



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL – GESTIÓN ADMINISTRATIVA DE LA CONSTRUCCIÓN

**“EMPLEO DE CONCRETO RECICLADO EN LA MANUFACTURA DE MEZCLAS
ASFÁLTICAS EN CALIENTE PARA VIALIDADES URBANAS”**

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
GONZALO VALENCIA MARTÍNEZ

TUTOR PRINCIPAL
DR. JESÚS ALFREDO HERNÁNDEZ NOGUERA
INSTITUTO DE INGENIERÍA UNAM

MÉXICO, D. F. ABRIL, 2016

JURADO ASIGNADO:

Presidente: **M. I. Mendoza Rosas Marco Tulio**
Secretario: **M. I. Candelas Ramírez Luis**
1er. Vocal: **Dr. Hernández Noguera Jesús Alfredo**
2do. Vocal: **Dra. Ossa López Alexandra**
3er. Vocal: **Ing. Cottier Caviedes Juan Luis**

Lugar donde se realizó la tesis:

Instituto de Ingeniería UNAM, Ciudad Universitaria, Ciudad de México

TUTOR DE TESIS:

Dr. Hernández Noguera Jesús Alfredo

FIRMA

RESUMEN

En México se producen 30,000 toneladas diarias de *Residuos de Construcción y Demolición (RCD)* de ellas 6,500 son producidas en la Ciudad de México. Esta localidad tiene un relleno sanitario de gran capacidad que se encuentra inhabilitado para recibir RCD, por lo tanto, parte de los residuos de la construcción se depositan en: tiraderos a cielo abierto, barrancas, zonas de reserva ecológica, suelos de conservación, cauces de ríos. Por ello, en este trabajo de investigación se propone utilizar el concreto producto de demolición comúnmente llamado “*cascajo*”, procedente de RCD, para fabricar un *concreto asfáltico* (también llamado “*mezcla asfáltica en caliente*” o HMA por sus siglas en inglés “Hot Mix Asphalt”). El objetivo de esta investigación es evaluar la posibilidad de reutilizar agregados de concreto reciclado, en combinación de agregados pétreos de cantera para la fabricación de una mezcla asfáltica en caliente (MAC) mediante el empleo de la metodología de diseño *SUPERPAVE*, basados en el nivel I y II, que corresponde a vialidades urbanas.

En la fase experimental, se seleccionó y caracterizó física y mecánicamente los componentes de la MAC: agregados pétreos de cantera, agregados de concreto reciclado RCD y el asfalto convencional EKBÉ, paralelamente se seleccionó el aditivo que se empleó para el control de absorción de agua, este solo se utilizó en el agregado grueso reciclado (delimitando por tamaño grueso del tamiz $\frac{3}{4}$ ”[19mm] a $\frac{1}{4}$ ”[6.3mm]).

Posteriormente, se fabricaron cuatro mezclas asfálticas diferentes. En la primera mezcla que es la de control se efectuó el diseño volumétrico, dicha mezcla contiene el 100% de agregado pétreo de cantera. Las tres mezclas asfálticas siguientes se realizaron basadas en el diseño volumétrico de la mezcla de control, pero sustituyendo en diferentes porcentajes el contenido de agregado pétreo de cantera por agregado de concreto reciclado RCD (el agregado reciclado grueso cubierto con aditivo) a razón de: 20%, 40% y 50%.

Finalmente en las cuatro mezclas se realizaron los ensayos de caracterización mecánica o desempeño, estos nos permiten estimar el comportamiento de la mezcla durante el periodo de vida de diseño para tránsito bajo y medio. Los ensayos de caracterización mecánica que se realizaron fueron: *Susceptibilidad a la humedad* y *Susceptibilidad a la deformación permanente*.

Palabras clave: Residuos de la Construcción y Demolición (RCD), Mezcla Asfáltica en Caliente (HMA), Superpave, diseño volumétrico, niveles de desempeño, susceptibilidad a la humedad y susceptibilidad a la deformación permanente.

ABSTRACT

Mexico produces 30,000 tons per day from construction and demolition waste (CDW) and 6,500 are produced in Mexico City. This town has a large capacity landfill that is disabled for CDW, therefore, part of the construction waste is deposited in: open dumps, ravines, ecological reserves, soil conservation, channels rivers. Therefore, in this research we propose using recycled concrete aggregate from CDW, to make asphalt concrete (sometimes called "hot mix asphalt" or HMA). The objective of this research is to evaluate the possibility of reusing recycled concrete aggregates in combination of stone aggregates quarry for the manufacture of hot mix asphalt (HMA) using the Superpave design methodology, based on the level I and II, corresponding to urban roads.

In the experimental stage is selected and characterized physically and mechanically components HMA: stone aggregates quarry, recycled concrete aggregates (RCA) and conventional asphalt EKBÉ parallel the additive used to control water absorption was selected, this one was used in recycled coarse aggregate (coarse demarcating sieve size $\frac{3}{4}$ " [19mm] $\frac{1}{4}$ " [6.3mm]).

Subsequently, four different asphalt mixes were produced. The first control mixture was determined volumetric design, this contains 100% of quarry stone aggregate. The following three asphalt mixes were made based on the volumetric mix design control, but substituting different content percentages of quarry stone aggregate for recycled concrete aggregates from CDW (recycled coarse aggregate covered with additive) shown below: 20 %, 40% and 50%.

Finally the four mixtures were determined mechanical characterization tests or performance, these allow us to estimate the behavior of the mixture during the design life for low and medium traffic. Mechanical characterization tests performed were: susceptibility to moisture and susceptibility to permanent deformation.

Keywords: CDW, hot mix asphalt (HMA), SUPERPAVE, volumetric design, performance levels, susceptibility to moisture and susceptibility to permanent deformation.

Esta tesis está dedicada a todas aquellas personas para quienes, investigar, descubrir, innovar y buscar la mejora continua en beneficio de sus semejantes marca la pauta en su vida, haciéndolos imprescindibles profesionales...

AGRADECIMIENTOS

Primeramente agradezco por esta tesis que fue posible gracias a la cooperación de todas y cada una de las personas que apoyaron directa e indirectamente, muchas de las cuales han sido un soporte y compañía en este ciclo que se cierra y marca la apertura de uno nuevo. Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México por brindarme un espacio dentro del programa de Maestría en Ingeniería Civil, agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo económico brindado y agradezco también al Instituto de Ingeniería UNAM y de manera particular a la coordinación del Laboratorio de Vías Terrestres por haberme facilitado los medios necesarios para llevar a cabo el desarrollo de la investigación.

Un agradecimiento muy especial a Dios y a mi familia: a Marisol, a mis hijas, a mis padres, a mis hermanos y a mis suegros por la confianza que me brindaron en este tiempo dedicado para llevar a cabo este proyecto que es parte importante en mi vida.

Agradezco al Dr. Jesús Alfredo Hernández Noguera por aceptarme para realizar esta tesis bajo su dirección, gracias por su orientación y confianza. Agradezco también al M. I. Marco Tulio Mendoza Rosas, a la Dra. Alejandra Ossa López y al Ing. Francisco Armando Rangel Ordóñez, por su apoyo, su orientación y tiempo brindado.

Agradezco la colaboración de las empresas que donaron los distintos materiales empleados en esta tesis: La Planta de Asfalto de la Ciudad de México, por la donación del material asfáltico, a Grupo Pirámide, por la donación del agregado pétreo de cantera y a la planta de Concretos Recicladados S.A. de C.V. por la donación del agregado pétreo reciclado.

Por último agradezco a los compañeros del grupo de Maestría y a los compañeros del Laboratorio: Leticia, Maribel, Daniel, Richard, Don Roberto y Don Francisco por su tiempo y apoyo brindado.

ÍNDICE GENERAL

Resumen.....	1
Abstract.....	3
Agradecimientos.....	3
Índice General	4
Índice de Figuras	6
Índice de Tablas	8
1. Introducción.....	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Planteamiento del Problema	3
1.3 Objetivos.....	6
1.3.1 Objetivo General	6
1.3.2 Objetivos Particulares.....	6
1.4 Hipótesis	6
1.5 Justificación	7
1.6 Alcances.....	8
1.7 Desarrollo metodológico	8
2. Estado del Arte	12
2.1 Introducción	12
2.2 Agregados alternativos empleados en la manufactura de una MAC	14
2.2.1 Pavimento de Asfalto Reciclado (RAP).....	14
2.2.2 Escoria de alto horno.....	15
2.2.3 Residuos de plástico	15
2.2.4 Polvo de Neumático	15
2.2.5 Concreto reciclado procedentes de Residuos de Demolición y Construcción (RCD). 15	
2.3 ¿Qué son los concretos reciclados procedentes de los Residuos de Construcción y Demolición (RCD)?.....	16
2.4 Mezcla asfáltica en Caliente (MAC)	18
2.5 Experiencia sobre la manufactura de mezclas asfálticas en caliente (MAC) con agregados pétreos naturales que contienen agregados RCD.....	19
3. Desarrollo Experimental	25
3.1 Descripción del desarrollo experimental a seguir y el mecanismo de comprobación a utilizar	25

3.2	Agregados pétreos	27
3.2.1	Granulometría	27
3.2.2	Selección de los agregados pétreos	30
3.2.3	Caracterización de los agregados pétreos.....	33
3.3	Cemento o Ligante asfáltico	48
3.3.1	Selección del cemento asfáltico	48
3.3.2	Ensayos de caracterización del cemento asfáltico	49
3.3.3	Ensayos de seguridad para el cemento asfáltico	50
3.3.4	Resultados y análisis de la caracterización del cemento asfáltico.	51
3.4	Diseño Volumétrico de la MAC por la metodología SUPERPAVE	52
3.4.1	Selección del nivel de diseño requerido	52
3.4.2	Requerimientos de compactación	55
3.4.3	Selección del esfuerzo de compactación	56
3.4.4	Requerimientos de diseño volumétrico	56
3.4.5	Propiedades volumétricas y relaciones gravimétricas.....	57
3.4.6	Diseño de la mezcla de control y las mezclas combinadas con RCD	60
4.	Presentación y Análisis De Resultados.....	72
4.1	Análisis de pruebas experimentales: Caracterización mecánica del concreto asfáltico ..	72
4.1.1	Determinación de la Susceptibilidad a la humedad mediante pruebas TSR	72
4.1.2	Susceptibilidad a la deformación permanente	81
5.	Conclusiones	88
5.1	Conclusiones	88
5.2	Recomendaciones.....	89
5.3	Futuras Líneas de Investigación.....	90
5.4	Bibliografía	92

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de Causa y Efecto "Ishikawa"	3
Figura 2. En ocasiones los RCD se depositan en: tiraderos a cielo abierto, barrancas, zonas de reserva ecológica, suelos de conservación, cauces de ríos.	5
Figura 3. Desarrollo metodológico.....	9
Figura 4. La industria de la construcción consume grandes volúmenes de materias primas y, por otro, genera enormes cantidades de RCD, provocando grandes problemas en las ciudades [23].	13
Figura 5. Procedimiento de reciclaje del material producto de RCD.....	17
Figura 6. Comparación de la absorción de agua de tres tamaños diferentes de partículas de agregado reciclado y un tamaño de agregado grueso ligero natural [17].	18
Figura 7. Agregado RCD pre-revestido con cemento asfáltico para una MAC[7].	20
Figura 8. Agregado RCD, se aprecia el mortero adherido en combinación con el agregado de cantera.....	21
Figura 9. Ensayo de “rueda de pista”, deformación permanente [4].	23
Figura 10. Desarrollo Experimental	25
Figura 11. Límites granulométricos de Superpave, para una mezcla de TMN ¾” (19.00 mm) ...	28
Figura 12. Diseño de la curva de proyecto de la MAC (estructura densa)	29
Figura 13. Banco del Grupo Constructor Pirámide, este se ubica en el km 29,5 de la carretera Lechería – Texcoco	31
Figura 14. Agregado pétreo de cantera para esta investigación es un “Basalto”, procedente del banco del Grupo Constructor Pirámide	31
Figura 15. Planta Concretos reciclados, esta planta se ubica en el Distrito Federal en la demarcación de la delegación Iztapalapa, en la Avenida del Árbol No. 106	32
Figura 16. Planta de concreto reciclado, almacén de concreto simple o armado.....	33
Figura 17. Tratamiento del agregado pétreo de cantera y RCD.....	34
Figura 18. Se escogió el aditivo denominado “Sellador 5×1, Vinílico – Acrílico”, considerando sus componentes y consistencia, se utiliza mezclado con agua.....	35
Figura 19. En esta investigación se definieron las proporciones 4:1, 5:1, 6:1, 7:1, se realizan pruebas de inspección para garantizar cual es la idónea para el agregado reciclado, primeramente se dosifica el material	36
Figura 20. Por cada prueba con diferente proporción de “Sellador vinílico – acrílico” se realizó una inspección visual de cada agregado, observando que la película cubriera uniformemente y tuviera una apariencia consistente.....	37
Figura 21. En la proporción 6:1 del rango de tamiz No.8 (2.36mm) al No. 16 (1.18mm) se unen considerablemente entre sí.....	38
Figura 22. Se ejecuta sobre partículas gruesas retenidas en la malla No 4 (4.75 mm), una cara fracturada es una cara que expone el interior de la partícula	39
Figura 23. Prueba de la angularidad de agregado fino	40
Figura 24. Se aplica a agregados gruesos mayores a la malla No. 4 (4.75 mm), para medir la relación de dimensiones de una muestra representativa de las partículas del agregado empleando un calibrador	40
Figura 25. Ensaye "Equivalente de arena"	41
Figura 26. Ensaye de desgaste en la máquina de “Los Ángeles”.....	43
Figura 27. Intemperismo Acelerado	44
Figura 28. Ensayo a la Gravedad específica y absorción para la arena.....	45

Figura 29. Ensayo a la Gravedad específica y absorción para la grava.....	46
Figura 30. El cemento asfáltico utilizado en esta investigación es clasificado como PEMEX EKBÉ Superpave PG.....	48
Figura 31. Regiones geográficas para la utilización recomendable de cementos asfálticos Grado PG [9]	49
Figura 32. Niveles de diseño para una mezcla asfáltica densa	54
Figura 33. El compactador giratorio utilizado en esta investigación es de la marca TROXLER, modelo 4140.....	56
Figura 34. Diagrama de fases o de componentes de la mezcla asfáltica compactada.....	58
Figura 35. Determinación del porcentaje de asfalto.....	60
Figura 36. Determinación de la gravedad específica máxima teórica "Densidad RICE", a las mezclas realizadas para esta investigación	62
Figura 37. Elaboración de la MAC	64
Figura 38. Procedimiento de la prueba TSR para determinar la susceptibilidad a la humedad	75
Figura 39. Gráfica de resultados del ensayo de susceptibilidad a la humedad para la mezcla de control.....	77
Figura 40 Gráfica de resultados del ensayo de susceptibilidad a la humedad para las mezcla combinadas con agregado reciclado RCD	81
Figura 41. Tipos de deformación permanente, representa la acumulación de pequeñas deformaciones producidas por la aplicación de carga [21].....	82
Figura 42. Equipo para ensayo de rueda de pista en laboratorio, dispositivo pequeño: Esta integrado con un termorregulador de temperatura (temperatura de ensayo de 60°C), con una duración de 10,000 ciclos, se puede aplicar una carga de 700±10 N a una frecuencia de 26.5±1.0, internamente tiene un neumático de goma y el dispositivo de medición de la deformación de la rodera en la probeta, este va registrando sobre un eje longitudinal de la probeta (230mm) la deformación en milímetros por cada ciclo durante los 10 000 ciclos	83
Figura 43. Profundidad de la rodera en mm	84
Figura 44. Gráfica de resultados de la deformación permanente media para la mezcla de control	85
Figura 45. Gráfica de resultados de la deformación permanente media para las mezclas combinadas	87

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Denominación de las mezclas Superpave, tamaño máximo nominal, tamaño máximo ..	27
Tabla 2. Denominación de las mezclas Superpave, para una MAC de 3/4" (19.00mm)	27
Tabla 3. Estructura granulométrica para el diseño de la curva de proyecto de la MAC (estructura densa).....	29
Tabla 4. Resultados de las pruebas de consenso al agregado pétreo.....	42
Tabla 5. Resultados de los ensayos a las propiedades de origen	44
Tabla 6. Gravedades específicas y % de absorción del agregado pétreo de cantera.....	46
Tabla 7. Gravedades específicas y % de absorción agregado pétreo de RCD.....	47
Tabla 8. Gravedades específicas y % de absorción agregado pétreo de RCD cubierto	47
Tabla 9. Caracterización del cemento asfáltico PEMEX EKBÉ Superpave PG, pruebas de consistencia y seguridad	51
Tabla 10. Elementos Químicos del cemento asfáltico PEMEX EKBÉ Superpave PG.....	51
Tabla 11. Niveles de diseño de mezcla de Superpave	53
Tabla 12. Niveles de diseño en función del número de ejes equivalentes y/o el tipo de proyecto	55
Tabla 13. Especificaciones de esfuerzo de compactación Superpave	56
Tabla 14. Requisitos volumétricos para ESAL's de diseño $3 \times 10^6 < \text{ESAL's} < 3 \times 10^7$ y un T.M.N. de 19 mm (3/4")	57
Tabla 15. Determinación de la gravedad específica máxima teórica "Densidad RICE", para la mezcla de control.....	61
Tabla 16. Determinación de la gravedad específica máxima teórica "Densidad RICE", para la mezclas combinadas con agregado natural de cantera y agregado de concreto reciclado cubierto con aditivo procedente de RCD	62
Tabla 17. Resultados del diseño volumétrico de la mezcla MAC	63
Tabla 18. Resultados del ensayo de susceptibilidad a la humedad para la mezcla de control.....	76
Tabla 19. Resultados del ensayo de susceptibilidad a la humedad para la mezcla combinación 80-20.....	78
Tabla 20. Resultados del ensayo de susceptibilidad a la humedad para la mezcla combinación 60-40.....	79
Tabla 21. Resultados del ensayo de susceptibilidad a la humedad para la mezcla combinación 50-50	80
Tabla 22. Calculo de la pendiente de deformación en pista WTS_{aire} (inclinación de la rodada en aire), en la mezcla de control	85
Tabla 23. Porcentaje de la profundidad media de la rodera en aire PRD_{aire} , en la mezcla de control.....	85
Tabla 24. Calculo de la pendiente de deformación en pista WTS_{aire} (inclinación de la rodada en aire), en las mezclas combinadas	86
Tabla 25. Porcentaje de la profundidad media de la rodera en aire PRD_{aire} , en las mezclas combinadas	86

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

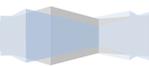
Las sociedades se caracterizan por propiciar el desarrollo económico y social de sus habitantes detonando la industria de la construcción para diversas obras de infraestructura de servicios donde se produce un aumento considerable de la producción de los Residuos de Construcción y Demolición (RCD) agravando el problema ambiental emanado de un inadecuado e incontrolado manejo, este es un problema especialmente de ciudades grandes.

En México, se producen cerca de 11 millones de toneladas al año de RCD y más del 20% es producida en el Distrito Federal (Ciudad de México), la experiencia en temas de reciclado de concreto producto de demolición es de carácter reciente, en el 2003 la Secretaría del Medio Ambiente hace una invitación a la Cámara Regional de la Industria Arenera del Distrito Federal y del Estado de México y a la CMIC para instalar una planta de tratamiento de residuos procedentes de la Construcción y Demolición de la zona metropolitana de la Ciudad de México, siendo en el 2004 la puesta en marcha de dicha planta ubicada en la Delegación Iztapalapa; los objetivos que busca es: reducir el consumo de agregados pétreos naturales y minimizar la explotación de nuevos bancos, impulsar la correcta gestión de los RCD y promover la utilización de agregados reciclados para disminuir los sitios de disposición de RCD, fomentar la innovación de tecnologías y calidad de los procesos acordes con el concepto de construcción sustentable y divulgar las cualidades de los agregados reciclados.

La normatividad existente en el país se origina en el Distrito Federal, esta entidad tiene competencia para emitir normas ambientales que establezcan requisitos o especificaciones más estrictos que los previstos en las Normas Oficiales, previniendo situaciones que podrían ir en detrimento de la calidad de vida de las personas, buscando garantizar el derecho a un medio ambiente adecuado y a la salud de los habitantes. Los RCD son clasificación dentro de los residuos de Manejo Especial, fracción VII; *residuos de la construcción, mantenimiento y demolición en general de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los residuos (DOF, 21-05-2013)*. La norma vigente actualmente es la NADF-007-AMBT-2004, *Clasificación y Especificaciones de Manejo para Residuos De La Construcción en el Distrito Federal (DOF, 12-07-2006)* y que próximamente será sustituida por la NADF-007-AMBT-2013, esta tienen por

objetivo establecer la clasificación y especificaciones de manejo de los residuos de la construcción para optimizar su control, fomentar su aprovechamiento y minimizar su disposición final inadecuada así como, hacer de uso obligatorio en todo el territorio del Distrito Federal para los productores de los residuos de la construcción y prestadores de servicios que intervienen en su generación, recolección, transporte, aprovechamiento o disposición.

Existen grandes ventajas para el empleo de los RCD como sustituto parcial o total del agregado pétreo, fino o grueso. La importancia del adecuado manejo de los RCD radica en lo económico, con algunas posibilidades de aprovechamiento y lo Ambiental realizando un manejo adecuado de los residuos.



1.2 Planteamiento del Problema

En la figura 1 se presenta el diagrama de causa y efecto para estudiar mejor el problema:

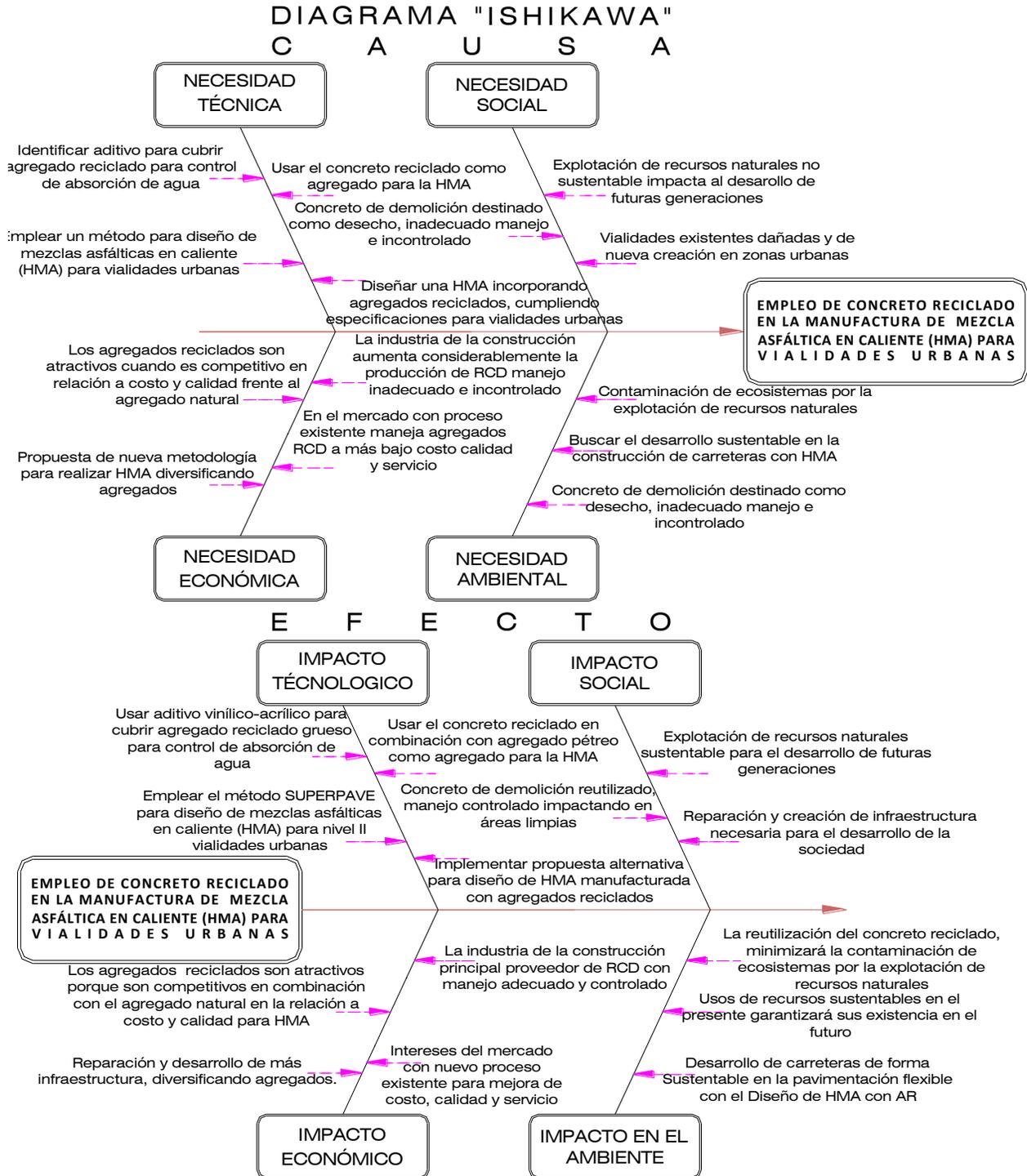


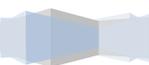
Figura 1. Diagrama de Causa y Efecto "Ishikawa"

En el diagrama de la figura 1 podemos concebir el problema de esta investigación, el cual se apoya en el *desarrollo sustentable*, que se entiende como un proceso que, tiene como restricción más importante, *la explotación de los recursos naturales*.

El consumo de importantes volúmenes de materiales por parte de la industria de la construcción fortalece *la explotación de recursos naturales*, además esta industria genera grandes cantidades de RCD, que en ocasiones tienen un *inadecuado e incontrolado manejo*. Estos problemas de tipo ambiental son de gran importancia en las grandes urbes, por ello en esta investigación se plantean estos problemas particularizados al Distrito Federal o Ciudad de México como comúnmente se le llama a esta localidad que es la capital del país.

En México, se producen 30,000 toneladas diarias de RCD y 6,500 son producidas en el Distrito Federal (DF), esto representa poco más de una quinta parte del RCD producido anualmente en el país. El DF, se caracteriza por favorecer el desarrollo social y económico de sus pobladores impactando la industria de la construcción para numerosas obras de servicios e infraestructura, asumiendo como resultado los problemas ambientales referidos a *la explotación de recursos naturales y un inadecuado e incontrolado manejo de RCD*, que consecuentemente, derivan en más problemas. Entre los problemas procedentes se tienen: a) Los bancos de material de la ciudad ya están suficientemente explotados, en ocasiones, se recurre a bancos fuera de la demarcación, repercutiendo en mayor costo de transportación e impacto en el deterioro de los ecosistemas dentro y fuera de la localidad; b) Esta localidad tiene un relleno sanitario de gran capacidad que se encuentra inhabilitado para recibir RCD, por lo tanto, en ocasiones los RCD se depositan en: tiraderos a cielo abierto, barrancas, zonas de reserva ecológica, suelos de conservación, cauces de ríos (ver figura 2); esto trae como consecuencia: la contaminación visual, del aire, de suelos, ríos superficiales como subterráneos y mantos acuíferos, favoreciendo que en zonas de reserva ecológica y suelos de conservación sean devastados sus ecosistemas por la expansión de los tiraderos.

El concepto de sustentabilidad aplicado a las vialidades urbanas debe garantizar *el cuidado al medio ambiente, la seguridad y la calidad de los desplazamientos*, así como la *rentabilidad económica y social*, contribuyendo al desarrollo de la ciudad y el país. Esto debe propiciar que la fabricación de vialidades urbanas y carreteras de asfalto, se estudien *diversos materiales y tecnologías innovadoras* para determinar su capacidad para el diseño, construcción y

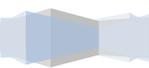


“EMPLEO DE CONCRETO RECICLADO EN LA MANUFACTURA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE PARA VIALIDADES URBANAS”

mantenimiento de los pavimentos. La incorporación de agregados de concreto reciclados en una mezcla asfáltica podría ser una forma de promover la *construcción sostenible*.



Figura 2. En ocasiones los RCD se depositan en: tiraderos a cielo abierto, barrancas, zonas de reserva ecológica, suelos de conservación, cauces de ríos.



1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Reutilizar el material de concreto reciclado producto de los residuos de construcción y demolición (RCD) en combinación con agregados pétreos de cantera en la manufactura de una mezcla asfáltica en caliente para su aplicación en vialidades urbanas.

1.3.2 Objetivos Particulares

- a) Diseñar mediante la metodología Superpave una mezcla asfáltica en caliente con agregados pétreos de cantera y determinar el contenido óptimo de asfalto.
- b) Fabricar tres mezclas asfálticas en caliente variando el contenido de agregados pétreos de cantera en combinación con los agregados RCD (20%, 40% y 50%) basados en las características de la mezcla de control, siguiendo la metodología Superpave.
- c) Evaluar el comportamiento mecánico de las mezclas asfálticas elaboradas: mezcla de control y mezclas combinadas, a través de los ensayos de comportamiento: Susceptibilidad a la humedad (ensayo de resistencia a la tensión indirecta) y de Deformación permanente (ensayo de rueda de pista) y establecer las diferencias entre ambos tipos de mezclas.

1.4 Hipótesis

En este trabajo de investigación se establece como base provisional la siguiente hipótesis. La mezcla elaborada que contiene el 100% de agregado pétreo de cantera, se cree que cumplirá el diseño volumétrico y granulométrico de acuerdo a los requerimientos para mezclas asfálticas densas, además cumplirá los parámetros de los ensayos de caracterización mecánica: Susceptibilidad a la humedad y Susceptibilidad a la deformación permanente para tránsito medio dentro de los requerimientos de diseño SUPERPAVE.

De las tres mezclas asfálticas en caliente fabricadas sustituyendo diferentes porcentajes de contenido de agregado pétreo de cantera por agregado de concreto reciclado RCD utilizando el diseño volumétrico de mezcla del control, se considera que varíen de forma gradual los

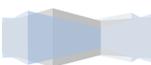


parámetros de diseño volumétrico, entre mayor proporción de RCD repercutirá de forma negativa, las mezclas 80%APC – 20%RCD y 60%APC – 40%RCD, sus parámetros serán aceptables, mientras que la proporción 50%APC – 50%RCD pueda caer entre parámetros no aceptables.

Con respecto a los ensayos de caracterización mecánica de susceptibilidad a la humedad, el parámetro %TSR muestra la resistencia a la tensión indirecta, la mezcla asfáltica de control elaborada con 100% de agregados pétreos de cantera se cree que tendrá una buena afinidad entre el cemento asfáltico utilizado en presencia de agua, presentando resultados aceptables, mientras que, las mezclas asfálticas elaboradas con agregados reciclados RCD se cree que muestren resultados donde hay una disminución gradual en el parámetro %TSR, al ir incrementando la sustitución de agregados pétreos de cantera por concreto reciclado, disminuirá la capacidad de adherencia entre el cemento asfáltico y los agregados haciéndolos sensibles a la acción del agua. Y finalmente en el ensayo de susceptibilidad a la deformación permanente, tanto la mezcla asfáltica de control con 100% de agregado pétreo de cantera, como las mezclas asfálticas elaboradas con agregados reciclados RCD, utilizando el procedimiento tipo “B” a 10,000 ciclos, se considera que los resultados serán aceptables, estarán dentro del parámetro de deformación por rodadura.

1.5 Justificación

El siguiente trabajo de investigación nace a raíz de la problemática ambiental provocada por *el uso excesivo de los recursos naturales y al impacto que las actividades humanas que tienen sobre el medio ambiente degradándolo hasta alcanzar condiciones que rebasan su propia capacidad de recarga, depositando de forma inadecuada e incontrolada residuos de la construcción y demolición (RCD)*. El *desarrollo sustentable* es una vertiente de los tiempos modernos donde se expresa que el crecimiento y desarrollo de los países debe ir directamente relacionados con las políticas de protección al medio ambiente y al desarrollo social de sus comunidades. El uso de material reciclado en las vialidades urbanas que provienen de residuos de la industria suma un valor agregado a la sustentabilidad, porque permite *ahorrar recursos económicos y provee un uso útil a los residuos*.



1.6 Alcances

- I. A continuación se plantean los siguientes alcances para esta investigación:
- II. Selección y caracterización física y mecánica de los siguientes materiales: pétreos de cantera, residuos de concreto reciclado (RCD) y ligante asfáltico.
- III. Diseñar mediante la metodología SUPERPAVE una mezcla asfáltica en caliente de control con agregados pétreos de cantera y determinar el contenido óptimo de asfalto.
- IV. Fabricar tres mezclas asfálticas en caliente variando el contenido de agregados pétreos de cantera en combinación con los agregados RCD (20%, 40% y 50%) basados en las características de la mezcla de control, siguiendo la metodología SUPERPAVE.
- V. Evaluar el comportamiento mecánico de las mezclas asfálticas elaboradas: mezcla de control y mezclas combinadas 80% AP – 20%RCD, 60% AP – 40%RCD y 50% AP – 50%RCD, a través de los ensayos de performance: Susceptibilidad a la humedad (ensayo de resistencia a la tensión indirecta) y de Deformación permanente (ensayo de rueda de pista) y establecer las diferencias entre ambos tipos de mezclas.
- VI. Determinar la factibilidad mediante la evaluación comparativa para una capa de rodadura para vialidades urbanas a partir del diseño de una mezcla asfáltica en caliente donde se incorpora agregados pétreos de cantera en combinación con agregados reciclados.

1.7 Desarrollo metodológico

En esta investigación se propone utilizar concreto producto de demolición para fabricar un concreto asfáltico. La intención es reutilizar agregados de concreto reciclado en combinación con agregados pétreos de cantera mediante el empleo de la metodología de diseño SUPERPAVE (Superior Performing Asphalt Pavement), basados en el nivel I y II, que corresponde a vialidades urbanas, esta metodología evalúa los componentes de mezcla de forma individual y de interacción combinada concibiendo las afectaciones de la mezcla de acuerdo al desempeño.

En la figura 3 se plantea el *Desarrollo Metodológico*, este se divide en cuatro fases para poder emprender mejor la investigación sin perder de vista los objetivos y alcances. La primera fase, *Documentación Bibliográfica*, se refiere a la búsqueda de literatura referente a investigaciones efectuadas alrededor de las MAC elaboradas con agregados reciclados procedentes de RCD en



“EMPLEO DE CONCRETO RECICLADO EN LA MANUFACTURA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE PARA VIALIDADES URBANAS”

sus distintas variantes, además de literatura referente a la metodología Superpave y normatividad para diseño de vialidades existente en México.

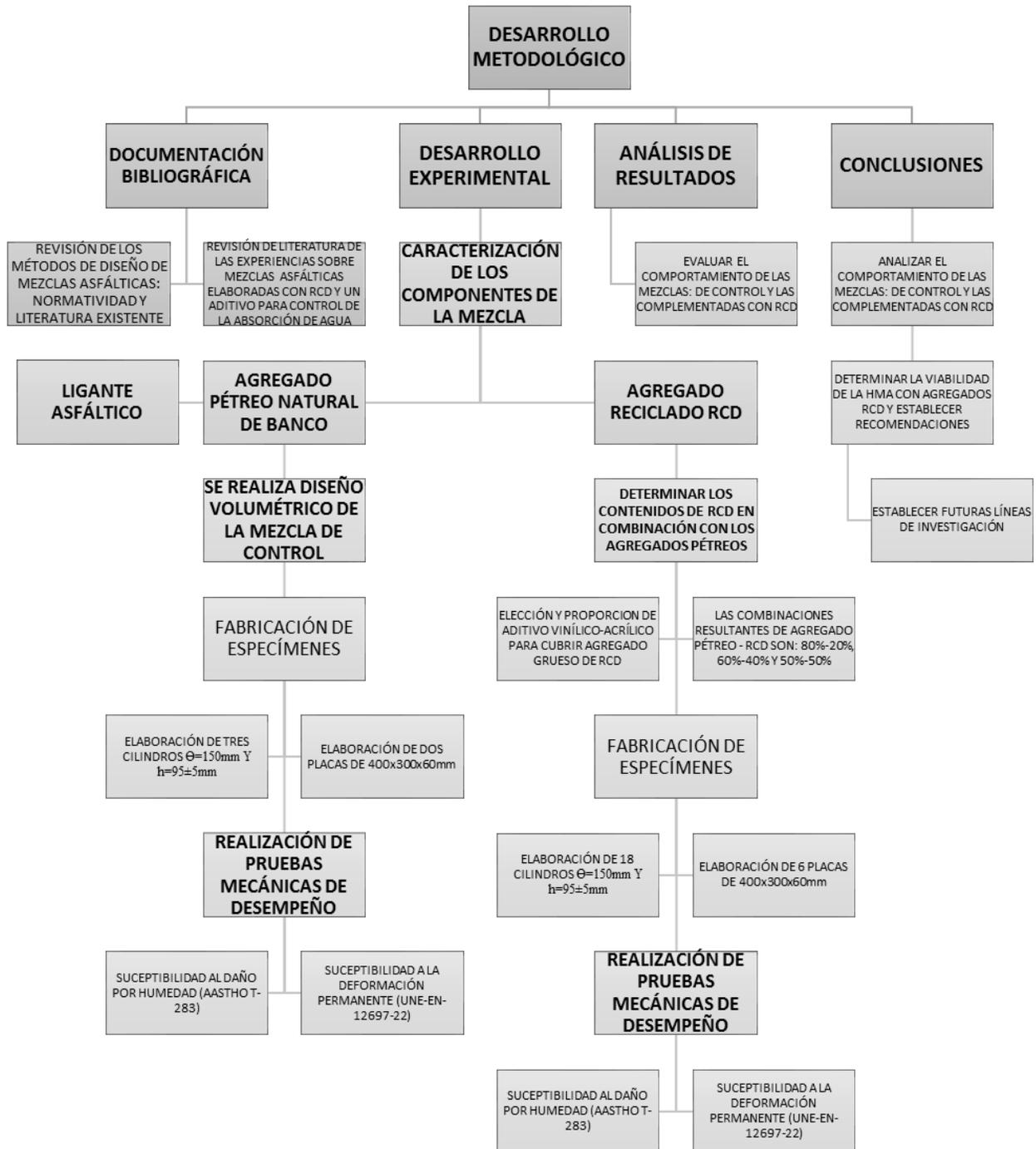
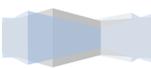


Figura 3. Desarrollo metodológico

La segunda fase, Desarrollo Experimental, es la parte práctica, donde a partir de la metodología seleccionada se caracterizó física y mecánicamente los componentes de las MAC (agregados

pétreos de cantera, agregados de concreto reciclado RCD y el ligante asfáltico convencional a utilizar), posteriormente se fabricaron las cuatro MAC diferentes, una mezcla de control que se le determina el diseño volumétrico (esta contiene el 100% de agregado pétreo de cantera), tres MAC basadas en el diseño volumétrico de la mezcla de control, pero sustituyendo en diferentes porcentajes el contenido de agregado pétreo de cantera por agregado de concreto reciclado RCD (el agregado reciclado grueso se cubrió con un aditivo para control de absorción de agua), a las cuatro mezclas se les determinan los ensayos de caracterización mecánicos. La tercer fase, Análisis de Resultados, se evalúan los ensayos de caracterización mecánica, esto permite estimar el comportamiento de la mezcla durante el periodo de vida de diseño para tránsito bajo y medio, los ensayos son: a) Susceptibilidad a la humedad, en este se identifica si una combinación de ligante asfáltico y agregado es susceptible a la acción del agua; b) Susceptibilidad a la deformación permanente, en este se mide el deterioro caracterizado por la existencia de una acción transversal de la superficie que ya no ocupa su posición original. En la última fase, Conclusiones, se analiza cada una de las fases presentadas durante la investigación determinando las ventajas y desventajas de la fabricación de la MAC con agregados reciclados procedentes de RCD, también se establecerán recomendaciones y futuras líneas de investigación.



CAPÍTULO 2

ESTADO DEL ARTE

2. ESTADO DEL ARTE

2.1 Introducción

En el año 2012 la Asamblea de las Naciones Unidas celebró la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo Sustentable, en Río de Janeiro, donde se generó el documento “El futuro que queremos” [14], el cual expresa la visión del desarrollo sustentable apoyado en los tres pilares: económico, social y ambiental. El desarrollo sustentable es una vertiente que expresa el crecimiento y desarrollo de los países que deben ir directamente relacionados con las políticas de protección al medio ambiente y al desarrollo social de sus comunidades, en ocasiones el desarrollo sustentable se entiende como un proceso, una de las restricciones más importantes en este proceso es la explotación de los recursos naturales. El concepto de sustentabilidad aplicado a las carreteras y vialidades urbanas no sólo es referido al cuidado del componente ambiental, sino que cualquier aspecto que pretenda ser sustentable en las vías de comunicación debe garantizar además del cuidado al medio ambiente la seguridad y la calidad de los desplazamientos, así como la rentabilidad económica y social, contribuyendo al desarrollo del país [11].

En la industria de la carreteras asfálticas, un número considerable de materiales y tecnologías innovadoras se están estudiando para determinar su idoneidad para el diseño, construcción y mantenimiento de estos pavimentos, MAC con RCD, pavimento de asfalto reciclado (RAP), cenizas volantes, cenizas de fondo, plásticos, son algunos de los materiales que los investigadores de transporte creen que depara el futuro a la sostenibilidad en la industria de las carreteras de asfalto [1].

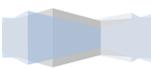
La industria de la construcción consume grandes volúmenes de materias primas y, por otro, genera enormes cantidades de escombros procedentes de la demolición o de desperdicios de materiales, los RCD son uno de los principales problemas de las grandes urbes, ver figura 4. En el Reino Unido, más del 50% de los residuos depositados en un vertedero típico viene de la construcción, unos 70 millones de toneladas de RCD cada año. En Australia, unos 14 millones de toneladas de RCD se han puesto en vertederos cada año, en el que alrededor del 44% de los residuos se atribuye a la industria de la construcción. En los Estados Unidos de América, alrededor del 29% de los residuos es de construcción, mientras que en Hong Kong, es alrededor del 38% [22]. En México se producen casi 11 millones de toneladas al año de RCD. Entre los

diversos tipos de materiales de construcción, el concreto resultó ser el elemento más importante. La incorporación de agregados de concreto reciclados en una MAC podría ser una forma de promover la construcción sostenible [8]. Hasta la fecha, varias investigaciones en Europa y Asia [2, 5, 6, 7, 12, 13, 17, 18, 19] han examinado el uso de este tipo de material de desecho en MAC. En países de la Unión Europea, la actividad del reciclaje de RCD tiene aproximadamente 20 años, reutilizándose el material reciclado en las obras de Ingeniería Civil [8].



Figura 4. La industria de la construcción consume grandes volúmenes de materias primas y, por otro, genera enormes cantidades de RCD, provocando grandes problemas en las ciudades [23].

Existen enormes ventajas para el uso de los agregados de concreto reciclado procedentes de los RCD, ya sea como sustituto parcial del agregado pétreo de cantera, especialmente aquellos que proceden de la trituración de concretos estructurales, simples o de desperdicio. La importancia del adecuado manejo de los RCD radica en lo *económico*, con algunas posibilidades de aprovechamiento como: venta directa de piezas y artículos recuperados en la demolición, reúso de material producto de la excavación, venta de materiales reprocesados para integrarse al flujo comercial, venta de materiales para su reprocesamiento (reciclaje como: metales, vidrio, madera, papel, cartón y plásticos) y lo *Ambiental* realizando un manejo adecuado de los residuos para evitar o reducir impactos [20].



2.2 Agregados alternativos empleados en la manufactura de una MAC

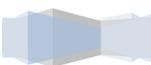
El desarrollo del Programa Estratégico de Investigación de Carreteras (*Strategic Highway Research Program, SHRP*, por sus siglas en inglés), 1996 [21]; expone que existe una gran variedad de agregados minerales que han sido empleados para manufacturar una MAC. Algunos materiales son llamados **agregados naturales** (en inglés son llamados “back – run”) porque provienen de depósitos fluviales o glaciares, utilizados sin ningún proceso. Los **agregados elaborados** pueden incluir a los naturales que han sido divididos en distintas partes según su tamaño, lavados, triturados o tratados para mejorar ciertas características de comportamiento de la MAC. En muchos casos el agregado es explotado en canteras y el proceso al que es sujeto es la trituración y la división de acuerdo a tamaños.

El **agregado sintético** es cualquier material no extraído de depósitos ni explotado en canteras, en muchos casos, es un sub – producto industrial.

Los **residuos** son usados como agregados o incorporados en los pavimentos asfálticos para resolver un problema ambiental (plástico, neumáticos y RCD). En algunos casos, los residuos pueden aportar una mejora en ciertas características del desempeño de la MAC. En otros casos solo son considerados para resolver el problema de la disposición de los residuos sólidos sin esperar una mejora en el desempeño de la MAC. A continuación se realiza una descripción de agregados alternativos utilizados en la manufactura de una MAC.

2.2.1 Pavimento de Asfalto Reciclado (RAP)

Un pavimento existente puede ser removido y reprocesado para elaborar una nueva MAC, los porcentajes de material reciclado puede llegar hasta en un 70%. El pavimento reciclado o RAP “Reclaimed Asphalt Pavement” es una variante muy utilizada y una significativa fuente de agregados para pavimentos asfálticos, así como una importante alternativa de tipo ambiental. Es una técnica muy regulada, existen diferentes metodologías de uso. Los resultados son aceptables con relación al costo de fabricación, transporte y control de calidad comparado si se realizará una mezcla convencional [21].



2.2.2 Escoria de alto horno

Es un agregado sintético que mejora de las propiedades de la mezcla ante la acción del agua, la fisuración por fatiga y fisuración por baja temperatura, características deseadas para la mejora del desempeño de la MAC. La escoria de alto horno es de forma angular, rugosa y con alta dureza, debido a la porosidad del material se incrementa la absorción del asfalto [10].

2.2.3 Residuos de plástico

Los residuos de plástico pueden ser manejados para complementar parte de los agregados pétreos de una MAC, o como modificador del ligante. Ha demostrado un incremento de la resistencia a la fatiga, mejora la trabajabilidad de la mezcla en altas como a bajas temperaturas [10].

2.2.4 Polvo de Neumático

El polvo de neumático es un residuo que utiliza en general dos métodos: a) Vía seca, en este método se añade directamente el polvo a la mezcla como fragmento de los agregados finos, el porcentaje sustituido oscila entre el 1 y el 3%, el complemento provoca un aumento del contenido de asfalto en la mezcla entre un 10 a 20%, reduciendo la deformación permanente de la mezcla y una reducción del ruido de circulación de los vehículos. b) Vía húmeda, en este método se modifica previamente el asfalto con los residuos de polvo después de realizada la mezcla con los agregados pétreos y el filler, el porcentaje de adición oscila entre al 18 al 22% sobre el peso del asfalto, teniendo como consecuencia mejor comportamiento ante roderas y fatiga [10].

2.2.5 Concreto reciclado procedentes de Residuos de Demolición y Construcción (RCD).

Los métodos con los agregados pétreos de concreto reciclado procedentes de RCD continúan en desarrollo, aunque con panoramas muy prometedores. Independientemente de la fuente o los métodos de procesamiento o mineralogía, se espera que el agregado provea un fuerte esqueleto pétreo para resistir las repetidas aplicaciones de la carga.

Los agregados de textura rugosa de buena cubicidad dan más resistencia que los redondeados y de textura lisa. Cuando una masa de agregados es cargada, puede generarse dentro de dicha masa un plano por lo que las partículas se deslizan unas respecto de las otras, lo cual resulta en una

deformación permanente de la masa. Es en este plano donde los “esfuerzos cortantes” exceden la “resistencia de corte” de la masa de agregados. La resistencia al corte de agregado es de crítica importancia en las MAC. A este respecto los agregados pétreos RCD, son aceptables con características para poder complementar el agregado pétreo natural de una MAC.

2.3 ¿Qué son los concretos reciclados procedentes de los Residuos de Construcción y Demolición (RCD)?

En los últimos años, el uso del concreto viejo de pavimentos, edificios y otras estructuras como fuente de agregados, es una realidad, ya se indica en proyectos de gran magnitud, por ejemplo en México, la construcción de la línea 12 del transporte colectivo metro ya lo indicaba, resultando en ahorro de material y energía, este agregado se le ha denominado concreto reciclado, comúnmente llamado en este país como “cascajo”.

El *procedimiento* para su obtención involucra (ver figura 5): 1) Demolición y remoción del concreto viejo, 2) Trituración en los triturados primarios y secundarios, 3) Remoción de acero y otros artículos embebidos (El concreto con una gran cantidad de acero de refuerzo se tritura con un triturador de vigas), 4) Tamizado y lavado (en ocasiones no se realiza) y finalmente 5) El Amontonamiento de los agregados grueso y fino resultantes. Se debe evitar que el producto final se contamine con polvo, yeso, madera y otros materiales extraños, en cuanto a la recepción del escombros debe estar libre de materiales indeseables que pueden restar calidad a los productos reciclados [20].

El *almacenamiento* en la planta puede realizarse dependiendo de las características del escombros, por ejemplo, el almacenamiento de la planta de donde proviene el agregado RCD utilizado en esta investigación (Concretos Reciclados S.A. de C.V.) se acomoda en diferentes almacenes: 1) Almacén de concreto simple o armado, 2) Almacén de materiales mezclados, como pueden ser morteros, concretos, tabiques, mamposterías, cerámicos, tepetatosos, etc. “Llamado todo en uno”, 3) Arenas y Arcillas producto de excavaciones y 4) Fresado de carpeta asfáltica [7].

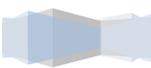




Figura 5. Procedimiento de reciclaje del material producto de RCD.

La *trituración y clasificación* se lleva a cabo de acuerdo a la granulometría deseada y simultáneamente se acomoda el material en diferentes almacenes. El *equipo de trituración* puede ser a base de quijadas, montado sobre orugas, computarizado y manejado a control remoto, con electroimán para separación del acero y sistema de aspersión para la estabilización de polvos. El equipo de cribado montado sobre orugas, computarizado y manejado a control remoto permite clasificar materiales con cuatro curvas granulométricas diferentes. Estos equipos se tiene una gran versatilidad en la operación, ya que pueden ser desplazados de un almacén a otro, economiza la operación sin requerir de instalaciones especiales. Los *materiales para reciclar* son los que provienen de demoliciones y desechos de la industria de la construcción (edificaciones, excavaciones, vialidades, urbanizaciones, caminos, etc.) Es importante recalcar el cuidado que se debe tener de no contaminar los productos a reciclar, ya que, para poder llevar a cabo esta actividad, estos deberán entregarse libres de materiales tales como: basura, papel, madera, plástico, textiles y materiales tóxicos. Los materiales aceptados son: adocretos, arcillas blocks, tabiques, cerámicos, concreto armado concreto simple, mamposterías, ladrillos, fresado de carpeta asfáltica [8].

Kosmatka et al, 2012 [20], definen al *concreto reciclado* como el concreto viejo que fue triturado para producir agregados. El agregado de concreto reciclado es usado comúnmente en la reconstrucción de pavimentos, también es usado satisfactoriamente como un agregado en sub bases granulares, sub bases de concreto magro, suelo – cemento y en el concreto nuevo como la única fuente o como remplazo parcial del agregado nuevo. El agregado del concreto reciclado generalmente tiene una mayor absorción de agua y una masa específica relativa menor que el

agregado convencional. Esto resulta de la alta absorción del mortero poroso y de la pasta del cemento endurecido en el agregado del concreto reciclado. Los valores de absorción típicamente varían del 3% al 10 %, dependiendo del concreto que se recicla. Esta absorción se encuentra entre los valores de los agregados naturales y ligeros. Los valores aumentan a medida que el agregado grueso disminuye (ver figura 6). La forma de las partículas de los agregados de concreto reciclado es similar a las de las rocas trituradas. La masa específica relativa disminuye progresivamente a medida que el tamaño de las partículas disminuye.

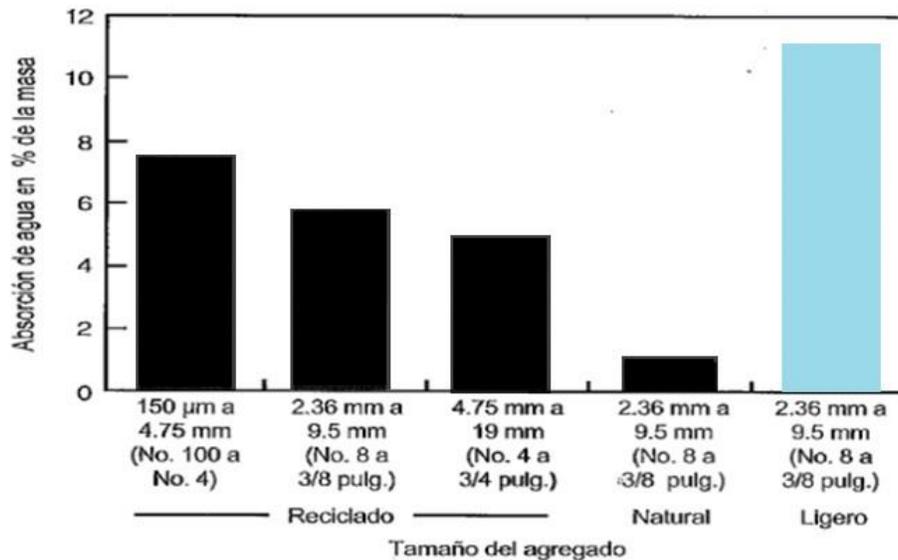


Figura 6. Comparación de la absorción de agua de tres tamaños diferentes de partículas de agregado reciclado y un tamaño de agregado grueso ligero natural [17].

2.4 Mezcla asfáltica en Caliente (MAC)

La SHRP, 1996 [21]; nos dice que el concreto asfáltico es un material vial producto de la combinación convencional combinado de un ligante asfáltico y un agregado mineral. El ligante asfáltico, que puede ser un cemento asfáltico o un modificado, une las partículas en una masa cohesiva. Al ser impermeable al agua, el ligante asfáltico también impermeabiliza la mezcla. El agregado mineral, ligado por el cemento asfáltico, actúa como un esqueleto que aporta resistencia y rigidez al sistema. Al incluir la MAC tanto cemento asfáltico como agregado mineral, su comportamiento es afectado de forma importante por las propiedades individuales de cada componente y por la correspondencia mutua de aquellos actuando como un sistema. Para entender mejor el comportamiento de las mezclas asfálticas es de considerar los tipos básicos de deterioros: la deformación permanente, la fisuración por fatiga y fisuración por baja temperatura.

La característica más importante del ligante asfáltico es la susceptibilidad térmica, el comportamiento del cemento asfáltico depende también de la duración del tiempo de aplicación de la carga y la velocidad de la carga, estos dos factores pueden intercambiarse. El cemento asfáltico es un material visco – elástico porque exhibe simultáneamente características que tienen ambos estados, viscosas y elásticas, a una temperatura intermedia condición prevista en el pavimento, un fluido viscoso y un sólido elástico.

Otro tipo de ligantes son los ligantes asfálticos modificados, estos son productos diseñados para superar las propiedades del asfalto original, mejorando así el desempeño del pavimento a largo plazo, la mayoría intenta reducir la dependencia con la temperatura, el endurecimiento por oxidación del cemento asfáltico y la susceptibilidad a la humedad de la mezcla asfáltica.

2.5 Experiencia sobre la manufactura de mezclas asfálticas en caliente (MAC) con agregados pétreos naturales que contienen agregados RCD

Al revisar la literatura existente sobre este tema, hay autores [9] [17] que concuerdan que no es posible manufacturar una MAC utilizando completamente agregados reciclados de RCD, debido a la alta absorción de agua y al desgaste presentado en los resultados de las pruebas realizadas a los componentes de la mezcla. A su vez, también se observó que los resultados de las pruebas son muy variables en cuanto a la resistencia al daño por agua en mezclas hecha con RCD, la susceptibilidad al daño por humedad es una propiedad de la que existe un contraste de opiniones: algunos autores [2, 4, 5, 6, 7], afirman una adecuada resistencia, sin embargo, otros autores [10, 12, 17, 18, 19], ven necesario limitar el porcentaje de RCD y/o tratar el RCD por separado, esto para lograr una resistencia al agua satisfactoria de tales mezclas. *Lee et al, 2012* [7], utilizaron una pasta de cemento de escoria para recubrir el RCD, con espesor de revestimiento de 0,25 mm, el cual fue evaluado siendo el volumen de pasta de revestimiento óptimo para una MAC. Los resultados indican que las propiedades de una MAC elaborada con RCD tienen contenidos altamente poros, sin embargo, las propiedades físicas de una MAC elaborada con RCD puede utilizarse como agregado, en cuanto a los resultados por daño a la humedad se encontraban dentro de la norma taiwanés de requisitos especificados (ver figura 7). *Zhu et al, 2012* [13], manifestaron que los agregados RCD revestidos con una resina de silicona líquida mejoró la

resistencia al daño por agua de una MAC. Por otra parte la revisión de la literatura técnica nos permite confirmar que otras propiedades de una MAC se ven afectados por el uso de RCD en lugar de los agregados naturales (ver figura 7). Investigadores [2, 4, 5, 6, 7, 10, 12, 17, 18, 19] han declarado que una MAC hecha con RCD es más rígida que las mezclas convencionales, la mayoría señalaron que una MAC con RCD tiene un comportamiento a la deformación permanente similar o mejor, mientras que otros, indican que en ocasiones a pesar de cumplir con la normatividad, la resistencia a la deformación permanente disminuye a medida que el porcentaje de RCD en la mezcla aumenta.

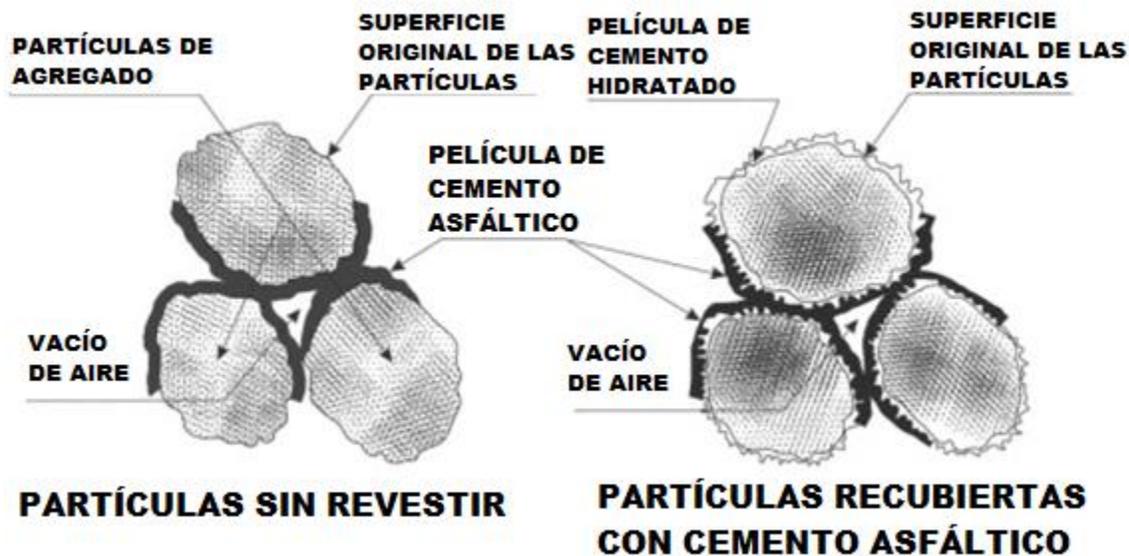


Figura 7. Agregado RCD pre-revestido con cemento asfáltico para una MAC[7].

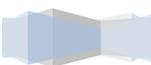
La resistencia a la fatiga de una MAC que contiene RCD es la propiedad mecánica que ha sido menos estudiada en la literatura. Los pocos estudios realizados [18] sobre este tema indican que la vida de fatiga de una MAC hecha con RCD es similar o mejor que la que presentan las mezclas convencionales, por otro lado, concuerdan que los agregados de RCD, por su proceso de producción, tiene textura rugosa de buena cubicidad lo cual lo confiere de una buena resistencia al corte y que al combinarse con los agregados pétreos naturales mejora el comportamiento de la mezcla, sin embargo, estos estudios sugieren que el mortero adherido al agregado influye de forma negativa [19]. Por otro lado, *Lee et al, 2012* [7], también nos exponen acerca de las propiedades del agregado RCD, indicando que estos agregados son ásperos, porosos, planos y de forma irregular, además poseen en este comportamiento bajo valores de baja gravedad específica, alta tasa de poro y absorción de agua. Su solidez y resistencia a la fricción son menores que en

agregados de cantera, debido principalmente a la variación significativa de sus propiedades como consecuencia de los agregados causada por la débil fuerza de la pasta de cemento endurecida (mortero) adherida a la superficie. Por lo anterior, las propiedades mecánicas de una MAC elaboradas con RCD son generalmente inferiores a las de una MAC con agregado de cantera. A su vez, *Sumeda Paranavithana et al, 2006 [19]*, reportan que los agregados RCD difieren de los agregados pétreos naturales debido a la pasta de cemento unido a la superficie de los agregados de cantera después del proceso de reciclaje, esta pasta de cemento altamente porosa y otros contaminantes contribuyen a la menor densidad de las partículas y mayor porosidad, la variación en la calidad de los agregados RCD y la absorción de agua superior, ver figura 8.



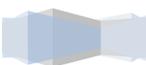
Figura 8. Agregado RCD, se aprecia el mortero adherido en combinación con el agregado de cantera.

Sumeda Paranavithana et al, 2006 [19], al utilizar los agregados RCD en una MAC encontraron que todas las propiedades volumétricas (excepto el porcentaje de vacíos de aire), los valores del módulo de fluencia y elásticos de especímenes de asfalto que contienen RCD eran relativamente más bajos comparados con los valores encontrados para especímenes similares hechos con sólo agregados naturales, sin embargo, estas propiedades medidas se encontraban dentro de los límites recomendados aceptables, el %TSR resultó ser del 70%, siendo aceptable de acuerdo a especificaciones Taiwanesas y exhibieron una tendencia a la disminución del %TSR con el aumento de la relación de sustitución de agregado RCD, debido a la absorción del cemento asfáltico; empero, la deformación permanente se mejora con el aumento de sustitución del agregado RCD.



Pérez et al, 2007 [17], evaluaron el comportamiento en tres diferentes mezclas elaboradas, una con 100% de agregado de cantera, otra con 100% de agregado reciclado y una última con 50% de agregado natural y 50% de agregado reciclado, los resultados demostraron la imposibilidad de utilizar únicamente agregado reciclado en una MAC, ya que estas presentan poca cohesión y poco recubrimiento del agregado por el cemento asfáltico. Lo anterior debido a la alta porosidad del agregado reciclado, por lo tanto, el aumento de la superficie específica del mismo hace que se requieran mayores cantidades de asfalto para lograr un mejor comportamiento. En las mezclas elaboradas con el 50% de agregado reciclado, los resultados de pruebas de susceptibilidad a la humedad fueron ligeramente superiores con respecto a la MAC elaborada con el 100% de agregado natural. En el ensayo de deformación permanente (Wheel Tracking Test) las deformaciones sufridas por la mezcla elaborada con el 100% de agregado natural fueron mayores que las presentadas en las mezclas elaboradas con agregado RCD.

Pasandín, et al, 2014a [5], evaluaron el efecto del tiempo de envejecimiento en las propiedades principales de las MAC elaboradas con agregado RCD. Las mezclas se dejaron en un horno durante 0 h, 2 h y 4 h a la temperatura de la mezcla, se estudiaron las propiedades volumétricas, rigidez y resistencia a la deformación permanente para una MAC que contiene 0%, 5%, 10%, 20% y 30% de RCD, los resultados que se obtuvieron son mayor oxidación de la MAC que contiene RCD, aumento del número de vacíos de aire, la rigidez a temperatura ambiente y la deformación (ver figura7). *Pasandín, et al, 2014b [6]*, también evaluaron la incorporación de agregado RCD en MAC debido al daño por agua, el uso de este material demostró tener durabilidad insuficiente, por ello en su investigación, realizan una caracterización en laboratorio de una MAC elaborada con agregados RCD, analizando los porcentajes: 5 %, 10 % , 20 % y 30 % de RCD en lugar de los agregados de cantera. Por otro lado para mejorar la resistencia al daño por el agua de las mezclas, los RCD se revistieron con 5 % de emulsión asfáltica previamente a la elaboración de las MAC. Los resultados indicaron que las mezclas cumplían con la resistencia y especificaciones españolas requeridas para capas de base, en cuanto a la evaluación de la rigidez, la deformación permanente y la fatiga de las mezclas, los resultados indicaron que las MAC elaboradas con RCD recubierta de una emulsión de asfáltica tiene propiedades mecánicas similares a los obtenidos para mezclas convencionales.



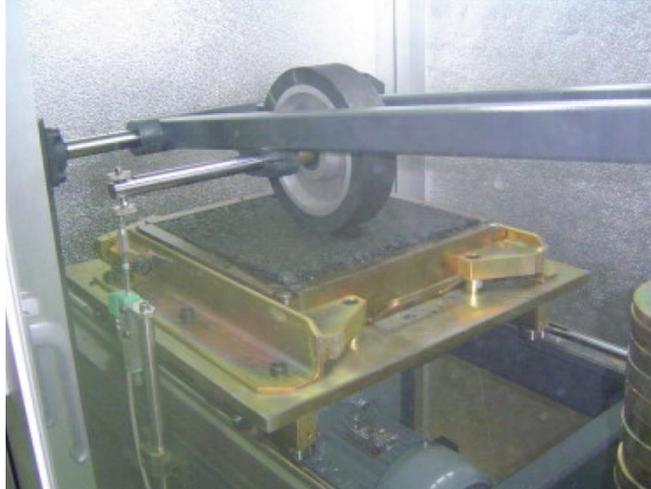
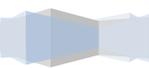


Figura 9. Ensayo de “rueda de pista”, deformación permanente [4].

García Salas, 2014 [10], diseño y elaboró probetas de concreto asfáltico realizando sustituciones parciales del agregado pétreo natural por agregado reciclado de RCD en porcentajes 10%, 20%, 30%, y 40% sobre la masa total de los agregados que componen la fase sólida de la mezcla. Los resultados de pruebas TSR fueron en todos los casos mayores al 80% lo que sugiere que el material no presentará daños por humedad significativos. Por otra parte, las pruebas de susceptibilidad a la deformación plástica (ver figura 9) mostraron que el aumento de porcentaje de agregado reciclado en las mezclas, mejora el comportamiento del concreto asfáltico, lo cual se atribuye a un aumento de la resistencia al esfuerzo cortante de la mezcla por la presencia de materiales con mayor angularidad como es el caso de los residuos RCD.



CAPÍTULO 3
DESARROLLO
EXPERIMENTAL

3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

3.1 Descripción del desarrollo experimental a seguir y el mecanismo de comprobación a utilizar

Para llevar a cabo este trabajo de investigación se plantea en la figura 10 el *Desarrollo Experimental*, realizado a partir de los objetivos y alcances.

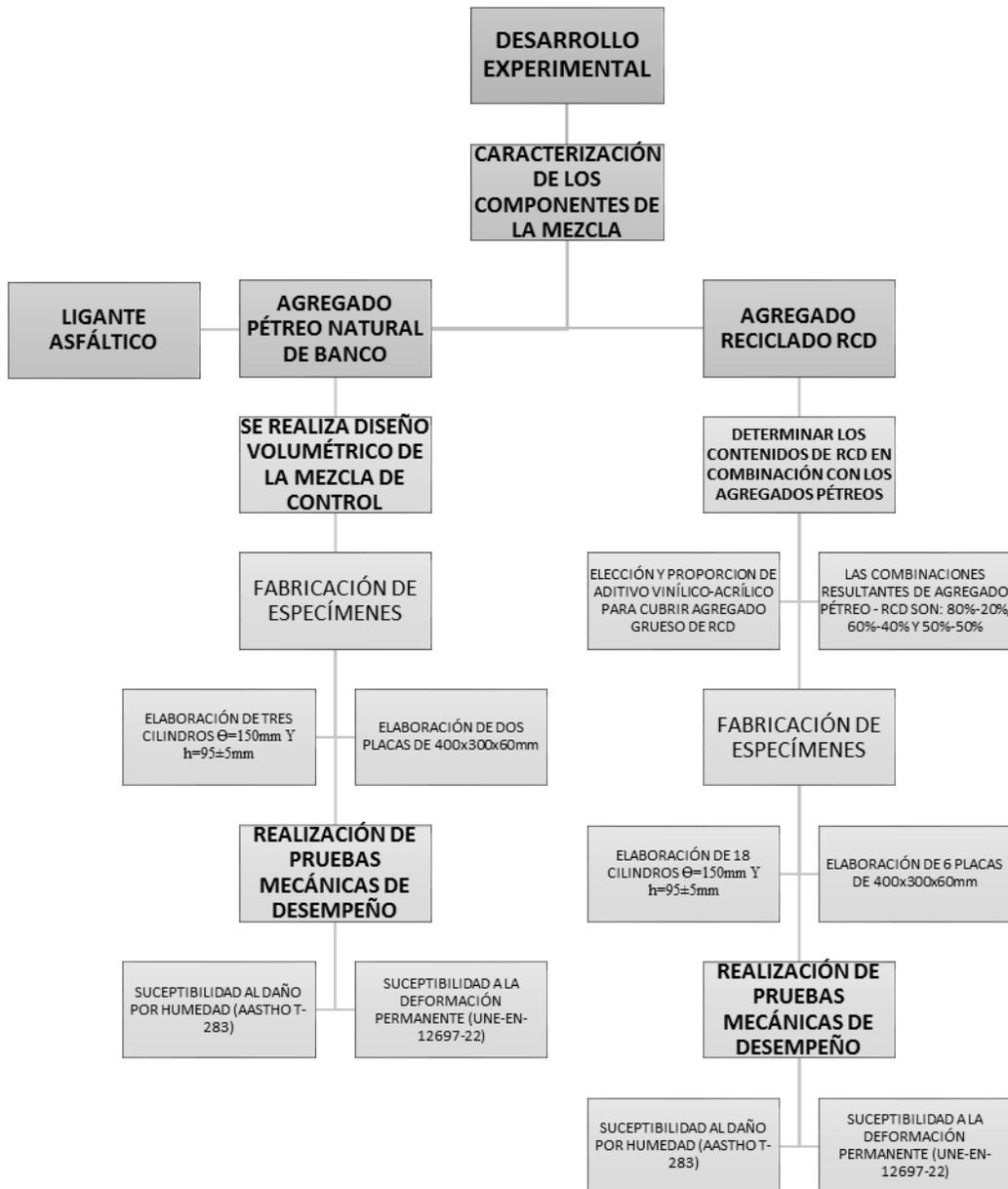
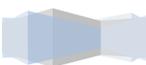


Figura 10. Desarrollo Experimental

Inicialmente se selecciona y caracteriza física y mecánicamente los componentes de la mezcla asfáltica: agregados pétreos de cantera, agregados de concreto reciclado RCD y el ligante asfáltico convencional *PEMEX EKBÉ Superpave PG*, también se selecciona un aditivo para control de absorción de agua en el agregado grueso reciclado con tamaño delimitado del tamiz $\frac{3}{4}$ "(19mm) a $\frac{1}{4}$ "(6.3mm). Posteriormente se fabricaron cuatro MAC diferentes, una mezcla que es la de control, se le determina el diseño volumétrico, esta contiene el 100% de agregado pétreo natural; Tres mezclas se realizaron con el mismo diseño volumétrico de la mezcla de control, pero sustituyendo en diferentes porcentajes el contenido de agregado pétreo de cantera por agregado de concreto reciclado RCD (el agregado reciclado grueso previamente cubierto con aditivo) a razón de: 20%, 40% y 50%. A las cuatro mezclas fabricadas se les determinan los ensayos de caracterización mecánica o de desempeño, estos nos permiten estimar el comportamiento de la mezcla durante el periodo de vida de diseño para tránsito bajo y medio. Los ensayos de caracterización mecánica que se realizaron son: a) *Susceptibilidad a la humedad*, este permite identificar si una combinación de ligante asfáltico y agregado es susceptible a la acción del agua, también mide la efectividad de los aditivos anti-desprendimiento o mejoradores de adherencia. b) *Susceptibilidad a la deformación permanente*, este mide el deterioro caracterizado por la existencia de una acción transversal de la superficie de la carpeta asfáltica que ya no ocupa su posición original, representa la acumulación de pequeñas deformaciones producidas con cada aplicación de carga, siendo esta deformación irrecuperable.

Es importante señalar que esta investigación se basa en la metodología SUPERPAVE para el diseño de las MAC, a través del protocolo AMAAC 2008. Al no existir una normatividad en el país para el diseño de mezclas asfálticas utilizando agregados reciclados por lo tanto se llevaron a cabo modificaciones a la metodología, las cuales son parte de la aportación al trabajo de investigación y se describirán posteriormente.



3.2 Agregados pétreos

3.2.1 Granulometría

La granulometría a utilizar en una mezcla asfáltica se debe seleccionar de acuerdo a la función requerida para la capa asfáltica en la estructura de un pavimento, *en esta investigación se utilizó la granulometría especificada por la metodología Superpave para una mezcla de ¾”(19.00mm), tamaño máximo, T.M. 1” (25.00 mm) y Tamaño máximo Nominal, T.M.N. ¾”(19.00 mm)*, ver tabla 1 y 2 [21].

Tabla 1. Denominación de las mezclas Superpave, tamaño máximo nominal, tamaño máximo

Denominación para Superpave, mm	Tamaño máximo nominal, mm	Tamaño máximo, mm
37.50	37.50	50.00
25.00	25.00	37.50
19.00	19.00	25.00
12.50	12.50	19.00
9.50	9.50	12.50

Tabla 2. Denominación de las mezclas Superpave, para una MAC de ¾”(19.00mm)

Tamices		Puntos de Control		Zona restringida	
Identificación	Abertura, mm	% Que pasa	% Que pasa	% Que pasa	% Que pasa
		Mínima	Máxima	Mínima	Máxima
1"	25.00		100		
¾"	19.00	90	100		
½"	12.50				
⅜"	9.50				
4	4.75				
8	2.36	23	49	34.6	34.6
16	1.18			22.3	28.3
30	0.600			16.7	20.7
50	0.300			13.7	13.7
100	0.150				
200	0.075	2	8		

Con referencia a la descripción de la frecuencia de distribución acumulada del tamaño de las partículas del agregado, *en esta investigación se vigiló la estructura del agregado de diseño (“design aggregate structure”) que pasará entre los puntos de control y evitará la zona de restricción satisfaciendo los requerimientos granulométricos de Superpave de para un TMN ¾” (19.00 mm), que es la utilizada en esta investigación (ver figura 11).*

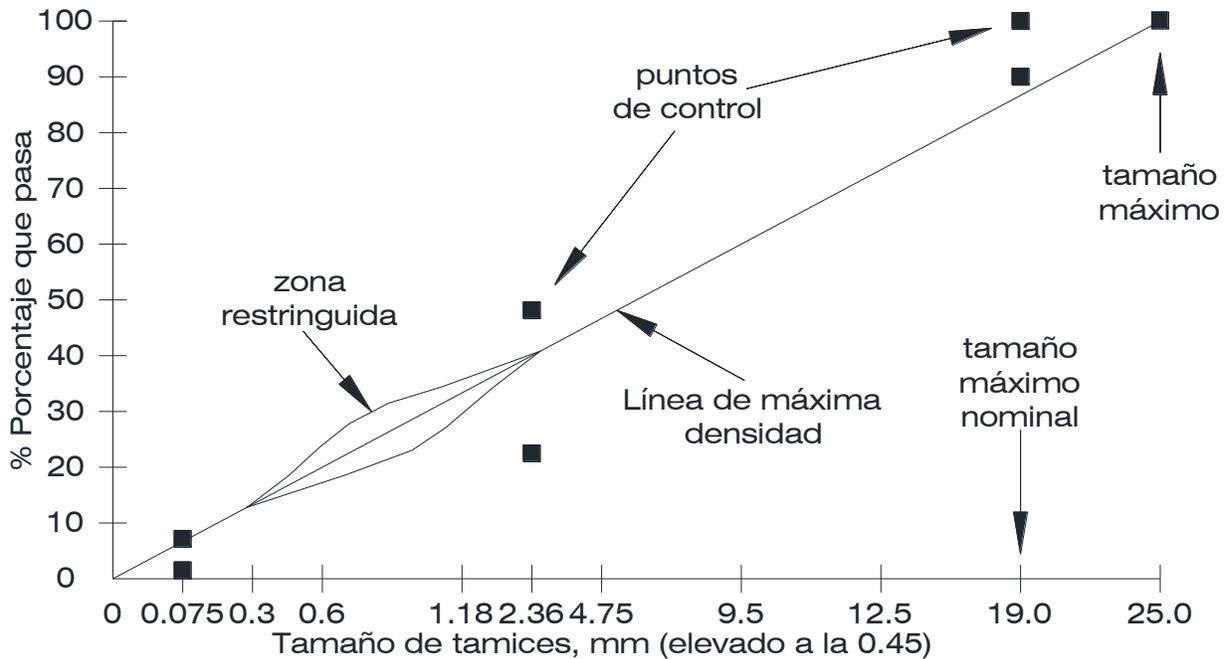
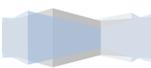


Figura 11. Límites granulométricos de Superpave, para una mezcla de TMN ¾” (19.00 mm)

Después de estudiar la granulometría, se realizaron ajustes para que se cumpliera con los parámetros de control marcados, *se analizaron estas estructuras granulométricas realizando ensayos con un compactador giratorio Model4140 Troxler, Superpave (SCG)* y un contenido de cemento asfáltico inicial; la granulometría definida para elaborar la mezcla de control y las mezclas elaboradas con agregados reciclados procedente de RCD quedó definida con una estructura densa mostrada en tabla 3 y la figura 12. Cabe señalar que al cumplir con diseño basado en los límites granulométricos por Superpave también se cumple con las tolerancias para la elaboración de mezclas densas definidas por la normatividad SCT.



“EMPLEO DE CONCRETO RECICLADO EN LA MANUFACTURA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE PARA VIALIDADES URBANAS”

Tabla 3. Estructura granulométrica para el diseño de la curva de proyecto de la MAC (estructura densa)

Malla	Abertura, mm	% que pasa	% retenido
2"	50.080		
1 1/2 "	38.100		
1"	25.400	100.00	0.00
3/4"	19.050	92.00	8.00
1/2"	12.700	81.85	10.15
3/8"	9.530	70.78	11.07
1/4"	6.350	56.36	14.42
N°4	4.750	48.88	7.47
N°8	2.360	33.61	15.28
N°16	1.180	21.02	12.59
N°30	0.600	15.61	5.41
N°50	0.300	10.61	5.01
N°100	0.149	6.49	4.11
N°200	0.075	2.61	3.88
Filler		0.01	2.61

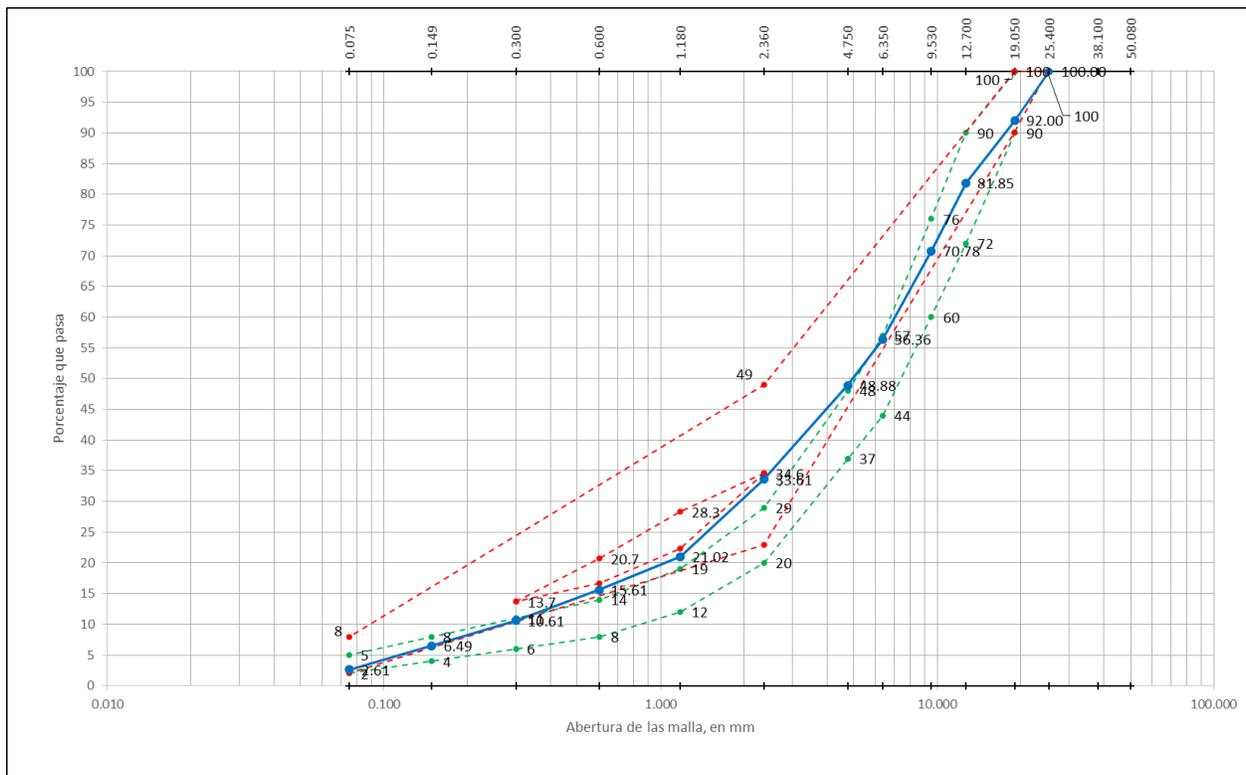
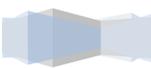


Figura 12. Diseño de la curva de proyecto de la MAC (estructura densa)

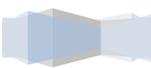


3.2.2 Selección de los agregados pétreos

En la selección de agregados pétreos para la fabricación de las MAC determinar las propiedades de los agregados es de gran importancia para la obtención de resultados aceptables con respecto a los ensayos de caracterización mecánica o de desempeño. Siguiendo la metodología Superpave, en esta investigación se identifican las dos categorías de propiedades de los agregados que se necesitan: propiedades de consenso y propiedades de origen, estas fueron realizadas para los agregados pétreos de cantera y para los agregados de concreto reciclado procedente de RCD. Cabe señalar que previamente se realizó el muestreo de dicho material pétreo, cumpliendo con la normatividad M.MMP.4.04.001/02 "Muestreo de materiales pétreos para mezclas asfálticas", esta indica el procedimiento para la obtención de muestras, el tipo, frecuencia y tamaño del muestreo. [9.1].

3.2.2.1 Selección de los agregados pétreos de cantera

El agregado pétreo de cantera que se seleccionó para esta investigación es un “Basalto”, procedente del banco del Grupo Constructor Pirámide, este se ubica en el km 29,5 de la carretera Lechería – Texcoco, calle Emilio Carranza s/n, colonia Isidro Atlautenco, Ecatepec, Estado de México (ver figura 13 y 14), el grupo constructor al obtener diversos productos pétreos realiza las pruebas correspondientes cumpliendo con las normas de calidad establecidas por la SCT. El basalto, es una roca ígnea extrusivas (volcánicas) de composición máfica, baja en contenido de sílice, de color oscuro, y rico en silicatos de hierro y magnesio, suele tener una textura porfídica, con fenocristales de olivino, augita, plagioclasa o feldespato en una fina cristalina matriz; en ocasiones puede presentarse en forma de vidrio, denominado sideromelano, con muy pocos cristales o sin ellos. El basalto constituye una de las rocas más abundantes en la corteza terrestre. La lava Basáltica es frecuentemente esponjosa; las cavidades de vapor se llenan de minerales secundarios tales como calcita, clorita, y zeolitas. Algunos basaltos son bastante vidriosos y muchos son de grano muy fino y compacto [9.2].



“EMPLEO DE CONCRETO RECICLADO EN LA MANUFACTURA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE PARA VIALIDADES URBANAS”

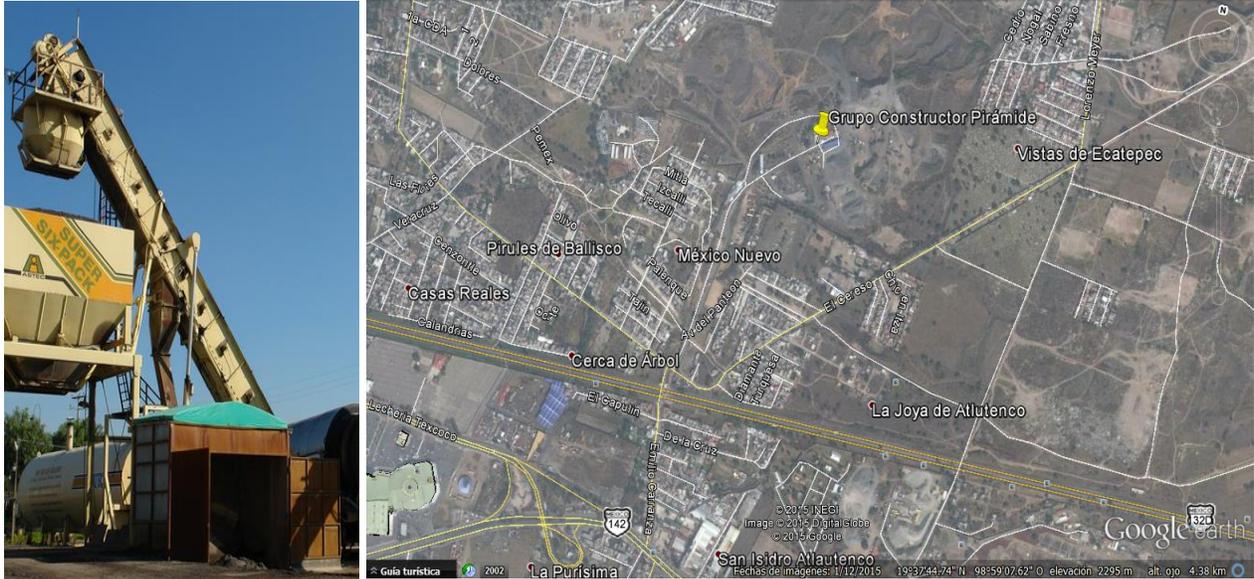


Figura 13. Banco del Grupo Constructor Pirámide, este se ubica en el km 29,5 de la carretera Lechería – Texcoco



Figura 14. Agregado pétreo de cantera para esta investigación es un “Basalto”, procedente del banco del Grupo Constructor Pirámide

3.2.2.2 Selección agregados de concreto reciclado procedente de RCD

Los agregados reciclados procedentes de los RCD utilizados en esta investigación provienen de la Planta Concretos reciclados, esta planta se ubica en el Distrito Federal en la demarcación de la delegación Iztapalapa, en la Avenida del Árbol No. 106 (ver Figura 15).



Figura 15. Planta Concretos reciclados, esta planta se ubica en el Distrito Federal en la demarcación de la delegación Iztapalapa, en la Avenida del Árbol No. 106

Esta planta recibe los materiales viables de reciclar, los que provienen de demoliciones y desechos de la industria de la construcción (edificaciones, excavaciones, vialidades, urbanizaciones, caminos, etc.), estos deberán entregarse libres de materiales tales como: basura, papel, madera, plástico, textiles y materiales tóxicos. Los materiales aceptados son: adocretos, arcillas blocks, tabiques, cerámicos, concreto armado concreto simple, mamposterías, ladrillos, fresado de carpeta asfáltica. Dependiendo de las características del escombros, se acomoda en diferentes almacenes: a) almacén de concreto simple o armado, b) almacén de materiales mezclados, como pueden ser morteros, concretos, tabiques, mamposterías, cerámicos,

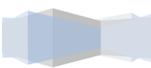
tepetatosos, etc. “Llamado todo en uno”, c) arenas y arcillas producto de excavaciones y d) fresado de carpeta asfáltica. *El almacén donde se obtuvieron las muestras pertenece al “Almacén de concreto simple o armado”* (ver figura 16).



Figura 16. Planta de concreto reciclado, almacén de concreto simple o armado

3.2.3 Caracterización de los agregados pétreos

.....
Como inicio del desarrollo experimental, se efectuó la caracterización de agregados pétreos para la fabricación de las mezclas asfálticas empleando “agregados pétreos de cantera” de tipo basáltico del banco Pirámide, al cual previamente se le efectuaron los protocolos de análisis granulométrico, cribado y lavado. La caracterización de los agregados de concreto reciclado producto de RDC triturado, se llevó a cabo sin sellador “Vinílico – acrílico y con sellador, cuya función es reducir la absorción de agua.



3.2.3.1 Tratamiento del agregado pétreo de cantera y agregado pétreo de RCD

Al conocer el material se observa que siempre tendrán diferencias relacionadas con su origen y proceso de producción, así como relacionadas con los procedimientos de muestreo y pruebas en laboratorio. Por ello *se determinó darle un tratamiento al agregado pétreo de cantera como al agregado pétreo de RCD. Al agregado pétreo de cantera se le realizó un proceso de cribado del material, se separó las partículas por cada tamaño, posteriormente se lavó, secó, envasó, identificó y almacenó* (ver figura 17), para poder tener un referente de control, avalando los especímenes que fueran representativos y los resultados sean confiables.



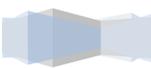
Figura 17. Tratamiento del agregado pétreo de cantera y RCD

Al agregado pétreo de RCD debido a la presencia de cemento en polvo en los agregados reciclados, se decidió no lavarlo, pero se realizó una reconocimiento visual para eliminar los residuos de plástico, madera, yeso, ladrillo y cerámica en el agregado de tamaño grueso (Del tamiz $\frac{3}{4}$ ”, 19mm al No. 8, 2.36mm, ver figura 17). De igual manera que el agregado pétreo de cantera se le realizó un proceso de cribado del material, se separó las partículas por cada tamaño, posteriormente se envasó, identificó y almacenó (ver figura 17), para poder tener un referente de control.

Como se señaló en el capítulo 2, en las investigaciones presentadas, *los agregados reciclados de concreto procedentes de RCD tiene una alto grado de absorción, por este motivo se buscó un aditivo para controlar la absorción de agua en el agregado, lo que se procuró, es que este aditivo, envolviera el agregado cubriéndolo completamente, también fuera resistente y práctico ante al proceso de fabricación de la mezcla asfáltica.* Después de investigar diferentes aditivos con las mismas características, se escogió el aditivo denominado “Sellador 5×1, Vinílico – Acrílico”, el cual debido a sus componentes y consistencia, se utiliza mezclado con agua. Posteriormente con el aditivo elegido se realizan pruebas para uniformizar la aplicación al agregado y proporción del aditivo partiendo de las recomendaciones del fabricante (ver figura 18), con la disposición de que la aplicación del aditivo sea de una forma práctica, anticipando que el procedimiento se utilizará para realizar mezclas asfálticas en grandes volúmenes, considerando la práctica real.



Figura 18. Se escogió el aditivo denominado “Sellador 5×1, Vinílico – Acrílico”, considerando sus componentes y consistencia, se utiliza mezclado con agua



Para preparar el aditivo se definió la proporción, se le agregó el agua necesaria en razón al material a saturar; por ejemplo, la primer proporción realizada es la especificada por el fabricante 5:1 (por cada litro de aditivo vinílico – acrílico se le agregan 5 litros de agua), posteriormente se homogenizó, resultando la mezcla “Sellador vinílico – acrílico”, esta cantidad resultante de sellador solo alcanzó para una porción de material. En esta investigación se definieron las proporciones 4:1, 5:1, 6:1, 7:1, se realizan pruebas de inspección para garantizar cual es la idónea para el agregado reciclado (ver figuras 19 y 20).

El procedimiento inicia con la dosificación del material, se pesaron 2 kg de agregado reciclado por cada tamaño, que va del rango de tamiz $\frac{3}{4}$ ” (19mm) al No. 16 (1.18mm), el separo en charolas es cuidando que el volumen del agregado no excediera la capacidad del molde, con el fin de lograr la cobertura total de los agregados. A continuación se preparó el “Sellador vinílico – acrílico” con la cantidad requerida de agua de acuerdo a la proporción 4:1, 5:1, 6:1, 7:1, ya con la mezcla preparada se saturó por 24 horas el agregado, al término se dejó secar en el horno 12 horas a 60°C. Por cada prueba con diferente proporción de “Sellador vinílico – acrílico” se realizó una inspección visual de cada agregado, observando que la película cubriera uniformemente y tuviera una apariencia consistente (ver figuras 19 y 20).



Figura 19. En esta investigación se definieron las proporciones 4:1, 5:1, 6:1, 7:1, se realizan pruebas de inspección para garantizar cual es la idónea para el agregado reciclado, primeramente se dosifica el material

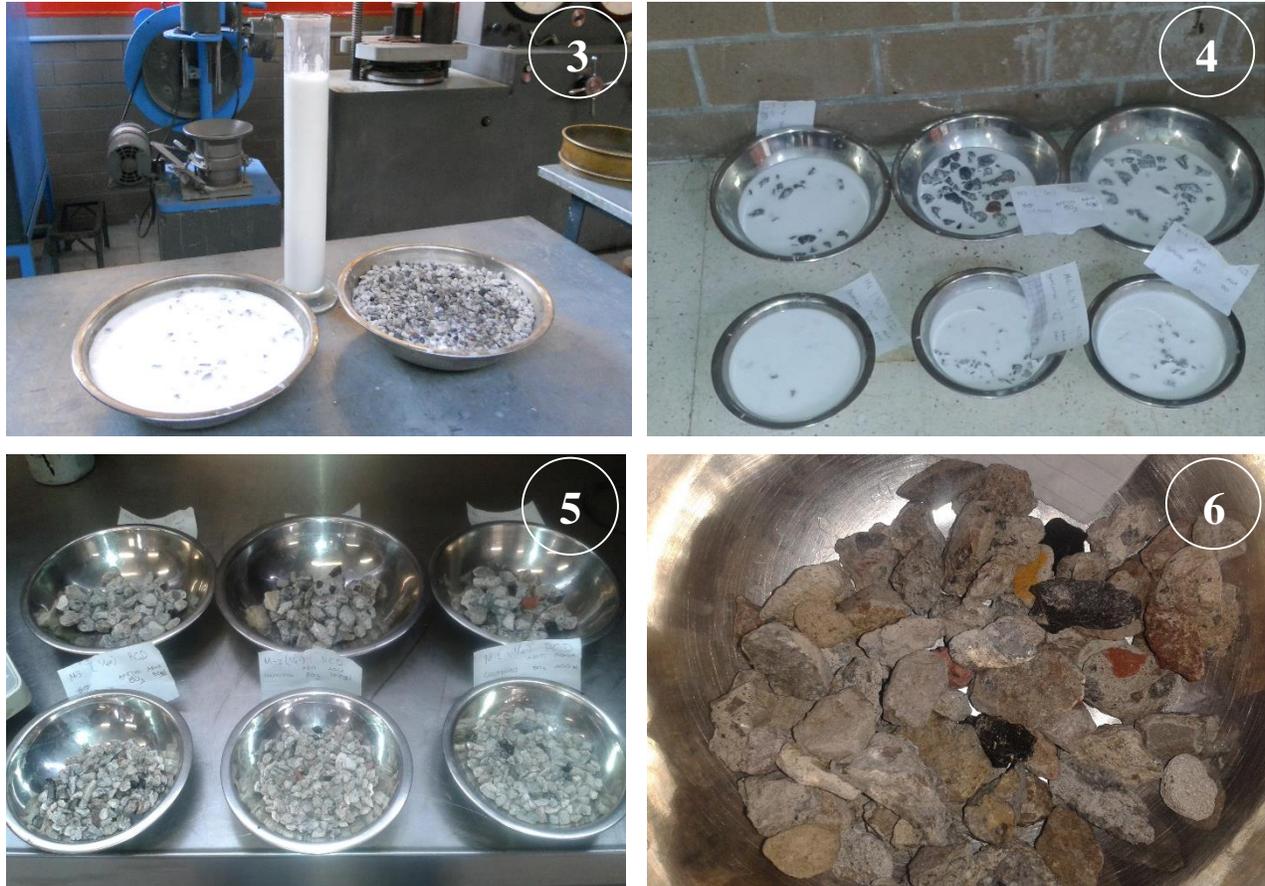


Figura 20. Por cada prueba con diferente proporción de “Sellador vinílico – acrílico” se realizó una inspección visual de cada agregado, observando que la película cubriera uniformemente y tuviera una apariencia consistente

3.2.3.1.1 Análisis del tratamiento del agregado de RCD

Después de analizar cada una de las proporciones se determinó:

- En la proporción 4:1, se apreció una película que cubría uniformemente el agregado, pero la apariencia de la película resultó excesiva, aproximadamente mayor a 2mm, en partes se deformó el agregado con exceso de aditivo. Se observó además que las partículas de agregado del rango de tamiz $\frac{1}{4}$ ” (6.30mm) al No. 16 (1.18mm) se unieron fuertemente entre sí. Por lo anterior no era factible utilizar esta proporción.
- En la proporción 5:1, se apreció una película que cubría uniformemente el agregado, la apariencia de la película fue transparente, de aproximadamente 1mm a 2mm de espesor, se adapta la forma del agregado, las partículas del rango de tamiz No.4 (4.75mm) al No. 16 (1.18mm) se unen fuertemente entre sí. Se consideró factible utilizar esta proporción.
- En la proporción 6:1, se apreció una película que cubría uniformemente el agregado, la apariencia de la película fue transparente de aproximadamente de un 1mm de espesor y se

adaptaba a la forma del agregado, las partículas del rango de tamiz No.4 (4.75mm) al No. 16 (1.18mm) se unían considerablemente entre sí. La factibilidad de utilizar esta proporción fue alta.

- d) En la proporción 7:1, se apreció una película que no cubrió uniformemente el agregado, la apariencia de la película fue transparente, de espesor muy delgado, en fragmentos con espesor menor a 1mm y en otros fragmentos no presentó película. Las partículas de agregado reciclado del rango de tamiz No.4 (4.75mm) al No. 16 (1.18mm) continuaron uniéndose entre sí. La factibilidad de utilizar esta proporción fue baja.

Los resultados obtenidos nos indicaron que la proporción 6:1, es la idónea para cubrir el agregado reciclado de RCD con aditivo “Sellador Vinílico- Acrílico”, pero las partículas del rango de tamiz No.4 (4.75mm) al No. 16 (1.18mm) se unieron considerablemente entre sí (ver figura 21), se decidió, solo cubrir el agregado del rango del tamiz $\frac{3}{4}$ ” (19mm) a $\frac{1}{4}$ ” (6.30mm) para evitar una mala dosificación del agregado al momento de realizar las mezclas asfálticas.



Figura 21. En la proporción 6:1 del rango de tamiz No.8 (2.36mm) al No. 16 (1.18mm) se unen considerablemente entre sí

Posteriormente a la selección y al tratamiento de los agregados pétreos, se realizaron las pruebas de origen, consenso y de rutina. Con lo que respecta al agregado reciclado procedente de RCD, estas pruebas se realizaron recubriendo el agregado con “Sellador Vinílico – Acrílico” y también sin recubrirlo, para evaluar su comportamiento.

3.2.3.2 Ensayos a las propiedades de consenso

Las propiedades de consenso, fue resultado del consenso de expertos viales que determinaron al evaluar ciertas características del agregado que estas fueran consideradas, críticas e imprescindibles, son aquellas consideradas para alcanzar un elevado desempeño de la mezcla

asfáltica en caliente. Estas propiedades deben satisfacerse en varias escalas, dependiendo del nivel de tránsito y la estructura del pavimento. Altos niveles de tránsito requieren valores más estrictos para las propiedades de consenso [21]. Estas propiedades son: angularidad del agregado grueso (caras fracturadas, ASTM D5821), angularidad del agregado fino (vacíos sin compactar, ASTM C1252 y AASHTO T304), partículas alargadas y planas (ASTM D4791) y equivalente de arena (contenido de arcilla, ASTM D2419).

3.2.3.2.1 Angularidad del agregado grueso

Este ensayo se ejecuta sobre partículas gruesas retenidas en la malla No 4 (4.75 mm) que pasan por el proceso de trituración. No se ejecuta sobre agregados finos. Una cara fracturada es una cara que expone el interior de la partícula de grava (ver figura22). El objetivo de esta evaluación es maximizar la resistencia al corte mediante el incremento de la fricción entre partículas de las mezclas de agregado, además de proveer estabilidad para tratamientos superficiales de agregados mediante el incremento de la fricción y textura del agregado utilizado carpetas asfálticas delgadas.



Figura 22. Se ejecuta sobre partículas gruesas retenidas en la malla No 4 (4.75 mm), una cara fracturada es una cara que expone el interior de la partícula

3.2.3.2.2 Angularidad del agregado fino

Esta propiedad asegura un alto grado de la fricción interna del agregado fino y de la resistencia al ahuellamiento (fallas por deformaciones plásticas, roderas). Se define como el porcentaje de vacíos de aire presente en los agregados, menores a la malla No. 4 (4.75 mm), levemente compactados. Contenidos de vacíos mayores significan más caras fracturadas. Un procedimiento de ensayo promulgado por la National Aggregates Association se usa para medir esta propiedad. En el ensayo, una muestra de agregados finos es vertida, a través de un embudo standard, en un

pequeño cilindro calibrado. Determinando el peso del agregado fino (W) que llena el cilindro de volumen conocido (V), el contenido de vacíos puede calcularse como la diferencia entre el volumen del cilindro y el volumen del agregado fino en el cilindro. La gravedad específica bruta del agregado fino (G_{sb}) se emplea para calcular el volumen del agregado fino [21], ver figura 23.

Otro ensayo, es según las normas ASTM C 1252, consiste en obtener la relación de vacíos de la parte fina. El valor así obtenido se compara con valores mínimos especificados que consideran el nivel de tránsito, así como su espesor de la carpeta. Como es una relación de vacíos obtenida en caída libre, su valor dependerá de la granulometría, de la forma del agregado y la textura superficial. Se necesita conocer la granulometría del material y su gravedad específica (G_{sb}).



Figura 23. Prueba de la angularidad de agregado fino

3.2.3.2.3 Partículas alargadas y planas

Esta prueba permite determinar el porcentaje en peso del agregado grueso cuya relación entre las dimensiones máxima y mínima es mayor que 5. Las partículas alargadas son indeseables porque tienden a quebrarse durante la construcción y bajo tránsito. El procedimiento es la Norma ASTM D 4791, "Partículas alargadas y chatas en agregados gruesos" y se aplica a agregados gruesos mayores a la malla No. 4 (4.75 mm). Para medir la relación de dimensiones de una muestra representativa de las partículas del agregado se emplea un calibrador. Dos valores se miden: porcentaje de partículas chatas y porcentaje de partículas alargadas, ver figura 24.



Figura 24. Se aplica a agregados gruesos mayores a la malla No. 4 (4.75 mm), para medir la relación de dimensiones de una muestra representativa de las partículas del agregado empleando un calibrador

3.2.3.2.4 Equivalente de arena

El equivalente de arena o contenido de arcilla es el porcentaje de material arcilloso presente en la fracción de agregado menor a la malla No.4 (4.75 mm). El propósito de este método de prueba es indicar bajo condiciones estándar, las proporciones relativas de arcilla o finos plásticos y polvos de suelos granulares y agregados finos que pasan la malla No. 4. (4,75 mm). Un valor mínimo de equivalente de arena sirve para limitar la cantidad permisible de partículas finas en un agregado [21], ver figura 25.

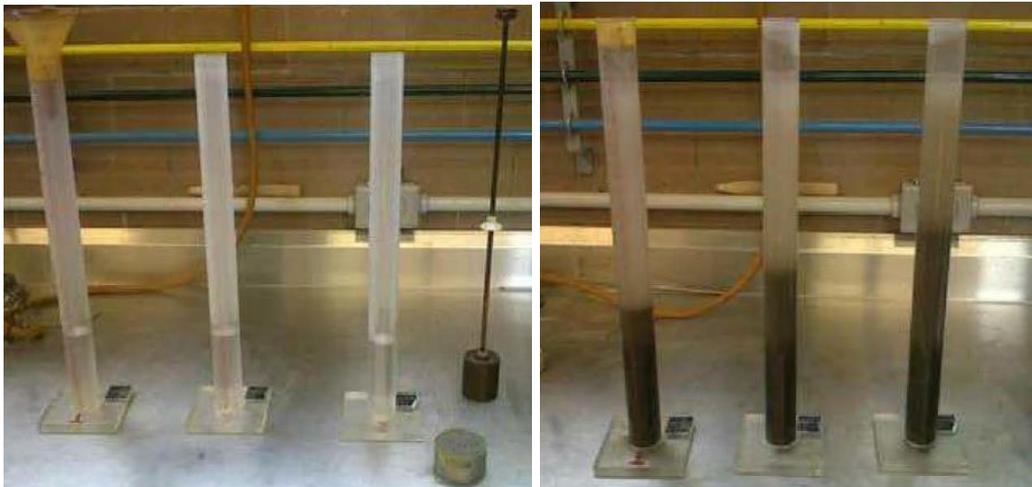


Figura 25. Ensayo "Equivalente de arena"

3.2.3.2.5 Resultados de los ensayos a las propiedades de consenso

En la tabla 4 se presentan los resultados de los ensayos de las propiedades de consenso, se puede evaluar para cada prueba el comportamiento de los diferentes tipos de agregado:

- La prueba de angularidad del agregado grueso y fino tuvo resultados aceptables para todos los tipos de agregado pétreo, la prueba no aplica para agregado pétreo de RCD recubierto.
- La prueba de Partículas alargadas y planas presentan resultados aceptables, siendo cero, para todos los tipos de agregado pétreo.
- La prueba de porcentaje de equivalente de arena también presentan resultados aceptables estando muy por encima del mínimo, para todos los tipos de agregado pétreo, esta prueba no aplica para agregado pétreo de RCD recubierto.

Tabla 4. Resultados de las pruebas de consenso al agregado pétreo

Prueba	Agregado pétreo de cantera	Agregado pétreo de RCD	Agregado pétreo de RCD recubierto	Valores especificados	Norma	Método de ensayo
Angularidad del agregado grueso (%)	100/100	100/100	100/100	95/90 mínimo	AI, SHRP SUPERPAVE	ASTM D5821
Angularidad del agregado fino (%)	41%	59%	No aplica	30% mínimo	AI, SHRP SUPERPAVE	ASTM C1252
Partículas alargadas y planas	0%	0%	0%	10% máximo	AI, SHRP SUPERPAVE	ASTM D4791
Equivalente de arena (%)	59%	58%	No aplica	40% mínimo	AI, SHRP SUPERPAVE	ASTM D2419



3.2.3.3 Ensayos a las propiedades de la fuente de origen

Las propiedades de origen son valores críticos específicos de cada fuente de origen del material. Son establecidos por las agencias locales, podrían también ser usadas como un control de aceptación [21]. Las propiedades de origen son: Tenacidad (prueba de Desgaste de los Ángeles, ASTM C131) y Durabilidad (prueba de Intemperismo Acelerado, ASTM C88).

3.2.3.3.1 Desgaste en la máquina de los Ángeles (Tenacidad)

La Tenacidad es el porcentaje de pérdida de material en una mezcla de agregados durante el ensayo de desgaste de mediante la prueba de Los Ángeles, ver figura 26. El objetivo de la prueba es determinar la resistencia a la trituración de los materiales pétreos empleados en mezclas asfálticas. La prueba consiste en colocar una muestra del material con características granulométricas específicas dentro de un cilindro giratorio, en donde es sometida al impacto de esferas metálicas durante un tiempo determinado, midiendo la variación granulométrica de la muestra como la diferencia entre la masa que pasa la malla No.12 (1,7mm), antes y después de haber sometido a este tratamiento [9.3].



Figura 26. Ensayo de desgaste en la máquina de “Los Ángeles”

3.2.3.3.2 Intemperismo Acelerado (Durabilidad)

Es el porcentaje de pérdida del material en una mezcla de agregados durante el ensayo de durabilidad de los agregados sometidos al ataque con sulfato de sodio o sulfato magnesio. El objetivo de la prueba es determinar la degradación esperada por intemperismo de los materiales pétreos empleados en las mezclas asfálticas.

La prueba consiste en someter a varios ciclos de saturación y secado los diferentes tamaños de la fracción de agregados gruesos de una muestra de materiales pétreos, mediante el empleo de una solución saturada de sulfato de sodio o magnesio, y medir la diferencia de su masa antes y después de haber sido sometido a este tratamiento, ver figura 27 [9.4].



Figura 27. Intemperismo Acelerado

3.2.3.3.3 Resultados de los ensayos a las propiedades de origen

En la tabla 5 se presentan los resultados de los ensayos de las propiedades de origen: a) En los resultados de la prueba abrasión de los Ángeles se puede notar que los agregados pétreos de cantera presentan mayor resistencia al desgaste (cumplen los valores especificados) con respecto al agregado pétreo de RCD (no cumplieron los valores especificados). b) El desgaste de los agregados pétreos de RCD mejoran con el recubrimiento vinílico acrílico, de tal forma que cumplen con los valores especificados. c) En las pruebas de intemperismo acelerado se puede notar que los agregados pétreos de cantera presentan mayor resistencia al desgaste (cumplen los valores especificados) con respecto al agregado pétreo de RCD y los agregados pétreos de RCD recubierto con aditivo – vinílico acrílico la prueba no es representativa.

Tabla 5. Resultados de los ensayos a las propiedades de origen

Prueba	Agregado pétreo de cantera	Agregado pétreo de RCD	Agregado pétreo de RCD recubierto	Valores especificados	Norma	Método de ensayo
Abrasión de los Ángeles (%) A	9%	31%	29%	30% máximo	N.CMT.4.04/08	ASTM C131 M.MMP.04. 04.006
Abrasión de los Ángeles (%) B	9%	31%	28%	30% máximo	N.CMT.4.04/08	ASTM C131 M.MMP.04. 04.006
Abrasión de los Ángeles (%) C		26%	20%	30% máximo	N.CMT.4.04/08	ASTM C131 M.MMP.04. 04.006
Intemperismo acelerado (%)	1%	24%	21%	15% máximo	N.CMT.4.04/08	ASTM C 88

3.2.3.4 Ensayo a la Gravedad específica y absorción

Esta prueba permite determinar la densidad relativa (gravedad específica) de los materiales pétreos empleados en mezclas asfálticas con el fin de conocer la masa de sólidos por unidad de volumen de dichos sólidos sin vacíos en cada una de sus fracciones, en finos o gravas, respecto a la densidad del agua, ver figuras 28 y 29.

En la prueba para la arena, consiste en eliminar el aire atrapado en la muestra de prueba, al estar sumergida totalmente en agua destilada en ebullición.



Figura 28. Ensayo a la Gravedad específica y absorción para la arena

Para la grava, consiste en introducir la muestra de prueba en un depósito con agua destilada, para determinar el volumen que desplaza, para después, al comparar con dicho volumen la masa seca de la muestra, obtener su masa por unidad de volumen y finalmente, compararla con la densidad

de agua. La absorción es un parámetro utilizado para calcular el cambio en la masa de un agregado debido al agua absorbida en los espacios internos de los poros de las partículas, con respecto a la condición seca.



Figura 29. Ensayo a la Gravedad específica y absorción para la grava

3.2.3.4.1 Resultados del ensayo a la Gravedad específica y absorción

En la tabla 6 y 7 se presentan los resultados de los ensayo a la gravedad específica y absorción para el agregado pétreo de cantera y de RCD. Estos resultados indican, que la densidad relativa de la porción gruesa de ambos tipos de agregado es mayor que la de la porción fina. Por otro lado, la absorción del agregado fino es mayor que la del agregado grueso.

Tabla 6. Gravedades específicas y % de absorción del agregado pétreo de cantera

TAMIZ	G_{sb} (Neta del agregado), kg/m³	G_{sss} (Saturada superficialmente seca), kg/m³	G_{sa} (Aparente del agregado), kg/m³	Absorción de agua (%)	Norma	Método de ensayo
3/4" (19.0 mm)	2535.40	2570.47	2627.79	1.38%	N.CMT.4. 04.003/0 2	ASTM C127-73
1/2" (12.5 mm)	2557.73	2598.81	2667.58	1.61%		
3/8" (9.5 mm)	2539.82	2575.76	2634.75	1.41%		
1/4" (6.3 mm)	2515.75	2560.04	2632.63	1.76%		
No.4 (4.75 mm)	2481.00	2538.03	2631.45	2.30%		
No. 8 (2.36 mm) a Filler	2.29	2.42	2.63	5.72%		ASTM C128-88

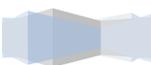


Tabla 7. Gravedades específicas y % de absorción agregado pétreo de RCD

TAMIZ	G _{sb} (Neta del agregado), kg/m ³	G _{sss} (Saturada superficialmente seca), kg/m ³	G _{sa} (Aparente del agregado), kg/m ³	Absorción de agua (%)	Norma	Método de ensayo
3/4" (19.0 mm)	1998.12	2193.73	2485.45	9.79%	N.CMT.4. 04.003/0 2	ASTM C127-73
1/2" (12.5 mm)	2031.91	2227.13	2526.39	9.61%		
3/8" (9.5 mm)	2056.05	2241.27	2524.86	9.01%		
No. 8 (2.36 mm) a Filler	1.40	2.17	2.18	14.38%		ASTM C128-88

En la tabla 8 se presentan los resultados de los ensayo a la gravedad específica y absorción para el agregado pétreo de RCD cubierto con el aditivo vinílico – acrílico. Estos resultados indican que la densidad relativa y la absorción de la porción gruesa del agregado recubierto son similares a la del no recubierto.

En términos generales los resultados de pruebas de gravedad específica y absorción indican que el agregado pétreo de RCD con y son recubrimiento vinílico es más ligero y presenta mayor absorción que el de cantera.

Tabla 8. Gravedades específicas y % de absorción agregado pétreo de RCD cubierto

TAMIZ	G _{sb} (Neta del agregado), kg/m ³	G _{sss} (Saturada superficialmente seca), kg/m ³	G _{sa} (Aparente del agregado), kg/m ³	Absorción de agua (%)	Norma	Método de ensayo
3/4" (19.0 mm)	2038.28	2224.45	2505.94	9.14%	N.CMT.4. 04.003/0 2	ASTM C127-73
1/2" (12.5 mm)	2061.85	2247.68	2533.90	9.01%		
3/8" (9.5 mm)	2054.09	2245.82	2542.86	9.33%		
No. 8 (2.36 mm) a Filler	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica		ASTM C128-88



3.3 Cemento o Ligante asfáltico

3.3.1 Selección del cemento asfáltico

El cemento asfáltico utilizado en esta investigación para la fabricación de MAC es clasificado como *PEMEX EKBÉ Superpave PG*, es un cemento asfáltico de uso convencional, grado PG 64 – 22 (ver figura 30), certificado bajo el análisis profesional de los laboratorios que cumple con la normatividad establecida por la SCT (M.MMP.4.05.001/00 "Muestreo de materiales asfálticos" N.CMT.4.05.004/08) [9], suministrado por la Planta de asfalto del Distrito Federal, ubicada en la avenida Del Imán, colonia Ajusco, delegación Coyoacán, a su vez, proveniente por la Refinería Miguel Hidalgo situada en la carretera a Jorobas – Tula km 26.5, municipio de Tula de Allende en el Estado de Hidalgo, ver figura 31 [15, 16]. Este cemento es adecuado para las carreteras del país, en función del clima dominante y de la magnitud del tránsito a que el producto estará sujeto durante su vida útil.



Figura 30. El cemento asfáltico utilizado en esta investigación es clasificado como PEMEX EKBÉ Superpave PG.

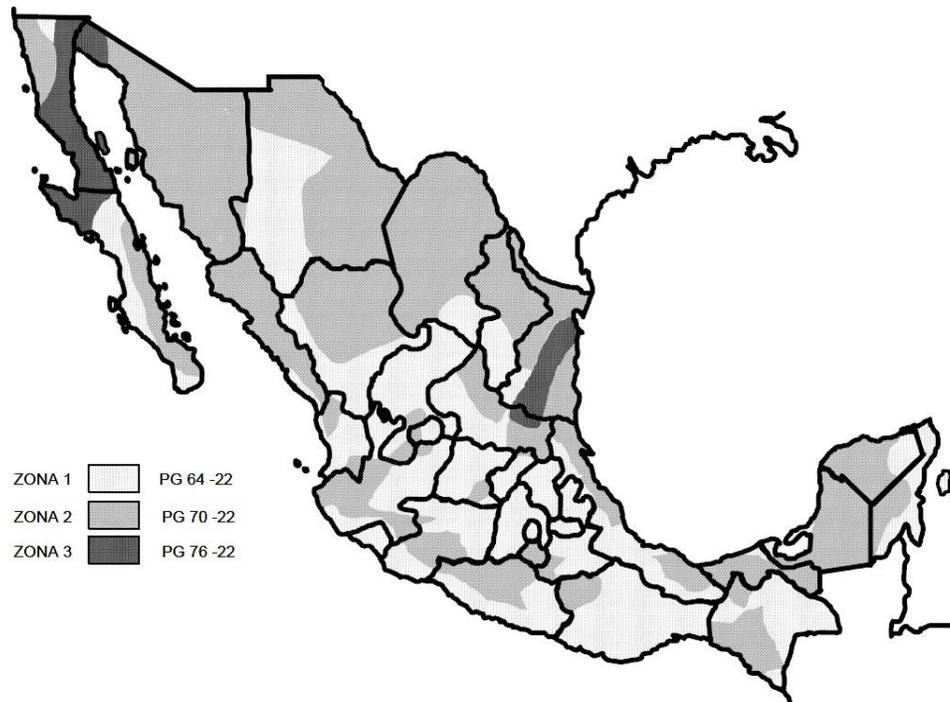


Figura 31. Regiones geográficas para la utilización recomendable de cementos asfálticos Grado PG [9]

3.3.2 Ensayos de caracterización del cemento asfáltico

Para la caracterización del cemento asfáltico se realizaron los siguientes ensayos.

3.3.2.1 Viscosidad dinámica

Consiste en determinar la consistencia de los materiales asfálticos mediante sus características de flujo a una temperatura de 60°C. Es aplicable a materiales asfálticos que tengan una viscosidad de 4.2 a 20 000 Pa.s (42 a 200 0000 Poises). La prueba reside en establecer el tiempo que tardan en pasar 20 ml de material a través de un tubo capilar al vacío, bajo condiciones de presión y temperatura preestablecidas, corregido por el factor de calibración del viscosímetro. Con el resultado se realiza la clasificación de los cementos asfálticos [10].

3.3.2.2 Viscosidad Saybolt-Furol

El objetivo de la prueba es determinar la viscosidad "Saybolt – Furol" de los cementos asfálticos a las temperaturas de 135°C, esta consiste en determinar el tiempo que tardan en pasar 60 cm³ de cemento asfáltico por un orificio "Furol", instalado en un tubo de viscosidad Saybolt. *La medida de la viscosidad de un cemento asfáltico es la consistencia o la resistencia para fluir*, se realiza para la clasificación de los cementos asfálticos [10].

3.3.2.3 Penetración en ligantes y residuos asfálticos

Este procedimiento representa una manera para determinar la penetración de cementos asfálticos semisólidos o sólidos, la muestra se reblandece y enfría bajo ambientes regulados. La penetración se mide por medio del penetrómetro empleando una aguja estándar que se aplica a la muestra. La penetración de un cemento asfáltico es la distancia en décimas de milímetro que una aguja estándar penetra verticalmente en la muestra, bajo ambientes regulados de temperatura, carga y tiempo [10].

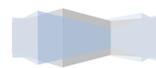
3.3.2.4 Punto de reblandecimiento

Esta prueba se fundamenta en la determinación de la temperatura a la cual una esfera de acero produce una deformación de 25mm, en una muestra de asfalto sostenida en un anillo horizontal, que se calienta gradualmente dentro de un bato de agua; el ablandamiento del asfalto, no se efectúa en un momento o a una temperatura definida, a medida que esta aumenta en forma gradual, el asfalto cambia, de un estado frágil o excesivamente espeso o de flujo lento, a un estado líquido más blando y menos viscoso [10].

3.3.3 Ensayos de seguridad para el cemento asfáltico

3.3.3.1 Punto de inflamación Cleveland

Esta prueba permite determinar la temperatura mínima a la que el asfalto produce flamas instantáneas al estar en contacto con fuego directo, así como aquella en que inicia su combustión. La prueba consiste en colocar una muestra de asfalto en una copa abierta de Cleveland, en donde se incrementa paulatinamente su temperatura hasta lograr que al pasar una flama por la superficie de la muestra se produzcan en ella flamas instantáneas, la temperatura correspondiente se denomina punto de inflamación. Si se continúa elevando la temperatura de la muestra se llega al punto en que se inicia la combustión del material, la temperatura correspondiente se denomina punto de combustión [10].



3.3.4 Resultados y análisis de la caracterización del cemento asfáltico.

La caracterización realizada del cemento asfáltico *PEMEX EKBÉ Superpave PG*, la podemos observar en la tabla 9, donde se hace un resumen de sus propiedades.

Tabla 9. Caracterización del cemento asfáltico PEMEX EKBÉ Superpave PG, pruebas de consistencia y seguridad

PRUEBA	RESULTADOS	VALORES REQUERIDOS	NORMA	MÉTODO DE ENSAYO
Viscosímetro Dinámica a 60°C (Pa.s)	180	200 ±40	N.CMT.4.05.001/06	M.MMP.4.05.002 ASTMD2171
Viscosidad de Saybol - Furol a 135°C (Segundos)	176	120 min		M.MMP.4.05.004 ASTMD88
Penetración a 25°C, 100 gr, a 5 segundos (dmm)	72	60 min		M.MMP.4.05.006 ASTMD5-97
Punto de reblandecimiento (°C)	51	48 - 56		M.MMP.4.05.009 ASTMD 36-95
Punto de inflamación Cleveland (°C)	235	232 min		M.MMP.4.05.007 ASTMD92

El análisis químico del cemento asfáltico *PEMEX EKBÉ Superpave PG* se observa en la tabla 10 la combinación de sus elementos carbono (C) y azufre (S), se presenta de forma homogénea.

Tabla 10. Elementos Químicos del cemento asfáltico PEMEX EKBÉ Superpave PG

DESCRIPCIÓN	ELEMENTO	PESO (%)	ATÓMICO (%)
Carbonato de Calcio	CaCO3	0.73%	98.06%
Sulfuro de Hierro	FeS2	0.04%	1.94%
Totales	FeS2	0.77%	100.00%

Al Analizar los resultados de las pruebas efectuadas se verifica que el cemento asfáltico cumple con las características especificadas en la metodología SUPERPAVE y los valores requeridos de la SCT, para la fabricación de mezclas asfálticas en caliente. El Cemento Asfáltico PEMEX EKBÉ Superpave PG, es un cemento asfáltico de uso convencional, clasificado como grado PG 64 – 22, certificado bajo el análisis profesional de los laboratorios que cumple con la normatividad establecida por la SCT.



3.4 Diseño Volumétrico de la MAC por la metodología SUPERPAVE

El diseño de mezclas asfálticas en caliente constituye una composición óptima de asfalto – agregado buscando un desempeño bajo diferentes situaciones de cargas de vehiculares y climáticas. Un factor que debe ser tomado en cuenta al considerar el comportamiento de la mezcla asfáltica son las proporciones volumétricas del asfalto, los componentes del agregado, la proporción de polvo y susceptibilidad a la humedad.

En 1987, el Programa de Investigación Estratégica de Autopistas (SHRP, Strategic Highway Research Program por sus siglas en inglés) comenzó el desarrollo de un nuevo sistema para especificación de materiales asfálticos [21]. El producto final es un nuevo sistema conocido como SUPERPAVE (SUperior PERforming Asphaft PAVement), representa un sistema avanzado de especificación de los materiales componentes, diseño de mezclas asfálticas y su análisis, y la predicción del desempeño de los pavimentos, incluyendo equipos de ensayo, métodos de ensayo y criterios. Dos aspectos claves en la metodología SUPERPAVE son la compactación en el laboratorio y los ensayos de desempeño de la mezcla compactada. La compactación en laboratorio se realiza con el Compactador Giratorio SUPERPAVE (SUPERPAVE Gyratory Compactar, SGC). Con los datos que provee este equipo de laboratorio durante la compactación se puede tener una idea de la compactabilidad de la MAC. El SGC puede usarse para diseñar mezclas que no exhiban un comportamiento débil y no se densifiquen, bajo la acción del tránsito, a un peligroso bajo contenido de vacíos [21].

La compactación giratoria produce mayores densidades de la mezcla asfáltica compactada, repercute de manera directa en los demás parámetros volumétricos. Los vacíos de aire son mayores aproximadamente en 1% para las mezclas elaboradas con el método Marshall [10].

3.4.1 Selección del nivel de diseño requerido

Ya que el diseño de mezclas Superpave y sus análisis es más complejo que otros métodos en uso, el alcance de su uso depende del nivel del tránsito (ESAL´s, número total de ejes simples equivalentes) o de la clasificación funcional del pavimento para el cual se hace el diseño. En consecuencia, 3 niveles de diseño de mezclas del Superpave fueron desarrollados. Sus alcances y los ensayos requeridos se presentan en la Tabla 11 [21].

Tabla 11. Niveles de diseño de mezcla de Superpave

TRÁNSITO (ESAL's)	NIVEL DE DISEÑO	REQUERIMIENTOS DE ENSAYO ¹
ESAL's < 10 ⁶	1	diseño volumétrico
10 ⁶ < ESAL's < 10 ⁷	2	diseño volumétrico + ensayos de predicción del desempeño
10 ⁷ < ESAL's	3	diseño volumétrico + ensayos de predicción del desempeño + pruebas adicionales

1) En todos los casos, la susceptibilidad a la humedad deben ser evaluada usando la norma AASHTO T283

3.4.1.1 Nivel 1

El diseño volumétrico, único requerimiento para el diseño de mezclas del Nivel 1, implica: a) selección del tipo de cemento asfáltico, b) las propiedades de consenso y las propiedades de fuente de origen deben ser cumplidas en los agregados pétreos, c) la fabricación de los especímenes de ensayo usando el SGC y la selección del contenido de asfalto basado en los vacíos de aire (Va%), vacíos del agregado mineral (VAM), vacíos llenados con asfalto (VFA), contenido óptimo de cemento asfáltico (Pb_{opt}) y la relación polvo llenante (filler) / contenido de asfalto efectivo (Vb_e).

3.4.1.2 Nivel 2

El Nivel 2 de diseño de mezclas parte del diseño volumétrico. Los ensayos establecidos para este nivel son dos procedimientos de ensayos basados en el desempeño: el ensayo de corte Superpave (SST, *Superpave Shear Tester*) y el ensayo de tracción indirecta (IDT, *Indirect Tensile Tester*). Los resultados de estos ensayos (output) son valores de entrada (input) de los modelos de predicción del desempeño o comportamiento en la metodología Superpave para estimar el desempeño real de los pavimentos. ***En esta investigación se selecciona el nivel 2, para un nivel de tránsito 10⁶ < ESAL's < 10⁷, número total de ejes simples equivalentes.***

3.4.1.3 Nivel 3

El Nivel 3 de diseño de mezcla abarca muchas de las facetas de los Niveles 1 y 2. Ensayos adicionales de SST e IDT se realizan en una amplia variedad de temperaturas. El diseño del Nivel 3 es el único protocolo que utiliza el ensayo de SST con muestras confinadas. Debido a que



abarca un amplio rango de ensayos y resultados, el diseño del Nivel 3 ofrece un más detallado y seguro nivel de predicción de la desempeño.

3.4.1.4 Protocolo de la Asociación Mexicana del Asfalto, AMAAC.

Este protocolo contiene la metodología necesaria para diseñar una mezcla asfáltica que se utilice en la construcción de pavimentos para carreteras en donde se desee obtener altos niveles de desempeño, lo precede la metodología Superpave de Estados Unidos. Incluye adaptaciones a las condiciones prevalecientes y a la tecnología disponible en nuestro país para su aplicación.

3.4.1.4.1 Niveles de diseño especificados por recomendación AMAAC [3].

El método de diseño Recomendación AMAAC, establece diferentes niveles de diseño para una mezcla asfáltica densa en función de la importancia de la carretera determinada por el nivel de tránsito esperado en el carril de diseño. La figura 32 ilustra los diferentes niveles de diseño [3].

En la tabla 12 se presenta la recomendación para el nivel de diseño recomendado para las mezclas asfálticas de granulometría densa en función del tránsito vehicular. *Referenciando la investigación en este protocolo, porque es el que nos rige a nivel nacional se selecciona el nivel II, para vialidades urbanas para un nivel de tránsito 10^6 a 10^7 , número de ejes equivalentes.*



Figura 32. Niveles de diseño para una mezcla asfáltica densa

Tabla 12. Niveles de diseño en función del número de ejes equivalentes y/o el tipo de proyecto

DESIGNACIÓN DEL NIVEL DE TRÁNSITO	NÚMERO DE EJES EQUIVALENTES	TIPO DE CARRETERAS USUALES	ENSAYES RECOMENDADOS
Nivel I Tránsito bajo	menor a 1,000,000	a) Carreteras federales tipo D, b) Carreteras alimentadoras, c) Carreteras estatales y municipales, d) Calles urbanas	a) Diseño volumétrico y susceptibilidad a la humedad
Nivel II Tránsito medio	de 1,000,000 a 10,000,000	a) Carreteras estatales, b) Carreteras federales tipo B y C, c) Vialidades urbanas	a) Diseño volumétrico y susceptibilidad a la humedad, b) Susceptibilidad a la deformación permanente
Nivel III Tránsito alto	de 10,000,000 a 50,000,000	a) Carreteras federales tipo A, b) Autopistas de cuota	a) Diseño volumétrico y susceptibilidad a la humedad, b) Susceptibilidad a la deformación permanente, c) Módulo dinámico
Nivel IV Tránsito muy alto	más de 50,000,000	a) Carreteras federales troncales, b) Autopistas de cuota, c) Importantes Vialidades suburbanas en ciudades muy grandes	a) Diseño volumétrico y susceptibilidad a la humedad, b) Susceptibilidad a la deformación permanente, c) Módulo dinámico, d) Fatiga

3.4.2 Requerimientos de compactación

El compactador giratorio es una contribución clave en la metodología Superpave para el diseño de mezclas asfálticas, ya que este puede usarse para diseñar mezclas que no presenten un comportamiento endeble, no se densifiquen bajo el tránsito y tengan un bajo contenido de vacíos. *El compactador giratorio utilizado en esta investigación es de la marca TROXLER, modelo 4140* (ver figura 33), *compacta la probeta con un principio de amasado, cumple con las especificaciones Superpave*, proporciona una segura y confiable compactación de especímenes a la presión de consolidación dada y un ángulo giratorio. Los parámetros especificados en la compactación por amasado para cualquier SCG, son: La fuerza (F) esfuerzo vertical, de 600KPa, el ángulo de giro (α), de $1.25^\circ (\pm 0.02^\circ)$ y la velocidad de giro (n), de 30rpm.





Figura 33. El compactador giratorio utilizado en esta investigación es de la marca TROXLER, modelo 4140

3.4.3 Selección del esfuerzo de compactación

Tabla 13. Especificaciones de esfuerzo de compactación Superpave

TRÁNSITO (ESAL´ s^{-1})	PARÁMETROS DE COMPACTACIÓN NÚMERO DE GIROS EN EL COMPACTADOR GIRATORIO		
	N inicial ²	N diseño ³	N máximo ⁴
ESAL´ $s < 3 \times 10^5$	6	50	75
$3 \times 10^5 < \text{ESAL´}s < 3 \times 10^6$	7	75	115
$3 \times 10^6 < \text{ESAL´}s < 3 \times 10^7$	8	100	160
ESAL´ $s \geq 3 \times 10^7$	9	125	205

1.Los ESAL´ s de diseño es el nivel de tránsito esperado para el carril de diseño para un periodo de diseño de 20 años, 2.Simula la colocación – acomodo inicial de la mezcla asfáltica y conformación – compactación inicial en el campo, 3.Simula el proceso de compactación de diseño en campo, 4.Simula la compactación alcanzada en la mezcla asfáltica al final de la vida útil del pavimento.

El número de giros efectuados por el compactador giratorio, define el esfuerzo de compactación para compactar el espécimen de la mezcla asfáltica, está en función de los ejes equivalentes de diseño (ESAL´ s). *Para esta investigación se consideró el correspondiente al nivel 2 de la metodología Superpave (ver tabla 13) y dentro del nivel II (transito medio, para vialidades urbanas) de las especificaciones que acoge el protocolo AMAAC.*

3.4.4 Requerimientos de diseño volumétrico

Los requerimientos volumétricos de la mezcla son: vacíos de aire (V_a), vacíos del agregado mineral (VAM) y vacíos llenos con asfalto (VFA). El contenido de vacíos de aire es una propiedad importante pues es utilizada como la base para la selección del contenido del cemento asfáltico. En Superpave, el contenido de vacíos de aire de diseño es del 4%. Superpave define a

los vacíos del agregado mineral (VAM) como la suma del volumen de vacíos de aire y del cemento asfáltico efectivo (P_{be} , esto es, el no absorbido) en una muestra compactada. Representa los vacíos entre las partículas del agregado. Los valores mínimos especificados para el VAM para el porcentaje de diseño de vacíos de aire del 4% están en función del tamaño máximo nominal del agregado. Otro aspecto es la proporción de polvo la cual se calcula como la relación entre el porcentaje en peso del agregado más fino que el tamiz 0.075 mm (No 200) y el contenido de asfalto efectivo (P_{be}) en porcentaje del peso total en la mezcla, menos el porcentaje de asfalto absorbido [21].

Los requerimientos volumétricos a cumplir para el diseño volumétrico de la mezcla de control de esta investigación, para un número de ESAL's de diseño de $3 \times 10^6 < ESAL's < 3 \times 10^7$ y un T.M.N. de 19 mm (3/4"), para el nivel 2 de la metodología Superpave y el nivel II (transito medio) de las especificaciones del protocolo AMAAC se presentan en la tabla 14.

Tabla 14. Requisitos volumétricos para ESAL's de diseño $3 \times 10^6 < ESAL's < 3 \times 10^7$ y un T.M.N. de 19 mm (3/4")

TRÁNSITO (ESAL's)	DENSIDAD REQUERIDA (% DE LA DENSIDAD TEÓRICA MÁXIMA) Gmm			VACÍOS DE AGREGADO MINERAL MÍNIMO EN %VMA	VACÍOS LLENOS DE ASFALTO EN % VFA	PROPORCIÓN DE POLVO
	NIVEL DE COMPACTACIÓN GIRATORIA			TAMAÑO MÁXIMO NOMINAL (mm)		
	N inicial	N diseño	N máximo	19mm (3/4")		
$3 \times 10^6 < ESAL's < 3 \times 10^7$	≤89	96	≤98	13	65-78	0.6 - 1.2

3.4.5 Propiedades volumétricas y relaciones gravimétricas

Un factor que debe tenerse en cuenta al considerar el comportamiento de la mezcla asfáltica es el de las proporciones volumétricas de los componentes, el cemento asfáltico y el agregado. Para fines de diseño, se le considera a la mezcla asfáltica como un sistema trifásico compuesto por una fase sólida, constituida por el agregado pétreo, una fase líquida, dada por el cemento asfáltico, y una fase gaseosa que constituye el aire. La figura 34 muestra el diagrama de fase que es usual considerar junto con las definiciones necesarias.



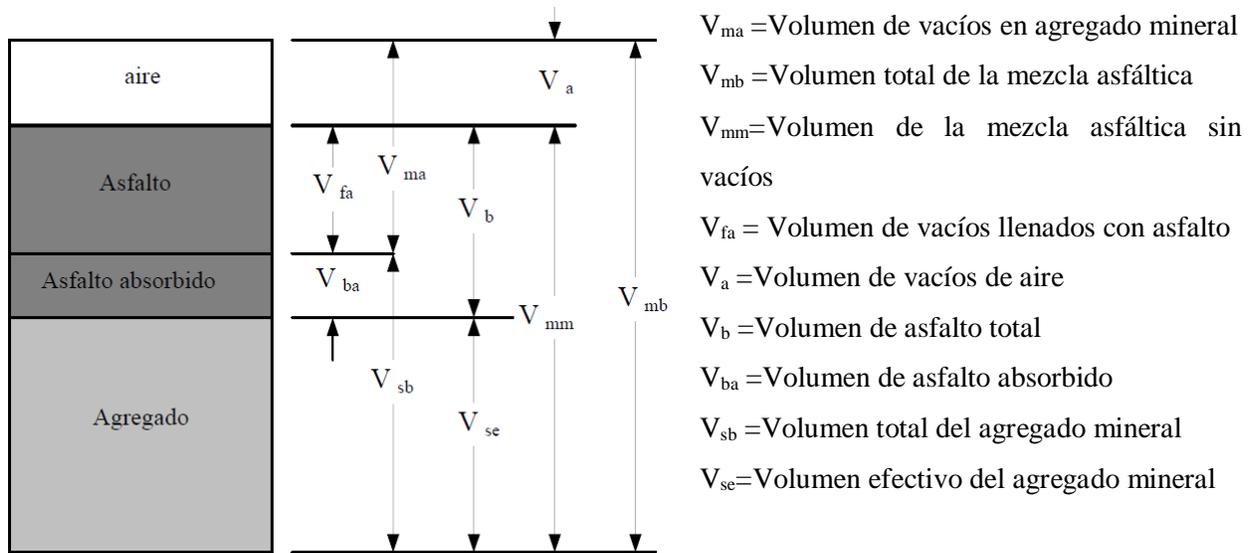


Figura 34. Diagrama de fases o de componentes de la mezcla asfáltica compactada

A continuación se presentan las propiedades volumétricas y relaciones gravimétricas empleadas para una serie de cálculos para la verificación de los especímenes fabricados en esta investigación:

a) Gravedad específica neta, G_{sb}

Donde:

$$G_{sb} = \frac{P_1 + P_2 \dots + P_N}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} \dots + \frac{P_N}{G_N}}$$

G_{sb} = Gravedad específica neta del agregado

P_1, P_2, P_N = Porcentajes individuales por masa de agregado,

G_1, G_2, G_N = Gravedad específica neta individual del agregado, (G_{sb} , de cada tamiz)

b) Gravedad específica efectiva, G_{se}

Donde:

$$G_{se} = \frac{P_{mm} - P_b}{\frac{P_{mm}}{G_{mm}} - \frac{P_b}{G_b}}$$

G_{se} = Gravedad específica efectiva del agregado,

G_{mm} = Gravedad específica teórica máxima, obtenida en laboratorio (ASTMD2041/AASHTO T 209 de la mezcla de pavimento sin vacíos de aire),

P_{mm} = Porcentaje de masa del total de la mezcla suelta= 100,

P_b = Contenido de asfalto con el cual ASTM 2041/AASHTO T209 desarrollo el ensayo; el porcentaje por el total de la masa de la mezcla,

G_b = Gravedad específica del asfalto

c) Gravedad específica aparente, G_{sa}

Donde:

$$G_{sa} = \frac{P_1 + P_2 \dots + P_N}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} \dots + \frac{P_N}{G_N}}$$

G_{sa} = Gravedad específica aparente del agregado

P_1, P_2, P_N = Porcentajes individuales por masa de agregado,

G_1, G_2, G_N = Gravedad específica neta individual del agregado, (G_{sb} , de cada tamiz)

d) Gravedad específica teórica máxima de la mezcla asfáltica, (RICE)

Donde:

$$G_{mm} = \frac{P_{mm}}{\frac{P_s}{G_{se}} + \frac{P_b}{G_b}}$$

G_{mm} = Gravedad específica teórica máxima, obtenida en laboratorio (ASTMD2041/AASHTO T 209 de la mezcla de pavimento sin vacíos de aire),

P_{mm} = Porcentaje de masa del total de la mezcla suelta= 100,

P_b = Contenido de asfalto con el cual ASTM 2041/AASHTO T209 desarrollo el ensayo; el porcentaje por el total de la masa de la mezcla,

G_b = Gravedad específica del asfalto

e) Vacíos en el agregado mineral, VAM

Donde:

$$VAM = 100 - \frac{G_{mb} \times P_s}{G_{sb}}$$

VAM = Vacíos en el agregado mineral (porcentaje del volumen neto),

G_{sb} = Gravedad específica neta del total de agregado,

G_{mb} = Gravedad específica neta de la mezcla asfáltica compactada (ASTM 1188 O D2726/AASHTO T 166),

P_s = Contenido de agregado, porcentaje del total de la masa de la mezcla asfáltica,

P_b = Contenido de asfalto, porcentaje de la masa del agregado

$$VAM = 100 - \frac{G_{mb}}{G_{sb}} \times \frac{100}{100 + P_b} \times 100$$

Esta expresión se usa si la composición de la mezcla es determinada como el porcentaje de la masa del agregado.

f) Contenido de asfalto efectivo, P_{be}

Donde:

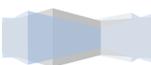
P_{be} = Contenido de asfalto efectivo, porcentaje del total de la mezcla,

P_b = Contenido de asfalto, porcentaje de la masa de la mezcla,

P_{ba} = Asfalto absorbido, porcentaje de la masa de la mezcla,

P_s = Contenido de agregado, porcentaje del total de la masa de la mezcla asfáltica

$$P_{be} = P_b - \frac{P_{ba}}{100} \times P_s$$



g) Vacíos de aire, V_a

Donde:

V_a = Vacíos de aire en la mezcla compactada, porcentaje del volumen total,

$$V_a = 1 \times \frac{G_{mb}}{G_{mm}} \times 100$$

G_{mm} = Gravedad específica máxima de la mezcla asfáltica,

G_{mb} = Gravedad específica neta de la mezcla asfáltica compactada

h) Vacíos llenados con asfalto, VFA

Donde:

VFA = Vacíos llenados con asfalto, porcentaje de VAM,

VAM = Vacíos en el agregado mineral, porcentaje del volumen total,

$$VFA = \frac{VAM - V_a}{VAM} \times 100$$

V_a = Vacíos de aire en mezclas compactadas, porcentaje del volumen total,

3.4.6 Diseño de la mezcla de control y las mezclas combinadas con RCD

3.4.6.1 Determinación del porcentaje de cemento asfáltico

La selección de la estructura del agregado de diseño es un proceso de prueba y error. Este paso consiste en mezclar, en diferentes porcentajes, los agregados disponibles para llegar a una granulometría (ver el subcapítulo “granulometría”) que satisfaga los requerimientos Superpave. Son normalmente tres mezclas de prueba empleadas para este propósito, la mezcla de prueba es considerada aceptable si posee las propiedades volumétricas adecuadas (con base en las condiciones de tránsito y clima) para determinar un contenido de cemento asfáltico de diseño.

Para verificar los requerimientos de diseño de la mezcla de referencia, se fabricaron una serie de probetas, las cuales fueron compactadas de acuerdo al nivel de tránsito (160 giros), en el compactador giratorio Superpave, con un contenido óptimo de 6% de asfalto sobre el peso del agregado, ver figura 35. Estimación del contenido óptimo inicial:



Figura 35. Determinación del porcentaje de cemento asfáltico

$P_{bi, \text{mezcla}} = 6.18\%$; $P_{bi, \text{agregado}} = 6.58\%$

3.4.6.1 Determinación gravedad específica máxima teórica "Densidad RICE"

Se llevó el ensaye de la densidad específica teórica máxima G_{mm} o densidad RICE, para la mezcla de control y las tres mezclas combinadas con RCD, una vez que los materiales pétreos se dosificaron se acondicionaron cercanos a la temperatura de mezclado, se dosificó el asfalto en peso con respecto al peso total de la mezcla. Posteriormente se procedió al mezclado del agregado pétreo y el cemento asfáltico a una temperatura de mezclado de 145°C hasta que las partículas más gruesas se cubrieron totalmente con el cemento asfáltico.

Después del mezclado, las mezclas asfálticas se colocaron sobre una charola y se dejaron en el horno a una temperatura de compactación de 130°C ± 5, por un periodo de 120 minutos, moviendo el material cada 30 min, cumpliendo así el periodo de curado, transcurrido ese tiempo se procedió a dejar enfriar el material si dejar que se formaran bloques. Posteriormente se realizó el ensayo de densidad RICE o gravedad especifica máxima teórica de acuerdo a la norma ASTM D 2041, En las tabla 15, 16 y figura 36, se puede observar que la densidad de RICE de la mezcla con agregado combinado de cantera con RCD es menor que la densidad de RICE de la mezcla de control.

Tabla 15. Determinación de la gravedad específica máxima teórica "Densidad RICE", para la mezcla de control

		ESPECÍMENES ENSAYADOS					
		E1	E2	E3	E4	E5	E6
A	Peso del picnómetro	2516	2515	2514	2514	2512	2515
B	Peso del picnómetro + mezcla asfáltica (g)	4625	4596	4567	4665	4495	4582
C	Peso de la mezcla	2109	2081	2053	2151	1983	2067
D	Temperatura de prueba (°C)	24	22	22.5	22	22	22
E	Peso del picnómetro con mezcla aforado (g)	8936	8915	8901	8967	8858	8902
F	Peso del picnómetro calibrado a la temperatura de prueba (g)	7728	7729	7729	7729	7729	7729
G	Gravedad especifica máxima, G_{mm}	2.341	2.324	2.331	2.355	2.321	2.311



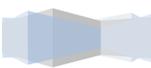
“EMPLEO DE CONCRETO RECICLADO EN LA MANUFACTURA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE PARA VIALIDADES URBANAS”

Tabla 16. Determinación de la gravedad específica máxima teórica "Densidad RICE", para la mezclas combinadas con agregado natural de cantera y agregado de concreto reciclado cubierto con aditivo proveniente de RCD

		ESPECÍMENES ENSAYADOS					
		COMB: 80-20		COMB: 60-40		COMB: 50-50	
		E1	E2	E3	E4	E5	E6
A	Peso del picnómetro	2510	2510	2510	2510	2510	2510
B	Peso del picnómetro + mezcla asfáltica (g)	4870	4940	4880	4920	4890	4840
C	Peso de la mezcla	2360	2430	2370	2410	2380	2330
D	Temperatura de prueba (°C)	22.5	23	22	22.5	19.5	19.5
E	Peso del picnómetro con mezcla aforado (g)	9060	9100	9060	9070	9060	9030
F	Peso del picnómetro calibrado a la temperatura de prueba (g)	7729	7729	7729	7729	7731	7731
G	Gravedad específica máxima, G_{mm}	2.294	2.296	2.280	2.255	2.265	2.260



Figura 36. Determinación de la gravedad específica máxima teórica "Densidad RICE", a las mezclas realizadas para esta investigación



3.4.6.2 Elaboración de la MAC

En la figura 37 se presentan las etapas importantes en la manufactura de las mezclas asfálticas en caliente que se realizaron en esta investigación, a continuación también se describen:

A. Etapa de mezclado:

- a) Los componentes de la mezcla, se pesaron de acuerdo a la estructura planteada y las probetas a realizar, ver figura 37-1.
- b) Acondicionamiento del agregado pétreo y cemento asfáltico Pemex EKBÉ a una temperatura de $150\pm 5^\circ\text{C}$ por 2 horas como mínimo. Se realizó el mezclado por probeta pesando el agregado necesario para cada una, ver figura 37-2
- c) Incorporación del 6% de asfalto sobre el peso del agregado, ver figura 37-3.
- d) Mezclado de los materiales por un tiempo de 4 minutos a la temperatura de $130\pm 5^\circ\text{C}$, ver figura 37-4.

B. Etapa de compactación:

- a) Colocación de la mezcla asfáltica en los moldes de compactación, ver figura 37-5,6.
- b) Compactación de las probetas a 160 giros en el compactador giratorio Superpave (probetas de forma cilíndrica con diámetro de 150mm y una altura de $95\pm 5\text{mm}$), ver figura 37-7.
- c) Desmolde de las probetas y notación del número de espécimen, ver figura 37-8.

A continuación en la tabla 17 se presenta el resumen de los resultados de la serie de cálculos realizados para la verificación de los requerimientos de las propiedades volumétricas y relaciones gravimétricas, de acuerdo con las especificaciones se consideró que los resultados son aceptables.

Tabla 17. Resultados del diseño volumétrico de la mezcla MAC

PROPIEDAD VOLUMÉTRICA	RESULTADOS OBTENIDOS	ESPECIFICACIÓN SUPERPAVE	ESPECIFICACIÓN AMAAC
Gravedad específica neta, G_{sb}	2.409	-	-
Gravedad específica efectiva, G_{se}	2.545	-	-
Gravedad específica teórica máxima, G_{mm}	2.335	-	-
Vacíos en el agregado mineral, VAM (%)	12.800	13	13
Contenido de asfalto efectivo, P_{be} (%)	3.882	-	-
Vacíos de aire, V_a (%)	4.293	4	4
Vacíos llenados con asfalto, VFA (%)	66.462	65 - 78	65 - 78
Proporción de polvo	0.673	0.6 - 1.2	0.6 - 1.2



“EMPLEO DE CONCRETO RECICLADO EN LA MANUFACTURA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE PARA VIALIDADES URBANAS”



Figura 37. Elaboración de la MAC

CAPÍTULO 4
PRESENTACIÓN Y
ANÁLISIS DE
RESULTADOS

4. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan y analizan los resultados obtenidos de las pruebas experimentales de las cuatro diferentes mezclas realizadas, llevadas a cabo para determinar el comportamiento de la mezcla durante el periodo de vida de diseño para tránsito bajo y medio. Los ensayos de caracterización mecánica que se realizaron en esta investigación son: a) *Susceptibilidad a la humedad*, y b) *Susceptibilidad a la deformación permanente*. Al final del capítulo se presentan los resultados y se evalúa la caracterización mecánica del concreto asfáltico de forma comparativa para una capa de rodadura para vialidades urbanas a partir del diseño de una mezcla asfáltica en caliente donde se incorpora agregados pétreos de cantera en combinación con agregados reciclados de RCD.

4.1 Análisis de pruebas experimentales: Caracterización mecánica del concreto asfáltico

4.1.1 Determinación de la Susceptibilidad a la humedad mediante pruebas TSR

Una vez que se verificaron los requerimientos volumétricos y la proporción de polvo, se realizó la prueba de susceptibilidad a la humedad, antes se elaboraron especímenes con diámetro de 150mm y altura de 95 ± 5 mm. El ensayo de susceptibilidad a la humedad empleado para evaluar la resistencia, comportamiento de una MAC al desprendimiento no se basa en el desempeño, sirve a dos propósitos. Primero, identifica si una combinación de cemento asfáltico y agregado es susceptible a la acción del agua. Segundo, mide la efectividad de los aditivos anti – desprendimiento o mejoradores de adherencia. Esta prueba se llevará a cabo de acuerdo a la norma AASHTO T283. (Resistencia de las mezclas bituminosas al daño inducido por humedad) [21].

4.1.1.1 Parámetros de las pruebas TSR para determinar la susceptibilidad a la humedad [21]

En el ensayo, dos sub – grupos de probetas son preparados. Los especímenes son compactados para lograr un contenido de vacíos de entre 6 y 8%, con un valor deseado de 7%. Los

especímenes de ensayo son elegidos de forma tal que cada grupo tenga el mismo contenido de vacíos.

Un subgrupo se somete a saturación por vacío para alcanzar un grado de saturación constante del 55 al 80%. Continúa un ciclo opcional de congelamiento. Al finalizar se acondiciona en una inmersión en agua caliente.

Después del acondicionamiento ambos subgrupos son sometidos al ensayo de resistencia a la tensión indirecta. El resultado informado es la relación entre la resistencia a la tensión del subgrupo acondicionado y la resistencia a tensión del subgrupo sin acondicionamiento. Esta relación se denomina "relación de resistencia a la tensión" o TSR (tensile strength ratio por sus siglas en inglés). Se requiere un TSR mínimo del 80 %.

4.1.1.2 Procedimiento de las pruebas TSR

El procedimiento de esta prueba obedece los parámetros vistos anteriormente, ver figura38:

- a) Manufactura de la mezcla, acondicionamiento de la mezcla por 2 horas a temperatura ambiente, ver figura 38-1 al 4.
- b) Revisión de vacíos de aire de los especímenes compactados, 6 a 8%, ver figura 38-5 y 6.
- c) Envejecimiento de la mezcla a corto plazo, 16 horas a $60 \pm 1^\circ \text{C}$.

A. Acondicionamiento para el primer subgrupo de especímenes:

- d) Saturación de los especímenes, 55 al 80%, ver figura 38-7.
- e) Congelamiento de forma opcional, mínimo 16 horas a $-18 \pm 3^\circ \text{C}$, ver figura 38-8.
- f) Inmersión en agua caliente, por 24 horas a $60 \pm 1^\circ \text{C}$, ver figura 38-7.

B. Para ambos subgrupos de especímenes:

- g) Inmersión en agua caliente, 2 horas antes de ser ensayados a $25 \pm 0.5^\circ \text{C}$, ver figura 38-7.
- h) Verificación de propiedades de resistencia, Resistencia a la Tensión Indirecta, ver figura38-9.
- i) Verificación de velocidad de carga, 51 mm/min a 25°C , ver figura 38-10.
- j) Separación de la probeta ensayada para un análisis visual, se puede observar la separación de los agregados de forma natural o por falla, ver figura 38-11.

Con los resultados conseguidos de *carga máxima soportada*, se calcula la Resistencia a la Tensión Indirecta (IDT por sus siglas en inglés, St) para las mezclas asfálticas en caliente, la de

control y las combinadas con concreto reciclado RCD de los dos subgrupos de especímenes, con las siguientes expresiones:

Donde:

$$S_t = \frac{2000P}{\pi t D}$$

S_t = Es la resistencia a tensión indirecta, kPa, t = Espesor o altura del espécimen, mm,
 P = Es la carga máxima, N, D = Es el diámetro del espécimen, mm.

Posteriormente se calcularon los valores de TSR de cada mezcla evaluada. Se requiere un TSR mínimo del 80 % para considerar aceptable el diseño volumétrico.

Dónde:

$$\%TSR = \frac{S_2}{S_1} \times 100$$

$\%TSR$ = Es la resistencia a tensión, %,
 S_1 = Es la resistencia a la tensión indirecta promedio de especímenes no acondicionados, kPa,
 S_2 = Es la resistencia a la tensión indirecta de especímenes acondicionados, kPa



“EMPLEO DE CONCRETO RECICLADO EN LA MANUFACTURA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE PARA VIALIDADES URBANAS”

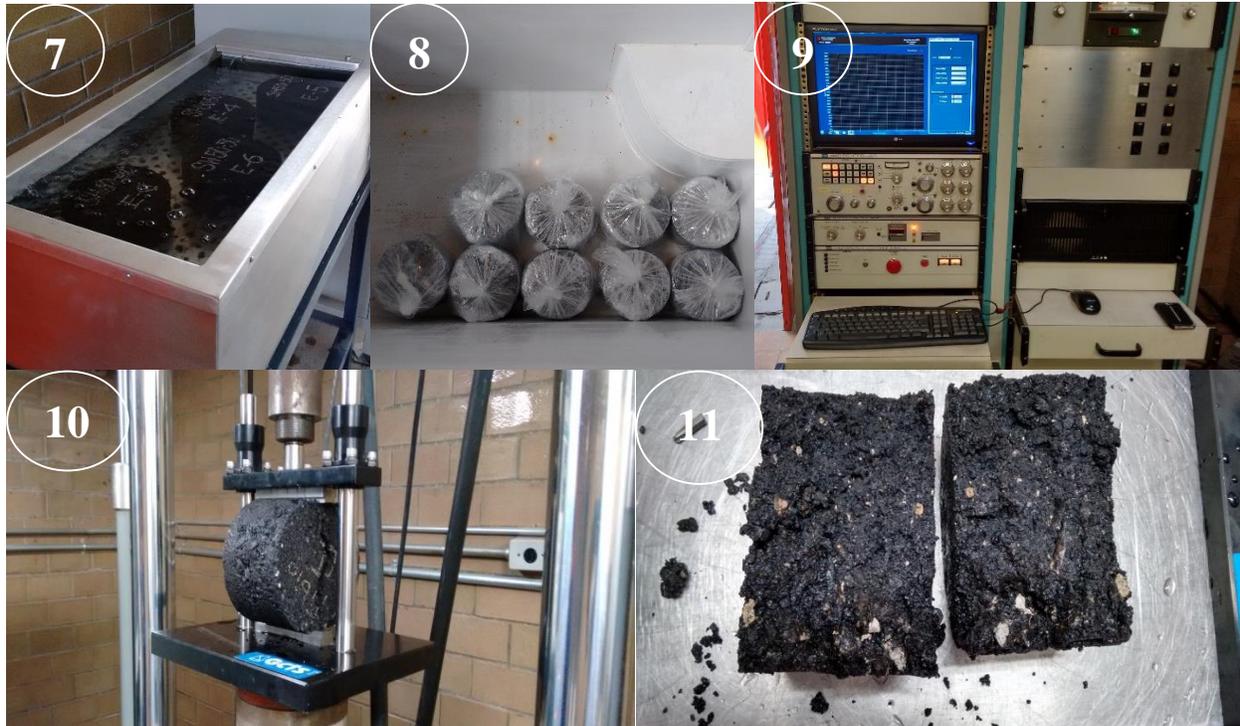
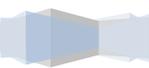


Figura 38. Procedimiento de la prueba TSR para determinar la susceptibilidad a la humedad



4.1.1.3 Resultados y análisis de las pruebas TSR para determinar la susceptibilidad a la humedad

En la tabla 18 y figura 39 se presentan los resultados de las pruebas TSR para la *mezcla de control*.

Tabla 18. Resultados del ensayo de susceptibilidad a la humedad para la mezcla de control

Identificación del espécimen		1	2	3	4	5	6
Diámetro, mm	<i>D</i>	150.00	150.00	150.10	149.70	149.93	150.12
Espesor, mm	<i>t</i>	99.20	95.20	95.33	93.88	95.27	94.62
Peso en aire, grs	<i>A</i>	3660	3622	3618	3618	3612	3625
Peso sat. superficialmente seco, grs.	<i>B</i>	3718	3679	3663	3670	3665	3679
Peso sumergido grs.	<i>C</i>	2035	2020	1990	2000	2001	2006
Volumen (B-C)	<i>E</i>	1683.00	1659.00	1673.00	1670.00	1664.00	1673.00
Gravedad especifica bruta (A/E)	<i>G_{mb}</i>	2.17	2.18	2.16	2.17	2.17	2.17
Gravedad especifica teórica máxima	<i>G_{mm}</i>	2.331	2.331	2.331	2.331	2.331	2.331
Vacíos [100((G _{mm} -G _{mb})/G _{mm})]	<i>P_a</i>	6.706	6.339	7.225	7.058	6.878	7.046
Volumen de vacíos (P _a E/100), cc	<i>V_a</i>	112.86	105.16	120.88	117.88	114.45	117.87
Carga, N	<i>P</i>	7995.37	7727.93	7738.76			
Espesor, mm	<i>t'</i>				99.88	95.27	94.68
Peso sat. superficialmente seco, grs.	<i>B'</i>				3691	3686	3715
Volumen de agua absorbida (B'-A), cc	<i>J'</i>				73	74	90
% Saturación (100J'/V _a)	<i>S'</i>				62	65	76
Carga, N	<i>P'</i>				8026.16	7413.54	8009.70
Resistencia a la TI, Muestras S/A	<i>S₁</i>	342.07	344.52	344.29			
Resistencia a la TI, Muestras Aco.	<i>S₂</i>				341.73	330.41	358.76
TSR (S ₂ /S ₁)		100.00					

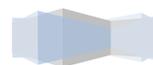
Probetas sometidas a ambientación:

E-4,E-5,E-6

Cumple con los parámetros de vacíos para la norma AASHTO T283 que especifica de 6 a 8 %

Cumple con los parámetros de saturación para la norma AASHTO T283 que especifica de 55 a 80%

Cumple con los parámetros establecidos por Superpave que exige un TSR mínimo del 80%.



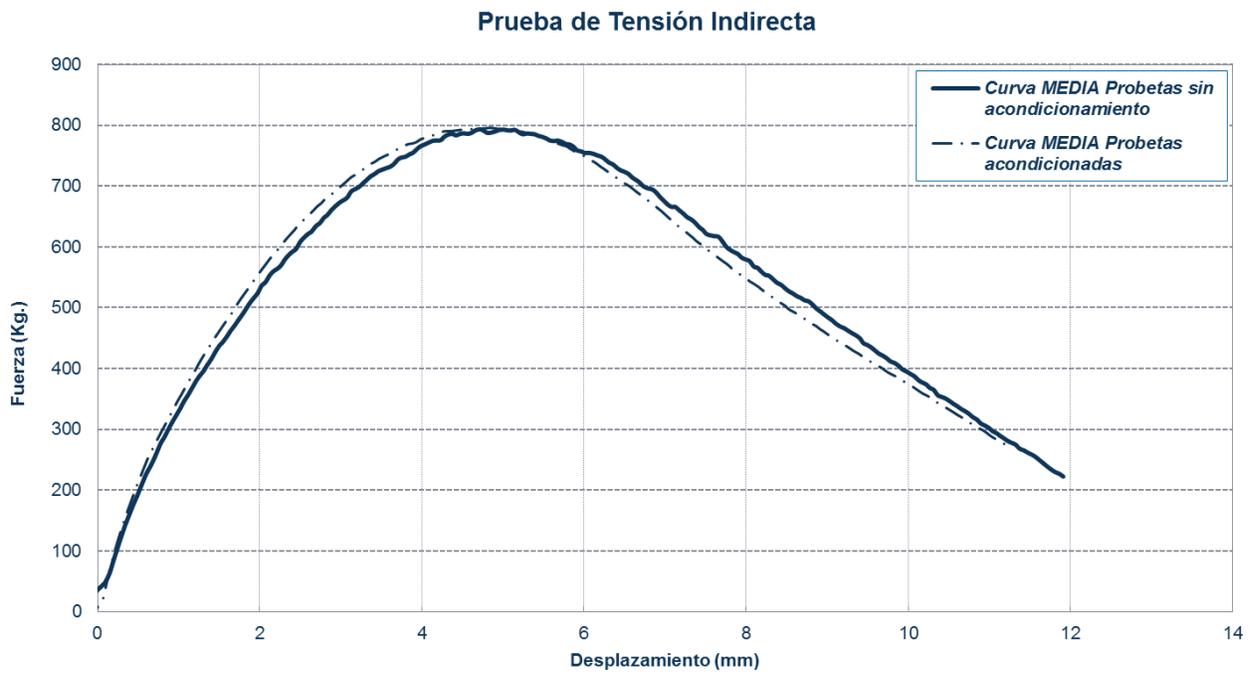
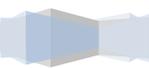


Figura 39. Gráfica de resultados del ensayo de susceptibilidad a la humedad para la mezcla de control



“EMPLEO DE CONCRETO RECICLADO EN LA MANUFACTURA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE PARA VIALIDADES URBANAS”

En las tablas 19, 20 y 21 y figura 42 se presentan los resultados obtenidos en *las muestras elaboradas con combinaciones de agregado pétreo de cantera y con agregado reciclado RCD.*

Tabla 19. Resultados del ensayo de susceptibilidad a la humedad para la mezcla combinación 80-20

		COMBINACIÓN 80-20					
Identificación del espécimen		E-2	E-5	E-6	E-4	E-1	E-3
Diámetro, mm	<i>D</i>	149.87	150.00	149.70	149.77	150.03	149.77
Espesor, mm	<i>t</i>	102.70	105.47	105.23	105.43	106.80	106.33
Peso en aire, grs	<i>A</i>	3561.80	3693.10	3686.30	3691.50	3683.30	3694.30
Peso sat. superficialmente seco, grs.	<i>B</i>	3604.90	3746.10	3745.30	3747.30	3732.90	3760.10
Peso sumergido grs.	<i>C</i>	1898.40	1974.80	1970.50	1982.30	1962.40	1993.50
Volumen (B-C)	<i>E</i>	1706.50	1771.30	1774.80	1765.00	1770.50	1766.60
Gravedad específica bruta (A/E)	<i>G_{mb}</i>	2.09	2.08	2.08	2.09	2.08	2.09
Gravedad específica teórica máxima	<i>G_{mm}</i>	2.295	2.295	2.295	2.295	2.295	2.295
Vacíos [100((G _{mm} -G _{mb})/G _{mm})]	<i>P_a</i>	9.05	9.15	9.50	8.87	9.35	8.88
Volumen de vacíos (P _a E/100), cc	<i>V_a</i>	154.52	162.11	168.57	156.50	165.58	156.88
Carga, N	<i>P</i>	10574.97	12093.05			10785.64	
Espesor, mm	<i>t'</i>			105.43	105.37		106.43
Peso sat. superficialmente seco, grs.	<i>B'</i>			3817.80	3812.50		3819.30
Volumen de agua absorbida (B'-A), cc	<i>J'</i>			131.50	121.00		125.00
% Saturación (100J'/V _a)	<i>S'</i>			78.01	77.31		79.68
Carga, N	<i>P'</i>			8851.87	8902.43		7694.77
Resistencia a la TI, Muestras S/A	<i>S₁</i>	437.40	486.64			428.52	
Resistencia a la TI, Muestras Aco.	<i>S₂</i>			357.04	359.15		307.31
TSR (S ₂ /S ₁)		75.67					

Probetas sometidas a ambientación:

E-3,E-4,E-6

Cumple con los parámetros de vacíos para la norma AASHTO T283 que especifica de 6 a 8 %

Cumple con los parámetros de saturación para la norma AASHTO T283 que especifica de 55 a 80%

No Cumple con los parámetros establecidos por Superpave que exige un TSR mínimo del 80%.



“EMPLEO DE CONCRETO RECICLADO EN LA MANUFACTURA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE PARA VIALIDADES URBANAS”

Tabla 20. Resultados del ensayo de susceptibilidad a la humedad para la mezcla combinación 60-40

Identificación del espécimen		COMBINACIÓN 60-40					
		E-1	E-3	E-2	E-4	E-6	E-5
Diámetro, mm	<i>D</i>	149.87	150.00	149.80	150.07	149.73	150.00
Espesor, mm	<i>t</i>	108.37	105.07	106.10	108.37	109.37	106.30
Peso en aire, grs	<i>A</i>	3689.10	3586.90	3598.70	3695.30	3694.90	3581.00
Peso sat. superficialmente seco, grs.	<i>B</i>	3742.00	3635.40	3653.40	3752.20	3746.40	3629.50
Peso sumergido grs.	<i>C</i>	1907.30	1858.60	1876.20	1916.00	1909.60	1857.00
Volumen (B-C)	<i>E</i>	1834.70	1776.80	1777.20	1836.20	1836.80	1772.50
Gravedad específica bruta (A/E)	<i>G_{mb}</i>	2.01	2.02	2.02	2.01	2.01	2.02
Gravedad específica teórica máxima	<i>G_{mm}</i>	2.27	2.27	2.27	2.27	2.27	2.27
Vacíos [100((G _{mm} -G _{mb})/G _{mm})]	<i>P_a</i>	11.34	10.99	10.72	11.27	11.31	10.92
Volumen de vacíos (P _a E/100), cc	<i>V_a</i>	208.11	195.27	190.47	206.88	207.66	193.58
Carga, N	<i>P</i>	11365.57	11774.51				10651.57
Espesor, mm	<i>t'</i>			106.00	108.57	109.37	
Peso sat. superficialmente seco, grs.	<i>B'</i>			3750.00	3845.50	3854.50	
Volumen de agua absorbida (B'-A), cc	<i>J'</i>			151.30	150.20	159.60	
% Saturación (100J'/V _a)	<i>S'</i>			79.43	72.60	76.86	
Carga, N	<i>P'</i>			7914.94	9584.71	8576.84	
Resistencia a la TI, Muestras S/A	<i>S₁</i>	445.52	475.63				425.27
Resistencia a la TI, Muestras Aco.	<i>S₂</i>			317.33	374.52	333.43	
TSR (S ₂ /S ₁)		76.15					

Probetas sometidas a ambientación:

E-2,E-4,E-6

Cumple con los parámetros de vacíos para la norma AASHTO T283 que especifica de 6 a 8 %

Cumple con los parámetros de saturación para la norma AASHTO T283 que especifica de 55 a 80%

No Cumple con los parámetros establecidos por Superpave que exige un TSR mínimo del 80%.



“EMPLEO DE CONCRETO RECICLADO EN LA MANUFACTURA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE PARA VIALIDADES URBANAS”

Tabla 21. Resultados del ensayo de susceptibilidad a la humedad para la mezcla combinación 50-50

		COMBINACIÓN 50-50					
Identificación del espécimen		E-1	E-3	E-2	E-4	E-6	E-5
Diámetro, mm	<i>D</i>	149.80	149.83	149.70	149.90	149.77	150.07
Espesor, mm	<i>t</i>	114.03	114.00	114.60	112.57	115.70	113.97
Peso en aire, grs	<i>A</i>	3694.40	3683.60	3673.10	3686.30	3691.90	3643.80
Peso sat. superficialmente seco, grs.	<i>B</i>	3747.90	3736.40	3759.40	3711.00	3742.80	3747.10
Peso sumergido grs.	<i>C</i>	1868.40	1847.00	1861.70	1845.00	1845.10	1858.10
Volumen (B-C)	<i>E</i>	1879.50	1889.40	1897.70	1866.00	1897.70	1889.00
Gravedad específica bruta (A/E)	<i>G_{mb}</i>	1.97	1.95	1.94	1.98	1.95	1.93
Gravedad específica teórica máxima	<i>G_{mm}</i>	2.26	2.26	2.26	2.26	2.26	2.26
Vacíos [100((G _{mm} -G _{mb})/G _{mm})]	<i>P_a</i>	13.10	13.81	14.43	12.67	13.99	14.72
Volumen de vacíos (P _a E/100), cc	<i>V_a</i>	246.26	260.93	273.87	236.34	265.56	278.12
Carga, N	<i>P</i>	10147.03	11790.76	12040.96			
Espesor, mm	<i>t'</i>				114.57	115.70	113.97
Peso sat. superficialmente seco, grs.	<i>B'</i>				3867.00	3887.70	3861.80
Volumen de agua absorbida (B'-A), cc	<i>J'</i>				180.70	195.80	218.00
% Saturación (100J'/V _a)	<i>S'</i>				76.46	73.73	78.38
Carga, N	<i>P'</i>				5688.37	7025.20	7501.56
Resistencia a la TI, Muestras S/A	<i>S₁</i>	378.16	439.45	446.82			
Resistencia a la TI, Muestras Aco.	<i>S₂</i>				210.87	258.10	279.23
TSR (S ₂ /S ₁)		59.17					

Probetas sometidas a ambientación:

E-4,E-5,E-6

Cumple con los parámetros de vacíos para la norma AASHTO T283 que especifica de 6 a 8 %

Cumple con los parámetros de saturación para la norma AASHTO T283 que especifica de 55 a 80%

No Cumple con los parámetros establecidos por Superpave que exige un TSR mínimo del 80%.



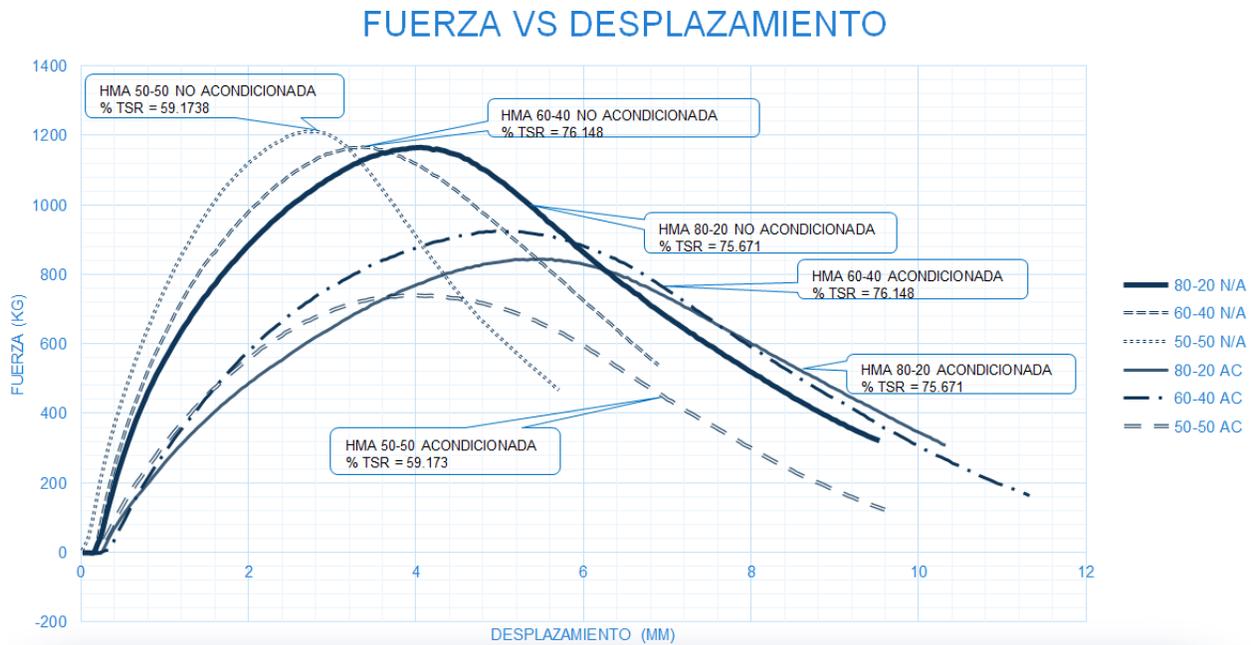


Figura 40 Gráfica de resultados del ensayo de susceptibilidad a la humedad para las mezcla combinadas con agregado reciclado RCD

4.1.2 Susceptibilidad a la deformación permanente

La deformación permanente es el deterioro representado por la existencia de una sección transversal de la superficie que ya no ocupa su posición original en una carpeta asfáltica. Se llama deformación permanente porque representa la acumulación de pequeñas deformaciones producidas con cada aplicación de carga, esta deformación es irrecuperable. Existen dos causas principales del ahuellamiento en pavimentos, la primera es causado por aplicación repetida de carga al suelo natural, el problema es considerado un problema de los materiales de la sub – rasante; el otro tipo principal, es el ahuellamiento que se debe a la acumulación de deformaciones en las capas asfálticas, este tipo de ahuellamiento es causado por una mezcla asfáltica cuya resistencia al corte es demasiado baja para soportar las cargas pesadas repetidas a las cuales está sometida, ver figura 41; el ahuellamiento de las mezclas asfálticas débiles es un fenómeno asociado a las altas temperaturas, pero realmente es un problema en los componentes de la MAC: el agregado mineral y del cemento asfáltico [21].

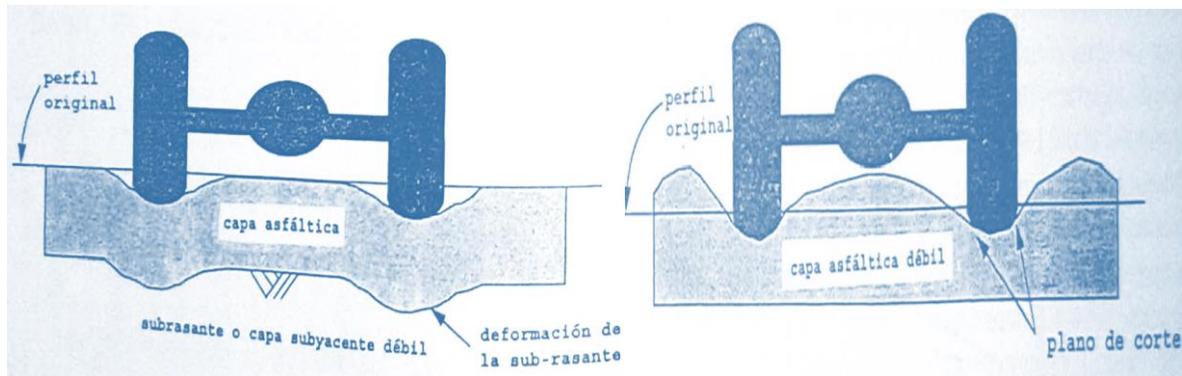


Figura 41. Tipos de deformación permanente, representa la acumulación de pequeñas deformaciones producidas por la aplicación de carga [21].

Una deformación plástica, se presenta cuando un sólido tiende a deformarse permanente e irreversiblemente, esto se debe a que dicho material se encuentra sometido a tensiones por encima de su rango elástico; en un pavimento flexible, su deformación plástica es de la misma forma, esta se presenta con cada aplicación de carga generando una acumulación de pequeñas deformaciones que sobre pasan su límite elástico con lo que su deformación se vuelve irrecuperable, ver figura 41, a esta deformación plástica de un pavimento, también se le llama deformación permanente.

4.1.2.1 Procedimiento del ensayo de Susceptibilidad a la deformación permanente por rodadura

En esta investigación se realizó la prueba de Susceptibilidad a la deformación permanente por rodadura (mediante la rueda de pista en laboratorio o prueba de la pista española), esta se refiere a la capacidad de la mezcla asfáltica para resistir la deformación, debida a las cargas que resultan de la simulación de tránsito vehicular, un pavimento es estable cuando conserva su forma; y es inestable cuando desarrolla deformaciones permanentes, corrugaciones y otros signos de desplazamiento de la mezcla. La estabilidad de una mezcla asfáltica depende principalmente, de la fricción interna y la cohesión.

Esta prueba consiste en medir la deformación permanente de una mezcla asfáltica compactada, mediante la aplicación de un movimiento cíclico concentrado de una rueda cargada. La probeta a ensayar es una placa de pavimento con geometría rectangular de 300 mm de ancho por 400 mm de largo con una altura de 60 mm; la placa se coloca en la pista española, ver Figura 41, a una temperatura de $60 \pm 1^\circ \text{C}$, con la aplicación de 10,000 ciclos de la rueda cargada una presión de

900 ± 25 kN/m². La prueba finaliza cuando los 10,000 ciclos han transcurrido o cuando la deformación sobre pasa los 20 mm de deformación.

4.1.2.2 Parámetros del ensayo de Susceptibilidad a la deformación permanente por rodera

Existen distintos tipos de ensayos de rodadura utilizados para determinar la resistencia a las deformaciones permanentes en las MAC, *en esta investigación se realizó la prueba de Susceptibilidad a la deformación permanente por rodera (ensayo de rueda de pista en laboratorio o prueba de la pista española) de acuerdo a la norma UNE- EN 12697-22 (AENOR, 2008)*, esta norma designa al equipo usado como dispositivo pequeño, ver figura 42.



Figura 42. Equipo para ensayo de rueda de pista en laboratorio, dispositivo pequeño: Esta integrado con un termostato de temperatura (temperatura de ensayo de 60°C), con una duración de 10,000 ciclos, se puede aplicar una carga de 700±10 N a una frecuencia de 26.5±1.0, internamente tiene un neumático de goma y el dispositivo de medición de la deformación de la rodera en la probeta, este va registrando sobre un eje longitudinal de la probeta (230mm) la deformación en milímetros por cada ciclo durante los 10 000 ciclos

De las pruebas realizadas en equipos utilizados (ver figura 43), se obtienen una serie de datos de los cuales se realizaron una serie de cálculos para la determinación del comportamiento de las mezclas asfálticas en caliente, la de control y las combinadas con concreto reciclado RCD, se ejecutaron con las siguientes expresiones:

- a) Pendiente de la deformación

Donde:

WTS_{aire} = Pendiente media de la deformación, en (mm para 1000 ciclos de carga),

$$WTS_{aire} = \frac{d_{10,000} - d_{5,000}}{5}$$

$d_{10,000, 5,000}$ = Es la profundidad de la rodera después de 5000 y 10,000 ciclos de carga en (mm)

Donde:

WTS_{media} = Pendiente media de la deformación del número de placas que componen el ensayo, mm/1000 ciclos de carga

$$WTS_{media} = \frac{WTS_{aire1} + WTS_{aire1} + WTS_{airen}}{n}$$

b) Porcentaje de profundidad de la rodera,

Donde:

$$PRD_{aire} = 100 \left(\frac{e}{RD_{aire}} \right)$$

PRD_{aire} = Porcentaje de la profundidad de la rodera, %,

e = Espesor de la placa

RD_{aire} = Profundidad de la rodera de la placa, mm

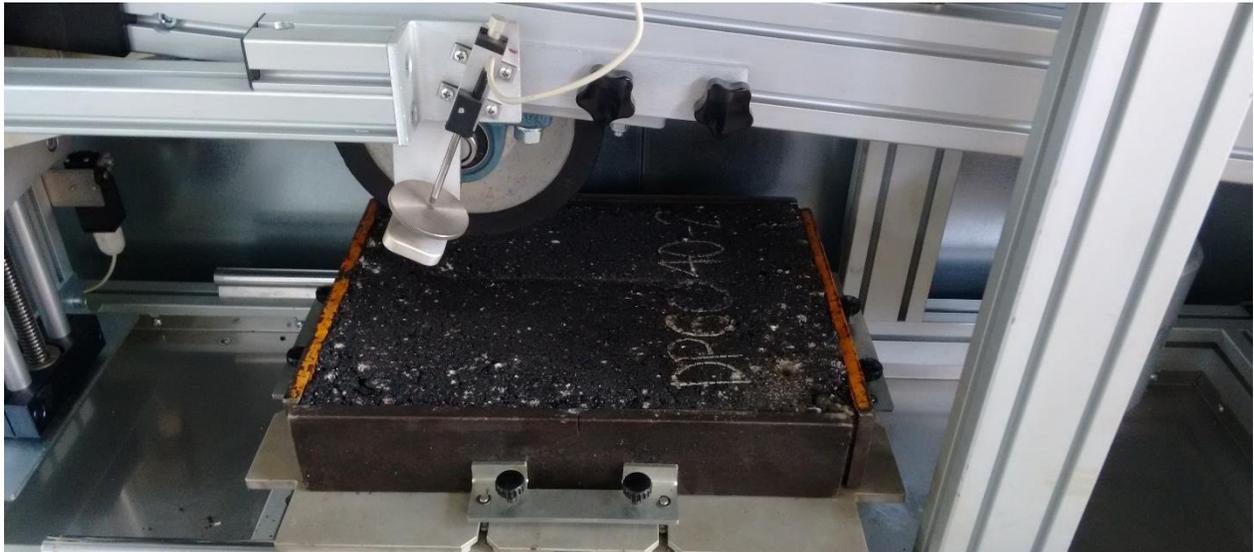


Figura 43. Profundidad de la rodera en mm

4.1.2.3 Resultados y análisis del ensayo de Susceptibilidad a la deformación permanente por rodadura

En las tablas 22 y 23 y figura 44 se presentan los resultados obtenidos para la *mezcla de control*.

Tabla 22. Cálculo de la pendiente de deformación en pista WTS_{aire} (inclinación de la rodada en aire), en la mezcla de control

	d_{5000} (mm)	d_{10000} (mm)	WTS_{AIRE} (mm/10 ³ ciclos)
Placa 1	15.36	16.57	0.242
Placa 2	9.07	12.26	0.638
Placa 3	12.22	14.42	0.440

$$WTS_{media} = 1.320 \text{ mm}/10^3 \text{ ciclos}$$

Tabla 23. Porcentaje de la profundidad media de la rodadura en aire PRD_{aire} , en la mezcla de control

	PRD_{AIRE} (%)
Placa 1	33.14
Placa 2	24.52
Placa 3	28.83
Promedio	28.83

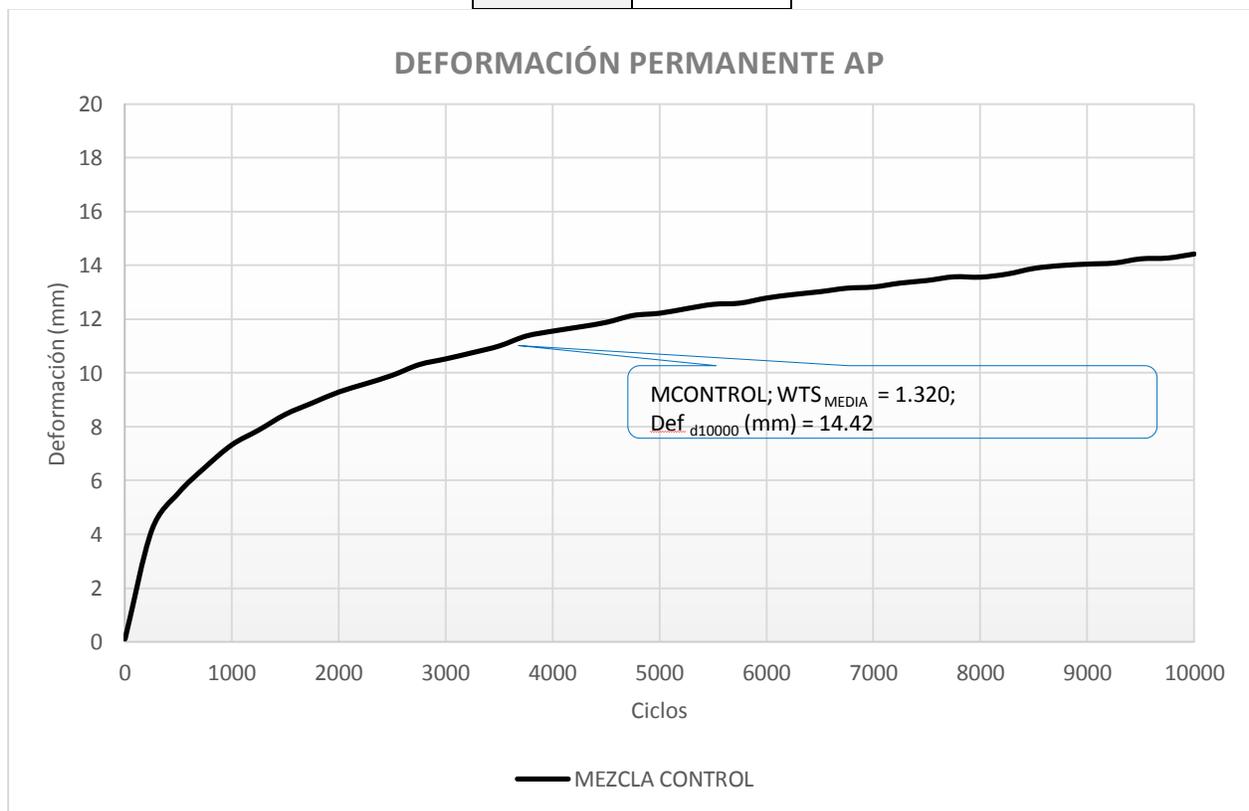


Figura 44. Gráfica de resultados de la deformación permanente media para la mezcla de control

En las siguientes tablas 24 y 25 y figura 45 se presentan los resultados obtenidos para *las muestras combinadas con agregado reciclado RCD*.

Tabla 24. Cálculo de la pendiente de deformación en pista WTS_{aire} (inclinación de la rodada en aire), en las mezclas combinadas

	d_{5000} (mm)	d_{10000} (mm)	WTS_{aire} (mm/10 ³ ciclos)
DP5050 E-1	3.47	3.98	0.102
DP6040 E-1	2.81	3.69	0.176
DP8020 E-1	2.34	3.33	0.198
DP5050 E-2	3.63	4.18	0.110
DP6040 E-2	3.03	3.89	0.172
DP8020 E-2	2.64	3.06	0.085

$WTS_{media\ 50-50} = 0.106$ mm/10³ciclos

$WTS_{media\ 60-40} = 0.174$ mm/10³ciclos

$WTS_{media\ 80-20} = 0.142$ mm/10³ciclos

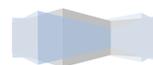
Tabla 25. Porcentaje de la profundidad media de la rodada en aire PRD_{aire} , en las mezclas combinadas

	PRD_{aire} (%)
DP5050 E-1	6.63
DP6040 E-1	6.15
DP8020 E-1	5.55
DP5050 E-2	6.97
DP6040 E-2	6.48
DP8020 E-2	5.10

Promedio ₅₀₋₅₀ = 6.80

Promedio ₆₀₋₄₀ = 6.32

Promedio ₈₀₋₂₀ = 5.33



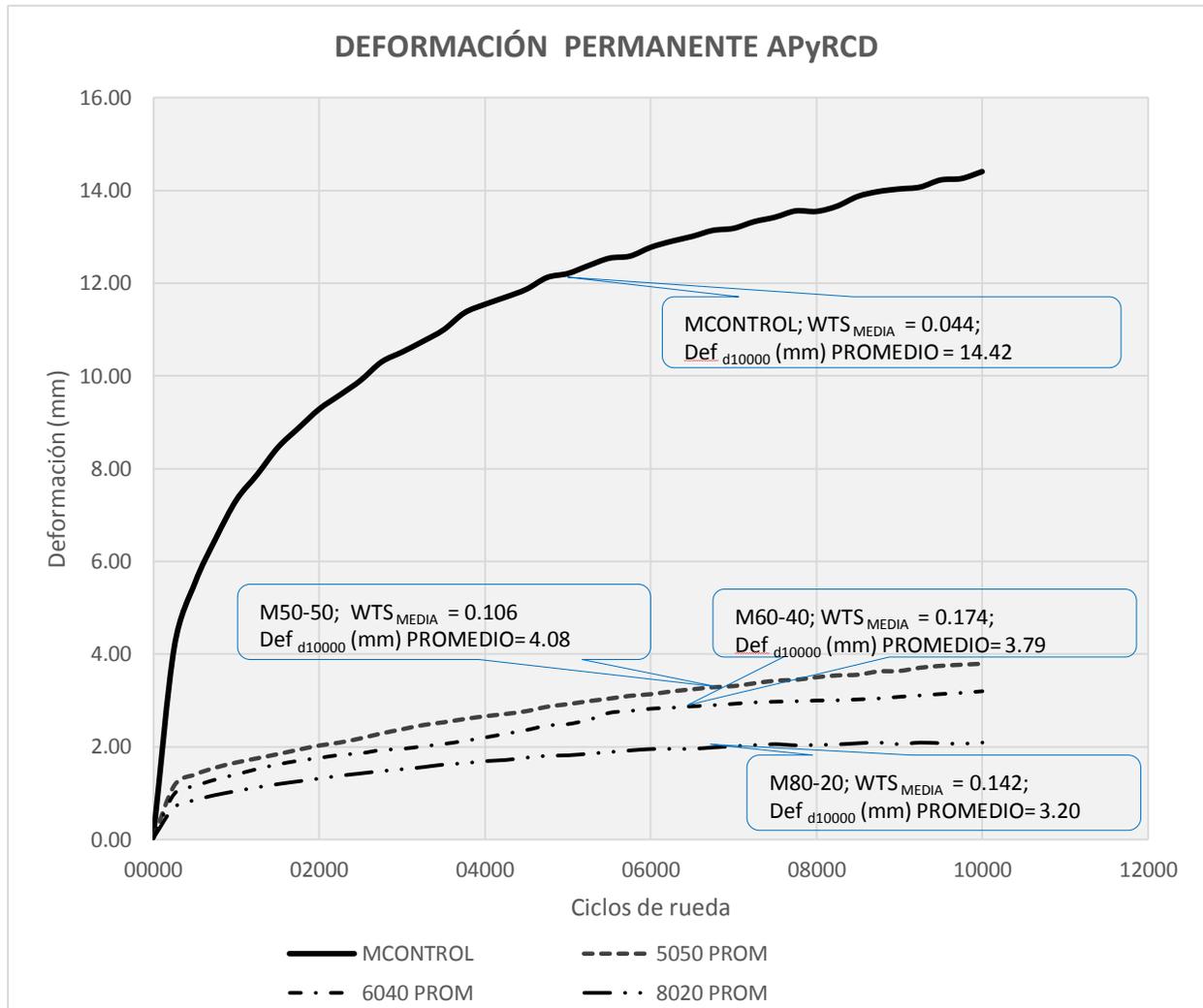


Figura 45. Gráfica de resultados de la deformación permanente media para las mezclas combinadas

El ensayo de susceptibilidad a la deformación permanente realizado a las mezclas asfálticas en caliente tiene como parámetro principal la profundidad de la rodera. El procedimiento utilizado es del tipo “B” (10,000 ciclos) en todos los ensayos (mezcla de control y mezclas asfálticas elaboradas con agregados reciclados) se completaron los ciclos correspondientes a una de temperatura de 60°C no deformándose más de 20 mm. Se puede apreciar en la figura 45, que las mezclas asfálticas elaboradas con agregado pétreo de cantera contra agregados pétreos de RCD: 50% APC- 50% ARCD, 60% APC - 40% ARCD y 80% APC- 20% ARCD presentan resultados aceptables dentro del parámetro normativo incluso mejor que el comportamiento – respuesta de la mezcla de control elaborada con agregados pétreos de cantera.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES

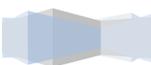
5. CONCLUSIONES

5.1 Conclusiones

En este trabajo de investigación se experimentó con agregados RCD para la elaboración de mezclas asfálticas en caliente, se analizaron tres tipos de mezclas variando el contenido de agregado RCD y agregado pétreo de cantera, además se realiza una mezcla de control que contiene 100% agregado pétreo. Comparando resultados entre estas mezclas se puede concluir:

No es factible utilizar un 100% de agregado RCD para elaborar mezclas asfálticas en caliente por la baja densidad relativa y la alta absorción de agua que consecuentemente eleva el consumo de asfalto, además el agregado RCD presenta un elevado grado de desgaste debido a las características que radican en la fabricación de los concretos que fueron demolidos y triturados, al realizarle las pruebas de consenso y origen al agregado RCD, este presenta resultados dentro los parámetros normativos en la mayoría de las pruebas. Para mejorar algunos parámetros se cubrió los agregados gruesos de RCD con un aditivo vinílico – acrílico experimentando una menor absorción de agua (0.36%) y disminución al desgaste (3.88%), cabe señalar que este aditivo se adhiere envolviendo al agregado. En cuanto a los agregados pétreos de cantera tiene un origen natural son de tipo basálticos y cumplen con las pruebas de origen y de consenso. Debido a las características de los RCD y a requerimientos de diseño volumétrico de la mezcla de control se estudiaron las siguientes combinaciones de agregado pétreo y agregado RCD para realizar mezclas asfálticas en caliente: 80% AP - 20% RCD, 60% AP - 40%RCD y 50% AP – 50%RCD.

Con respecto al ensayo de susceptibilidad a la humedad se mide con el parámetro %TSR que muestra la resistencia a la tensión indirecta (80% mínimo especificado bajo norma T283). La mezcla asfáltica de control elaborada con agregados pétreos tiene una buena afinidad entre el cemento asfáltico utilizado en presencia de agua, presentando resultados por arriba de lo especificado en norma en el parámetro %TSR. Las mezclas asfálticas elaboradas con agregados reciclados RCD muestran resultados donde hay una disminución progresiva en el parámetro %TSR al ir incrementando la sustitución de agregados pétreos por reciclados, mediante el análisis y observación de los resultados se puede determinar que la variación en la composición de los agregados reciclados presenta en muy baja proporción contaminantes (yesos, ladrillos, plásticos,



vidrio, cerámicos, astillas de madera) disminuyendo la capacidad de afinidad y/o adherencia entre el cemento asfáltico y los agregados haciéndolas sensibles a la acción del agua.

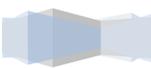
El ensayo de susceptibilidad a la deformación permanente realizado a las mezclas asfálticas en caliente tiene como parámetro principal la profundidad de la rodera. El procedimiento utilizado es del tipo “B” (10,000 ciclos) en todos los ensayos (mezcla de control y mezclas asfálticas elaboradas con agregados reciclados) se completaron los ciclos correspondientes a una de temperatura de 60°C no deformándose más de 20 mm. Se puede apreciar que las mezclas asfálticas elaboradas con agregados RCD presentan resultados dentro del parámetro normativo cumpliendo con un mejor comportamiento incluso con la respuesta de la mezcla de control.

Los resultados y conclusiones obtenidos en esta investigación son satisfactorios. Sin embargo, una MAC manufacturada con agregado reciclado cubierta con aditivo vinílico – acrílico RCD requiere mayor investigación, por el origen del RCD que tiene diversas variables. En este sentido, otros agregados naturales deben ser probados para generalizar conclusiones.

5.2 Recomendaciones

A continuación se plantean las recomendaciones para cuando se utilicen agregados reciclados procedentes de RCD, en la elaboración de una MAC:

- a) En la selección del agregado reciclado procedente de RCD, utilizar en lo posible un almacén de “concreto simple o armado”, este tiene menos partículas indeseables como: tabiques, polvo, cerámicos, yeso, madera y otros materiales extraños.
- b) En el almacén de la manufactura de las mezclas, evitar que el producto final se contamine con materiales extraños, en cuanto a la recepción del escombro debe estar libre de materiales indeseables que pueden restar calidad a los productos reciclados.
- c) Delimitar el porcentaje de agregados reciclados a utilizar en la manufactura de una MAC, se recomienda no usar más de 40% de agregados reciclados ya que la baja densidad, tiene como consecuencia aumentar en los diseños los contenidos de asfalto, afectando la susceptibilidad a la humedad.
- d) No se recomienda utilizar polvo o filler producto de RCD, por sus condiciones de origen, ya que este no se puede extraer las partículas indeseables y tiene como consecuencia aumentar la absorción de asfalto.



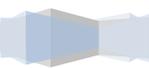
- e) Proponer extender tiempos de mezclado al ir incrementando la cantidad de material producto de RCD, ya que el cemento asfáltico cubre lentamente las partículas de agregado reciclado como consecuencia de la textura rugosa – porosidad, ya que en laboratorio, con los agregados reciclados utilizados y utilizando la mezcladora automática, se utiliza un periodo de tiempo de 5 a 8 minutos para el cemento asfáltico utilizado PG 64-22.
- f) Verificar periódicamente la densidad relativa teórica máxima (densidad RICE) al utilizar agregados reciclados y se pudieran tener valores inadecuados para calcular los porcentajes de vacíos de aire en la mezcla.
- g) Al dosificar los agregados reciclados procedentes de RCD verificar que estos estén completamente secos, se observó que estos absorben humedad y se pueden tener variaciones en peso al instante de mezclar.

5.3 Futuras Líneas de Investigación

Se trazan las siguientes:

- a) Sería conveniente analizar con un diseño volumétrico particular para cada MAC combinada con agregado de cantera y con agregado reciclado cubiertas con aditivo vinílico – acrílico procedente de RCD, además de no combinar agregado reciclado del tamiz No. 8 (2.36mm) a filler, ya que este no se le puede hacer una limpieza superficial.
- b) Sería útil estudiar otras propiedades mecánicas, como la fatiga a flexión en cuatro puntos y el módulo dinámico, para verificar el desempeño de estas mezclas en el nivel 3 de la metodología Superpave o nivel III – IV que establece el protocolo AMAAC.
- c) Sería provechoso examinar el empleo solo de la fracción gruesa para una MAC, ya que esta fracción le tiene menos partículas indeseables que la fracción fina, y por consiguiente una menor de dispersión en los resultados de cada ensayo.
- d) Sería beneficioso analizar otras mezclas variando los componentes de la mezcla, por ejemplo variando agregados pétreos natural, o cementos asfálticos ya sean modificados o sin modificar, para verificar la compatibilidad agregado – asfalto, o variar el recubrimiento con un aditivo que proporcione la disminución de absorción del agregado, por ejemplo una emulsión.
- e) Sería útil analizar los agregados procedentes de RCD para elaborar mezclas asfálticas tibias – frías. Analizar la posibilidad de emplear otra estructura granulométrica

(semidenso o semicerrado, abierto, poroso) y en la construcción de otras capas dentro de la estructura del pavimento (bases hidráulicas, bases negras).



5.4 Bibliografía

1. Alfonso Rico Rodríguez, Rodolfo Téllez Gutiérrez, Paul Garnica Anguas; Instituto Mexicano del Transporte, Secretaria de Comunicaciones y Transportes, **Criterios de sustentabilidad para carreteras en México**, Publicación Técnica No.104, Sanfandila, Qro. 1998, Pág. 3-4
2. Aljassar, AH, Al-Fadala, Ali MA; Diario de los ciclos de materiales y gestión de residuos, **El reciclaje de los residuos de demolición de edificios de Kuwait en mezclas asfálticas en caliente**, Volumen 7, Número 2, Agosto 2005, pp. 112-115
3. Asociación Mexicana del Asfalto, A. C. Protocolo AMAAC, **Desempeño de mezclas asfálticas**, Protocolo AMAAC 00/2008, Colegio de Ingeniero Civiles de México, Agosto 2008, Pág. 3 – 11
4. A.R. Pasandín, I. Pérez, L. Medina; Materials and Design, **Hot asphalt mixture using C & D waste as coarse aggregate**, Volumen 36, Abril 2012, pp. 840-846
5. A.R. Pasandín, I. Pérez; Construction and Building Materials, **Effect of ageing time on properties of hot-mix asphalt containing recycled concrete aggregates**, Volumen 52, Febrero 2014, pp. 284-293
6. A.R. Pasandín, I. Pérez; Construction and Building Materials, **Mechanical properties of hot-mix asphalt made with recycled concrete aggregates coated with bitumen emulsion**, Volumen 55, Marzo 2014, pp. 350-358
7. Cheng-Hsiao Lee, Jia Chong Du, Der-Hsien Shen; Construction and Building Materials, **Evaluación de agregado de concreto reciclado pre-recubierto de asfalto de mezcla en caliente**, Marzo de 2012; Volumen 28, Número 1, pág. 66-71



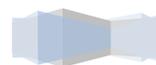
8. Concretos Recicladados S.A de C.V., [En línea]. Disponible: <http://concretosrecicladados.com.mx/>, [Último acceso: Junio 2015]. **Primer encuentro de Residuos de la Construcción y Demolición**, Ciudad Universitaria, Octubre 8, 2014

9. Instituto Mexicano del Transporte, Secretaria de Comunicaciones y Transportes. **N·CMT·4·05·004/08, Características de los materiales, Materiales para pavimentos, Materiales Asfálticos, Aditivos y Mezclas, Calidad de Materiales Asfálticos Grado PG**, México, Mayo 2005, Paginas 1 – 6
 - 9.1 Instituto Mexicano del Transporte, Secretaria de Comunicaciones y Transportes. **M.MMP.4.04.001/02, Métodos de muestreo y pruebas de materiales, Materiales para pavimentos, Materiales pétreos para muestras asfálticas, Muestreo de materiales pétreos para mezclas asfálticas**, México, Septiembre 2002, Paginas 1 – 4
 - 9.2 Enciclopedia Británica, **Basalto**, [En línea]. Disponible: <http://global.britannica.com/science/basalt>, [Último acceso: Julio 2015]
 - 9.3 Instituto Mexicano del Transporte, Secretaria de Comunicaciones y Transportes. **M.MMP.4.04.006/02, Métodos de muestreo y pruebas de materiales, Materiales para pavimentos, Materiales pétreos para muestras asfálticas, Desgaste mediante la Prueba de Los Ángeles de materiales pétreos para mezclas asfálticas**, México, Diciembre 2002, Paginas 1 – 5
 - 9.4 Instituto Mexicano del Transporte, Secretaria de Comunicaciones y Transportes. **M.MMP.4.04.008/03, Métodos de muestreo y pruebas de materiales, Materiales para pavimentos, Materiales pétreos para muestras asfálticas, Intemperismo Acelerado de materiales pétreos para mezclas asfálticas**, México, Diciembre 2003, Paginas 1 – 5

10. José Luis García Salas. Instituto Politécnico Nacional. **Empleo de residuos de concreto y demolición en la construcción de carpetas asfálticas**. Tesis para Maestría, México, Junio 2014



11. Juan Fernando Mendoza Sánchez, Instituto Mexicano del Transporte, Secretaria de Comunicaciones y Transportes; **Criterios de Sustentabilidad para Carreteras en México**, Publicación Técnica No.392, Sanfandila, Qro. 2014; Pág. 3-111
12. Julian Mills-Beale, Zhanping You; **The mechanical properties of asphalt mixtures with Recycled Concrete Aggregates**, Construction and Building Material, Volumen 24, Número 3, Marzo 2010, pp. 230-235
13. J. Zhu, S. Wu, J. Zhong, D. Wang. Materiales de Construcción, **Investigación de mezcla asfáltica con residuos de demolición obtenidos a partir de los edificios dañados por terremoto**, Volumen 29, 2012, pp. 466-475
14. Organización de las Naciones Unidas; **El futuro que queremos**, Río de Janeiro, Brasil, Julio, 2012.
15. PEMEX, Petróleos Mexicanos, **Asfalto Ekbé Superpave PG**, [En línea]. Disponible: http://www.comercialrefinacion.pemex.com/portal/sccli037/controlador?Destino=sccli037_01.jsp, [Último acceso: Junio 2015]
16. PEMEX, Petróleos Mexicanos, **Refinería Miguel Hidalgo**, [En línea]. Disponible: <http://www.ref.pemex.com/octanaje/17miguel.htm>, [Último acceso: Junio 2015]
17. I. Pérez, M. Toledano, J. Gallego, J. Taibo; Materiales de Construcción, **Propiedades mecánicas de mezclas Bituminosas en caliente fabricadas con áridos reciclados de construcción y demolición**, Volumen 57, Número 285, Enero 2007, pp. 17-29
18. I. Pérez, M. Toledano, J. Gallego, J. Taibo; Actas de la institución de ingenieros civiles: Transporte, **Mezclas de asfalto con residuos de la construcción y demolición**, Volumen 163, Número 4, 2010, pp. 165-174



19. Sumeda Paranavithanaa, Abbas Mohajeranib. **Efectos de hormigón reciclado en las propiedades de concreto asfáltico**, Recursos, Conservación y Reciclaje, Julio de 2006; Volumen: 48, Número 1, pág.1-12
20. Steven Kosmatka y William Panarese. **Diseño y control de mezclas de concreto**, Portland Cement Association, 2012, Pág. 128-130
21. Strategic Highway Research Program (SHRP), Departamento del Transporte de los EU, Instituto del Asfalto; **Antecedentes del Diseño y Análisis de Mezclas Asfálticas de Superpave**. Instituto Panamericano de Carreteras, Agosto 1996
22. Vivian W.Y. Tam, K. Wang, C.M. Tam, **Assessing relationships among properties of demolished concrete, recycled aggregate and recycled aggregate concrete using regression analysis**, Journal of Hazardous Materials, Volumen 152, Número 2, Abril 2008, pp 703-714
23. Google, **Búsqueda de imágenes de disposición de RCD**, [En línea]. Disponible: https://www.google.com.mx/search?q=concreto+en+tiraderos&rlz=1C1GGGE_esMX588MX607&espv=2&biw=1024&bih=738&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ei=fGqNVe31B5CTyASg6YLoAQ&ved=0CAYQ_AUoAQ, [Último acceso: Junio 2015]

