240	230	210	205	185	180	170	--
Cantidad aprox.imada de aire atrapado en concreto sin inclusión de aire	3	2.5	2.0	1.5	1.0	0.5	0.3	0.2
Concreto con aire incluido								
De 3 a 5	180	175	165	160	145	140	135	120
De 8 a 10	200	190	180	175	160	155	150	135
De 15 a 18	215	205	190	185	170	165	160	--

Fuente: Elaboración propia a partir de ACI 211.1-91

Tabla 3.3 Selección de la relación agua / cemento

Resistencia a la compresión a los 28 días kg/cm ² **	Concreto sin aire incluid	Concreto con aire incluido
450	0.38	--
400	0.43	--
350	0.48	0.40
300	0.55	0.46
250	0.62	0.53
200	0.70	0.61
150	0.80	0.71

Fuente: Elaboración propia a partir de ACI 211.1-91

Tabla 3.4. Cantidad de grava en volumen

TMA mm	Volumen del agregado grueso ** varillado en seco por volumen unitario de concreto para distintos módulos de finura de la arena				Volumen del 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	3.00	3.20	3.40	3.60
Mod. De finura								
10	0.50	0.48	0.46	0.44	0.44	0.42	0.40	0.38
12.5	0.59	0.57	0.55	0.53	0.53	0.51	0.49	0.47
20	0.66	0.64	0.62	0.60	0.60	0.58	0.56	0.54
25	0.71	0.69	0.67	0.65	0.65	0.63	0.61	0.59
40	0.76	0.74	0.72	0.70	0.70	0.68	0.66	0.64
50	0.78	0.76	0.74	0.72	0.72	0.70	0.68	0.66
70	0.81	0.79	0.77	0.75	0.75	0.73	0.71	0.69
150	0.87	0.85	0.83	0.81	0.81	0.79	0.77	0.75

Fuente: Elaboración propia a partir de ACI

8. Calcular la cantidad de arena en volumen (m^3) para $1 m^3$ de concreto hidráulico mediante la diferencia de las cantidades de grava, agua y cemento previamente obtenidas (Ecuación 3.15).

$$\text{Arena } (m^3) = [1000 - (\text{grava } (kg) / \text{densidad grava}) - (\text{agua } (kg) / 1) - (\text{cemento } (kg) / \text{densidad cemento})] / 1000$$

9. Calcular la cantidad de arena en masa (kg) para $1 m^3$ de concreto hidráulico (Ecuación 3.16):

$$\text{Arena } (kg) = \text{arena } (m^3) / \text{masa vol. arena } (kg/m^3) \quad 3.16$$

10. Corrección por humedad

Una vez obtenida la cantidad de agua por retirar o adicionar de la cantidad de agua inicial, calculada en el diseño de mezcla, tanto de la grava como de la arena, en función de su humedad y absorción, se emplea la ecuación 2 para finalmente (Ecuación 3.18):

$$a_{final} = a_{inicial} - (a_{grava} + a_{arena}) \quad \text{Ec. 3.18}$$

Donde:

$a_{inicial}$: cantidad de agua inicial, calculada en el diseño de mezcla (kg)

a_{grava} : cantidad de agua por retirar o adicionar a partir de la humedad de la arena a partir de lo calculado en el diseño de mezcla (kg)

a_{arena} : cantidad de agua por retirar o adicionar a partir de la humedad de la arena a partir de lo calculado en el diseño de mezcla (kg)

a_{final} : cantidad de agua ajustada para la homogenización de la mezcla (kg)

3.7 MEDICIÓN DEL REVENIMIENTO

La medición del revenimiento (Figura 3.12) de cada mezcla se realizó tal y como lo establece la normativa mexicana de la SCT (M.MMP.2.02.056, 2006) “revenimiento del concreto fresco”, obteniendo en todos los ensayos resultados favorables, de acuerdo con el diseño de mezcla. Cada espécimen se curó de acuerdo con la norma (NMX-C-159-ONNCCE, 2016) “elaboración y curado de especímenes de ensayo”.



Figura 3.16 Medición del revenimiento en el concreto

Fuente: Elaboración propia

3.7 ELABORACIÓN DE ESPECÍMENES

De acuerdo con el diseño experimental, se realizaron 4 muestras de 10 cilindros de concreto hidráulico conforme a la norma mexicana (NMX-C-159-ONNCCE, 2016) y para su ensaye de resistencia a compresión y tensión diagonal a edades de 7, 14 y 28 días. La primera muestra (MC) se elaboró como muestra base (sin RAP) mientras que a las tres restantes se les colocó RAP en Condición Original (CO), RAP en Condición Recuperado Sin Lavar (SL) y RAP en Condición Recuperado Lavado (LAV).



Figura 3.17 Morteros de concreto

Fuente: Elaboración propia

La elaboración de las muestras de morteros y concretos se llevó a cabo en cuatro jornadas, las variables ambientales de temperatura y humedad relativa estuvieron en condiciones normales. Para cada jornada se realizó el cálculo de corrección por humedad empleando el contenido de humedad del agregado (w , %) y la absorción del agregado (%) para determinar la cantidad de agua tanto para la arena como para la grava, con la Ecuación 3.17 mostrada a continuación:

$$a = \frac{(w - \text{abs}) \text{ kg}}{100} \quad \text{Ec. 3.17}$$

Donde:

w = humedad del agregado (%)

abs = absorción del agregado (%)

kg = cantidad calculada del agregado en el diseño de mezcla (kg)

a = cantidad de agua por agregar o quitar al diseño de mezcla (kg)

3.9 EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE LA MEZCLA

3.9.1 Resistencia a la compresión

De acuerdo con la norma NMX-C-061-ONNCE “Determinación de la resistencia a la compresión de cilindros de concreto”, se realizaron ensayos a 3, 7, 14 y 28 días para determinar la resistencia a la compresión de los cilindros de concreto conforme a la Ecuación 3.19.

$$f'c = \frac{P_{\text{máx}}}{S} \quad \text{Ec. 3.19}$$

Donde:

$f'c$: Resistencia a la compresión, kg/cm^2

P : carga máxima aplicada, kg

S : área de la sección transversal del espécimen, cm^2



Figura 3.18 Ensayo de resistencia a la compresión de morteros
Fuente: Elaboración propia



Figura 3.19 Ensayo de resistencia a la compresión de concretos

Fuente: Elaboración propia

3.9.2 Resistencia a la tensión

De acuerdo con la norma M-MMP-2-02-059 “Determinación de la resistencia a la tensión diagonal de cilindros de concreto”, se realizaron ensayos a 3, 7, 14 y 28 días para determinar la resistencia a la compresión de los cilindros de concreto. Determinando la resistencia obteniendo la carga máxima aplicada en kg (**P**), la longitud promedio del espécimen en cm (**l**), y el diámetro promedio del espécimen en centímetros (**d**), ecuación 3.20.

$$T = \frac{2P}{\pi ld}$$

Ec. 3.20



Figura 3.20 Resistencia a la tensión por compresión diametral en morteros

Fuente: Elaboración propia



Figura 3.21 Resistencia a la tensión por compresión diametral en concretos
Fuente: Elaboración propia

Dirección General de Bibliotecas de la UAQ

CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de cada una de las pruebas, así mismo, los datos se muestran por debajo de éste, sin embargo, se omite la explicación del proceso puesto que se referenció en el Capítulo 3, así como también se referenciaron las normas correspondientes de los datos de cada prueba y ensayo en conjunto. Ubicando la metodología adecuada para el proceso de separación del ligante asfáltico del agregado RAP se procedió a definir el método para la obtención, las propiedades del material y la evaluación de su desempeño en la mezcla de la siguiente manera.

- Elaboración del protocolo
- Selección del material proporcionado por la Secretaria de Infraestructura del Estado de Querétaro.
- Muestreo del material a evaluar proporcionado por la Secretaria de Infraestructura del Estado de Querétaro.
- Separación del ligante asfáltico y agregado RAP mediante Máquina de Desgaste de Los Ángeles

Una vez que se obtuvieron las proporciones de la separación del ligante asfáltico del agregado RAP mediante el Desgaste en la Máquina de Los Ángeles, se procedió a hacer la evaluación de la siguiente manera:

- Evaluación de las propiedades del material RAP en condición original y después de Desgaste
- Diseño y elaboración de mezcla para la obtención óptima del agregado RAP
- Elaboración de cilindros y vigas con contenidos óptimos y adecuados
- Evaluación de cilindros a 3, 7, 14 y 28 días

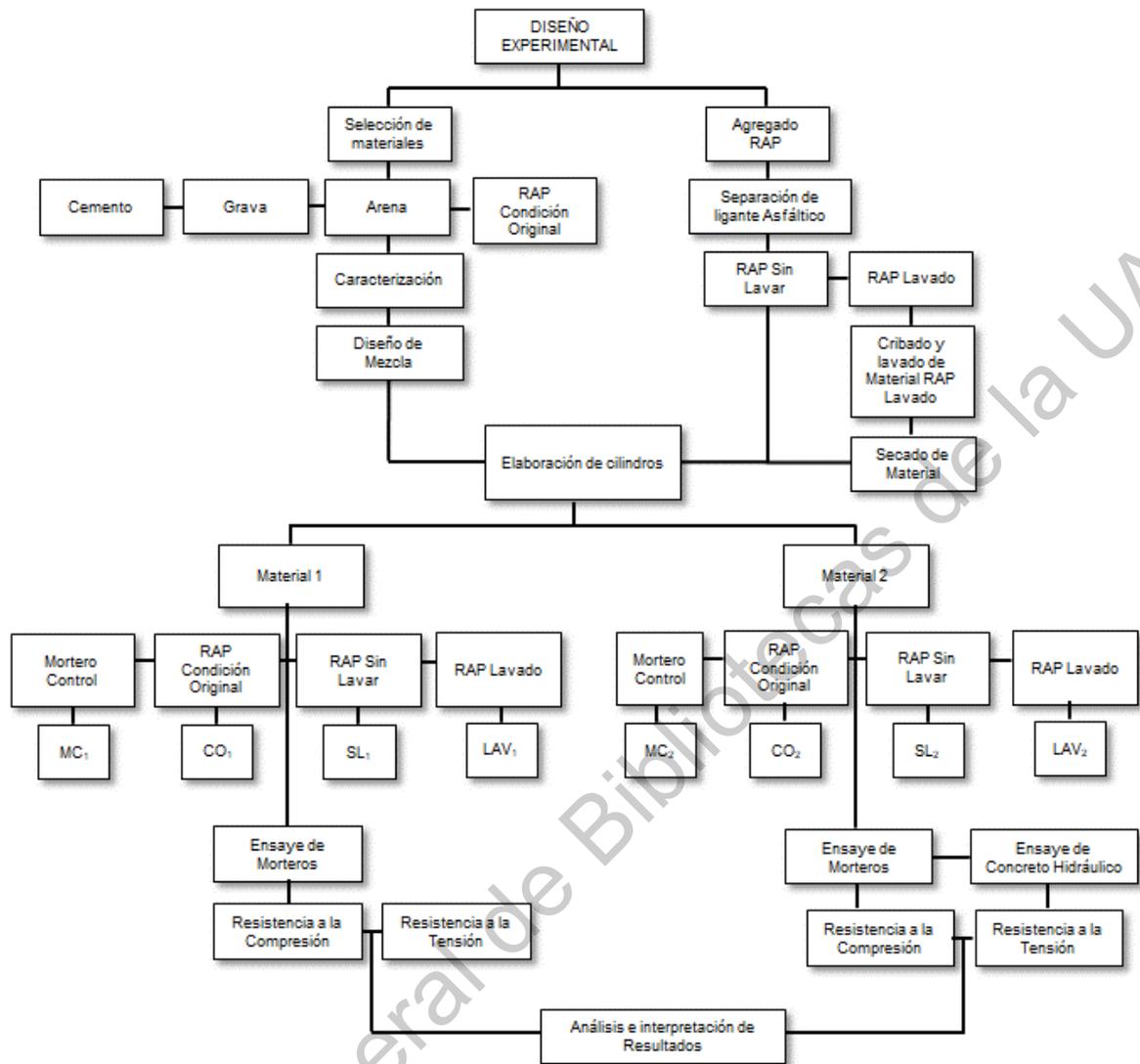


Figura 4.1 Diseño Experimental

Fuente: Elaboración propia

4.1 AGREGADOS NATURALES Y RAP CO

4.1.1 Granulometría

Una vez cuarteado el material y almacenado en bolsas, se determinó la granulometría del material de control de agregados gruesos y finos, así como del material RAP en Condición Original. Se puede observar en la Figura 4.2 que el material MC cuenta con una adecuada distribución de materiales y el RAP CO tiene una distribución inadecuada debido al fresado del pavimento.

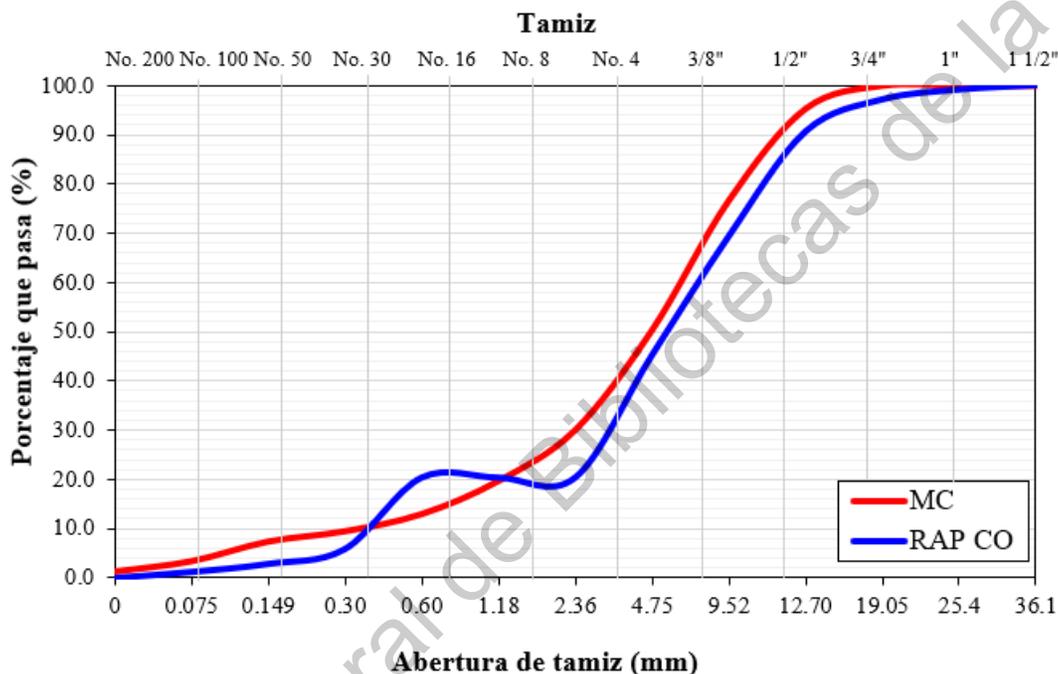


Figura 4.2 Granulometría del material RAP en condición original

Fuente: Elaboración propia

4.2 OBTENCIÓN DEL MATERIAL ASFÁLTICO Y AGREGADO

Para el proceso de obtención del ligante asfáltico y agregado se procedió a hacer la evaluación de distribución mediante la norma ASTM C131, se obtuvo la granulometría antes de introducir el RAP CO y después para así observar el comportamiento de distribución del material a ser empleado como RAP SL (Figura 4.3), se aplicó el mismo procedimiento antes mencionado para determinar la distribución granulométrica del agregado RAP LAV y así mismo poder observar el comportamiento y modificación de su distribución (Figura 4.4).

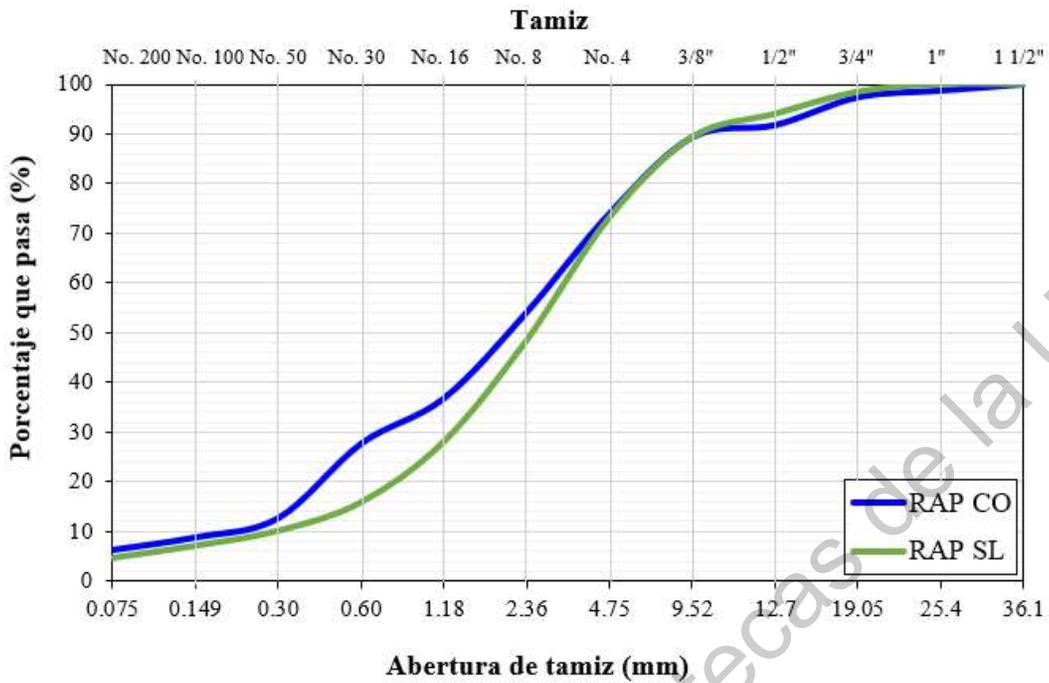


Figura 4.3 Curva Granulométrica del material RAP CO y RAP SL
 Fuente: Elaboración propia

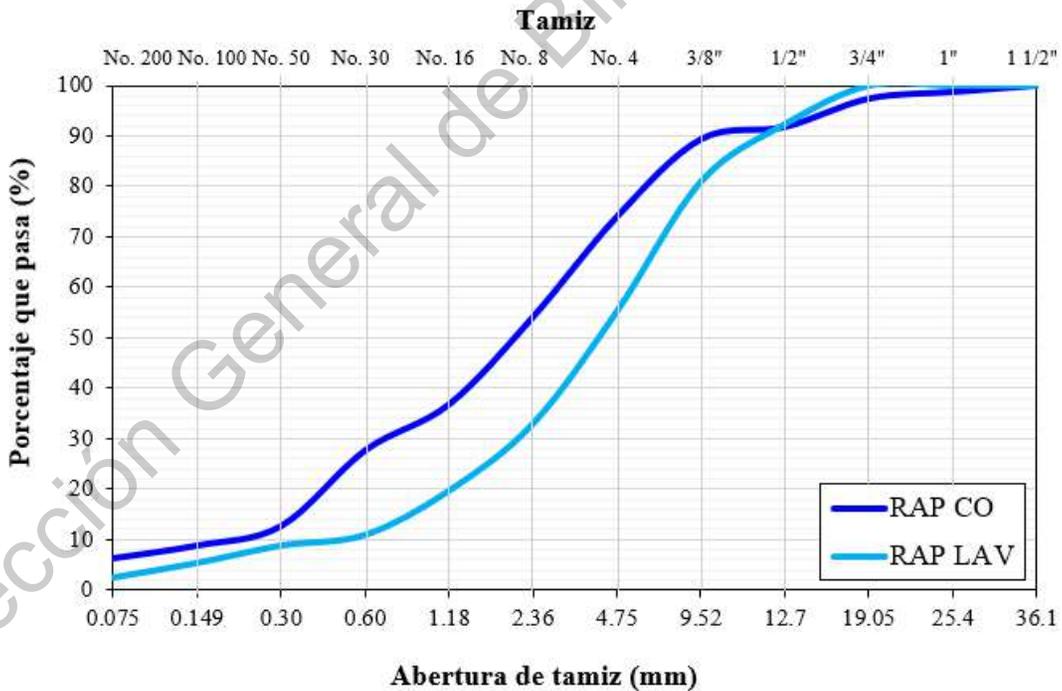


Figura 4.4 Curva Granulométrica del material RAP CO y RAP LAV
 Fuente: Elaboración propia

De la Figura 4.4 se observa que una vez desgastado el material tiene un mejor comportamiento en distribución y se logra hacer una recuperación de arenas del 60% respecto al material que entro a desgaste, siendo un porcentaje óptimo para las pruebas de evaluación de desempeño posteriores a la mezcla. En la Figura 4.5 se muestra el material después de desgaste del retenido en cada malla, de donde se puede observar que se cuenta con agregado tipo arena de material asfáltico, para proceder ahora a hacer la elaboración de las siguientes pruebas.



Figura 4.5 Material RAP después de desgaste.

Fuente: Elaboración propia

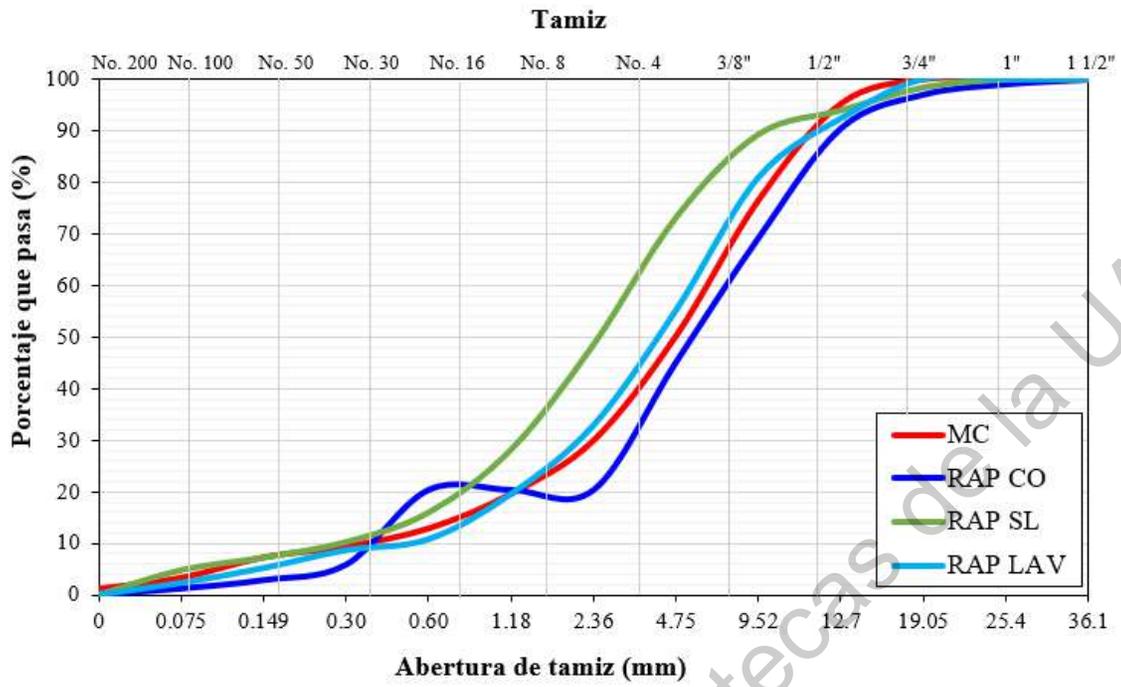


Figura 4.6 Resumen de distribución granulométrica de los agregados
 Fuente: Elaboración propia

Dirección General de Bibliotecas de la UAQ

4.3 CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS

Los agregados seleccionados tanto del agregado grueso como del agregado fino para la elaboración del concreto hidráulico empleado en esta investigación fue la planta de la región Bello de la empresa PAVIMENTAR, en la Tabla 4.1 se muestran los resultados de la caracterización de los agregados, así mismo, de la Tablas 4.3 a 4. Se muestran los resultados de la caracterización de los agregados empleados en Querétaro como arena traídos del Banco Saldarriega y RAP de infraestructura del RAP, así como el RAP empleado en Medellín, empleado como arena y sustituto del agregado virgen. Se tomó la determinación de emplear un tamaño máximo nominal de 19.05 mm, buscando que los tamaños mayores para permitir un adecuado acomodo entre ellas. La caracterización de los agregados para el concreto hidráulico se realizó empleando normas de la ASTM y SCT y el manual del laboratorio de ingeniería en materiales UAQ, Facultad de Ingeniería.

Tabla 4.1 Caracterización de Material 1 MC

Agregado Grueso	Gravedad específica	2.81
	Absorción del agregado	1.10
	Peso Unitario Compacto, $\frac{g}{cm^3}$	1.60
Agregado Fino	Gravedad específica	1.90
	Absorción del agregado, %	2.5
	Peso Unitario Compacto $\frac{g}{cm^3}$	1.10
	Módulo de Finura, %	2.58

Fuente: elaboración propia

De los datos mostrados en la Tabla 4.1 se puede observar que se encuentra dentro de los criterios que indican la norma de calidad de los materiales para concreto hidráulico, por lo que es un material adecuado para el diseño de mezclas de concreto.

Tabla 4.2 Material 1 RAP CO₁

Agregado Grueso	Gravedad específica	2.237
	Absorción del agregado	4.12
	Peso Unitario Compacto, $\frac{g}{cm^3}$	1.680
Agregado Fino	Gravedad específica	2.252
	Absorción del agregado, %	2.63
	Peso Unitario Compacto $\frac{g}{cm^3}$	6.41
	Módulo de Finura, %	1.431

Fuente: elaboración propia

De los datos que se presentan en la Tabla 4.2 se observó que el material RAP en Condición Original absorbe un 20 % más de agua que el agregado natural a pesar del contenido de material asfáltico lo cual podría ser una mejora en la relación agua / cemento al momento de hacer la mezcla.

Tabla 4.3 Material 1 RAP SL1

Agregado Fino	Gravedad específica	2.198
	Absorción del agregado, %	1.85
	Peso Unitario Compacto $\frac{g}{cm^3}$	11.13
	Módulo de Finura, %	1.352

Fuente: elaboración propia

De los datos mostrados en la Tabla 4.3 se detecto que la absorción del agregado grueso y agregado fino eran muy similares lo que se puede inferir al desgaste presentado en las partículas.

Tabla 4.4 Material 1 RAP LAV1

Agregado Fino	Gravedad específica	2.785
	Absorción del agregado, %	1.82
	Peso Unitario Compacto $\frac{g}{cm^3}$	3.44
	Módulo de Finura, %	1.758

Fuente: elaboración propia

De los datos obtenidos del RAP recuperado Lavado se puede observar que se encuentra con una breve diferencia entre las características del material natural lo que indica una posible trabajabilidad de la misma forma.

Tabla 4.5 Material 2 CO2

Agregado Grueso	Gravedad específica	2.321
	Absorción del agregado	4.40
	Peso Unitario Compacto, $\frac{g}{cm^3}$	1.708
Agregado Fino	Gravedad específica	2.261
	Absorción del agregado, %	2.70
	Peso Unitario Compacto $\frac{g}{cm^3}$	6.73
	Módulo de Finura, %	1.464

Fuente: elaboración propia

De los datos obtenidos a partir de la caracterización del Material 2 CO2 se obtuvieron resultados similares a los del material 1 con la diferencia de un incremento en la absorción del agregado grueso.

Tabla 4.6 Material 2 SL2

Agregado Fino	Gravedad específica	2.214
	Absorción del agregado, %	1.90
	Peso Unitario Compacto $\frac{g}{cm^3}$	11.90
	Módulo de Finura, %	1.373

Fuente: elaboración propia

Conforme a los datos obtenidos de la caracterización del RAP SL2 se encontró que contaba con una adecuada gravedad, pero una absorción mayor a lo que indica la norma de calidad para agregados de concreto hidráulico.

Tabla 4.7 Material 2 LAV2

Agregado Fino	Gravedad específica	2.811
	Absorción del agregado, %	1.74
	Peso Unitario Compacto $\frac{g}{cm^3}$	3.39
	Módulo de Finura, %	1.743

Fuente: elaboración propia

4.4 DISEÑO DE LA MEZCLA

Tomando en cuenta los valores obtenidos durante la caracterización de los agregados, el Proporcionamiento del diseño de concreto hidráulico mediante el método del ACI empleado para esta investigación se presenta en la Tabla 4.8 para una resistencia a la compresión ($f'c$) de 250 kg/cm².

Tabla 4.8 Diseño de mezcla para concretos

Material	Cantidades para 1 m³ (kg)	Cantidades para 1 m³ (%)	Para 1 BULTO de Cemento	
Cemento	416.67	0.102	50.00	1.0 BULTO
Agua	200.00	0.200	31.00	2.0 BOTES
Arena	784.76	0.287	122.33	4.0 BOTES
Grava	985.23	0.411	179.033	5.0 BOTES

Fuente: Elaboración propia

4.5 RESISTENCIAS A LA COMPRESIÓN Y TENSIÓN DE MORTEROS

4.5.1 Resistencia Material 1

Conforme a la normativa se ensayaron los morteros de 5 x 10 cm a 28 días de edad en resistencia a la compresión en donde se puede observar la Tabla 4.9 los resultados de los morteros elaborados.

Tabla 4.9 Resultados de resistencias del Material 1

Mortero tipo	Edad (días)	Resistencia a compresión promedio (kg/cm²)	Porcentaje de la resistencia a compresión	Resistencia a tensión promedio (kg/cm²)	Porcentaje de la resistencia a tensión
Mortero Base de Control (MB)		99.8	-	21.0	-
Mortero RAP en Condición Original (CO)	28	49.8	49.9%	10.2	48.4%
Mortero RAP en Condición Recuperado Sin Lavar (SL)		64.9	65.0%	11.5	54.4%
Mortero RAP en Condición Recuperado Lavado (LAV)		97.6	97.8%	16.7	79.2%

Fuente: elaboración propia

De la Tabla anterior, se encontró que para los morteros LAV incremento en resistencia a la compresión comportándose de una manera similar al Mortero Base. En cambio, para los materiales CO y SL las resistencias disminuyeron, pudiendo relacionarlo con todas las investigaciones que han coincidido que el ligante asfáltico adherido al agregado reduce la resistencia del concreto, así mismo se debe al material fino y polvo que se le adhiere al material al ser recuperado o desgastado en la máquina.

4.5.2 Resistencias del Material 2

Conforme a la normativa se ensayaron los morteros de 5 x 10 cm a 28 días de edad en resistencia a la compresión en donde se puede observar la Tabla 4.9 los resultados de los morteros elaborados.

Tabla 4.10 Resultado de resistencias del Material 2

Mortero tipo	Edad (días)	Resistencia a compresión promedio (kg/cm²)	Porcentaje de la resistencia a compresión	Resistencia a tensión promedio (kg/cm²)	Porcentaje de la resistencia a tensión
Mortero Base de Control (MB)		88.9	-	23.1	-
Mortero RAP en Condición Original (CO)	28	39.7	44.6%	10.6	45.7%
Mortero RAP en Condición Recuperado Sin Lavar (SL)		55.9	62.9%	12.0	51.9%
Mortero RAP en Condición Recuperado Lavado (LAV)		88.2	99.1%	17.2	74.1%

Fuente: Elaboración propia

4.6 RESISTENCIAS A LA COMPRESIÓN Y TENSIÓN DE CONCRETOS

4.6.1 Resistencia a la compresión

Para la evaluación de las resistencias a la compresión del concreto se evaluó de acuerdo con la normativa teniendo como resultados los que se muestran en la Tabla 4.10

Tabla 4.11 Evolución de los concretos a compresión

Muestra	Identificación	Edad/Resistencia a la Compresión			
		0	7	14	28
Mortero de Control	MC	0.0	159.6	224.9	259.6
RAP en Condición Original	CO	0.0	122.4	165.1	166.0
RAP en Condición Recuperado Sin Lavar	SL	0.0	150.6	213.6	235.4
RAP en Condición Recuperado Lavado	LAV	0.0	171.1	224.8	258.3

Fuente: Elaboración propia

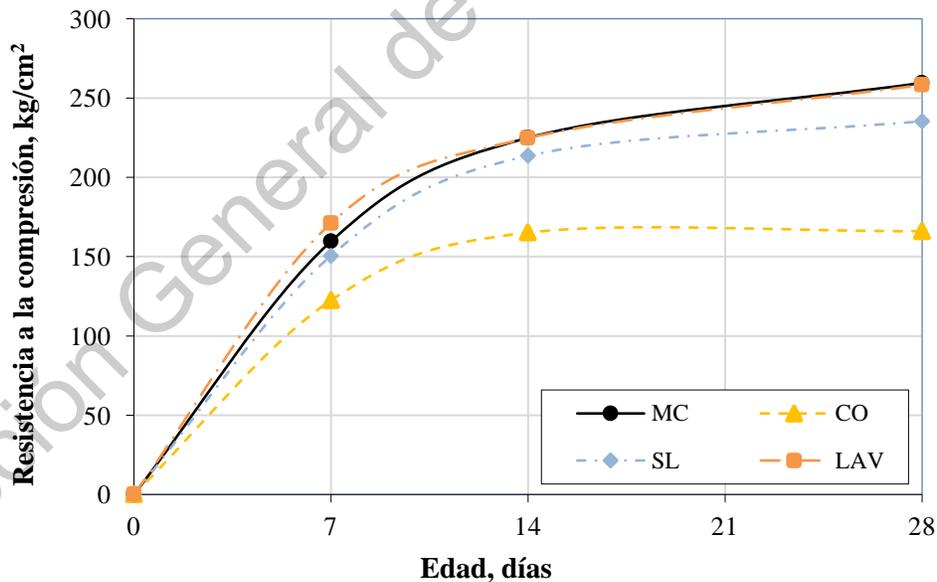


Figura 4.7 Evolución de la resistencia a la compresión de los concretos

Fuente: elaboración propia

4.6.2 Resistencia a la tensión

Tabla 4.12 Evolución de los concretos a tensión

Muestra	Identificación	Edad/Resistencia a la Tensión Diagonal			
		0	7	14	28
Mortero de Control	MC	--	21.5	29.0	30.9
RAP en Condición Original	CO	--	17.4	20.1	25.4
RAP en Condición Recuperado Sin Lavar	SL	--	17.9	21.1	29.6
RAP en Condición Recuperado Lavado	LAV	--	23.5	28.8	30.4

Fuente: Elaboración propia

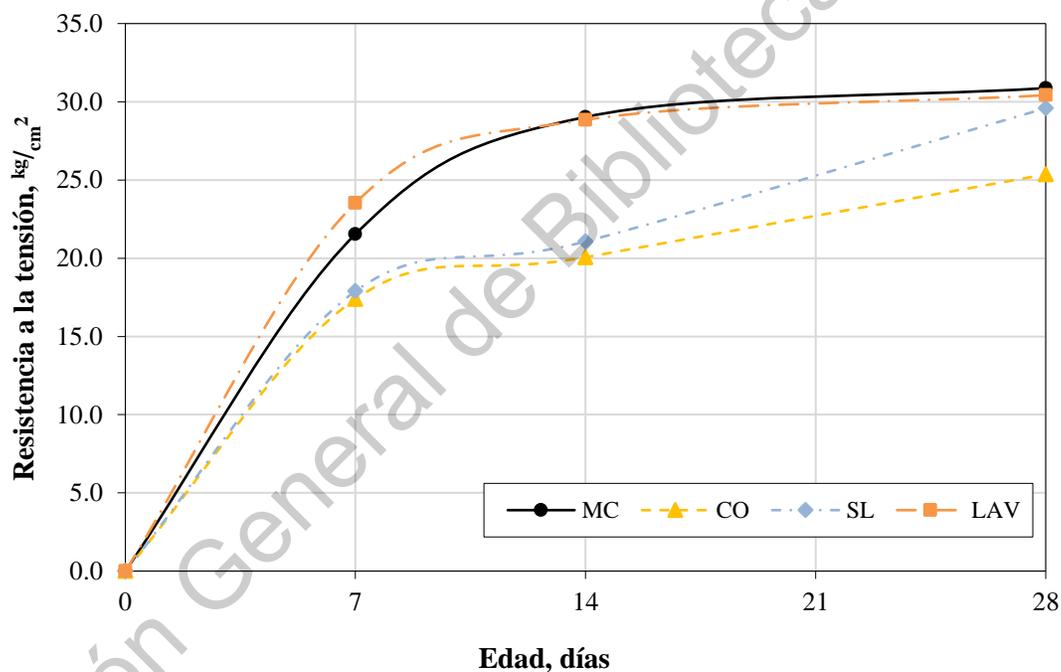


Figura 4. 8 Evolución de resistencias a la tension en concretos

Fuente: elaboración propia

Para la evaluación de resistencia a la compresión de los cilindros de concreto se encontró un comportamiento similar y esperado a como se comportaron los morteros debido a la evaluación de la arena, por lo que se observó que el material LAV incrementó en su resistencia en un 3.98% respecto al concreto base, esperando así que tenga un comportamiento similar al agregado de arena del material virgen (ver Tabla 4.13).

Tabla 4.13 Resumen de las resistencias a compresion y tension de los concretos

Concreto tipo	Edad (días)	Resistencia a compresión promedio (kg/cm ²)	Porcentaje de la resistencia a compresión	Resistencia a tensión promedio (kg/cm ²)	Porcentaje de la resistencia a tensión	Relación tensión/compresión
Concreto Base de Control (MB)		259.6	-	30.9	-	11.9%
Concreto RAP en Condición Original (CO)		166.0	64.0%	25.4	82.1%	15.3%
Concreto RAP en Condición Recuperado Sin Lavar (SL)	28	235.4	90.7%	29.6	95.8%	12.6%
Concreto RAP en Condición Recuperado Lavado (LAV)		258.3	99.5%	30.4	98.5%	11.8%

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

La Hipótesis se cumple hacienda que el material Recuperado Lavado increcementando su resistencia a la tension y el que tuvo el mayor comportamiento.

Al realizar las pruebas para obtener el desempeño de las 4 diferentes mezclas de concreto, se pudo observar una buena distribución de los agregados, debido a las fallas longitudinales que se tuvieron en las probetas.

Dado que el material impregnado de asfalto, sella la porosidad del agregado, las mezclas obtenidas demandaron menor porcentaje de agua, con lo cual la relación agua/cemento aumenta

En lo que respecta a la evaluación de los ensayos de morteros tienen un comportamiento similar los dos materiales, observando que se obtuvieron resistencias y comportamientos, por lo que se concluyó que el material CO y SL recuden la Resistencia de los morteros ocasionado por el polvo, ligante asfáltico y contaminación de los agregados.

Por un lado, los resultados obtenidos del concreto base en resistencia a la compresión nos indicaron un $f'c$ de 259.6 kg/cm² a los 28 días de edad, mientras que las mezclas RAP en Condición Original y RAP en Condición Recuperado Sin Lavar dio como resultado una disminución del 36% y 9.3% respectivamente respecto al concreto base. Por otro lado, los resultados del concreto LAV tuvieron un comportamiento similar al concreto base, reduciendo su resistencia en un 0.5 %.

En lo que respecta los resultados obtenidos de resistencia a la tensión del concreto base a los 28 días de edad se obtuvo 30.9 kg/cm² reduciendo sus resistencias en un 17.9 % y 4.2% del concreto tipo CO y SL, respectivamente, nuevamente el concreto tipo LAV redujo en un 1.5% respecto al concreto base.

De esto, se pudo observar que el material LAV mejora la Resistencia del concreto comportandose de manera similar que el concreto base, pudiendo ser empleado como arena en el concreto hidráulico.

FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Como futuras líneas de investigación están resumidos aquellos aspectos que resultaron potencialmente interesantes para desarrollar trabajos complementarios tales como:

- Establecer una investigación con la misma metodología empleando agregados gruesos y finos desgastados para comparar con un concreto de agregados vírgenes y los resultados aportados en investigaciones.
- Establecer una metodología de diseño adecuada de mezclas de concreto hidráulico adicionadas con agregados de reciclado de pavimento asfáltico contemplando la metodología expuesta en esta investigación y las propiedades especiales para diseñar, como lo son el porcentaje de absorción, granulometría, densidad de los agregados, con el objetivo de promover nuevos diseños.
- Es necesario investigar la acción de aporte en resistencia en módulo de ruptura para comparar los resultados expuestos en esta investigación.

CAPÍTULO 6. REFERENCIAS

- Aschenbrener, T. (10 de Septiembre de 2013). Federal Highway Administration. Asphalt Pavement In-Place Recycling Techniques. Schaumburg, Illinois, Estados Unidos de América. Obtenido de <https://www.pavementpreservation.org/conferences/regional-in-place-recycling-conferences/2013-midwestern-states-in-place-recycling-conference/?vid=08>
- Abdessemed, M., Kenai, S., & Bail, A. (2015). Experimental and Numerical Analysis of the Behavior of an Airport Pavement Reinforced by Geogrids. *Construction and Building Material*, vol. 94, pp. 547 – 554
- ACI Committee 214R-11 (2011). Guide to evaluation of strength test results of concrete. Farmington Hills, USA: American Concrete Institute, pp. 16.
- Al – Orami S., Hassan F., & Hago Abdulwahid. (2009). Reciclaje de pavimento Asfáltico Recuperado en Hormigón de Cemento Portland. *The Journal of Engineering Research*, vol. 6, pp. 550 - 567
- Arteaga Capistrán , M. I. (2018). Optimización Geométrica y Acomodo de Fibras de PET Reciclado para Mejorar la Resistencia a la Flexión en Morteros - TESIS. Universidad Autónoma de Querétaro
- ASTM D75 International. (2019). Standard Practice for Sampling Aggregates
- ASTM C131 International (2020). Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine

- ASTM C136 International (2019). Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates
- ASTM C127 International (2015). Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate
- ASTM C128 International (2015). Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate
- Baldenebro López, F. J., Herrera Ramírez, J. M., & Castorena González, J. H. (2015, Febrero). Estudio numérico-experimental de fibras de PET y su comportamiento en una matriz de concreto. Chihuahua, Chihuahua, México: Centro de Investigación en Materiales Asociados, S.C
- Catálogo de Deterioros de Pavimentos Flexibles. (2002). Consejo de Directores de Carreteras de Iberia e Iberoamérica. Volumen No. 11., pp. 3 - 28
- Campos, D. (2017), Diseño y Evaluación del Desempeño Mecánico de una Base Hidráulica Reciclada Mediante la Tecnología de Asfalto Espumado. Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, (190 páginas)
- Chesner, W. H., Collins., R. J., y MacKay, M. (1998). User guidelines for waste and by-product materials in pavement construction.
- Delwar, M., Fahmy, M., y Taha, R. (1997) Use of Reclaimed Asphalt Pavement as an Aggregate in Portland Cement Concrete, *ACI Mater. J.*, pp. 251–256
- Distress Identification Manual*. (2014). *U.S. Department of Transportation*. Federal Highway Administration. Publication No. FHWA-HRT-13-092. Pp. 1 - 66
- Espinosa Arreola (2012). Pavimentos Rígidos vs Flexibles: Cúal es mejor. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Ingeniería Civil , Morelia, Michoacán , México: Maestría en Infraestructura del Transporte en la Rama de las Vías Terrestres

- F. Zollo, R. (1997). Fiber-reinforced Concrete: an Overview after 30 Years of Development. *Cement and Concrete Composites*, vol. 19, pp. 107 – 122
- Federation, E. U. (Octubre de 2009). Sustainable roads and optimal mobility. Bruselas, Bélgica
- Fabela, M., Jaworski, J., y Lozano, A. (1999), Proceso de Remoción de Carpetas Asfálticas, Instituto Mexicano del Transporte, Querétaro, México
- Foti, D. (2011). Preliminary Analysis of Concrete Reinforced with Waste Bottles PET Fibers. *Construction and Building Materials*, vol. 25, pp. 1906 - 1915
- Gui-Ping, H., y Wing-Gun, W. (2006), Effects of moisture on strength and permanent deformation of foamed asphalt mix incorporating RAP materials. *Construction and Building Materials*, vol. 22, pp. 1305 – 1318
- Gutiérrez Hernández, J. L., Soria Anguiano, V. J., & Dorado Pineda, M. L. (2017). Estudio Estadístico de Campo del Autotransporte Nacional. *Análisis estadístico de la Información recopilada en las estaciones instaladas en 2016*. Sanfandila, Querétaro: Documento Técnico No. 71, pp. 23 - 82
- Hoyos L.R, Puppala A. J, Ordonez C.A. (2011), Characterization of Cement-Fiber-Treated Reclaimed Asphalt Pavement Aggregates: Preliminary Investigation. *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 23, pp. 52 – 115
- Huang, B., X. Shu and G. Li (2005). Laboratory Investigation of Portland cement concrete containing 1092 recycled asphalt pavements. *Cement and Concrete Research*, vol. 35, pp. 1502 – 1593
- Hossiney N., Tia M., & Bergin MJ. (2012). Concrete containing RAP for use in concrete pavement. *Construction and Building Materials*, vol. 15, pp. 10 - 25

- Instituto Nacional de Estadísticas y Geografía (INEGI) (2018), Vehículos de motor registrados en circulación; Periodo ene 2017 – jul 2018. Aguascalientes, México, <<http://www.beta.inegi.org.mx/temas/vehiculos>>, (Sep. 12, 2018)
- IMT. (1991). *Catálogo de Deterioros en Pavimentos Flexibles de Carreteras Mexicanas. Instituto Mexicano del Transporte y Secretaria de Comunicaciones y Transportes, Publicación Técnica No. 21, pp. 1 - 52*
- Isola, M., Betti, G., Marradu, A., y Tebaldi, G. (2013), Evaluation of Cement Treated Mixturez with High Percentage of Reclaimed Asphalt Pavement, *Construction and Building Materials*, vol. 48, pp. 82 – 185
- Izaks, R., Haritonovs, V., y Zaumanis, M. (2015). Bituminous Mixtures and Pavements VI. First trial to design up to 50% recycled hot mix asphalt in Latvia, 545. (C. P. 2015, Ed.) London, United Kingdom: A.F. Nikolaides. doi:10.1201/b18538-2
- K, R., & Manoharan, A. (2017). Flexure Behaviour of Concrete Beam Reinforced with Biaxial Geogrid. *International Journal of Engineering Research and General Science*, vol. 5, pp. 72 - 83.
- M.MMP.1.04. (2003). *Métodos de Muestreo y Prueba de Materiales. Contenido de Agua. SCT*
- M.MMP.1.05. (2018). *Métodos de Muestreo y Prueba de Materiales. Densidades Relativas y Absorción . SCT*
- M.MMP.2.02.020. (2018). *Método de Muestreo y Prueba de Materiales. Finura del Cemento por el Método del Tamiz. SCT*
- M.MMP.2.02.023. (2018). *Métodos de Muestreo y Prueba de Materiales. Masa Volumétrica de los Agregados Pétreos. SCT*
- M.MMP.2.02.032. (2018). *Método de Muestreo y Prueba de Materiales. Resistencia a la Degradación del Agregado Grueso mediante la Máquina de Los Ángeles. SCT*

- M.MMP.2.02.056. (2006). Método de Muestreo y Prueba de Materiales. *Revenimiento del Concreto Fresco*. SCT
- M-MMP-2-02-059 (2004). Normativa para la Infraestructura del Transporte. Resistencia a la Tensión en Cilindros de Concreto”, SCT-IMT, México.
- Marini, S. (2006), Reciclado de Pavimentos Asfálticos en Frío. LEMAc Centro de Investigaciones Viales, Universidad Tecnológica Nacional
- Martínez, G., Martínez, M., y Martínez, E. (2013). Concreto Polimérico Reforzado con Fibras de Luffa, *Información Tecnológica*, vol. 24, pp. 15 – 52.
- Mendoza, C., Aire, C., y Dávila, P. (2011). Influencia de las Fibras de Polipropileno en las Propiedades del Concreto en Estados Plásticos y Endurecidos, *Concreto y Cemento*, pp. 35-47
- Montejo, A. (2002), Ingeniería de Pavimentos para Carreteras. Universidad Católica de Colombia. Bogotá (eds.), Bogotá, D.C. pág. 1. ISBN: 958-96036-2-9
- Monti, A., Shen, H., y Khodair, Y. (2016), Characteristics of self-consolidating concrete with RAP and SMC. *Construction and Boulding Material*, 102. 564 – 573
- Montejo, A. (2010), Ingeniería de Pavimentos: Fundamentos, estudios básicos y diseño. Universidad Católica de Colombia (eds.), Bogotá, D.C. (672 páginas). ISBN: 958-97617-9-8
- N.CMT.02.02.001. (2002). Características de los Materiales. *Calidad del Cemento Portland*. SCT
- N.CMT.2.02.002. (2019). Características de los Materiales. *Calidad de Agregados Pétreos para Concreto Hidráulico*. SCT
- N.CMT.2.02.005. (2004). Características de los Materiales. *Materiales para Concreto Hidráulico*. SCT

NMX-C-159-ONNCCE. (2016). Elaboración y Curado de Especímenes de Ensayo. Industria de la Construcción, ONNCCE

NMX-C-061-ONNCCE. (2015). Determinación de la Resistencia a la Compresión de Cementantes Hidráulicos. Industria de la Construcción, ONNCCE

Newcomb, D., Brown, E., y Epps, J. (2007). Designing HMA Mixtures with High RAP Content. A Practical Guide. Lanham, MD: National Asphalt Pavement Association. Obtenido de http://driveasphalt.org/assets/content/resources/QIP124_Designing_HMA_Mixtures_with_High_RAP_Contentweb.pdf

Neville A.M. (1999). "Tecnología del Concreto", 1ª. Edición, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C.

Okafor, F. O. (2010). Performance of Recycled Asphalt Pavement as Coarse Aggregate in Concrete. Artículo en Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies

Pérez Jiménez, F. a. (2007). Proyecto, conservación y Gestión de Firmes. Madrid, España: Asociación Española de la Carretera Goya

Rodríguez, R., Castaño, V. y Martínez, M. (2001), Emulsiones Asfálticas, Instituto Mexicano del Transporte, Querétaro, México

Rondón, H., y Reyes, F. (2015), Pavimentos: materiales, construcción y diseño, (ed.) ECOE, Bogotá, pág. 23. ISBN 978-958-771-175-2

SCT. (n.d.). Catálogo de Secciones Estructurales de Pavimentos para las Carreteras de la República Mexicana. Dirección General de Servicios Técnicos.

Singh, S., Ransinchung, G.D., y Kumar, P. (2017). An economical processing technique to improve RAP inclusive concrete properties, Construction and Building Material. vol. 148

Zollo, R. (1997). Fiber-reinforced concrete: an overview after 30 years of development, Cement and Concrete, vol. 19, pp. 107-122

Dirección General de Bibliotecas de la UAQ