Ciudad Obregón, Sonora, a 03 de Diciembre de 2013.

Instituto Tecnológico de Sonora
P r e s e n t e.

El que suscribe **DANIEL GERARDO ÁLVAREZ OSUNA**, por medio del presente manifiesto bajo protesta de decir verdad, que soy autor y titular de los derechos de propiedad intelectual tanto morales como patrimoniales, sobre la obra titulada: **"USO DE AGREGADOS RECICLADOS PARA PAVIMENTACIÓN".** en lo sucesivo "LA OBRA", misma que constituye el trabajo de tesis que desarrolle para obtener el grado de **Ingeniero Civil** en ésta casa de estudios, y en tal carácter autorizo al Instituto Tecnológico de Sonora, en adelante "EL INSTITUTO", para que efectúe la divulgación, publicación, comunicación pública, distribución y reproducción, así como la digitalización de la misma, con fines académicos o propios del objeto del Instituto, es decir, sin fines de lucro, por lo que la presente autorización la extiendo de forma gratuita.

Para efectos de lo anterior, EL INSTITUTO deberá reconocer en todo momento mi autoría y otorgarme el crédito correspondiente en todas las actividades mencionadas anteriormente de LA OBRA.

De igual forma, libero de toda responsabilidad a EL INSTITUTO por cualquier demanda o reclamación que se llegase a formular por cualquier persona, física o moral, que se considere con derechos sobre los resultados derivados de la presente autorización, o por cualquier violación a los derechos de autor y propiedad intelectual que cometa el suscrito frente a terceros con motivo de la presente autorización y del contenido mismo de la obra.

DANIEL GERARDO ÁLVAREZ OSUNA
(Nombre y firma del autor)

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

El cuidado del medio ambiente es hoy en día uno de los temas más importantes en el mundo y por supuesto en México, el deterioro del planeta está llegando a niveles alarmantes, por lo cual es necesario la implementación de nuevas tecnologías y otras formas innovadoras de construcción para infraestructura que permita la reutilización de materiales que parecen ser desechos pero que pueden ser aprovechados y generar una ganancia. Entre los principales problemas que se presentan al momento de realizar una construcción está el retiro del escombro o el concreto que es demolido, los grandes costos de acarreo a sitios establecidos o rellenos que generan altos impactos a las compañías constructoras.

La presencia de grandes catástrofes naturales, como sismos, huracanes entre otros, y la guerra ha generado una cantidad inmensa de desechos de construcción, entre ellos miles de toneladas de concreto.

Los primeros usos del concreto reciclado se remontan a la época de la segunda guerra mundial, sobre todo en países europeos (Rusia, Alemania y Gran Bretaña principalmente), los cuales al ver sus ciudades devastadas y con miles de toneladas de escombros, pusieron en práctica algunas pruebas y se verificó que el concreto podía ser utilizado como agregado para la elaboración de una nueva mezcla de concreto, lo cual ayudó a la eliminación de los desechos y evitando la sobreexplotación de los bancos de material que son recursos no renovables.

Gluzhe en 1948 (Instituto Mexicano del Cemento y el Concreto 2013) fue el encargado de las primeras investigaciones sobre la utilización de concreto reciclado, el elaboró mezclas con desechos de concreto como un agregado, y pudo constatar que estos tienen una menor capacidad a la compresión en comparación de los agregados naturales.

Cada una de las experiencias adquiridas en el continente europeo ocasionó la elaboración de algunos estudios en Estados Unidos, donde en la actualidad se hace de una manera más común el reciclado del concreto.

La primera construcción elaborada completamente de concreto reciclado se encuentra en la Ciudad de Valencia en España y es un puente de una longitud de 165 metros y para su construcción fueron necesarios 348 metros cúbicos de agregados reciclados (Domínguez, 2012).

Como un ejemplo del aprovechamiento de estos desechos aproximadamente 104 millones de toneladas de concreto fueron reciclados en Estados Unidos de América en sólo un año (Portland Cement Association, 1997), así como en el año 2008

Materiales ReCreteInc de Colorado proporcionaron una cantidad considerable (7900 metros cúbicos) de concreto premezclado en el cual se utilizó concreto reciclado como un agregado para la creación de bases y paneles en el parque empresarial en Denver, siendo esta una de las principales empresas recicladoras en Estados Unidos.

A su vez debido al gran auge de la construcción ecológica como es llamada comúnmente en Estados Unidos, se creó un Instituto, llamado Asociación de Reciclaje de Materiales de Construcción (Construction Materials Recycling Association) en el cual se regula la calidad de los materiales y se lleva una estadística del aprovechamiento de los desechos de la construcción, además de dar a conocer cada uno de los beneficios que atrae el reciclarlos.

Sin embargo, en México son muy pocos los estudios que han sido elaborados para conocer las características del concreto reciclado y en menor cantidad a la utilización de este mismo como material de pavimentación. Para realizar un análisis en México solo existe una planta de reciclado y esta se encuentra en la Ciudad de México y tiene una capacidad de producción de 2000 toneladas diarias de agregado reciclado, que en realidad es muy poca para la gran cantidad de escombro que se genera solamente en el Distrito Federal (Concretos reciclados, 2004), esta empresa elabora carpetas asfálticas y materiales para base y sub-base.

Gran mayoría de las vialidades en México están compuestas principalmente de pavimentos asfálticos, esto debido a su bajo costo de construcción en comparación con los pavimentos rígidos; sin embargo, el costo de mantenimiento de estos es muy alto año tras año, esto derivado al mal diseño, la mala compactación de las capas y los factores climáticos que dañan considerablemente la estructura del pavimento.

En Ciudad Obregón, actualmente no se tienen registros de una investigación en la cual se reutilice el concreto en mezclas asfálticas, por lo cual es importante los

resultados que se obtengan de las pruebas de laboratorio, para que las empresas regionales se beneficien con el uso de este tipo de agregado en la pavimentación y ayudar al cuidado del medio ambiente.

1.2 Planteamiento del problema

Una de las preocupaciones o problemas más frecuentes en la mayoría de las ciudades mexicanas, es la acumulación de grandes cantidades de desechos de concreto y otros materiales de construcción en lotes baldíos, que ocasionan un mal aspecto a la zona, además de hacer la función de un hogar para la fauna nociva, causante de muchas enfermedades en la población.

La creciente explotación de los bancos de materiales de buena calidad, aunado al alto costo que ocasiona el transportar estos agregados desde distancias considerablemente largas a la zona de la obra, siendo este un factor considerado en el momento de realizar un presupuesto o un análisis de los precios unitarios, esto como consecuencia de la crisis energética que presenta México al estar en constante aumento los derivados del petróleo como lo es el diesel.

Así mismo, la gran importancia que recae en el cuidado del medio ambiente y el hábitat de especies en peligro de extinción, ha llamado la atención de los países más desarrollados para buscar el reciclar los materiales existentes en lugar de contaminar y explotar nuevos yacimientos. Debido a estos argumentos es necesaria la búsqueda de nuevos métodos de construcción que ayuden a resolver cada uno de estos problemas.

Este proyecto surge de la necesidad de encontrar una nueva forma más eficiente e innovadora en la rehabilitación o construcción de pavimentos, con la cual se obtengan beneficios de disminución de acarreos y una considerable disminución de los precios de los agregados, buscando de igual forma se cumplan con cada una de

las especificaciones que marca la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT).

Considerando cada uno de los problemas anteriormente mencionados ¿Es conveniente utilizar concreto reciclado como agregado en la elaboración de un pavimento asfáltico o flexible?

1.3 Justificación

El presente trabajo de investigación tiene la finalidad de realizar una comparación entre una carpeta asfáltica elaborada utilizando concreto reciclado triturado como agregado pétreo, y una como es generalmente construida, con material extraído de un banco de material certificado, en este caso, el utilizado por la constructora MAS para la elaboración de la carpeta asfáltica en sus obras.

Con los resultados de esta investigación se tendrá la posibilidad de concluir si es posible utilizar el concreto reciclado como un agregado para mezcla asfáltica y si este podrá cumplir con cada una de las especificaciones de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT).

La investigación realizada y los resultados serán de gran beneficio para la implementación de nuevas formas de construcción de pavimentos, a su vez se beneficiarán las empresas constructoras al ahorrar en el acarreo y el municipio en la limpieza de grandes cantidades de escombro acumuladas en ciertas zonas de la ciudad, de igual forma es importante recalcar que los bancos de ríos se encuentran en una situación crítica debido a la sobreexplotación por parte de empresas constructoras y que el aprovechamiento de nuevos bancos de materiales requieren de estudios costosos, por lo cual es importante la búsqueda de nuevas tecnologías como lo es el concreto reciclado para contribuir al cuidado del medio ambiente.

1.4 Objetivo general

Comparar las características de una carpeta asfáltica realizada con concreto reciclado como agregado y una con agregado pétreo de un banco de material, para la rehabilitación o construcción de un pavimento flexible.

1.5 Objetivos específicos

- Comprobar la buena calidad de los agregados del banco de materiales de la Constructora MAS, para la elaboración de una carpeta asfáltica.
- Elaborar un diseño de mezcla de concreto asfáltico utilizando concreto reciclado como agregado, mediante el método Marshall, para verificar que cumpla con especificaciones de la SCT.
- Elaborar un diseño de un concreto asfáltico utilizando agregado pétreo de la Constructora MAS, comprobando que cumpla con especificaciones de la SCT.

1.6 Limitaciones

Dentro de los limitantes que se tienen con respecto a esta investigación es la poca información de nuevas tecnologías en la aplicación del concreto reciclado sobre todo en México, a su vez otro gran problema que se puede encontrar en la elaboración de esta investigación es la poca precisión de algunas máquinas de laboratorio por lo cual es muy importante evitar errores que marquen de manera significativa los resultados.

El factor principal que afectó y limitó el proceso de este proyecto fue el tiempo, además la poca disposición de materiales y equipo, ya que el laboratorio de vías terrestres era ocupado constantemente, lo cual retrasaba el avance de las pruebas.

Otra de las limitaciones que se presentaron fue la creación solo de 1 espécimen de mezcla asfáltica para cada contenido de cemento asfáltico, siendo que el manual de la SCT marca que se deben realizar 3 pruebas para cada contenido asfáltico esto para tener resultados más confiables, debido al poco tiempo y disposición, además de la poca cantidad de material pétreo con que se contaba se decidió realizar solo 1, elaborándolos de la manera más correcta y siguiendo cada paso para evitar errores y resultados afectados.

De igual forma debido a la poca disponibilidad de equipo, materiales y tiempo se realizaron sólo 3 pruebas para el cemento asfáltico, siendo que el manual de la SCT marca necesaria la elaboración de 7 pruebas para clasificar el cemento asfáltico, para ella ver la calidad y las características del cemento asfáltico se realizaron las más comunes.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1 Pavimentos

Un pavimento, según Olivera (2000), se puede definir como un conjunto de capas de varios materiales seleccionados que reciben de forma directa las cargas proporcionadas por el peso de los vehículos así como el peso que estos transportan (cargas de tránsito) y son transmitidas en forma distribuida a las capas inferiores, este conjunto de capas debe estar formado por materiales con suficiente calidad que permitan resistir estas cargas, y los aspectos climatológicos que proporcionen una ruta segura, cómoda y rápida. Este mismo autor, considera que tan solo algunas de las características estructurales con que debe contar un pavimento son principalmente:

- Tener un espesor total suficiente para soportar completamente las cargas de los vehículos, así como transmitir adecuadamente los esfuerzos a las terracerías, de modo que estas no lleguen a sufrir una deformación perjudicial, o daños que pongan en peligro la seguridad de los usuarios de la rúa.
- Tener una capa superior llamada carpeta asfáltica adecuada que permita el adecuado rodamiento de los vehículos y deberá ser resistente a los agentes climatológicos o de intemperismo.
- Una buena planeación del drenaje, para evitar encharcamientos que ocasionen la penetración del agua a las capas inferiores.

Para elaborar un proyecto de pavimentación es necesario determinar la composición de cada una de las capas, así como de sus espesores; buscando cumplir con cada una de las especificaciones marcadas por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT); sin embargo, los materiales que forman las terracerías deben cumplir con estas normas pero no deben ser rigurosas, por lo cual por factores de economía es muy común utilizar el material producto de los cortes adyacentes.

El material que se desea para construir un pavimento está constituido por suelos gruesos, pero resultaría antieconómico e innecesario, eliminar por completo a los suelos finos. Siempre habrá que coexistir con un cierto volumen de éstos. También es evidente que cuanto más abajo aparezcan los suelos finos, recibirán esfuerzos de menor cuantía provenientes del tránsito, de manera que su presencia irá siendo menos nociva (Rico, Téllez y Garnica, 1998).

En la Figura 1 se muestra la composición de un pavimento, así como los principales elementos con los cuales debe contar una carretera.

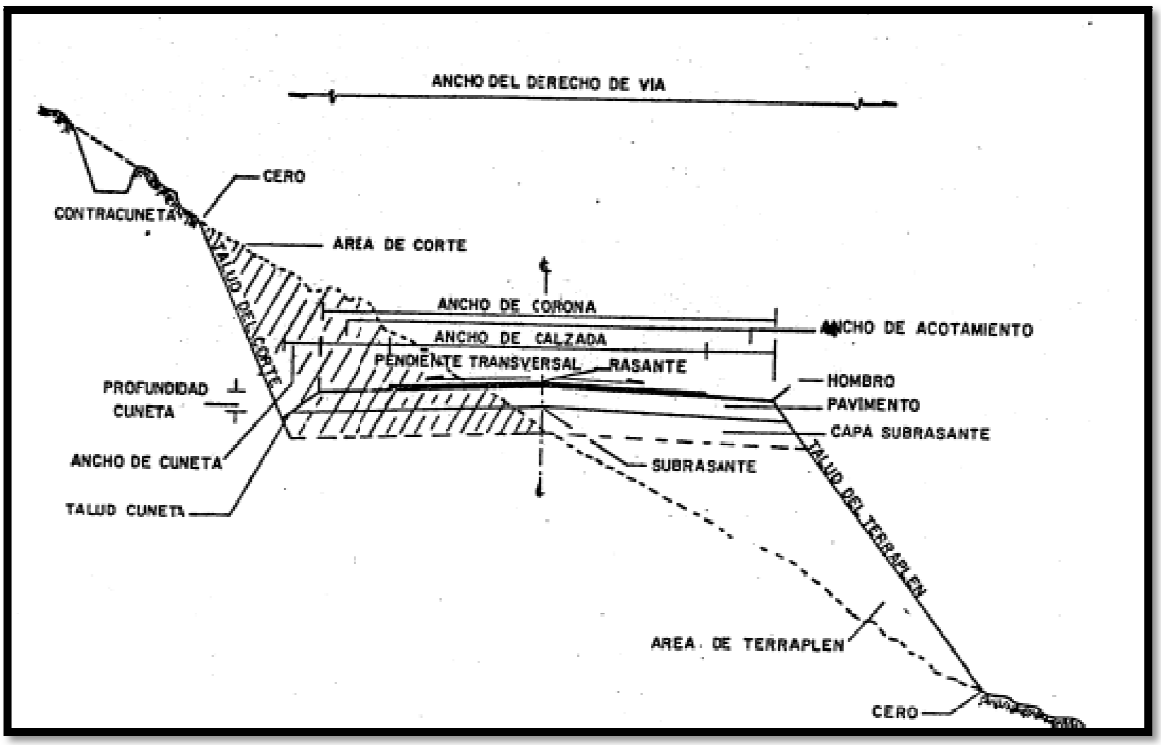

Figura 1. Sección transversal de un pavimento.
Fuente: Olivera (2000)

Existen dos principales tipos de pavimentos: Los rígidos y los flexibles, siendo estos últimos los más utilizados en México por su bajo costo en comparación con los rígidos, aunque estos tengan un elevado costo de mantenimiento.

2.1.1 Pavimento rígido

Un pavimento rígido se define como una superficie de rodamiento proporcionada por losas de concreto hidráulico que distribuyen las cargas de los vehículos, hacia las capas inferiores, por medio de toda la superficie de la losa y de las adyacentes que trabajan en forma conjunta con la que recibe directamente las cargas (Olivera, 2000).

Según este mismo autor las principales ventajas de utilizar un pavimento rígido son:

- Una mayor durabilidad
- Bajo costo de mantenimiento

- Mayor seguridad a los usuarios
- Una mejor distribución de los esfuerzos a través de las losas

En la Figura 2 se muestra la sección transversal, en la cual se puede identificar las capas componentes de un pavimento rígido o de concreto hidráulico.

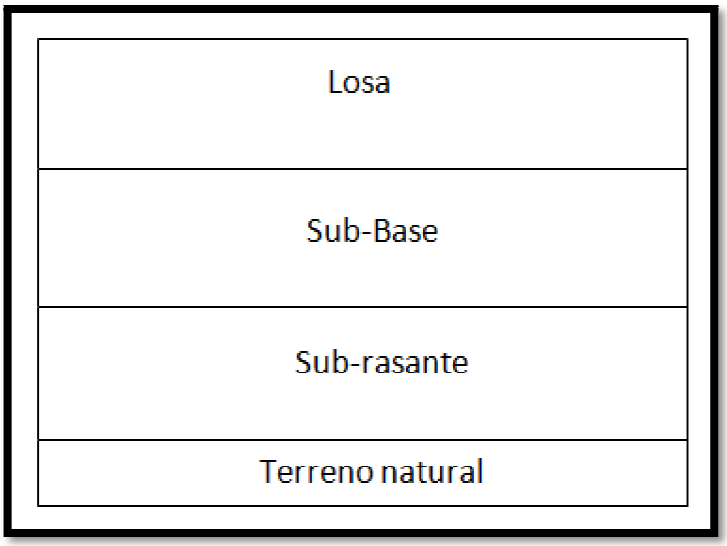

Figura 2. Capas que forman un pavimento rígido
Fuente: Olivera F. (2000).

Otra de las principales cualidades de este tipo de pavimentación es que debido a la rigidez de las losas que lo conforma la superficie de rodamiento no sufre un pavimento flexible.

Debido a estas ventajas el uso de pavimento rígido o concreto hidráulico en México está experimentando un considerable aumento en la construcción de infraestructura urbana como lo son caminos, aeropuertos y obras portuarias (Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, 2011).

En base a algunas investigaciones, Crespo (1998) expone que este tipo de pavimento es afectado principalmente por los esfuerzos que se producen al expandirse o contraerse las losas debido a los cambios de temperatura y por las

condiciones climáticas, y para el diseño de un pavimento rígido se utilizan los siguientes parámetros:

- Volumen y el tipo de vehículos que transitaran por la vialidad (obtenido por medio de un aforo)
- Módulo de reacción y características de la subrasante
- Resistencia del concreto

Si se toman en cuenta cada una de estos aspectos, prácticamente se cumplirá con la seguridad de la rúa y no se tendrán costos adicionales o excesivos en la construcción del mismo, así mismo los gastos por reparaciones o mantenimiento serán menores.

2.1.2 Pavimento flexible

En este tipo de pavimento la superficie de rodamiento es proporcionada por una carpeta asfáltica; las cargas de los vehículos se distribuyen a las capas inferiores por medio de las características de fricción y cohesión de las partículas de los materiales; y la carpeta asfáltica se pliega a pequeñas deformaciones de las capas inferiores sin que su estructura se rompa (Olivera, 2000).

Según los autores Rico y Del Castillo (1990), un pavimento flexible es constituido principalmente por una sub-base, una base y finalmente la carpeta asfáltica, todo esto construido sobre una capa subrasante. Un pavimento de esta clasificación debe proporcionar un rodamiento uniforme y resistente a la acción del tránsito, además del intemperismo.

Las principales características con las que debe cumplir un pavimento flexible son:

- Resistencia estructural, por lo cual se deberá revisar los espesores de cada capa y verificar que cumplan con las especificaciones marcadas por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT)
- Durabilidad, esta depende del factor económico y del tipo de transito para el cual será construido
- Bajo Costo en comparación con otros métodos de pavimentación
- Comodidad

De acuerdo a Olivera (2000), en las últimas décadas se ha utilizado el concreto asfáltico en la mayoría de las obras de infraestructura en México, a pesar de tener una falla frágil, y tener una menor resistencia a la del concreto hidráulico, sin embargo para evitar que la carpeta se agriete por pequeñas deformaciones de la base esta puede construirse de una forma más rígida, estabilizándola por medio de cal o cemento portland.

En la Figura 3 se muestra la sección transversal de un pavimento flexible con una carpeta de concreto asfáltico.

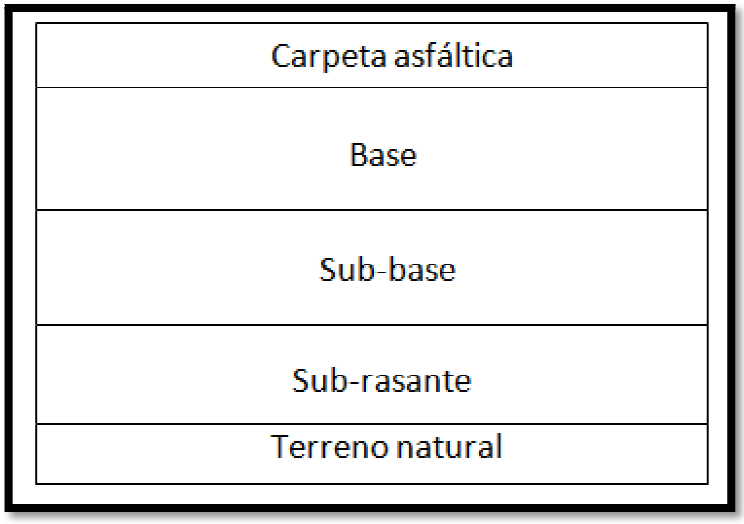

Figura 3. Capas que forman un pavimento flexible
Fuente: Olivera F. (2000).

2.2 Proceso constructivo de un pavimento flexible

2.2.1 Terracerías

Las terracerías según Olivera (2000) pueden ser definidas como los volúmenes de materiales que se extraen o sirven de relleno para la construcción de una vía terrestre; la extracción puede hacerse a lo largo de la línea de la obra y si este volumen se utiliza en la construcción de terraplenes o los rellenos, se dice que se tienen terracerías compensadas; el volumen de corte que no se usa se denomina desperdicio. Si el volumen que se extrae en la línea no es suficiente para construir los terraplenes o los rellenos, se necesita extraer material fuera de ella o sea en zonas de préstamos; si estas zonas están cercanas a la obra toman el nombre de préstamos laterales mientas que si estas se encuentran a una distancia mayor a 100 metros se llaman préstamos de banco.

El mismo autor explica que en terrenos tipo montañoso no se construyen terraplenes ya que por el exceso de cortes se tiene un volumen fuerte de desperdicio, mientras que en los tipo lomerío estos se construyen a través de los cortes, para los cuales se realiza un estudio de curva masa para proyectar una rasante más económica.

Las terracerías en terraplén se dividen en dos zonas, el cuerpo de terraplén que es la parte inferior y la capa subrasante que se coloca sobre la anterior, con un espesor mínimo de 30 cm.

Cuando el tránsito que va a circular sobre el camino es mayor a 5000 vehículos diarios, al cuerpo del terraplén se le colocan los últimos 50 cm. con material compactable y esta capa se le denomina capa subyacente, tal y como se puede observar en la Figura 4.

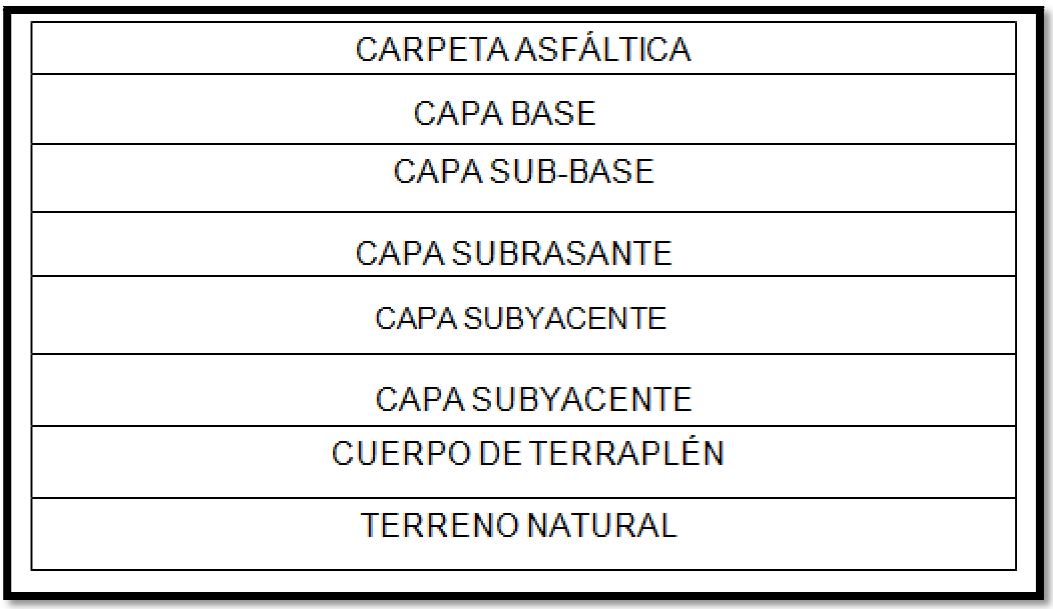

Figura 4. Capas que forman una obra vial de tránsito mayor a 5000 vehículos
Fuente: Olivera F. (2000).

a) Cuerpo del terraplén

En base a lo expuesto por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (2009), los terraplenes son estructuras que se construyen con materiales producto de cortes o precedentes de bancos, con el fin de obtener el nivel de subrasante que indique el proyecto, ampliar la corona, cimentar estructuras, además de formar bermas y bordos, así como tender taludes.

Otra de sus funciones es la de resistir las cargas de tránsito transferidas por las capas superiores, y distribuir los esfuerzos a través de su espesor, para transmitirlos, en forma adecuada al terreno natural (Olivera, 2000).

Según este mismo autor los materiales que se pueden utilizar pueden tener tamaños máximos hasta 75 cm para los suelos y en la actualidad se acepta que estos tengan un límite líquido menor al 70%.

b) Capa subrasante

Según Crespo (1998) la subrasante es la capa que corona las terracerías, la cual será de un espesor mínimo de 30 cm. formándose con una o varias capas de material seleccionado tal que se fije el proyecto, la compactación necesaria es de 95% de su peso volumétrico seco máximo (P.V.S.M).

Las principales funciones de esta capa es evitar que cuando el cuerpo del terraplén este formado por material fino este contamine el pavimento, además evitar que este sea absorbido por las terracerías cuando estas están formadas por fragmentos de roca, de igual forma uniformizar y economizar los espesores del pavimento (Olivera, 2000).

2.2.2 Estructura del pavimento

Sobre la capa subrasante de las terracerías se construye el pavimento, formado por una Sub base, una base y por último la carpeta asfáltica, las características más importantes para estas capas son la resistencia, plasticidad y valor cementante, las cuales las deben de cumplir de una forma simultánea. A continuación se describen las funciones así como los requisitos necesarios según las normas de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (2011) para la construcción de cada capa:

a) Sub base

Capa de materiales pétreos seleccionados cuyas funciones principales son proporcionar un apoyo uniforme a la base de un pavimento asfáltico, soportar las cargas que éste le transmite aminorando los esfuerzos inducidos y distribuyéndolos adecuadamente a la capa inmediata inferior, y prevenir la migración de finos hacia las capas superiores.

En base a la norma N-CMT-4-02/11 de la SCT los agregados deben cumplir con una granulometría especificada en la misma, además la relación entre el porcentaje de

peso que pasa la malla número 200 y el porcentaje de peso que pasa la malla número 40 sebe ser menor o igual a 0.65.

b) Base

La base es una capa de materiales pétreos seleccionados que se construye generalmente sobre la sub base o la subrasante, cuyas funciones principales son proporcionar un apoyo uniforme a la carpeta asfáltica, la capa de rodadura asfáltica o la carpeta de concreto hidráulico; soportar las cargas que éstas le transmiten aminorando los esfuerzos inducidos y distribuyéndolos adecuadamente a la capa inmediata inferior, y proporcionar a la estructura del pavimento la rigidez necesaria para evitar deformaciones excesivas, drenar el agua que se pueda infiltrar e impedir el ascenso capilar del agua subterránea.

La definición de Olivera (2000) expone que la base es la capa que recibe la mayor parte de los esfuerzos producidos por el tránsito vehicular debe estar constituida por materiales pétreos con buena distribución granulométrica, a su vez una base permite que la carpeta tenga un menor espesor.

El mismo autor menciona que regularmente esta capa además de la compactación necesita otro tipo de mejoramiento llamado estabilización, para poder resistir las cargas sin que se presente una deformación considerable, este mejoramiento puede obtenerse con la adición de cal o de cemento portland.

Los requisitos que marca la norma de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) son una granulometría como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Especificación de la granulometría de una base de un pavimento flexible

Malla		Porcentaje que pasa	
Abertura (mm)	**Designación**	**ΣL≤ 10^6**	**ΣL>10^6**
75	3"	100	100
50	2"	85-100	85-100
37.5	1 1/2"	75-100	75-100
25	1"	62-100	62-90
19	3/4"	54-100	54-83
9.5	3/8"	40-100	40-65
4.75	No.4	30-80	30-50
2	No.10	21-60	21-36
0.85	No.20	13-44	13-25
0.425	No.40	8-31	8-17
0.25	No.60	5-23	5-12
0.15	No.100	3-17	3-9
0.075	No.200	0-10	0-5

Fuente: Secretaría de Comunicaciones y Transportes (2005)

c) Carpeta asfáltica

Una mezcla asfáltica es el producto obtenido de la incorporación y distribución uniforme de un material asfáltico en uno pétreo. Las mezclas en caliente son elaboradas utilizando cemento asfáltico y utilizando materiales pétreos de una planta mezcladora estacionaria o móvil (Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2003).

Para la elaboración de esta mezcla se utilizan materiales pétreos bien graduados, con tamaño nominal entre 37.5 mm. y 9.5 mm. que satisfagan los requisitos de calidad establecidos por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT).

De acuerdo a Olivera (2000) su función es principalmente proporcionar una superficie de rodamiento adecuada, con una textura y color conveniente de tal manera que

resista los efectos abrasivos del tránsito vehicular, además debe ser impermeable como protección para la base.

2.3 Pruebas de clasificación del agregado y el asfalto

Las pruebas de clasificación según Crespo (1998) son las que permiten identificar las características de los materiales o agregados, y de esta manera decidir si pueden ser utilizados o no en alguna de las capas estructurales de un pavimento.

2.3.1 Pruebas de clasificación al agregado

Los materiales pétreos para la construcción de carpetas son suelos inertes provenientes de ríos o arroyos, y de depósitos naturales denominados mina, los cuales requieren de cribado y triturado para poder utilizarse. Las características más importantes que deben satisfacer los materiales pétreos son: la granulometría, la dureza, la forma de la partícula así como la adherencia con el asfalto (Olivera, 2000).

a) Granulometría**.** El objetivo de esta prueba es determinar el porcentaje en peso de las partículas de diferentes tamaños que forman el agregado, para realizar la prueba se hace uso de mallas por las que se hace pasar el material y se pesa el total de partículas retenido en cada malla para obtener un porcentaje de la cantidad de agregado que paso cada abertura de la malla (Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2003).

b) Densidad. Es importante hacer notar que los materiales que tienen densidades menores a 1.8 (PV suelto menor de 1500 kg/cm3) presentan problemas al ser utilizados en alguna capa de la sección transversal de las vías terrestres, pues su resistencia es baja y por fáciles de romperse o deshacerse.

c) Dureza. Se utiliza la prueba de desgaste Los Ángeles en la cual se coloca el material con una granulometría determinada, dentro de un cilindro hueco junto con bolas de acero y se hace girar (Olivera, 2000).

d) Resistencia y Expansión. Se pueden utilizar métodos como pruebas triaxiales y los realizados en consolidómetros pero una prueba muy usada es la Porter Estándar, ya que con ella se obtienen otros parámetros como son peso volumétrico seco máximo, humedad óptima, expansión y valor relativo de soporte.

e) Adherencia con el asfalto. De igual forma el mismo autor expresa que los materiales que van a estar en contacto con asfalto como lo son carpetas asfálticas, bases negras o bases naturales deben de tener una buena adherencia con el asfalto. Esta característica se ve seriamente afectada cuando se tiene agua, es por ello que las pruebas que se realizan con este fin y las más usadas en México son: la prueba de desprendimiento por fricción y la prueba de pérdida de estabilidad por inmersión en agua.

2.3.2 Pruebas de clasificación para el asfalto

Las principales pruebas que se realizan al cemento asfáltico son las que se describen brevemente a continuación:

a) Densidad. Según los estudios realizados por Olivera (2000) es de mucha importancia la obtención de este parámetro ya que sirve como medio para hacer correcciones de volúmenes cuando estos se miden en temperaturas altas.
b) Destilación. El objetivo de esta prueba es determinar la cantidad de disolvente que contiene el producto asfáltico y conocer sus características en lo referente a la volatización (Crespo, 1998).

c) Viscosidad. Conforme al mismo autor, esta prueba se realiza para determinar el grado de fluidez de un asfalto líquido a determinada temperatura.
d) Penetración. El objetivo de esta prueba es determinar el grado de dureza del residuo de la destilación de los asfaltos rebajados o la dureza del cemento asfáltico original.

2.4 Cementos asfálticos

Los asfaltos son componentes naturales de muchos petróleos en los cuales se encuentran disueltos, El asfalto refinado se produce en una gran variedad de tipos desde los sólidos, duros y quebradizos hasta los fluidos casi tan líquidos como el agua. Su viscosidad varía con la temperatura y las resinas le producen adherencia con los materiales pétreos siendo excelentes ligantes (Crespo, 1998).

Según su viscosidad dinámica a sesenta grados Celsius los cementos asfalticos se clasifican como muestra la Tabla 2.

Los principales usos para este tipo de material asfáltico es la elaboración de carpetas, mezclas, morteros y estabilizaciones, así como elemento base para la fabricación de emulsiones asfálticas y asfaltos rebajados.

A su vez en la Figura 5 se muestra las diferentes zonas en las que se divide México para la utilización del asfalto, dependiendo principalmente de las condiciones del clima y la topografía presente en la región.

Tabla 2. Clasificación de los cementos asfálticos

Clasificación	Viscosidad a 60 ˚C	Usos más comunes
AC-5	50±10	• En la elaboración de carpetas de mezcla en caliente dentro de las regiones indicadas como zona 1 en la Figura 5. • En la elaboración de emulsiones asfálticas que se utilicen para riego de impregnación de liga y poreo con arena así como estabilizaciones.
AC-10	100±20	• En la elaboración de carpetas de mezcla en caliente dentro de las regiones indicadas como zona 2 en la Figura 5. • En la elaboración de emulsiones asfálticas que se utilicen en carpetas y morteros de mezcla en fío, así como en carpetas por sistema de riego dentro de las regiones indicadas como zona 1 en la Figura 5.
AC-20	200±40	• En la elaboración de carpetas de mezcla en caliente dentro de las regiones indicadas como zona 3 en la Figura 5. • En la elaboración de emulsiones asfálticas que se utilicen en carpetas y morteros de mezcla en frío, así como en carpetas por el sistema de riegos, dentro de las regiones indicadas como zona 2 en la Figura 5.
AC-30	300±60	• En la elaboración de carpetas de mezcla en caliente dentro de las regiones indicadas como zona 4 en la Figura 5. • En la elaboración de emulsiones asfálticas que se utilicen en carpetas y morteros de mezcla en frío, así como en carpetas por el sistema de riegos, dentro de las regiones indicadas como zonas 3 y 4 en la Figura 5. • En la elaboración de asfaltos rebajados en general, para utilizarse en carpetas de mezcla en frío, así como en riegos por impregnación

Fuente: Secretaría de Comunicaciones y Transportes (2001)

Figura 5. Regiones geográficas para la utilización de asfaltos
Fuente: Secretaría de Comunicaciones y Transportes (2001).

2.5 Requisitos de Calidad de una mezcla asfáltica

Como afirma el autor Olivera (2000) las mezclas asfálticas pueden producirse en una amplia gama de combinaciones de agregados, además del producto asfáltico utilizado, las características principales de la mezcla dependen de las cantidades relativas que contengan los agregados de gravas, arenas y finos.

Las principales propiedades que debe tener una mezcla asfáltica:

a) Estabilidad: Es la capacidad de una carpeta asfáltica para resistir las deformaciones provocadas por las ruedas de los vehículos, la estabilidad depende tanto de la fricción como de la cohesión de la mezcla. La fricción interna depende de la forma, textura y granulometría de los agregados como de la densidad de la mezcla y cantidad de asfalto (Olivera, 2000).

b) Durabilidad. La Secretaría de Comunicaciones y Transportes (2005) expresa que es la propiedad que tiene una carpeta asfáltica para resistir el desprendimiento del agregado debido al tráfico e intemperismo. Generalmente se mejora la durabilidad utilizando contenidos de asfalto altos, granulometrías densas, mezclas impermeables y bien compactadas.

c) Flujo. Representa la deformación vertical producida en el espécimen utilizando la carga necesaria para producir su falla, además es un indicador de la tendencia de la mezcla para alcanzar una condición plástica.

d) Porcentaje de vacíos en la mezcla. Según la Secretaria de Comunicaciones y Transportes (2005) en su manual del método Marshall (M-MMP-4-05-034) indica que el objetivo de esta prueba es determinar si el espécimen fue compactado bien o no en el laboratorio, con esto se puede asegurar la impermeabilización de la carpeta.

El diseño de las mezclas asfálticas tiene como objetivo principal establecer las proporciones de los materiales que intervienen al hacerse la misma, con el fin de que con ellas se logren las propiedades que propicien condiciones de uso y duración suficiente para alcanzar el objetivo deseado (Marín, 2004).

2.6 Método Marshall

El método Marshall está limitado al proyecto y control de elaboración de mezclas asfálticas hechas en planta estacionaria, en caliente, utilizando cemento asfáltico (AC). En esta prueba se determinaran el peso volumétrico, porcentajes de vacíos, estabilidad y el flujo de los especímenes cilíndricos (Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2005).

El método original únicamente es aplicable a mezclas asfálticas en caliente para pavimentación, que contengan agregados con un tamaño máximo de 25 mm (1”) o menor. El método Marshall modificado se desarrolló para tamaños máximos arriba de 38 mm (1.5”), y está pensado para diseño en laboratorio y control en campo de mezclas asfálticas en caliente, con graduación densa (Garnica, Delgado y Sandoval 2005).

De igual forma los mismos autores determinan que el método Marshall utiliza especímenes de prueba estándar de 64 mm (2 ½”) de alto y 102 mm (4”) de diámetro; se preparan mediante un procedimiento para calentar, combinar y compactar mezclas de asfalto- agregado (ASTM D1559).

2.7 Uso de concreto reciclado como agregado en una mezcla asfáltica.

De acuerdo a la granulometría deseada, se realiza la trituración, esta se realiza 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 (Concretos reciclados, 2004).

Existen principalmente 3 tipos de trituradoras que son utilizadas para reciclar el concreto, estas son:

De mandíbula: La compresión se realiza entre una placa fija y otra móvil. La reducción de tamaño de la partícula se ejecuta a medida que ésta recorre la longitud entre las placas. Esta trituradora se utiliza como primaria, obteniéndose tamaños de partículas menores a 4”.

De impacto: Este tipo de máquina tiene un rotor con placas que gira y lanza las partículas sobre una o varias placas produciendo su rotura. Pueden usarse como

primarias, secundarias o eventualmente terciarias, generando una partícula de forma más regular y de tamaño menor a 2”.

De cono: La trituración se produce mediante dos placas con forma de cono. El tamaño de la partícula al ingresar debe ser menor a 6” por este motivo suele trabajar como secundaria después de la mandíbulas o la de impacto. Las partículas procesadas tienen un tamaño menor a 1.5” (Instituto Mexicano del Cemento y el Concreto, 2012).

El uso de concreto reciclado se ha limitado un poco sólo a la pavimentación con concreto hidráulico, ya que en esta se realiza una nueva mezcla con la ayuda de químicos o cenizas volátiles que le dan la resistencia necesaria al rodamiento de los autos.

La Administración Federal de Carreteras en Estados Unidos (FHWA) apoya y promueve el uso de materiales reciclados en la construcción de carreteras de pavimento en un esfuerzo por preservar el medio ambiente , reducir los residuos , y proporcionar un material rentable para la construcción de carreteras. El objetivo principal es fomentar el uso de materiales reciclados en la construcción de carreteras en la medida económico y práctico máximo posible con un rendimiento igual o mejor. Como parte de la política de los materiales reciclados FHWA, la FHWA promueve activamente el concreto reciclado y la tecnología de pavimento.

Según algunos estudios elaborados en Estados Unidos muestran estas ventajas de utilizar el concreto reciclado en pavimentos asfálticos en la carpeta asfáltica: (Federal Highway Administration, 2013)

- Es de mayor rendimiento pues los áridos reciclados son de menor peso por unidad de volumen, lo que significa menos peso por metro cúbico, lo que

resulta en la reducción de costos de materiales, costos de recorrido y los costos generales del proyecto.

- Ofrece una manera de reducir los flujos de residuos a vertederos
- Provee una mejor compactación

CAPÍTULO III. METODOLOGÍA

3.1 Tipo de investigación

El tipo de investigación que se presenta es cuantitativa ya que permite examinar los datos de una manera científica, o más específicamente en forma numérica. En cuanto a los alcances son de tipo exploratorios, ya que esta investigación analiza un tema o problema poco estudiado y del cual no se posee mucha documentación o información.

En lo que respecta al diseño de investigación, esta es no experimental, porque no se manipularon las variables, en este tipo de investigación se observan los fenómenos tal y como se dan en su contexto natural. De igual forma es tipo transversal porque se estudian los fenómenos en un momento del calendario (Hernández et al, 2006).

3.2 Participantes

La presente investigación fue elaborada por un estudiante de Ingeniería Civil, auxiliado por un asesor que colaboró con aspectos técnicos enfocados a la pavimentación.

3.3 Materiales y Equipo

Para llevar a cabo esta investigación se realizaron varias pruebas en el laboratorio, elaboradas tal y como lo marcan las normas de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, en la Tabla 3, se hace mención a cada uno de los materiales utilizados para cada prueba, así como el equipo que se empleó.

Tabla 3. Materiales y equipo utilizados en esta investigación

Prueba	Material	Equipo
Granulometría del material pétreo (SCT, M-MMP-04-01-03)	• Agregados naturales (sello, grava y arena) • Agregado reciclado	• Juego de mallas desde 2" hasta la No. 200 • Balanza de precisión • Charola • Cucharón
Porcentaje de partículas alargadas y lajeadas (SCT, M-MMP4-04-005/02)	• Agregados naturales (grava) • Agregado reciclado	• Juego de mallas desde 2" hasta la No. 4 • Balanza de precisión • Calibrador de espesores • Calibrador de longitudes. • Cucharón • Charola

Prueba	Material	Equipo
Porcentaje de equivalente de arena (SCT, M-MMP-4-04-004)	• Arena • Agua destilada	• Cilindro de prueba de acrílico • Tapón de hule • Tubo irrigador • Botella con capacidad de cuatro litros. • Manguera de hule de 3/16” • Pisón • Cápsula • Embudo de boca ancha • Malla No. 4 • Balanza
Desgaste los Ángeles (SCT, MMP-4-04-006/02)	• Agregado natural (grava, sello) • Agregado reciclado	• Máquina de Los Ángeles • Carga Abrasiva (esferas) • Juego de mallas desde 2” hasta No. 12 • Horno • Balanza de precisión • Cucharón • Charola
Densidad de los cementos asfálticos	• Cemento asfáltico • Agua destilada	• Picnómetro • Balanza de precisión • Horno o estufa • Guantes • Termómetro
Penetración en cemento asfáltico (SCT M-MMP-4-05-006)	• Cemento asfáltico	• Aparato de penetración • Agujas • Cápsula de penetración • Baño de agua • Termómetro • Cronómetro • Espátula

Prueba	Material	Equipo
Punto de reblandecimiento (SCT M-MMP-4-05-009)	• Cemento asfáltico	• 2 anillos de latón • Vaso de vidrio • Sistema de soporte de latón • Dos esferas de acero • Guías de acero • Placa de apoyo • Mechero • Termómetro • Pinzas
Diseño de mezcla asfáltica para la elaboración del método Marshall	• Agregados naturales (arena, sello y grava) • Agregado reciclado • Cemento asfáltico	• Un molde de compactación de 4” de diámetro provisto de un collarín y una placa base • Un sostén del molde de compactación, para sujetar firmemente el molde. • Un pisón de compactación con superficie circular de apisonado de 98.4 mm. de diámetro, equipado con una pesa deslizante de 4.536 kgs. Cuya altura de caía es de 45.7 cm. • Una máquina de compresión Marshall accionada con un motor eléctrico que permite aplicar cargas por medio de una cabeza de prueba conforma de anillo seleccionada, a una velocidad de 50.8 mm sobre minuto.

Prueba	Material	Equipo
		• Una máquina de compresión Marshall accionada con un motor eléctrico que permite aplicar cargas por medio de una cabeza de prueba conforma de anillo seleccionada, a una velocidad de 50.8 mm sobre minuto. • Un medidor de flujo (micrómetro) • Un tanque de saturación • Hornilla eléctrica para calentar los agregados • Charola y cucharones de lámina • Balanza para 20 kg
Pérdida de estabilidad por inmersión en agua (SCT,M-MMP-4-05-042/03)	• Cemento asfáltico • Agregado Natural • Agregado Reciclado • Agua	• Tanque de inmersión • Máquina de compresión simple

Fuente: Elaboración propia.

3.4 Procedimiento

De una manera corta y sencilla se muestra un resumen de la metodología o los pasos que se llevaron a cabo para la elaboración de esta investigación y la elaboración de las 2 muestras de mezcla asfáltica:

- Obtención del material pétreo natural de la planta de carpeta asfáltica de la Constructora MAS.
- Recolección de escombro tipo concreto, y proceso de triturado del mismo por medio de un proceso manual con la ayuda de un marro y un cincel, buscando una granulometría aproximadamente al agregado natural, cabe mencionar que el escombro recolectado es de un firme.
- Elaboración de pruebas de calidad de agregados pétreos para carpetas asfálticas, tal como se menciona en la norma N-CMT-4-04/08 como granulometría, densidad, forma de partícula y desgaste Los Ángeles para el material pétreo natural y el reciclado.
- Localización, obtención y pruebas del cemento asfáltico para la elaboración de mezcla asfáltica siguiendo la normatividad de la SCT.
- Diseño de mezcla asfáltica para la elaboración del método Marshall, determinando el contenido óptimo de asfalto para ambos tipos de agregados, tal como se menciona en el manual M-MMP-4-05-034.

1.- Obtención del material pétreo natural de la planta de carpeta asfáltica

Para la elaboración de las pruebas de laboratorio y la recolección de información respecto a esta investigación se realizó un muestreo de material de la panta de producción de carpeta asfáltica de la Constructora MAS, ubicada en Periférico Norte Km. 3.5 entrada a chihuahuita, en la ciudad de Navojoa, Sonora.

En la Figura 6 se puede observar la planta de producción de agregados pétreos, así como las bandas por donde circula el material que es triturado para una granulometría específica.

Figura 6. Planta de producción de agregados para carpeta asfáltica de la constructora MAS

2.- Recolección del escombro tipo Concreto para ser utilizado como agregado pétreo.

La recolección del escombro se realizó en el Fraccionamiento Casa Blanca en Ciudad Obregón, Sonora, la función que tenía este concreto era servir como piso o firme a una iglesia, el triturado se realizó con ayuda de un marro y un cincel, y se buscó que se tuviera una granulometría parecida al agregado natural.

En la Figura 7, se muestra el lugar exacto de la recolección del material reciclado.

Figura 7. Recolección de escombro tipo concreto

3.- Pruebas de clasificación y resistencia al material pétreo

El clasificar cada uno de los materiales pétreos, en este caso arena, sello y grava es muy importante, ya que de estos dependen las propiedades y la resistencia que pueda tener una mezcla asfáltica, como puede ser su estabilidad, así como la cantidad de finos presente en los agregados, a su vez es primordial para el diseño de la mezcla según el método Marshall, las pruebas se realizaron conforme a lo marcan las normas de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT).

Granulometría del material pétreo natural (SCT, M-MMP-04-01-03)

La granulometría de los agregados tiene la finalidad de separar en diferentes tamaños las partículas de roca o granos de arena de una forma sedimentaria y de esta manera ver la cantidad de grava, arena y finos además de su respectivo porcentaje que equivale a cada tamaño o que pasa cada malla.

Primeramente se cuarteó el material pétreo, con el fin que se obtuviera una muestra más representativa, y que mostrara realmente las características del agregado, a su vez se tomaron de 5 a 3 kg. del material al que se le realizó la prueba y fue pasado por varias mallas de distintos tamaños que van desde 2 pulgadas a la No. 200, estas se pueden apreciar en la Figura 8. De igual manera fue necesaria la elaboración de

una gráfica semilogarítmica que mostró el porcentaje de material pétreo que pasó cada una de las mallas contra la abertura de estas últimas.

En general existen 2 métodos utilizados para la clasificación de suelos, el de la SUCS y el de la AASHTO, por lo cual se puede utilizar alguno de los 2.

Figura 8. Mallas para la prueba de granulometría.

Porcentaje de partículas alargadas y lajeadas (SCT, M-MMP4-04-005/02)

Esta prueba permite conocer el contenido de partículas en forma de laja y las alargadas, para así poder clasificar y obtener un porcentaje de la forma de las partículas del material pétreo, para realizar esta prueba fue necesario pasar por la malla No. 4 el material a clasificarse y determinar la forma de cada partícula en el caso de partículas lajeadas un calibrador de espesor y para las partículas lajeadas uno de longitud, en la Figura 9 se presenta el calibrador para las partículas alargadas, mientras que en la Figura 10 se presenta el calibrador utilizado para la prueba de partículas lajeadas.

Los porcentajes de masa de partícula alargada se calcularon como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\mathrm{Ca} = \left(\frac{\mathrm{Ma}}{\mathrm{M}}\right) \mathrm{x}100$$

Dónde:

Ca = Por ciento en masa de partículas con forma alargada (%)

Ma= Peso de las partículas con forma alargada (g)

M= Peso total de la muestra (g)

Figura 9. Calibrador para la prueba de partícula alargada

En el caso de partículas en forma de laja es un procedimiento similar y se calculó con la siguiente ecuación:

$$\mathrm{Cp} = (\frac{\mathrm{Me}}{\mathrm{M}})\mathrm{x}100$$

Dónde:

Cp= Por ciento en masa de partículas en forma de laja (%)

Me= Masa de las partículas con forma de laja (g)

M= Masa total de la muestra (g)

Figura 10. Calibrador de espesores para prueba de partículas lajeadas

Porcentaje equivalente de arena (SCT, M-MMP-4-04-004)

La finalidad de esta prueba es saber que características tiene el material pétreo empleado en una mezcla asfáltica, en este caso la arena. Por medio de esta es posible separar la arena de la arcilla. Los finos son partículas muy inestables y pueden ser perjudiciales para la estructura de un pavimento flexible por lo cual es de suma importancia obtener el porcentaje que este se encuentra en un agregado.
La prueba consistió en agitar un cilindro, que contenía muestra del material pétreo que pasó la malla No.4, y por medio de una solución fue posible que los finos se depositaran en el fondo o se sedimentaran.

El porcentaje de equivalente de arena es posible calcularlo con la siguiente fórmula obtenida del manual de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes.

$$\%\mathrm{EA} = \frac{\mathrm{LNS\ arena}}{\mathrm{LNS\ finos}} \mathrm{x100}$$

Dónde:
%EA= Porcentaje de equivalente de arena (%)
LNS arena= Nivel superior de la arena (cm)
LNS finos= Nivel superior de los finos (cm)

Desgaste Mediante prueba Los Ángeles (SCT, MMP-4-04-006/02)

Esta prueba tiene por objeto determinar la resistencia a la trituración de los materiales pétreos a utilizarse en una mezcla asfáltica, los resultados que se obtienen de esta prueba son de gran utilidad para conocer el efecto que origina la exposición del material a condiciones de servicio, como lo es el rodado de los vehículos.

Esta prueba consistió en colocar una muestra de material en un cilindro giratorio, el cual se muestra en la Figura 11, con una granulometría específica dependiendo en qué tipo de muestra se encuentra esto en base al rango de los tamaños de sus partículas, en la Tabla 4 se muestra las diferentes composiciones de la muestra y las cargas abrasivas.

Figura 11. Cilindro rotatorio para prueba Desgaste Los Ángeles

Por medio del impacto de esperas y las 500 revoluciones, las partículas de material se fueron rompiendo, y al finalizar se midió la variación granulométrica de la muestra como la diferencia entra la masa que pasó la malla No. 12 y antes de haber sido sometida a la prueba.

El desgaste de las partículas por la prueba Los Ángeles se pudo calcular con la siguiente ecuación:

$$\mathrm{Pa} = \frac{\mathrm{Pi} - \mathrm{Pf}}{\mathrm{Pi}} \mathrm{x}100$$

Dónde:

Pa= Desgaste por trituración Los Ángeles (%)

Pi= Masa inicial de la muestra de prueba (g)

Pf= Masa final del material de la muestra mayor de 1.7mm (malla No. 12)

Tabla 4. Composición de la muestra y cargas abrasivas para desgaste Los Ángeles

Tipo de composición de la muestra de prueba	Rango de tamaños		Masa de la fracción g	Carga abrasiva	
	mm	Designación		Número de esferas	Masa total g
A	37,5 - 25	1½" - 1"	1 250 ± 25	12	5 000 ± 25
	25 - 19	1" - ¾"	1 250 ± 25		
	19 - 12,5	¾" - ½"	1 250 ± 10		
	12,5 - 9,5	½" - ⅜"	1 250 ± 10		
	Masa total de la muestra de prueba		5 000 ± 10		
B	19 - 12,5	¾" - ½"	2 500 ± 10	11	4 584 ± 25
	12,5 - 9,5	½" - ⅜"	2 500 ± 10		
	Masa total de la muestra de prueba		5 000 ± 10		
C	9,5 - 6,3	⅜" - ¼	2 500 ± 10	8	3 330 ± 20
	6,3 - 4,75	¼ - N°4	2 500 ± 10		
	Masa total de la muestra de prueba		5 000 ± 10		
D	4,75 - 2	N°4 - N°10	5 000 ± 10	6	2 500 ± 15

Fuente: Secretaría de Comunicaciones y Transportes (2005).

Densidad del material pétreo mayor a la malla No. 4 (SCT, M-MMP-1-05/03)

Por medio de esta práctica se puede determinar un poco de los parámetros de calidad de un agregado, y además del porcentaje de absorción que este experimenta al ser saturado por 24 horas, el procedimiento empleado fue primeramente secar superficialmente el agregado después de saturarse, y obtener su peso húmedo, posteriormente por medio de un picnómetro el cual se llena previamente se deposita

el agregado y en una probeta se mide el agua desalojada, siendo este el volumen del agregado, en la Figura 12 se presenta el equipo utilizado para esta prueba, como lo es el picnómetro de acero inoxidable y la probeta.

A su vez por medio de las siguientes formulas se puede obtener el valor de la densidad de sólidos y de masa.

$$\%\ de\ absorción = \frac{(peso\ grava\ humeda) - (Peso\ grava\ seca)}{(peso\ grava\ seca)} x100$$

$$Sm = \frac{Peso\ grava\ seca}{volumen\ desalojado}$$

$$Ss = \frac{Peso\ grava\ seca}{Volumen\ real\ de\ sólidos}$$

4.- Obtención y Pruebas de cemento asfáltico para la elaboración de una mezcla asfáltica

En este apartado se muestra principalmente los pasos realizados para obtención del cemento asfáltico, la localización, así como una explicación breve de cada prueba. El cemento asfáltico se obtuvo de igual forma de la planta estacionaria de la Constructora MAS, la cual se encuentra ubicada en la Ciudad de Navojoa, Sonora, esta se muestra en la Figura 12.

Figura 12. Planta estacionaria de la Constructora MAS

Densidad de los cementos asfálticos

El objetivo de esta prueba es determinar el peso específico relativo que es la relación entre el peso de un volumen dado de AC a 25 grados centígrados con relación al peso específico del agua, este dato permite determinar el porcentaje de vacíos y el volumen de AC.

En la Figura 13 se puede observar el picnómetro lleno de cemento asfáltico para obtener el valor de la densidad.

La fórmula para calcular la densidad del asfalto se marca en la siguiente ecuación:

$$S = \frac{Wfa - Wf}{(Wfw - Wf) - (Wfaw - Wfa)}$$

Dónde:

S= Densidad de los cementos asfálticos

Wf= Peso del picnómetro en gr.

Wfw= Peso del picnómetro lleno de agua en gr.

Wfa= Peso del picnómetro con asfalto en gr.

Wfaw= Peso del picnómetro con asfalto y agua en gr.

Figura 13. Picnómetro para la prueba de densidad de cementos asfálticos.

Penetración (SCT M-MMP-4-05-006)

Esta prueba tiene por objetivo conocer el grado de dureza de un cemento asfáltico, mediante la penetración vertical de una aguja en una muestra representativa de dicho material bajo condiciones establecidas de peso, tiempo y temperatura; la profundidad a la que penetra la aguja se mide en décimos de milímetros.

Punto de reblandecimiento (SCT M-MMP-4-05-009)

El objeto de la prueba es determinar la temperatura a la cual se reblandece o funde un cemento asfaltico, por medio de colocar una pequeña esfera de acero en una muestra de asfalto sostenida en un anillo horizontal y calentado gradualmente dentro de un baño de agua.

5.- Diseño de mezcla asfáltica para la elaboración del método Marshall

A continuación se explican los pasos llevados a cabo para diseñar una mezcla asfáltica (Concreto Asfáltico) de granulometría densa por el Método de Marshall, para un camino con ejes equivalentes $\Sigma L\langle 10^6$ utilizando agregados pétreos muestreados en la Planta de asfaltos de la Constructora MAS, utilizando el procedimiento que marca la Secretaría de Comunicaciones y Transportes M-MMP-4-05-034.

Primeramente se utilizó la variante uno para determinar el contenido mínimo de asfalto, esta se aplica a materiales graduados que contienen finos; el método se basa en la estimación aproximada de la superficie total del agregado pétreo en función de la granulometría.

Para determinar el contenido mínimo de asfalto, el porcentaje de material de cada tamaño se multiplicó por la constante de área que se muestra en la Tabla 5, y ese producto se multiplicó por el índice asfáltico (Tabla 6) según el tipo de material pétreo, sobre todo la forma de la partícula. La suma del contenido parcial dio el contenido mínimo total de la muestra.

Tabla 5. Áreas superficiales de partículas para diferentes fracciones

MATERIAL		CONSTANTE DE ÁREA EN M m2/kg
PASA MALLA No.	RETIENE EN LA MALLA No.	
37.5 (1 ½”)	19.0 (3/4”)	0.27
19.0 (3/4”)	4.75 (No.4)	0.41
4.75 (No.4)	0.425(No.40)	2.05
0.425(No.40)	0.075 (No.200)	15.38
0.075 (No.200)		53.30

Fuente: Secretaría de Comunicaciones y Transportes (2005).

Tabla 6. Índices asfálticos para diversos tipos de material pétreo.

MATERIALES PÉTREOS DE PARTÍCULAS	ÍNDICES ASFÁLTICOS EN Kg/m2		
	ABSORCIÓN 0.0 A 2.5 %	ABSORCIÓN 2.6 A 5.0%	ABSORCIÓN MAYOR A 5.0%
Redondeadas (sin triturar)	0.0055	0.0065	0.0075
Sub-angulosas (triturado parcial)	0.0065	0.0075	0.0085
Angulosas (totalmente triturado.	0.0075	0.0085	0.0100

Fuente: Secretaría de Comunicaciones y Transportes (2005).

A continuación se presenta el procedimiento para realizar la prueba Marshall.

a) Elaboración de especímenes

Fijada la granulometría de mezcla asfáltica cumpliendo especificaciones se determinó el porcentaje en peso de los siguientes tamaños en que fue separado previamente el material pétreo.

b) Para cada contenido de asfalto se fabricó 1 espécimen, cada uno requirió de aproximadamente 1100 gramos de agregado pétreo. Se tomó de cada uno de los tamaños mencionados, la cantidad de muestra que resultó de multiplicar el porcentaje en peso de cada fracción por el peso total de la muestra. Las fracciones ya pasadas se mezclaron previamente a la adición del cemento asfáltico. La cantidad de cemento asfáltico que debió agregarse a cada muestra se calculó sobre la base del contenido mínimo más un exceso de 0.5% que es el producto que puede quedar adherido a la charola.

c) Las cantidades de cemento asfáltico deben corresponder a los siguientes porcentajes de cemento asfáltico.

Contenido mínimo -1%

Contenido mínimo -0.5%

Contenido mínimo neto

Contenido mínimo +0.5

Contenido mínimo +1.0

d) Se mezclaron los agregados y el cemento asfáltico, calentados previamente a temperatura de 175 a 120 ℃, hasta que se obtuvo una distribución uniforme del asfalto. Para compactar la mezcla asfáltica se procedió con un pisón de compactación y el molde en un baño de agua hirviendo. Una vez caliente se colocó un papel filtro en el fondo del molde y se llenó con la mezcla caliente. Se aplicaron 50 golpes con la pesa deslizante, se invirtió el collarín y se aplicaron otros 50 golpes por la otra cara del espécimen.
e) Se removió el collarín y la placa base y el molde con su contenido se sumergió en agua fría por 2 minutos y se extrajo el material.

Prueba para los especímenes

a) Determinación del peso volumétrico. Este se pudo obtener mediante la relación del peso del espécimen y el volumen del mismo.

b) Estabilidad y flujo. Estos valores se obtuvieron ensayando los espécimen, primeramente se sumergió el espécimen en el tanque de saturación, tal y como se muestra en la Figura 14, con el agua a la temperatura de (60+-0.50˚C), y se mantuvo en esta condición por un lapso de 20 a 30 minutos.

Figura 14. Tanque de inmersión o baño María.

c) Terminando el período de inmersión se sacó del tanque y se secó su superficie, se colocó el espécimen entre las dos secciones de la cabeza de prueba y se centró el conjunto en la máquina de compresión y se colocó el micrómetro, de la misma manera a como se puede ver en la Figura 15. La carga máxima aplicada para producir la falla a esa temperatura se tomó como el valor de estabilidad, mientras que la lectura en el micrómetro fue el valor del flujo.

Figura 15. Prueba Marshall.

En la Tabla 7 se muestran los factores de corrección para los especímenes que no tengan la altura especificada de 63.5 mm.

Tabla 7. Factores de corrección para la estabilidad

Altura del espécimen mm	Factor de corrección	Altura del espécimen mm	Factor de corrección
55	1.27	63.5	1.00
56	1.23	64	0.98
57	1.20	65	0.96
58	1.16	66	0.94
59	1.13	67	0.92
60	1.10	68	0.90
61	1.07	69	0.88
62	1.04	70	0.86
63	1.01	71	0.85

Fuente: Secretaría de Comunicaciones y Transportes (2005).

d) Porcentaje de vacíos en la mezcla. Se determinó el peso volumétrico del espécimen de mezcla ya curada y compactada, mientras que la densidad del asfalto se considera como 1.03 gr/cm3.

$$VMC = \frac{100(D - Pv)}{D}$$

Donde

Vmc= Porciento de vacíos en el espécimen

D= Densidad de la mezcla asfáltica

Pv= Peso volumétrico del espécimen

e) Porcentaje de vacíos en el agregado mineral. Este parámetro se pudo calcular con la siguiente fórmula que marca la SCT.

$$VAM = 100(1 - \frac{A(Pv)}{1000 D_\gamma \gamma_o})$$

Donde

VAM= Porciento de vacios del material pétreo

A= Peso del material pétreo respecto al peso de la mezcla

Pv= Peso volumétrico de la mezcla

Dr= Densidad relativa aparente del material pétreo

ɾo=Peso específico del agua

f) Porcentaje de vacíos ocupados por el asfalto. Se calculó mediante la siguiente fórmula.

$$VFA = \frac{D_\gamma (P_a)\gamma}{100\, D_\gamma (D_a) - (100 - P_a) D_a(\gamma)}$$

Donde:

Dγ= Densidad relativa aparente del material pétreo

γ= Peso volumétrico del espécimen

Da= Densidad relativa del AC

Pa= Porcentaje de Ac con relación al peso de la muestra

Para finalizar se realizaron las gráficas de Peso volumétrico, estabilidad, flujo, Vacíos, VAM y VAF contra el contenido de asfalto.

Se realizó el mismo procedimiento utilizando como agregado el concreto reciclado para realizar una comparativa.

Perdida de estabilidad por inmersión en agua (SCT,M-MMP-4-05-042/03)

Esta prueba consiste en determinar la disminución de la resistencia a la compresión sin confinar que se presentan en especímenes de mezcla asfáltica sumergidos en agua después del curado. La pérdida de estabilidad se puede calcular con la siguiente fórmula.

$$P.E. = \frac{R1 - R2}{R1} X100$$

Dónde:

P.E= Es el porcentaje de pérdida de estabilidad por inmersión en agua, en porciento.

R1= Es la resistencia del espécimen no saturado, en Kg/cm2.

R2= Es la resistencia del espécimen saturado en Kg/cm2.

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y SU DISCUSIÓN

4.1 Resultados

Los resultados que se obtuvieron en la elaboración de cada una de las pruebas de clasificación y resistencia de los agregados para la elaboración de una mezcla asfáltica son primordiales para corroborar la buena calidad de los resultados del banco de Materiales de la constructora MAS y de igual forma los agregados reciclados, y verificar el cumplimiento de cada una de las especificaciones de la SCT, estos se presentan a continuación.

1. Pruebas de para el agregado natural utilizado en la mezcla asfáltica

Granulometría de materiales pétreos para mezclas asfálticas (SCT, M-MMP-04-04-002/02)

Los resultados que se presentan a continuación fueron elaborados a los agregados naturales de la Compañía MAS, debido a que este se encontraba dividido en fracciones, a su vez se presentan las gráficas de cada una de estas fracciones, esto es necesario para elaborar una granulometría de diseño en el cual se cumpla con las especificaciones de la SCT.

a) Grava

En la Tabla 8 se presentan los resultados obtenidos de separar el agregado en este caso grava, en cada uno de los distintos tamaños de partícula o retenidos en cada malla, así como su respectivo porcentaje y las especificaciones marcadas por la SCT.

Tabla 8. Composición granulométrica de la grava

Malla		Peso retenido parcial (g)	% Retenido parcial	% Retenido acumulativo	% que pasa la malla	Especificación SCT
2”	(50.8 mm)	0	0.00	0	100	100
1 ½”	(38.1 mm)	0	0.00	0	100	100
1”	(25.4 mm)	0	0.00	0.00	100	100
¾”	(19.05 mm)	339	6.78	6.78	93.22	90-100
½’’	(12.70.mm)	1150	23.00	29.78	70.22	76-89
⅜”	(9.53 mm)	477	9.54	39.32	60.68	67-82
¼’’	(6.35mm)	1593	31.86	71.18	28.82	56-71
No. 4	(4.75 mm)	451	9.02	80.20	19.80	50-64
No. 10	(2.00 mm)	502	10.04	90.24	9.76	36-46
No. 20	(0.850 mm)	324	6.48	96.72	3.28	25-35
No. 40	(0.425 mm)	73	1.46	98.18	1.82	18-27
No. 60	(0.25 mm)	29	0.58	98.76	1.24	13-21
No. 100	(0.15 mm)	37	0.74	99.50	0.50	9-16
No. 200	(0.075 mm)	15	0.30	99.80	0.20	5-8
Pasa la No. 200		10	0.20	100		
Suma		5000	100.00			

Mediante la Tabla 8 es posible la elaboración de la curva granulométrica, tomando en cuenta el porcentaje que pasa cada malla, además se muestran las zonas de especificaciones, esta curva es mostrada en la Figura 16.

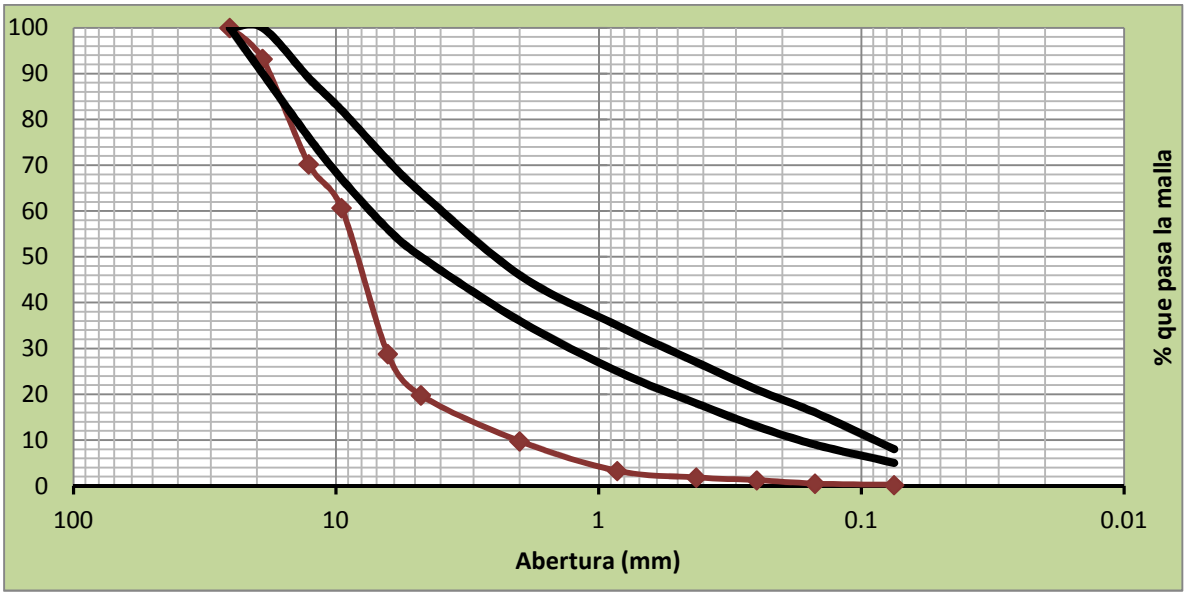

Figura 16. Curva granulométrica de la grava

Un suelo bien graduado presenta una curva muy tendida, y para conocer un poco más a detalle su clasificación es necesario calcular los valores de D30, D60 y D10, siendo estos el tamaño de partícula tal que el 60%, 30% y 10% en peso del suelo pasa la malla, para posteriormente calcular el coeficiente de uniformidad (Cu) y el coeficiente de curvatura (Cc)

D60 =9.5

$$Cu = \frac{D60}{D10} = \frac{9.5}{2} = 4.75 > 4 \;\; Suelo\ no\ uniforme$$

D30= 6.3

$$Cc = \frac{D30^2}{D60xD10} = \frac{6.3^2}{9.5x2} = 2.08 \;\; OK! \;\; Entre\ 1\ y\ 3$$

D10= 2

En la Tabla 9 se pueden observar los porcentajes de Arena, grava y Finos, con los cuales se puede clasificar según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).

Tabla 9. Porcentajes de suelo para la Grava

Material	Tamaño de partícula	% del suelo
Grava	76.2-4.75	100-19.80 = 80.2%
Arena	4.75-0.074	19.80-0.20=19.6%
Finos	<0.074	0.2%

Según la clasificación SUCS es una grava bien graduada o mezcla de arena y grava con pocos finos (GW).

b) Sello

En la Tabla 10 se presentan los resultados obtenidos en la prueba de granulometría efectuada conforme al manual de la Secretaría de Comunicaciones y Transporte, para el sello.

Tabla 10. Composición granulométrica del sello

Malla		Peso retenido parcial (g)	% retenido parcial	% retenido acumulativo	% que pasa la malla	Especificación
¾"	(19.05 mm)	0	0.00	0	100	90-100
½''	(12.70.mm)	0	0.00	0	100	76-89
⅜"	(9.53 mm)	182	3.64	3.64	96.36	67-82
¼''	(6.35mm)	3838	76.76	80.40	19.60	56-71
No. 4	(4.75 mm)	670	13.40	93.80	6.20	50-64
No. 10	(2.00 mm)	147	2.94	96.74	3.26	36-46
No. 20	(0.850 mm)	57	1.14	97.88	2.12	25-35
No. 40	(0.425 mm)	31	0.62	98.50	1.50	18-27
No. 60	(0.25 mm)	34	0.68	99.18	0.82	13-21
No. 100	(0.15 mm)	19	0.38	99.56	0.44	9-16
No. 200	(0.075 mm)	14	0.28	99.84	0.16	5-8
Pasa la No. 200		8	0.16	100		
Suma		5000	100			

En base a los resultados expuestos en la Tabla 10, se obtuvo la curva granulométrica presentada en la Figura 17.

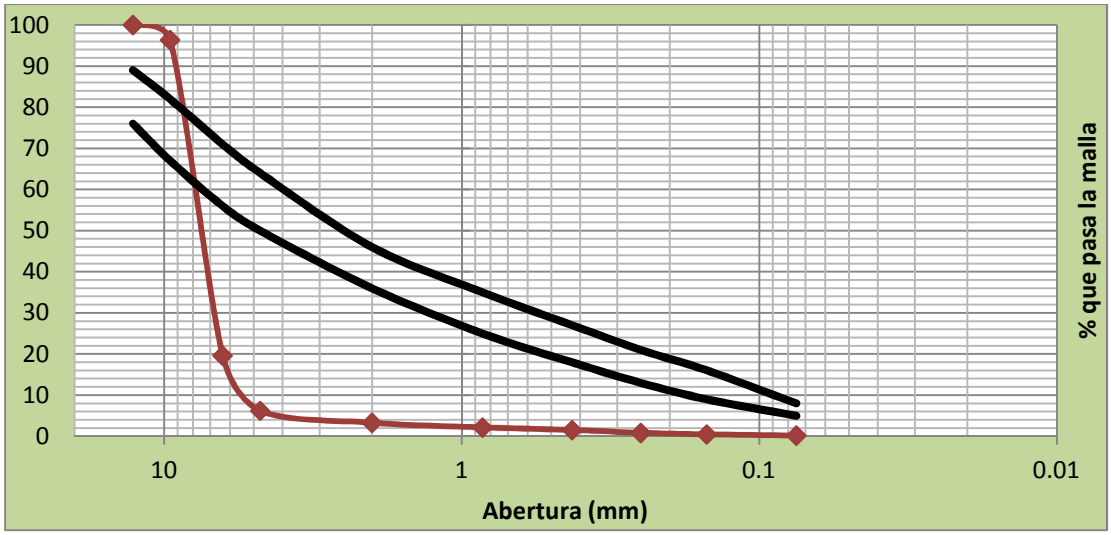

Figura 17. Curva Granulométrica del Sello (Agregado Natural).

De igual forma para clasificar el agregado fue necesario obtener los diámetros de partícula y calcular los coeficientes de curvatura y de uniformidad, los cuales se presentan a continuación.

D60 =8

$$Cu = \frac{D60}{D10} = \frac{8}{5.5} = 1.45 < 4 \ \ Suelo\ uniforme$$

D30= 7

$$Cc = \frac{D30^2}{D60xD10} = \frac{7^2}{8x5.5} = 1.11\ Ok\ entre\ 1\ y\ 3$$

D10= 5.5

En la Tabla 11 se explican la composición del sello, en lo que es grava, arena y finos, esto para obtener su clasificación mediante la SUCS.

Tabla 11. Porcentajes de suelo para la grava

Material	Tamaño de partícula	% del suelo
Grava	76.2-4.75	100-6.20 =93.8 %
Arena	4.75-0.074	6.20-0.16=6.04%
Finos	<0.074	0.16%

Según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos es una grava mal graduada (GP), debido a que el material es muy uniforme, y esto es debido a que más de la mitad del material fue retenido en la malla de ¼ de pulgada.

c) Arena

En la Tabla 12 se presentan los resultados obtenidos en la prueba a la arena, siguiendo cada procedimiento establecido en el manual de la SCT, utilizando las mallas de menor graduación desde No. ¼¨ hasta la No. 200.

Tabla 12. Composición granulométrica de la arena

Malla		Peso retenido parcial (g)	% retenido parcial	% retenido acumulativo	% que pasa la malla	Especificación
¼"	(6.35mm)	0	0	0	100	56-71
No. 4	(4.75 mm)	13	2.60	2.60	97.4	50-64
No. 10	(2.00 mm)	126	25.20	27.80	72.2	36-46
No. 20	(0.850mm)	88	17.60	45.40	54.6	25-35
No. 40	(0.425mm)	100	20.00	65.40	34.6	18-27
No. 60	(0.25 mm)	73	14.60	80.00	20	13-21
No. 100	(0.15 mm)	34	6.80	86.80	13.2	9-16
No. 200	(0.075mm)	19	3.80	90.60	9.4	5-8
Pasa la No. 200		47	9.40	100.00		
Suma		500	100			

En la Figura 18 se muestra el resultado de graficar el porcentaje de material que pasa cada malla contra la abertura de estas mismas.

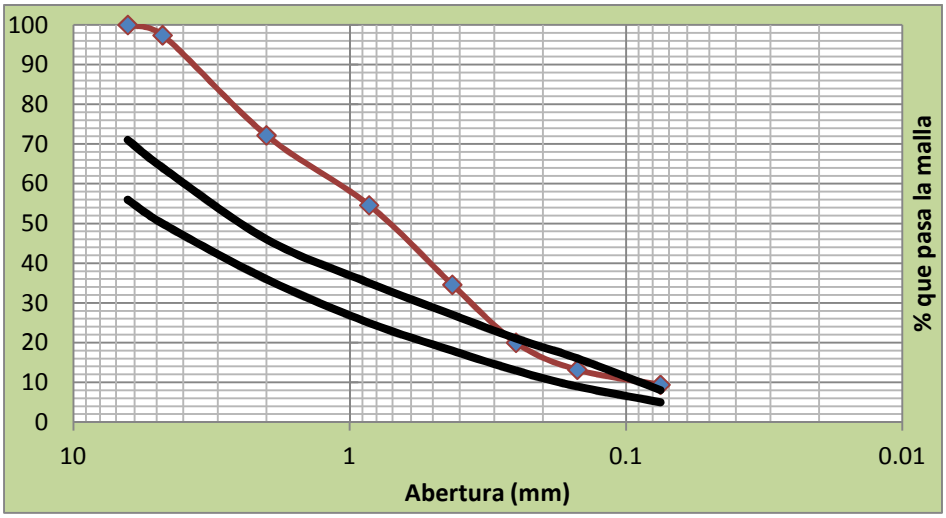

Figura 18. Curva granulométrica de la arena

De igual manera se presentan los diámetros de partícula para determinar la curvatura y uniformidad del material, y en la Tabla 13 los porcentajes de grava, arena y finos y su respectiva clasificación según la SUCS.

D60 = 1.5

$$Cu = \frac{D60}{D10} = \frac{1.5}{0.15} = 10 > 6$$ Suelo no uniforme

D30= 0.47

$$Cc = \frac{D30^2}{D60xD10} = \frac{0.47^2}{1.5x0.15} = 1 > 0.98 < 3$$

D10= 0.15

Tabla 13. Porcentaje de suelo para la arena

Material	Tamaño de partícula	% del suelo
Grava	76.2-4.75	100-97.4 =2.6 %
Arena	4.75-0.074	97.4-9.4=88%
Finos	<0.074	9.4%

Según estos porcentajes la arena es Mal graduada (SP) esto debido a que no cumple con las condiciones necesarias para una arena bien graduada.

Diseño granulométrico y granulometría resultante

Para este diseño de mezcla se utilizó el método gráfico del Cuadrado, en el cual intervienen tres materiales, grava (A), arena (B) y sello (G)

El obtener la granulometría de diseño de una mezcla asfáltica es el primer paso para elaborar el método Marshall, en la Tabla 14 se presentan los resultados obtenidos de verificar que la granulometría resultante estuviera dentro de especificaciones, en la cual se puede apreciar que 2 mallas quedaron fuera de las mismas.

En las Figuras 19 y 20 se presenta el método gráfico que fue utilizado para obtener la granulometría más óptima en la cual estuvieran todas las mallas dentro de especificación, cabe mencionar que el tamaño nominal del material pétreo es de ¾ de pulgada por lo cual se utilizaron las especificaciones para una sumatoria de ejes equivalentes menor o igual a 1000000.

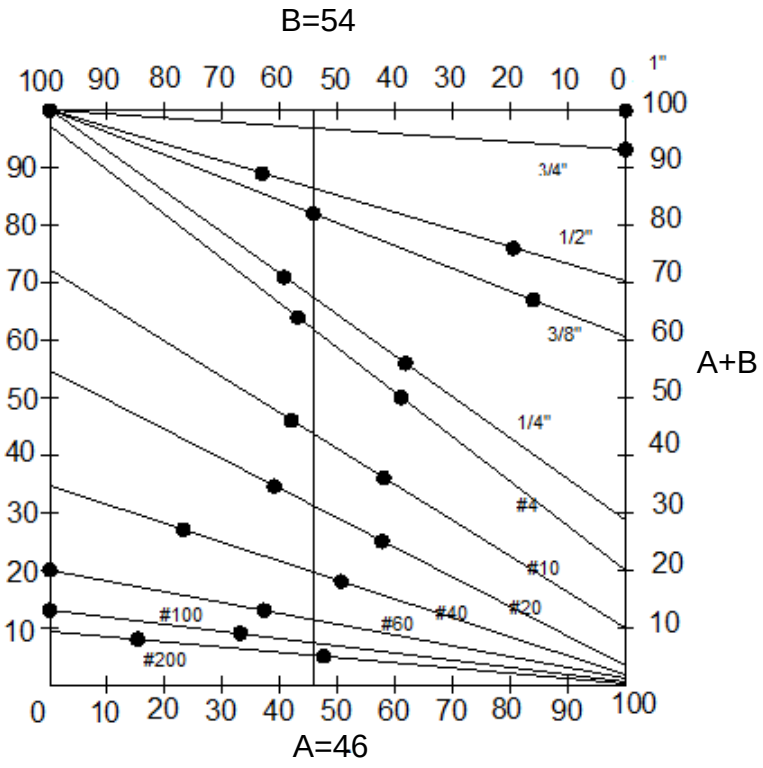

Figura 19. Diseño granulométrico con grava y arena

En base a la Figura 19 se puede determinar que 2 mallas no cumplen con las especificaciones de la SCT siendo estas la No. 100 y 60, por lo cual se realizó el ajuste en el que la mayoría de las mallas quedarán dentro de las especificaciones marcadas por los puntos, por lo cual se obtuvo un valor del agregado A (grava) de 46 y un valor de 54 del agregado B (Arena), el que queden las mallas de menor graduación fuera de especificaciones trae consigo un efecto negativo ya que este porcentaje de partículas es el que tiene un mayor consumo de cemento asfáltico.

En la Figura 20 se presenta la mezcla de los 3 agregados con las proporciones óptimas.

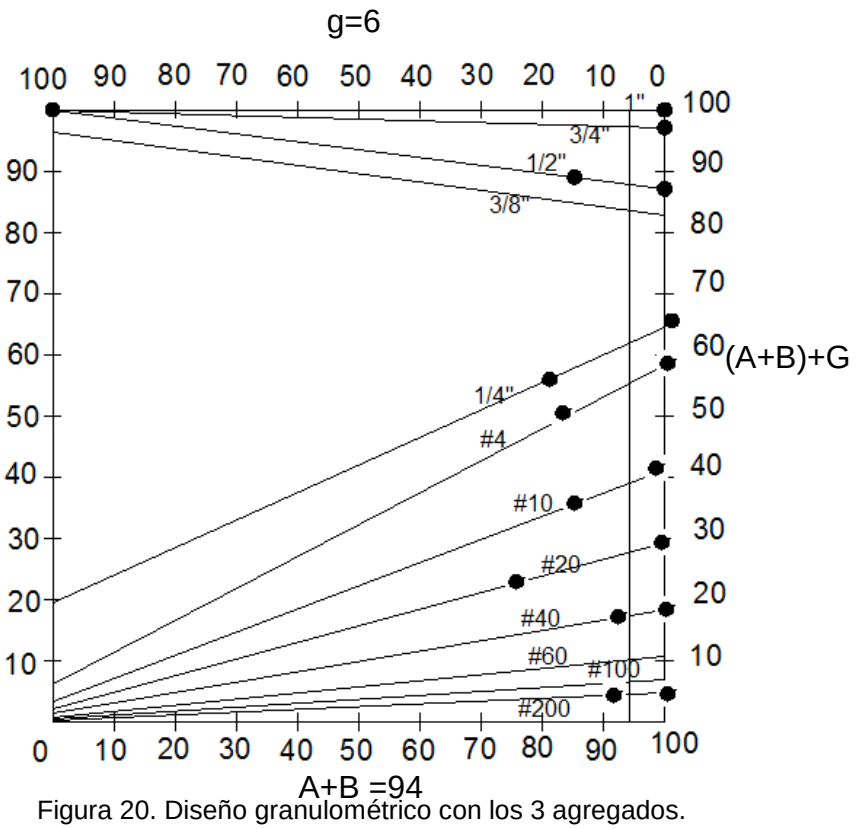

Figura 20. Diseño granulométrico con los 3 agregados.

Con los resultados obtenidos de esta gráfica se puede calcular el porcentaje de cada agregado por separado, por medio de las siguientes ecuaciones.

$$A = \frac{A´}{100} x(A+B) \rightarrow \frac{46}{100} x(94) = 43.24\%$$

$$B = \frac{B´}{100} x(A+B) \rightarrow \frac{54}{100} x(94) = 50.76\%$$

$$g = 6\%$$

Tabla 14. Granulometría resultante

AGREGADO	1"	3/4"	1/2"	3/8"	1/4"	No. 4	10	20	40	60	100	200
ESPECIFICACIONES	100	90-100	76-89	67-82	56-71	50-64	36-46	25-35	18-27	13-21	9-16	5-8
GRAVA (α)	100.0	93.2	70.2	60.7	28.8	19.8	9.8	3.3	1.8	1.2	0.5	0.2
ARENA (B)	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	97.40	72.20	54.60	34.60	20.00	13.20	9.40
SELLO (γ)	100.0	100.0	100.0	96.36	19.60	6.20	3.26	2.12	1.50	0.82	0.44	0.16
0.46α	46.0	42.9	32.3	27.9	13.3	9.1	4.5	1.5	0.8	0.6	0.2	0.1
0.54β	54.0	54.0	54.0	54.0	54.0	52.6	39.0	29.5	18.7	10.8	7.1	5.1
a + b	100.0	96.9	86.3	81.9	67.3	61.7	43.5	31.0	19.5	11.4	7.4	5.2
0.06γ	6.0	6.0	6.0	5.8	1.2	0.4	0.2	0.1	0.1	0.05	0.03	0.01
0.94α+β	94.0	91.1	81.1	77.0	63.2	58.0	40.9	29.1	18.3	10.7	6.9	4.9
GRANULOMETRIA	100.0	97.1	87.1	82.8	64.4	58.4	41.1	29.3	18.4	10.7	6.9	4.9
0.4324α	43.2	40.3	30.4	26.2	12.5	8.6	4.2	1.4	0.8	0.5	0.2	0.1
0.5076b	50.8	50.8	50.8	50.8	50.8	49.4	36.6	27.7	17.6	10.2	6.7	4.8
0.06γ	6.0	6.0	6.0	5.8	1.2	0.4	0.2	0.1	0.1	0.05	0.03	0.01
GRANULOMETRIA	100.0	97.1	87.1	82.8	64.4	58.4	41.1	29.3	18.4	10.7	6.9	5

Con la granulometría resultante se elaboró la siguiente curva granulométrica, y de igual forma se marca la zona de especificaciones de la SCT, esta se muestra en la Figura 21.

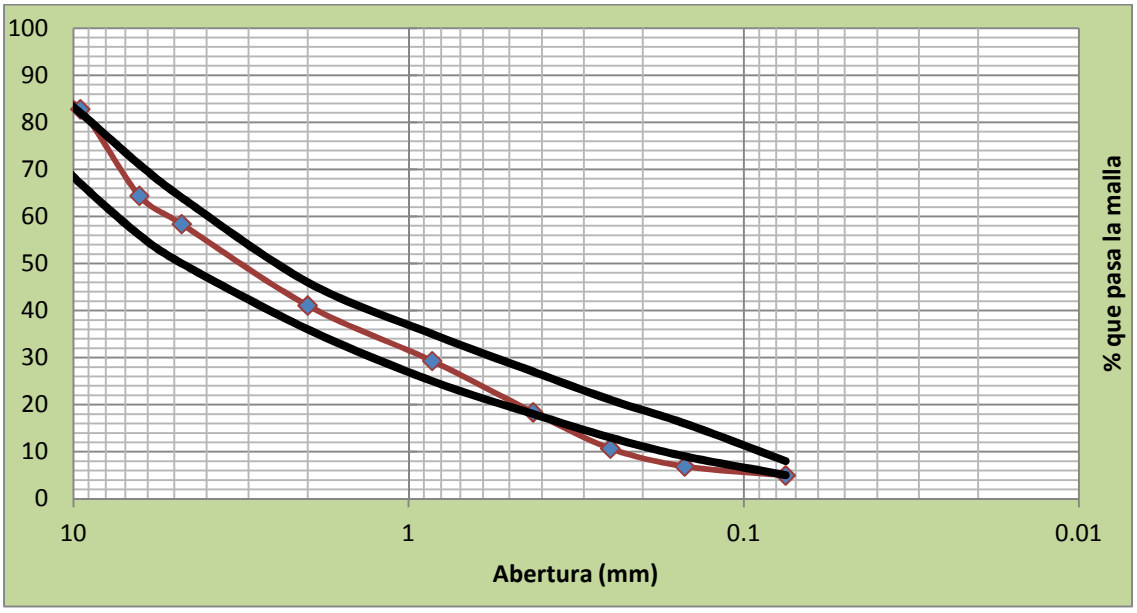

Figura 21. Granulometría resultante.

Porcentaje de partículas lajeadas y alargadas (SCT, M-MMP4-04-005/02)

Después de realizar la prueba en la cual se mide el grosor y la longitud de cada una de las partículas para el material pétreo, se obtuvieron los resultados que se muestran en la Tabla 15.

Tabla 15. Porcentaje de partículas lajeadas y alargadas del agregado natural

M1 (gr) = 1342.5 M2 (gr) = 1452.1

Mallas	Masa de las partículas con forma alargada (gr)		Masa de las partículas con forma de laja (gr)		Porcentaje de las partículas con forma alargada (%)		Porcentaje de las partículas con forma de laja (%)	
	ma (1)	ma(2)	me (1)	me (2)	Ca(1)	Ca (2)	Cp (1)	Cp (2)
Mayor 2"	0	0	0	0	0	0	0	0
2" a 1 ½"	0	0	0	0	0	0	0	0
1 ½"" a 1"	0	0	0	0	0	0	0	0
1" a ¾"	0	0	0	0	0	0	0	0
¾" a ½"	145.03	74.32	141.40	161.30	10.80	5.12	10.53	11.11
½" a 3/8"	42.10	53.24	63.02	83.20	3.14	3.67	4.69	5.73
3/8" a ¼"	32.20	42.20	22.53	15.30	2.40	2.91	1.68	1.05
Total	219.33	169.76	226.95	259.80	16.34	11.69	16.91	17.89

% Partículas alargadas	16.34
% Partículas lajeadas	17.89
% de Partículas alargadas y lajeadas	34.23

Mediante estos resultados se puede corroborar en la Tabla 16 que el valor que se obtuvo 34.23% se encuentra dentro de las especificaciones de calidad del material pétreo para mezclas asfálticas para una sumatoria de ejes equivalentes de 1000000.

Tabla 16. Características de calidad para material pétreo ΣL≤10^6

Característica	Valor
Densidad relativa, mínimo	2.4
Desgaste Los Ángeles % máximo	35
Partículas alargadas y lajeadas % máximo	40%
Equivalente de arena % mínimo.	50

Desgaste Los Ángeles (SCT, MMP-4-04-006/02)

En la Tabla 17 se presentan los datos que se obtuvieron como resultado de la trituración del material por medio del desgaste Los Ángeles para el agregado natural utilizando una variante ¨B¨ según su granulometría, así como la fórmula utilizada para obtener su porcentaje.

Tabla 17. Porcentaje de desgaste Los Ángeles del agregado Natural

Fórmula	Pi (gr)	Pf (gr)	Porcentaje de desgaste
$\mathrm{Pa} = \frac{\mathrm{Pi} - \mathrm{Pf}}{\mathrm{Pi}} \mathrm{x}100$	5000	3346.5	33.07%

En base a estos resultados obtenidos para el agregado natural se puede determinar que el si cumple con los requisitos de calidad mostrados en la Tabla 16.

Equivalente de arena (SCT, M-MMP-4-04-004)

Los resultados que se obtuvieron de esta prueba realizada a la arena se presentan en la Tabla 18, en la cual se puede observar las lecturas que se obtuvieron, del nivel superior de finos y el nivel superior de arena, así como su fórmula.

Tabla 18. Resultados de porcentaje de equivalente de arena

Fórmula	Lectura del nivel superior de arena	Lectura del nivel superior de arcilla	Porcentaje de equivalente de arena (%)
$\%EA = \frac{\text{LNS arena}}{\text{LNS finos}} x100$	2.4	4.1	58.53

Con los resultados obtenidos y presentados en esta Tabla 18, se puede hacer una comparación con los requisitos de calidad mostrados en la Tabla 16, los cuales marcan que se tiene un valor dentro de las especificaciones de la SCT, debido a que el valor mínimo es de 50%.

Densidad del material pétreo mayor a la malla No. 4 (SCT, M-MMP-1-05/03)

Después de elaborar esta práctica según el manual de la SCT se realizaron los cálculos necesarios y los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 19, de igual forma al revisar las especificaciones para el material pétreo se muestra que se tiene un valor dentro de los requisitos de calidad al tener un valor mayor que el mínimo que se muestra en la Tabla 16.

Tabla 19. Resultados de densidad del material pétreo mayor a la Malla 4

Característica	Muestra
Peso del material húmedo (g)	263
Peso del material seco	261
Peso del agua absorbida (g)	2
Vol desalojado (ml)	96
Vol. desalojado (m3)	0.000096
% de absorción	0.766%
Volumen real de sólidos	0.0000952
Densidad de la masa Sm=	2.71
Densidad de los sólidos	2.74

$$\%\ de\ absorción: \frac{(263gr - 261gr)}{261gr} x100 = 0.766\%$$

$$sm = \frac{0.261kg}{0.000096m3x1000\frac{Kg}{m3}} = 2.71$$

$$ss = \frac{0.261gr}{0.0000952m3x1000\frac{kg}{m3}} = 2.74$$

2. Pruebas de calidad para el agregado reciclado

Las pruebas de calidad que se realizaron al concreto reciclado fueron: Desgaste Los Ángeles, Forma de la partícula y la densidad para el material mayor de la malla 4, a continuación se muestran los resultados de cada una.

Desgaste Los Ángeles (SCT, MMP-4-04-006/02)

En la Tabla 20 se presentan los datos que se obtuvieron como resultado de la trituración del material por medio del desgaste Los Ángeles para el concreto reciclado utilizando una variante ¨B¨ según su granulometría, así como la fórmula utilizada para obtener su porcentaje.

Tabla 20.Resultado prueba Desgaste Los Ángeles para el Concreto Reciclado

Fórmula	Pi (gr)	Pf (gr)	Porcentaje de desgaste
$\mathrm{Pa} = \frac{\mathrm{Pi} - \mathrm{Pf}}{\mathrm{Pi}} \mathrm{x}100$	5000	2180.5	56.39%

Con este resultado obtenido se puede observar que el concreto reciclado no cumple con las especificaciones determinadas por la SCT que se muestran en la Tabla 16.

Porcentaje de partículas lajeadas y alargadas (SCT, M-MMP4-04-005/02)

De igual forma se presentan en la Tabla 21 los resultados que se obtuvieron al momento de realizar la prueba de forma de partícula al concreto reciclado y así comprobar que está dentro de las especificaciones de la SCT.

Tabla 21. Porcentaje de partículas lajeadas y alargadas para el concreto reciclado

M1 (gr) = 1459.2 **M2 (gr) = 1326.4**

Mallas	Masa de las partículas con forma alargada (gr)		Masa de las partículas con forma de laja (gr)		Porcentaje de las partículas con forma alargada (%)		Porcentaje de las partículas con forma de laja (%)	
	ma (1)	ma(2)	me (1)	me (2)	Ca(1)	Ca (2)	Cp (1)	Cp (2)
Mayor 2"	0	0	0	0	0	0	0	0
2" a 1 ½"	0	0	0	0	0	0	0	0
1 ½"" a 1"	0	0	0	0	0	0	0	0
1" a ¾"	0	0	0	0	0	0	0	0
¾" a ½"	140.20	98.40	120.20	70.20	9.61	7.42	8.24	5.29
½" a 3/8"	72.20	42.10	77.20	30.20	4.95	3.17	5.29	2.28
3/8" a ¼"	8.30	30.20	15.30	10.40	0.57	2.28	1.05	0.78
Total	220.70	170.70	212.70	110.80	15.12	12.87	14.58	8.35

% Partículas alargadas	15.12
% Partículas lajeadas	14.58
% de Partículas alargadas y lajeadas	29.70

El porcentaje de partículas alargadas y lajeadas que se obtuvo del material triturado fue de 29.70 muy por debajo del valor máximo de 40% que manejan las especificaciones de la SCT, por lo cual este cumple, cabe mencionar que el valor que se obtiene de esta prueba al agregado reciclado depende de la forma de trituración ya que puede variar considerablemente.

Densidad de los materiales mayor a la malla No. 4 para el concreto reciclado. (SCT, M-MMP-1-05/03)

En la siguiente Tabla 22 se presentan los resultados obtenidos para esta prueba, en la cual se muestra el porcentaje de absorción y la densidad.

Tabla 22. Resultados de densidad de material concreto reciclado mayor a la malla 4.

Característica	Muestra
Peso del material húmedo (g)	301
Peso del material seco	297
Peso del agua absorbida (g)	4
Vol desalojado (ml)	118
Vol. desalojado (m3)	0.000118
% de absorción	1.72%
Volumen real de sólidos	0.000116
Densidad de la masa Sm=	2.516
Densidad de los sólidos	2.56

$$\%\ de\ absorción: \frac{(354gr - 348gr)}{348gr} x100 = 1.72\%$$

$$sm = \frac{0.297kg}{0.000118m3x1000\frac{Kg}{m3}} = 2.516$$

$$ss = \frac{0.297gr}{0.000116m3x1000\frac{kg}{m3}} = 2.56$$

3. Pruebas de clasificación y calidad para el cemento asfáltico

Se realizaron pruebas al cemento asfáltico para conocer sus propiedades y corroborar que estas cumplen las especificaciones que marca la Secretaría de Comunicaciones y Transportes que se muestran en la Tabla 23.

Tabla 23. Requisitos de calidad para el cemento asfáltico

CARACTERÍSTICAS	AC 20
Punto de reblandecimiento (˚C)	48-56
Densidad de los cementos asfálticos (gr/cm3)	1.03
Penetración al cemento asfáltico (mm) mínimo	60

Fuente: Secretaria de Comunicaciones y Transportes (2006)

Densidad de los cementos asfálticos

Los resultados obtenidos en esta prueba se presentan en la Tabla 24, en el cual se puede observar que se tiene un valor de 1.00.

Tabla 24. Resultados de la Densidad del cemento asfáltico

Fórmula	Wf (gr)	Wfw (gr)	Wfa (gr)	Wfaw (gr)	Wa (gr)	Ww (gr)	Sca
$S = \frac{Wfa - Wf}{(Wfw - Wf) - (Wfaw - Wfa)}$	35	61	47	61	12	12	1.0

El resultado varía por decimales con el valor exacto de la densidad de un AC-20, esto pudo presentarse debido a una mala calibración de la balanza, pero en sí esta cumple con las especificaciones de la SCT. Y mediante esta densidad se puede corroborar que es un tipo de cemento asfáltico de tipo AC-20.

Penetración al cemento asfáltico (SCT M-MMP-4-05-006)

Para la obtención de este resultado fue necesario realizar 3 ensayos, para obtener un promedio, en la Tabla 25 se muestran estos resultados los cuales nos muestran que la penetración al cemento asfáltico cuando este ya está endurecido es de 57 mm., de igual forma se puede corroborar su calidad en la Tabla 23, en la cual se puede ver que no cumple con la especificación, mínima que es de 60 mm.

Tabla 25. Resultados de penetración al cemento asfáltico

Ensayo no.	Tiempo	Penetración	Penetración
	(seg)	(mm)	grados
1	5	5.5	55
2	5	5.8	58
3	5	5.9	59
		5.73	57.33

Punto de reblandecimiento (SCT M-MMP-4-05-009)

Los resultados obtenidos en esta prueba al cemento asfáltico se muestran en la Tabla 26. Con un promedio de los 2 ensayos realizados de 53 grados centígrados.

Tabla 26. Resultados del punto de reblandecimiento

Anillo	Temperatura
	℃
1	54
2	52.5
PROM.	53.25

En base a estos resultados se puede corroborar que se está dentro de la especificación marcada en la norma N-CMT-5-05-001/006 de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes y presentada en la Tabla 23.

4. Diseño de un concreto asfáltico por el método Marshall para el agregado natural

El primer paso para la elaboración de la prueba Marshall es obtener la granulometría resultante de combinar los 3 agregados y a su vez verificar que cumpla con especificaciones de la SCT, esta granulometría se muestra en la Figura 21.

Lo siguiente es separar el agregado pétreo de proyecto en los siguientes tamaños, sobre los 1100 gr. que es el peso total para cada espécimen, esta se muestra en la Tabla 27.

Tabla 27. Peso del material pétreo separado para prueba Marshall

Malla no.	% de Mat. pétreo	Peso material pétreo
Retenido ½ “	12.9	(12.9/100)x1100= 141.9
Pasa ½” y retiene en ¼”	22.7	(22.7/100) x1100= 249.7
Pasa ¼”y retiene en No.10	23.3	(23.3/100)x1100= 256.3
Pasa No. 10 y retiene No. 40	22.7	(22.7/100)x1100= 249.7
Pasa No. 40	18.4	(18.4/100)x1100= 202.4
SUMA	100	1100

Después de conocer el peso del material pétreo para cada malla, es necesaria la determinación del contenido mínimo de asfalto por medio de la variante 1 ya que esta muestra contiene finos, los resultados de este cálculo se presentan en la Tabla 28.

La constante de área utilizada depende del tamaño del material, esta ya se encuentra determinada para cada rango de mallas, y dicha constante se puede observar en la Tabla 5 en el Capítulo III, de igual forma en la Tabla 6 se presenta la tabla de índice de asfáltico que depende de las propiedades del material como lo es la forma de la partícula y la absorción.

Tabla 28. Resultados de contenido mínimo de cemento asfáltico

Tamaño	% en peso entre mallas	Constante de área	Superficie parcial	Índice asfáltico	Cont. Parcial de cemento asfáltico
MALLAS		m2/kg	m2/kg	kg/m2	kg/kg
1 1/2" - 3/4"	2.9	0.27	0.00783	0.0085	0.0000665
3/4" - No. 4	38.7	0.41	0.15867	0.0085	0.001348
No. 4 - No. 40	40	2.05	0.82	0.0085	0.0069
No. 40 - No. 200	13.5	15.38	2.0763	0.0085	0.01764
No. 200	4.9	53.3	2.6117	0.0085	0.0221
				Contenido total	0.0482333

Absorción: Media

Tipo de asfalto: AC-20 Triturado: Totalmente (Angulosa)

Densidad del asfalto: 1.03 gr/cm3

Para obtener el contenido mínimo en peso fue necesario multiplicarlo por 1.25 ya que los cementos asfálticos tienen menor poder de cubrimiento, por lo cual el contenido mínimo es:

$$4.82\%\ en\ peso * 1.25 = 6.025 \approx 6.05$$

Ya calculado el contenido mínimo de asfalto, es posible calcular el porcentaje de asfalto, así como su peso para cada pastilla o espécimen, estos resultados se muestran en la Tabla 29.

Tabla 29. Peso de mezcla asfáltica para cada espécimen

No. de espécimen	% de cemento asfáltico	% de cemento asfáltico + 0.5	Peso de cemento asfáltico (gr)	Peso material pétreo (gr)	Peso mezcla asfáltica(gr)
1	5.05	5.55	61.05	1100	1161.05
2	5.55	6.05	66.55	1100	1166.55
3	6.05	6.55	72.05	1100	1172.05
4	6.55	7.05	77.55	1100	1177.55
5	7.05	7.55	83.05	1100	1183.05
6	7.55	8.05	88.55	1100	1188.55

Después de elaborar cada uno de los especímenes tomando en cuenta el peso de cemento asfáltico para cada uno, así como el peso del material pétreo de cada tamaño de partícula especificado en la Tabla 27, se tomaron las medidas de cada uno de estos para obtener un volumen y después su peso volumétrico, estos resultados se muestran en la Tabla 30.

Tabla 30. Determinación del peso volumétrico

Cont. CA	Peso CA (g)	Peso pétreo (g)	Peso mezcla asfáltica (g)	Diam (cm)	Área (cm2)	Altura (cm)	Vol. (cm3)	Peso (g)	PV (kg/m3)	PV (gr/cm3)
5.05	61.05	1100	1161.0	10.210	81.873	6.690	547.73	1130.200	2063.4	2.06342
5.55	66.55	1100	1166.5	10.240	82.355	6.570	541.07	1145.100	2116.3	2.11635
6.05	72.05	1100	1172.0	10.152	80.946	6.756	546.87	1150.300	2103.4	2.10343
6.55	77.55	1100	1177.5	10.180	81.393	6.736	548.26	1163.700	2122.5	2.12253
7.05	83.05	1100	1183.0	10.120	80.436	6.700	538.92	1153.500	2140.3	2.14038
7.55	88.55	1100	1188.5	10.150	80.914	6.680	540.50	1148.200	2124.3	2.12432

En la Figura 22 se presenta la gráfica peso volumétrico contra porcentaje de cemento asfáltico.

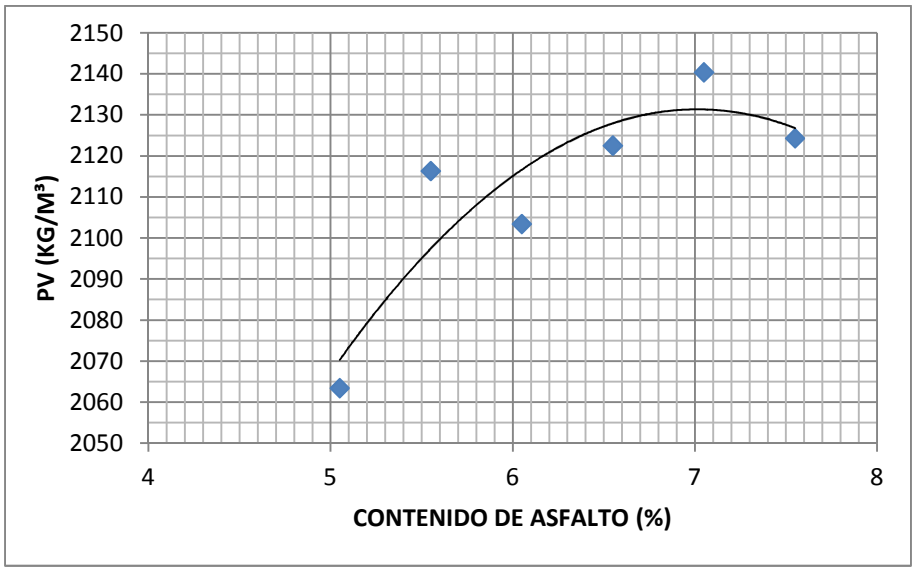

Figura 22. Peso volumétrico vs CA

En la siguiente Tabla 31 se puede apreciar los valores obtenidos de la compresión de cada uno de los especímenes así como la deformación que se obtuvo al momento de darse la falla, cabe mencionar que la estabilidad fue la carga en la cual el cilindro falló, el factor de corrección depende de la altura del espécimen y se puede observar en el Capítulo III, en la Tabla 7.

Tabla 31. Determinación de estabilidad y flujo

No. de espécimen	% de CA	Altura espécimen (cm)	Factor de corrección	Lects. de estabilidad	Estabilidad (kg)	Estabilidad corregida (kg)	Estabilidad corregida (N)	Flujo (mm)	deform. (in*10^-2)
1	5.05	6.690	0.92	221.0000	740.19	682.4552	6692.16	2.29	9
2	5.55	6.570	0.95	235.0000	786.11	743.6601	7292.33	2.57	10.1
3	6.05	6.756	0.91	251.0000	838.59	762.1106	7473.26	3.18	12.5
4	6.55	6.736	0.91	275.0000	917.31	837.3206	8210.77	3.35	13.2
5	7.05	6.700	0.92	261.0000	871.39	801.68	7861.26	3.40	13.4
6	7.55	6.680	0.92	245.0000	818.91	756.6728	7419.93	3.58	14.1

Al igual se graficó el contenido de asfalto contra la estabilidad y el flujo y estas se muestran en las Figuras 23 y 24 respectivamente.

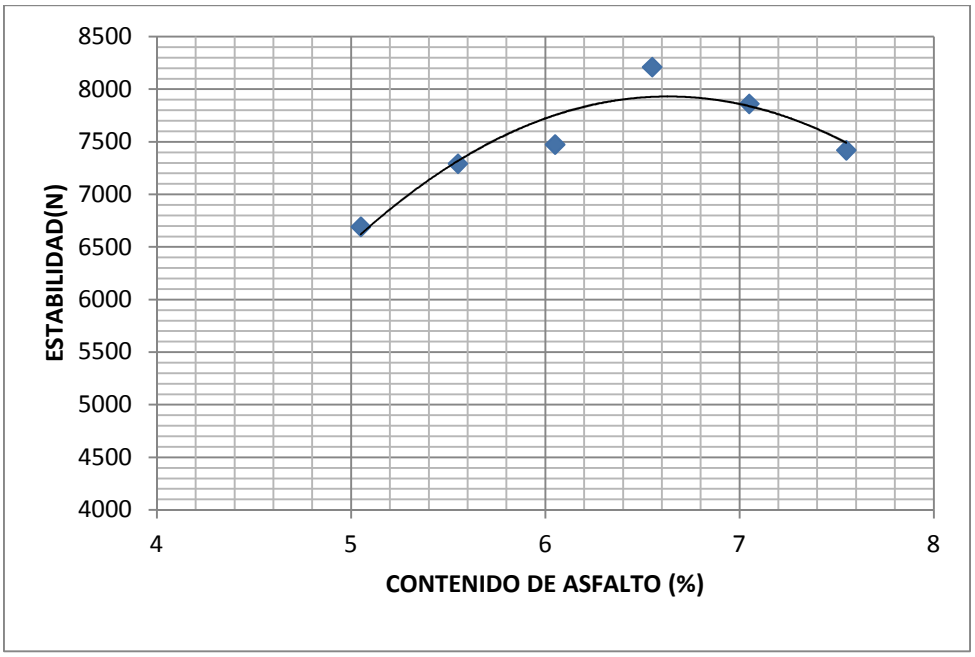

Figura 23. Estabilidad vs CA

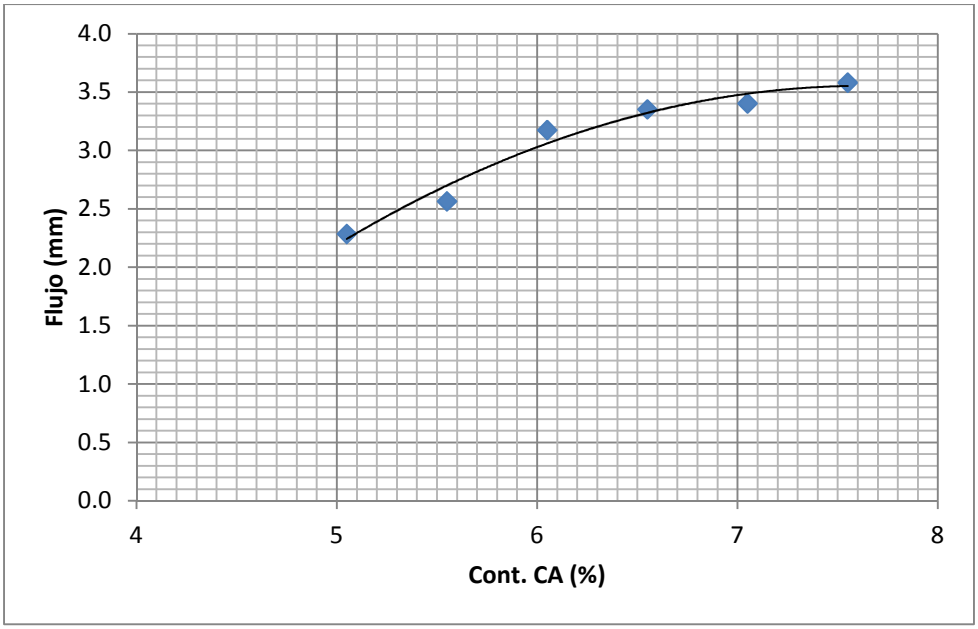

Figura 24. Flujo vs CA

En la Siguiente Tabla 32 se muestran los cálculos realizados para obtener el valor del porcentaje de vacíos de cada espécimen y así ver si esta se encuentra dentro de las especificaciones de la SCT.

Tabla 32. Determinación del porcentaje de Vacíos para la mezcla con agregado natural

No. de espécimen	% de CA	Peso de CA (g)	Peso mezcla asfáltica (g)	Peso ret. en malla 1/4" (g)	Peso que pasa en malla 1/4" (g)	Pg (%)	Pf (%)	Pa (%)	Dg
A	B	C	D	E	F	G = 100E/D	H = 100F/D	I=100C/D	J
1	5.05	61.05	1161.05	391.6	708.4	33.73	61.01	5.26	2.74
2	5.55	66.55	1166.55	391.6	708.4	33.73	61.01	5.73	2.74
3	6.05	72.05	1172.05	391.6	708.4	33.73	61.01	6.21	2.74
4	6.55	77.55	1177.55	391.6	708.4	33.73	61.01	6.68	2.74
5	7.05	83.05	1183.05	391.6	708.4	33.73	61.01	7.15	2.74
6	7.55	88.55	1188.55	391.6	708.4	33.73	61.01	7.63	2.74

Df	Da	D	P.V. (g/cm3)	E (%)
K	L	M	N	R
2.65	1.03	2.47	2.063	16.558
2.65	1.03	2.45	2.116	13.444
2.65	1.03	2.42	2.103	13.005
2.65	1.03	2.39	2.123	11.239
2.65	1.03	2.37	2.140	9.508
2.65	1.03	2.34	2.124	9.211

Al igual que los otros parámetros necesarios para calificar la calidad de la mezcla se presenta la gráfica de Contenido de asfalto contra el porcentaje de vacíos, en la Figura 25.

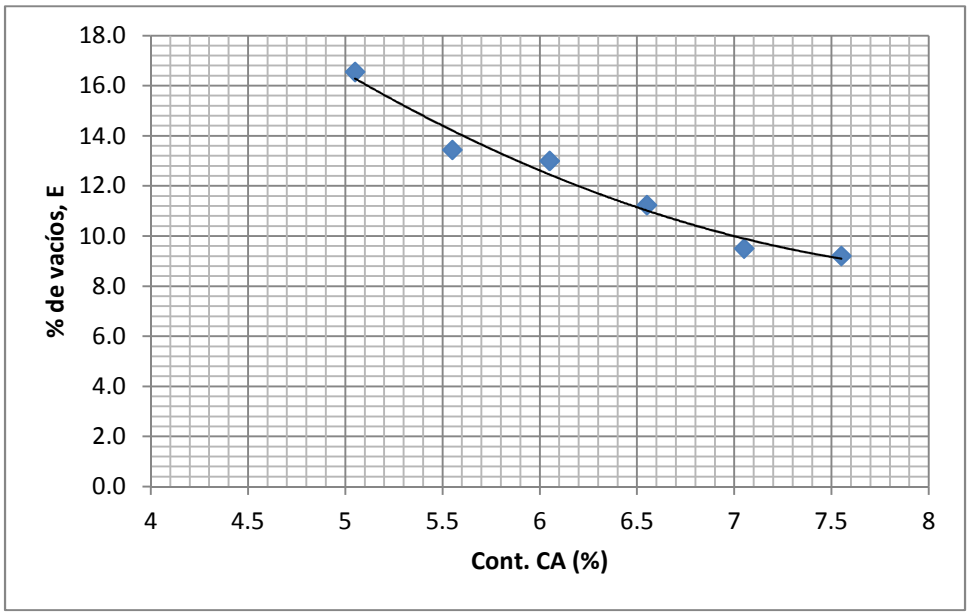

Figura 25 Porcentaje de vacíos VS CA

En la Tabla 33 se muestran los resultados del porciento en el agregado mineral (VAM), respecto al volumen del espécimen de mezcla.

Tabla 33. Determinación del porciento de vacíos en el agregado mineral (VAM)

No. de espécimen	Peso mat. pétreo (g)	Peso mezcla asfáltica (g)	Dr	P.V. (kg/m3)	A	VAM (%)
A	B	C	D	E	F = 100B/C	G
1	1100.00	1161.05	2.65	2063.42	94.742	26.229
2	1100.00	1166.55	2.65	2116.35	94.295	24.694
3	1100.00	1172.05	2.65	2103.43	93.853	25.505
4	1100.00	1177.55	2.65	2122.53	93.414	25.179
5	1100.00	1183.05	2.65	2140.38	92.980	24.901
6	1100.00	1188.55	2.65	2124.32	92.550	25.809

En la Figura 26 se muestra el contenido de asfalto contra el porcentaje de vacíos en el agregado mineral.

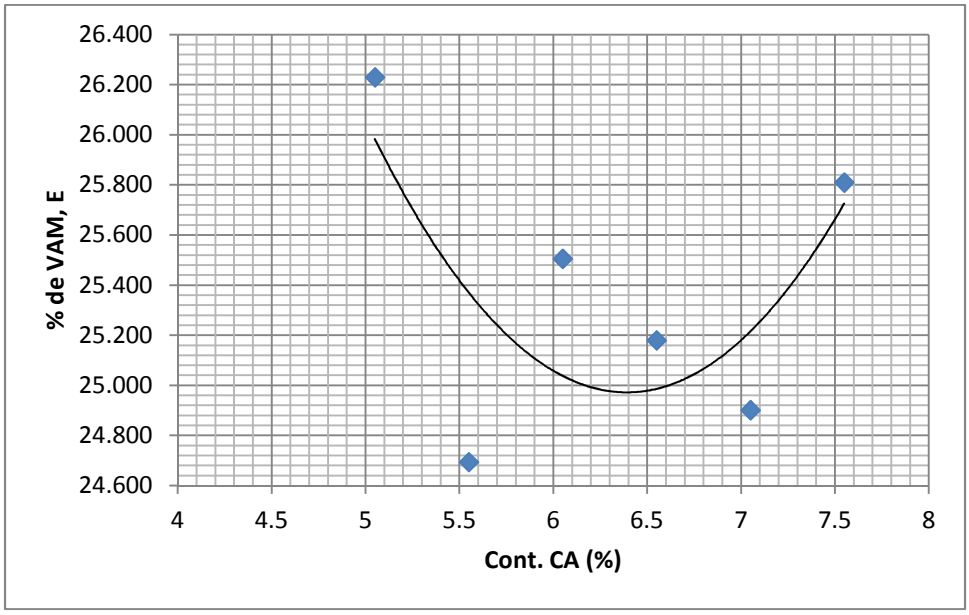

Figura 26. VAM VS CA

Por último en la Tabla 34 se presentan los cálculos que se elaboraron para obtener el porcentaje de vacíos ocupados por el asfalto, al igual en la Figura 27 el contenido asfaltico contra el VFA (vacíos ocupados por el asfalto).

Tabla 34. Determinación del porcentaje de vacíos ocupados por el asfalto

No. De espécimen	% de C.A.	pa(%)	PV (gr/cm3)	% VFA		
1	5.05	5.258	2.06342087	59.021446	Dg=	2.74
2	5.55	5.732	2.11635369	67.36283	Df=	2.65
3	6.05	6.206	2.09	70.750129	Dr=	2.65
4	6.55	6.679	2.1	76.492758	da=	1.03
5	7.05	7.153	2.13	83.857975		
6	7.55	7.627	2.11	87.274649		

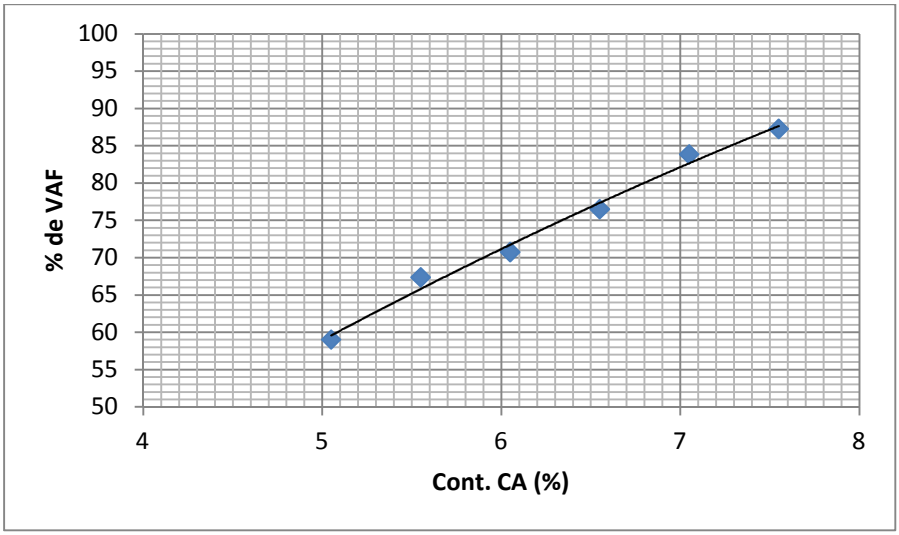

Figura 27. VAF vs CA

Después de elaborada cada una de las gráficas fue necesaria la obtención del contenido óptimo de asfalto en el cual se buscaron lecturas que estuvieran dentro de las especificaciones de la SCT que se muestran en la misma Tabla 35, es importante justificar que la lectura del porcentaje de vacíos no se pudo leer, esto debido a que la línea polinómica formada por las 6 lecturas no llegó al rango de especificaciones que es de 3 a 5 por ciento.

Tabla 35. Determinación del contenido óptimo de asfalto

Características	Contenido de AC
Max. Peso volumétrico	6.98
Max. Estabilidad	6.6
Flujo (mm) (2-4)	6.0
% de vacíos (3-5)	No se pudo leer
%VFA (65-78)	6.05
PROMEDIO	**6.40**

Conociendo el contenido óptimo de asfalto, el siguiente paso es determinar si la mezcla cumple con las especificaciones utilizando este valor de contenido de asfalto, y por lo tanto si es de buena calidad, las lecturas obtenidas se muestran en la Tabla 36 y de igual forma las especificaciones para cada valor o parámetro.

Tabla 36. Datos obtenidos para el Contenido óptimo

Características	Datos obtenidos	Especificaciones	Cumple
Contenido óptimo de C.A (%)	6.4		
Peso volumétrico (kg/m3)	2125		--
Estabilidad (N)	7970	5340	SI
Flujo (mm)	3.25	2-4	SI
Vacíos (%)	11.2	3-5	NO
V.A.M. (%)	24.960	Min 13	SI
V.A.F (%)	71	65-78	SI

Perdida de estabilidad por inmersión en agua (SCT, M-MMP-4-05-042/03)

Después de elaborar esta práctica en el cual se tomó como base el contenido mínimo de asfalto, se fabricó otro espécimen el cual se sumergió en agua, los resultados fueron satisfactorios, ya que se tuvo una pérdida de estabilidad de 16% siendo menor que el valor máximo permitido de 25%.

$$P.E. = \frac{822.85 - 692}{822.85} X100 = 15.90\%$$

5. Diseño de un concreto asfáltico por el método Marshall para el agregado reciclado.

El procedimiento que se siguió para la elaboración de la prueba Marshall con el concreto reciclado fue similar al agregado Natural de la compañía MAS, se utilizó la misma granulometría resultante, esto para poder realizar una comparación entre la resistencia de cada uno, a continuación se muestran las mismas características de la mezcla, así como el contenido óptimo y el resultado si está dentro o no de especificaciones.

En la Tabla 37 se muestra el cálculo del peso volumétrico de cada espécimen del concreto reciclado, a su vez las dimensiones de cada uno como es el diámetro, y la altura y el peso.

Tabla 37. Determinación del peso volumétrico para la mezcla con Agregado reciclado

Cont. CA	Peso CA (g)	Peso pétreo (g)	Peso mezcla asfáltica (g)	Diam. (cm)	Área (cm2)	Altura (cm)	Vol. (cm3)	Peso (g)	PV (kg/m3)	PV (gr/cm3)
5.05	61.05	1100	1161.05	10.200	81.713	6.700	547.48	1135.000	2073.15	2.07315
5.55	66.55	1100	1166.55	10.270	82.838	6.510	539.28	1142.890	2119.30	2.1193
6.05	72.05	1100	1172.05	10.152	80.946	6.560	531.00	1148.500	2162.89	2.16289
6.55	77.55	1100	1177.55	10.173	81.281	6.510	529.14	1153.900	2180.72	2.18072
7.05	83.05	1100	1183.05	10.080	79.801	6.470	516.32	1145.200	2218.02	2.21802
7.55	88.55	1100	1188.55	10.200	81.713	6.520	532.77	1141.980	2143.49	2.14349

De igual forma en la siguiente Figura 28 se muestra el contenido de asfalto contra el peso volumétrico.

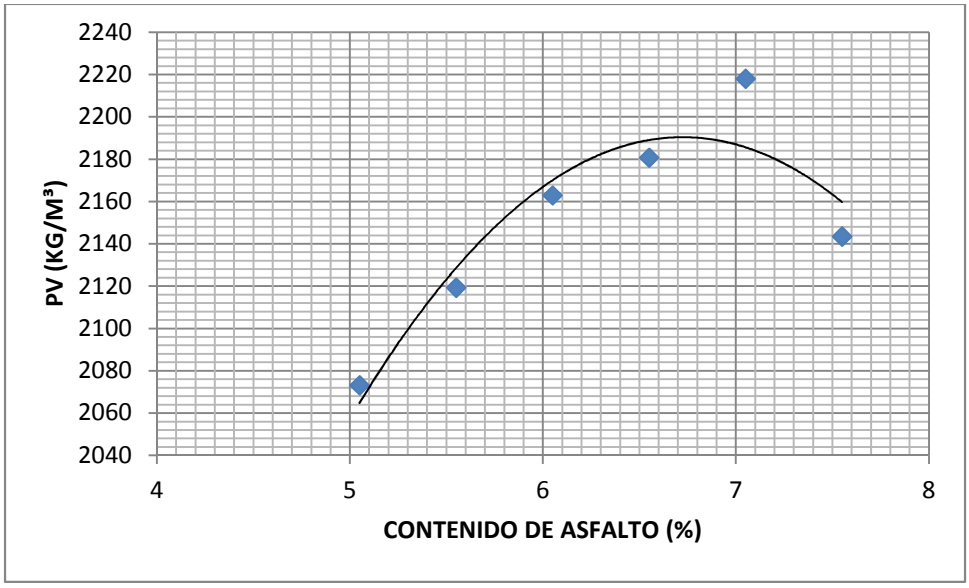

Figura 28. PV. Vs CA para la mezcla con agregado reciclado

Los resultados de estabilidad y flujo se muestran en la siguiente Tabla 38, en la cual se puede observar que se tuvieron valores más grandes que en comparación con la mezcla con agregado natural.

Tabla 38. Determinación de estabilidad y flujo para la mezcla con agregado reciclado

No. de espécimen	% de CA	Altura espécimen (cm)	Factor de corrección	Lects. de estabilidad	Estabilidad (kg)	Estabilidad corregida (kg)	Estabilidad corregida (N)	Flujo (mm)	deform. (in*10^-2)
1	5.05	6.700	0.92	101.0000	346.59	318.8628	3126.77	3.86	15.2
2	5.55	6.510	0.96	132.0000	448.27	429.4427	4211.11	4.11	16.2
3	6.05	6.560	0.95	131.0000	444.99	421.8505	4136.67	4.42	17.4
4	6.55	6.510	0.96	135.0000	458.11	438.8694	4303.55	4.90	19.3
5	7.05	6.470	0.97	78.0000	271.15	261.93	2568.49	4.62	18.2
6	7.55	6.520	0.96	90.0000	310.51	296.8476	2910.89	5.16	20.3

En las Figuras 29 y 30 se puede observar la gráfica de contenido de asfalto contra la Estabilidad y el Flujo.

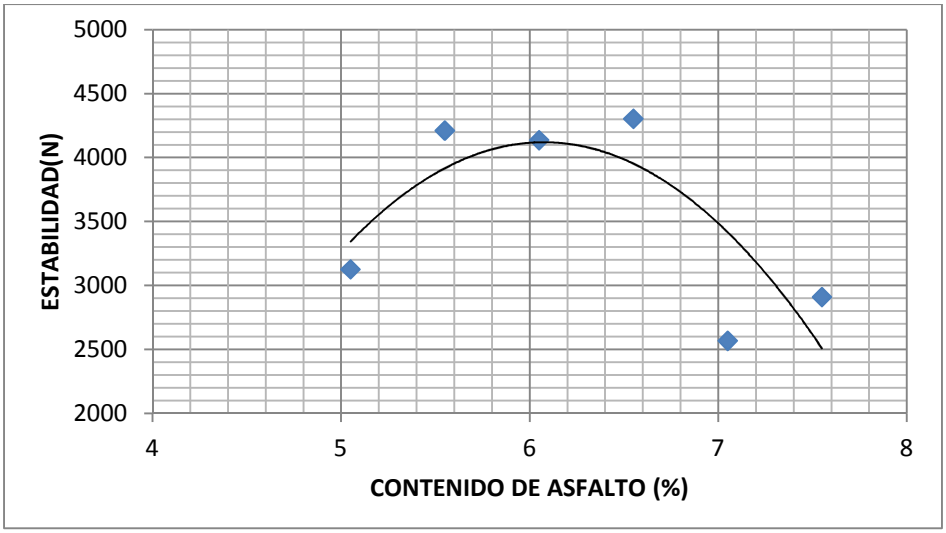

Figura 29. Estabilidad Vs CA para la mezcla con agregado reciclado

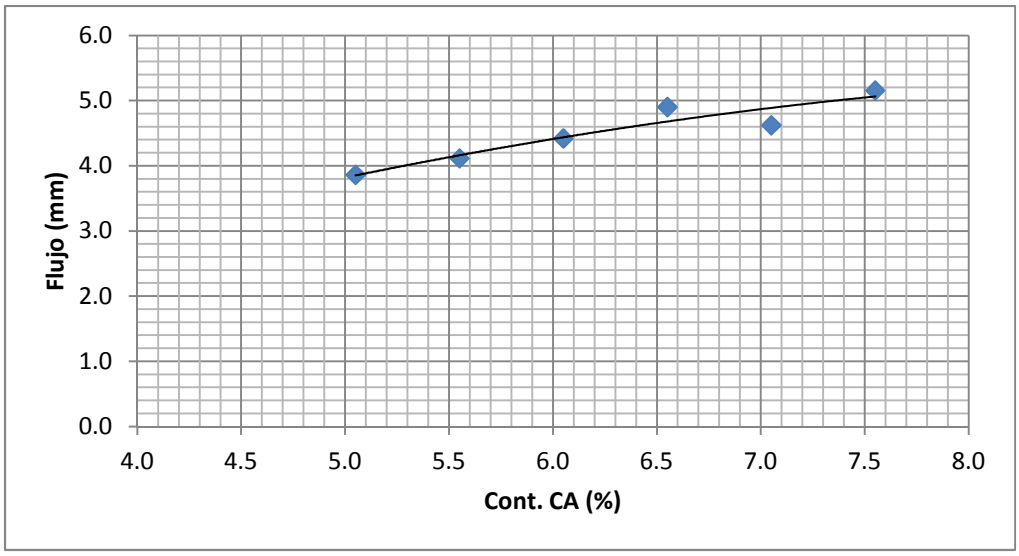

Figura 30. Flujo vs CA para mezcla con agregado reciclado

La determinación del porcentaje de vacíos para la mezcla con agregado reciclado se presenta en la Tabla 39.

Tabla 39 Determinación del porcentaje de vacíos para la mezcla con agregado reciclado

No. de espécimen	% de CA	Peso de CA (g)	Peso mezcla asfáltica (g)	Peso ret. en malla 1/4" (g)	Peso que pasa en malla 1/4" (g)	Pg (%)	Pf (%)	Pa (%)	Dg
A	B	C	D	E	F	G = 100E/D	H = 100F/D	I=100C/D	J
1	5.05	61.05	1161.05	391.6	708.4	33.73	61.01	5.26	2.56
2	5.55	66.55	1166.55	391.6	708.4	33.73	61.01	5.73	2.56
3	6.05	72.05	1172.05	391.6	708.4	33.73	61.01	6.21	2.56
4	6.55	77.55	1177.55	391.6	708.4	33.73	61.01	6.68	2.56
5	7.05	83.05	1183.05	391.6	708.4	33.73	61.01	7.15	2.56
6	7.55	88.55	1188.55	391.6	708.4	33.73	61.01	7.63	2.56

Df	Da	D	P.V. (g/cm3)	E (%)
K	L	M	N	R
2.65	1.03	2.42	2.073	14.370
2.65	1.03	2.39	2.119	11.489
2.65	1.03	2.37	2.163	8.674
2.65	1.03	2.34	2.181	6.919
2.65	1.03	2.32	2.218	4.306
2.65	1.03	2.29	2.143	6.536

De igual manera en la siguiente Figura 31 se puede observar los valores de porcentaje de vacíos graficado contra el contenido de asfalto de cada espécimen.

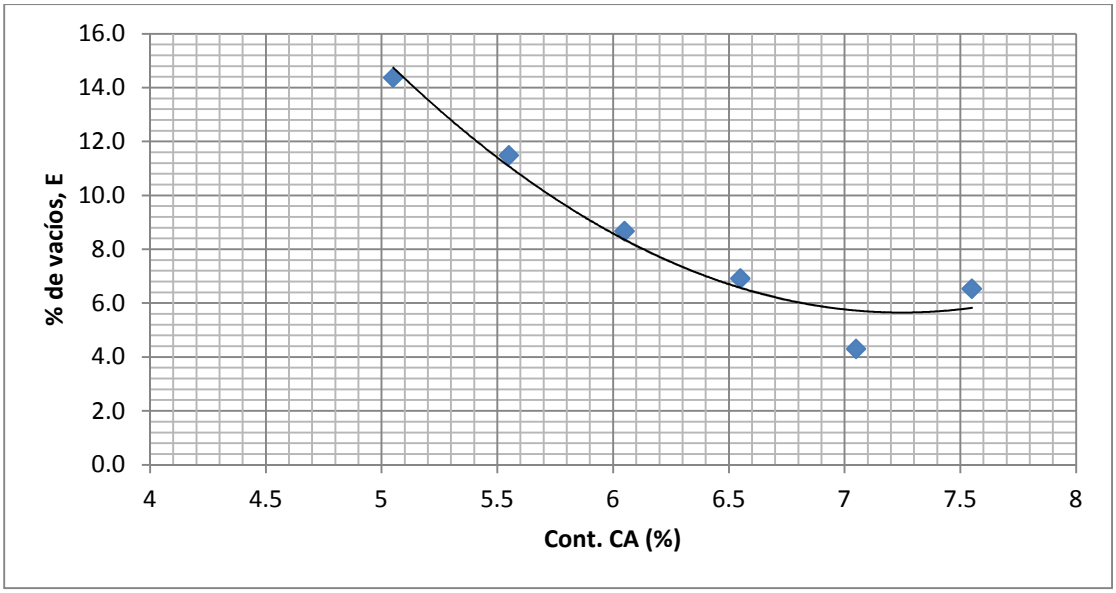

Figura 31. Porcentaje de vacíos Vs CA para mezcla con agregado reciclado

Al igual que con la mezcla con agregado natural, se determinó el porcentaje de vacíos en el espécimen de la mezcla asfáltica, los resultados se presentan en la Tabla 40, y a su vez en la Figura 32 se muestra este parámetro graficado contra el contenido de asfalto.

Tabla 40. Determinación del porcentaje de vacíos en el espécimen de la mezcla asfáltica

No. de espécimen	Peso mat. pétreo (g)	Peso mezcla asfáltica (g)	Dr	P.V. (kg/m3)	A	VAM (%)
A	B	C	D	E	F = 100B/C	G
1	1100.00	1161.05	2.65	2073.15	94.742	25.881
2	1100.00	1166.55	2.65	2119.30	94.295	24.589
3	1100.00	1172.05	2.65	2162.89	93.853	23.399
4	1100.00	1177.55	2.65	2180.72	93.414	23.128
5	1100.00	1183.05	2.65	2218.02	92.980	22.177
6	1100.00	1188.55	2.65	2143.49	92.550	25.140

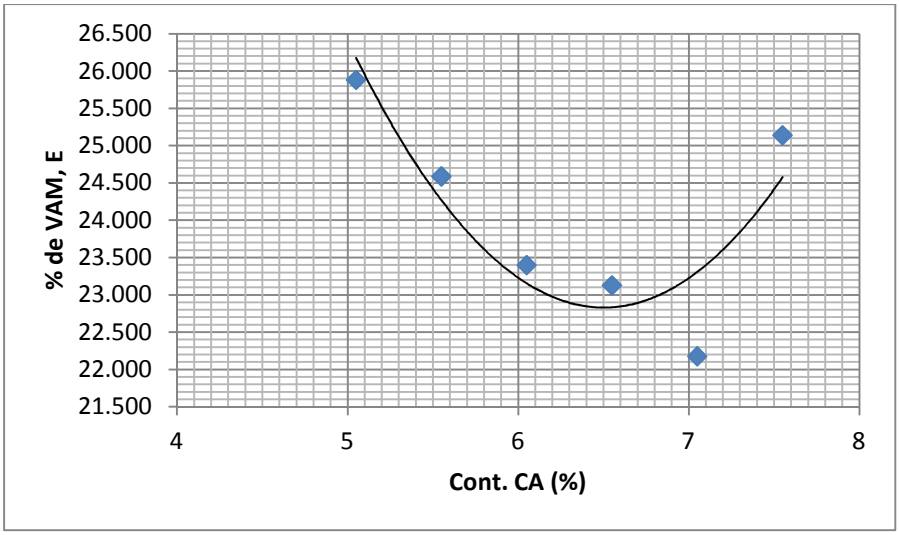

Figura 32. VAM vs CA para la mezcla con agregado reciclado

En la Tabla 41 se puede observar los resultados de porcentaje de vacíos ocupados por el asfalto, y de igual forma en la Figura 33 se muestra este valor graficado contra el contenido de asfalto.

Tabla 41. Determinación del porcentaje de vacíos ocupados por el asfalto para la mezcla con agregado reciclado

No. De espécimen	% de C.A.	pa(%)	PV (gr/cm3)	% VFA		
1	5.05	5.258	2.07315052	55.720845	Dg=	2.56
2	5.55	5.732	2.11930116	63.171842	Df=	2.65
3	6.05	6.206	2.09	66.163867	Dr=	2.65
4	6.55	6.679	2.1	71.53426	da=	1.03
5	7.05	7.153	2.13	78.42137		
6	7.55	7.627	2.11	81.617656		

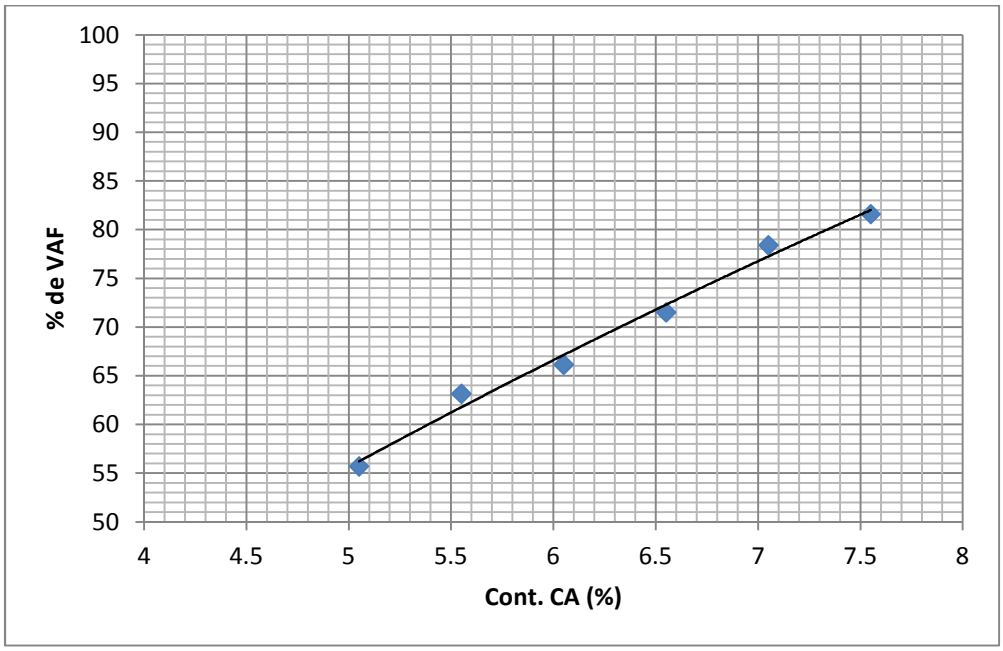

Figura 33. VAF vs CA para la mezcla con agregado reciclado

Después de elaborada cada una de las gráficas fue necesaria la obtención del contenido óptimo de asfalto en el cual se buscaron lecturas que estuvieran dentro de las especificaciones de la SCT que se muestran en la misma Tabla 42.

Tabla 42. Determinación del contenido óptimo de cemento asfaltico para la mezcla con agregado reciclado

CARACTERISTICAS	CONTENIDO DE AC
Max. Peso volumétrico	6.77
Max. Estabilidad	6.1
Flujo (mm) (2-4)	5.1
% de vacíos (3-5)	No se pudo leer
%VFA (65-78)	6.4
PROMEDIO	6.09

Conociendo el contenido óptimo de asfalto, el siguiente paso es determinar si la mezcla cumple con las especificaciones utilizando este valor de contenido de asfalto, y por lo tanto si es de buena calidad, las lecturas obtenidas se muestran en la Tabla 36 y de igual forma las especificaciones para cada valor o parámetro.

Tabla 43. Datos obtenidos para el Contenido óptimo

CARACTERISTICAS	DATOS OBTENIDOS	ESPECIFICACIONES	CUMPLE
Contenido óptimo de C.A (%)	6.09		
Peso volumétrico (kg/m3)	2184		--
Estabilidad (N)	4110	5340	NO
Flujo (mm)	4.4	2-4	NO
Vacíos (%)	8.2	3-5	NO
V.A.M. (%)	23.100	Min 13	SI
V.A.F (%)	68	65-78	SI

Perdida de estabilidad por inmersión en agua para la mezcla con agregado reciclado (SCT,M-MMP-4-05-042/03)

Después de elaborar esta práctica en el cual se tomó como base el contenido mínimo de asfalto, se fabricó otro espécimen el cual se sumergió en agua, los resultados se muestran en la siguiente ecuación.

$$P.E. = \frac{412.46 - 310.6}{412.46} X100 = 24.69\%$$

4.2 Discusión de resultados

Con los resultados obtenidos en cada una de las pruebas se puede comprobar que el agregado pétreo de le empresa constructora MAS son de buena calidad, a continuación en la Tabla se puede observar el análisis de cada uno de estos

parámetros de calidad, comparados con los obtenidos para el concreto reciclado y a su vez las especificaciones que marca la SCT.

Tabla 44. Tabla comparativa entre el uso de Agregados reciclados y naturales.

PRUEBA	Agregado Natural	Agregado Reciclado	Especificaciones (SCT)
Desgaste Los Angeles (%)	33.07	56.39	Max 35
Equivalente de arena (%)	58.33	58.33	Mín. 50
Densidad Relativa	2.74	2.56	Mín. 2.4
Porcentaje de partículas alargadas y lajeadas (%)	34.23	29.70	Máx. 40
PRUEBA MARSHALL			
Contenido óptimo (%)	6.4		
Peso volumétrico	2125	2184	
Estabilidad (N)	7970	4110	5340
Flujo (mm)	3.25	4.4	2-4
Porcentaje de vacíos	11.2	8.2	3-5
Porcentaje de V.A.M.	24.96	23.10	Mín. 13
Porcentaje de V.A.F.	71	68	65-78

En lo que respecta a las pruebas de calidad como lo son desgaste Los Ángeles, densidad, forma de partícula y equivalente de arena; los valores que se obtuvieron demuestran que se están en el rango de las normas que marca la SCT, por lo cual demuestran su calidad.

Un valor positivo en la prueba de desgaste cobra importancia ya que las partículas van a estar sometidas a un roce continuo como es en el caso de pavimentos, para lo cual los agregados que se utilizan deben ser duros y resistentes.

El equivalente de arena es una prueba de laboratorio, que se realiza con el objeto de determinar qué porcentaje de una muestra se puede considerar como arena se obtuvo un valor de 58% el cual está dentro de las especificaciones, es importante conocer este valor debido a que una buena carpeta asfáltica de un camino necesita la menor cantidad de finos posible, sobre todo de arcillas, que son los materiales que en contacto con el agua causan un gran daño al pavimento.

Las pruebas de forma alargada y lajeada son muy importantes ya que si se tienen porcentajes muy altos el cual este no es el caso, se pueden presentar problemas de fracturas en el material, ya sea en el uso o cuando se esté construyendo, por lo cual sería necesario el uso de otro agregado de esta forma se pueden evitar fallas por fatiga, deformaciones o grietas.

Todas estas prácticas fueron elaboradas en base a los manuales de la SCT para los agregados naturales, al igual con el concreto reciclado, en los cuales se obtuvieron resultados positivos en las pruebas de partículas, densidad mientras que el porcentaje de desgaste Los Ángeles fue muy alto, se pudo observar que al pasar el material ya triturado por la malla No.12 quedaron solo las partículas del agregado natural del concreto.

En base a las prácticas a los cementos asfálticos, estos como se puede determinar que es un AC-20 debido a la densidad obtenida, se puede observar que los valores de penetración no están dentro de la especificación marcada para cementos asfalticos, esto pudo deberse a una mala calibración del equipo.

Para el diseño de la granulometría, fue necesaria la utilización del método del cuadrado en la cual se buscó que se tuvieran todas las mallas dentro de especificaciones, en la Figura 11 y 12 se puede observar que 2 mallas quedan fuera

de especificaciones pero por un valor muy pequeño, esto debido a la granulometría de los agregados.

En los resultados obtenidos para la mezcla con agregado natural se puede observar que están dentro de especificaciones, como lo es la estabilidad, el flujo, el VAM y el VAF, pero el porcentaje de vacíos fue muy alto en comparación con las marcadas por las especificaciones, esta característica de la mezcla puede ser corregido, aplicándose un mortero asfáltico el cual mejorará la resistencia de la carpeta al paso del agua y el aire, una segunda sería realizar un riego de sello sobre el pavimento ya terminado.

En cambio con la mezcla con concreto reciclado se obtuvieron valores negativos en lo que respecta a flujo, vacíos y estabilidad.

El tener una poca estabilidad nos demuestra que la carpeta no será resistente al paso de automóviles pesados, ya que esta presentará deformaciones grandes tal como se muestra en la gráfica de flujo. El obtener una estabilidad adecuada depende de la forma, textura y la granulometría de los agregados, así como la densidad de los mismos y la cantidad de asfalto.

La pérdida de estabilidad por inmersión en agua nos demuestra cuanto pierde de resistencia un pavimento al estar saturado o en contacto por el agua durante un tiempo, por ejemplo en tiempos de lluvia, con los resultados que se obtuvieron se puede corroborar que se está dentro de especificaciones, ya que se tienen valores menores de 25%.

Al igual que en la mezcla con agregado natural el porcentaje de vacíos puede ser corregido, pero la estabilidad y el flujo no, por lo cual no es recomendable la utilización de concreto reciclado en una pavimentación con concreto asfaltico.

CAPITULO V. CONCLUSIONES

Como ya se observó en el capítulo anterior, existe diferencia entre la estabilidad y el flujo de la mezcla con agregado natural y reciclado, los resultados marcan que la mezcla con agregado natural está dentro de especificaciones, mientras que el reciclado no, por lo cual no es recomendable la utilización de este material para la pavimentación de una calle con tránsito de ejes equivalentes menor o igual a 1 000 000.

Cabe mencionar que la resistencia obtenida no está muy lejos de la aceptada por la SCT, por lo cual este material puede ser utilizado en lugares donde no se tenga tanto tráfico vehicular, como por ejemplo estacionamientos de tiendas comerciales en callejones, entre otros.

En lo que respecta al otro objetivo la calidad de los agregados de la Constructora MAS, queda claro que son de calidad al estar dentro de especificaciones, esto demuestra por qué la mezcla con agregado natural si tuvo una aceptación por parte de las especificaciones de la SCT.

Realizando una comparación entre ambos agregados, en el concreto reciclado se tuvo un desgaste de 56%, mientras que el natural de 33% existe una diferencia muy grande de 23% lo cual demuestra que el material reciclado no sería resistente al uso, al tránsito de los vehículos y a los aspectos climatológicos.

Se obtuvo un porcentaje de contenido óptimo de cemento asfáltico el cual fue de 6.40% para el agregado natural y 6.09% para el reciclado, los cuales tienen un valor no muy alto, pero en general no podrá ser muy económico, ya que en cantidades altas de asfalto se encarece más la mezcla asfáltica.

Al igual otro parámetro importante es la estabilidad, se presentaron lecturas en la máquina de compresión simple para los 12 especímenes (6 agregado natural y 6 agregado reciclado) y se realizaron las gráficas pertinentes para posteriormente ajustar los puntos a una línea polinómica, en la cual se pudo leer la estabilidad para el contenido óptimo de cada tipo de mezcla, los resultados fueron de 7970 y 4110 N, por lo cual el agregado natural es mejor en este aspecto en comparación con el reciclado, esto nos deja muy claro que el concreto reciclado no es resistente a grandes cargas, por lo cual un pavimento con este agregado podría presentar ondulaciones o deformaciones excesivas, se sabe bien que un pavimento flexible siempre tendrá deformaciones pero nunca sobrepasar lo que marca las normas de la SCT, ya que se puede poner en riesgo la seguridad de los usuarios.

Cabe destacar que el uso que tenía el escombro utilizado era de un firme, por lo cual su resistencia a la compresión puede variar entre los 210 Kg/m3 hasta 150 Kg/m3, este es u dato muy importante ya que existen concretos con mayor resistencia y otra dosificación, por lo cual pudieron haber estado dentro de especificaciones.

Según la bibliografía que se obtuvo de este tema se pudo observar que en otros países es muy común el uso de este material para pavimentación, ó para la realización de otras mezclas, solo que son agregados químicos que rigidizan el material, como lo son cenizas volcánicas, puzolanas, etcétera.

BIBLIOGRAFÍA

Concretos Reciclados (2004). *Concretosreciclados.com.* Recuperado el 09 de septiembre de 2013 desde: http://www.concretosreciclados.com.mx/

Crespo, C. (1998). *Vías de comunicacion: Caminos, ferrocarriles, aeropuertos, puentes y puertos.* México, DF: Limusa.

Dominguez, *J.* (2012). *Uso a grande escala del concreto reciclado.* Ponencia presentada en el Foro Internacional del Concreto, México DF.

Federal Highway Administration (2013). *fhwa.dot.gov. Recuperado el 13 de Noviembre de 2013 desde:* http://www.fhwa.dot.gov/

Garnica, P., Delgado, H., y Sandoval, C. (2005). *Análisis comparativo de los métodos Marshall y superpave para compactacion de mezclas asfálticas.* Querétaro: Secretaría de Comunicaciones y Transportes.

Hernández R, Fernandez C.y Baptista P., *(2006).Metodología de la Investigación,* (4ta Edición) México:Mc Graw Hill.

Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto. (2011). Concreto para Durango. *Construccion y tecnología en concreto* , 1 (06)

Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto. (2013). *Emblema urbano en concreto, 3(04)*

Marín, A. (2004). *Asfaltos modificados y pruebas de laboratorio para caracterizarlos.* Tesis no publicada, Instituto Politécnico Nacional, México, DF.

Olivera, F. (2000). *Estructuración de vías terrestres* (2da edición) México:CECSA.

Portland Cement Association (1997). *cement.org. Recuperado el 10 de Septiembre de 2013 desde:* http://www.cement.org/tech/index.asp

Rico, A., y Del Castillo, H. (1990). *La ingeniería de suelos en las vías terrestres, carreteras, ferrocarriles y aeropistas.(Vol 2)* Mexico: Limusa.

Rico, A., Telléz, R., y Garnica, R. (1998). *PAVIMENTOS FLEXIBLES. Problemática, metodologías de diseño y tendencias.* Sanfandila, Querétaro: Publicación Tecnica 104.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2003). *CMT. Caracteristicas de los Materiales; Materiales para pavimentos.* Mexico.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2005). *CTR. Construcción*. México.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2009). *CTR. Construcción.* México.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2011). *CTR.Construcción.* Mexico.

ÍNDICE

LISTA DE TABLAS……iii
LISTA DE FIGURAS…….....iv
RESUMEN …….. vi
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN 1
1.1 Antecedentes 1
1.2 Planteamiento del problema..... 4
1.3 Justificación..... 5
1.4 Objetivo general 6
1.5 Objetivos específicos 6
1.6 Limitaciones 6
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO 8
2.1 Pavimentos 8
2.1.1 Pavimento rígido..... 10
2.1.2 Pavimento flexible..... 12
2.2 Proceso constructivo de un pavimento flexible 14
2.2.1 Terracerías 14
2.2.2 Estructura del pavimento 16
2.3 Pruebas de clasificación del agregado y el asfalto..... 19
2.3.1 Pruebas de clasificación al agregado 19
2.3.2 Pruebas de clasificación para el asfalto..... 20
2.4 Cementos asfálticos..... 21
2.5 Requisitos de Calidad de una mezcla asfáltica..... 23

2.6 Método Marshall..... 24
2.7 Uso de concreto reciclado como agregado en una mezcla asfáltica..... 25
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA..... 28
3.1 Tipo de investigación 28
3.2 Participantes 29
3.3 Materiales y Equipo..... 29
3.4 Procedimiento 32
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y SU DISCUSIÓN..... 50
4.1 Resultados..... 50
4.2 Discusión de resultados..... 84
CAPITULO V. CONCLUSIONES..... 89
BIBLIOGRAFÍA 92

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Especificación de la granulometría de una base de un pavimento flexible 18
Tabla 2. Clasificación de los cementos asfálticos 22
Tabla 3. Materiales y equipo utilizados en esta investigación 29
Tabla 4. Composición de la muestra y cargas abrasivas para desgaste Los Ángeles 40
Tabla 5. Áreas superficiales de partículas para diferentes fracciones 44
Tabla 6. Índices asfálticos para diversos tipos de material pétreo. 45
Tabla 7. Factores de corrección para la estabilidad 47
Tabla 8. Composición granulométrica de la grava 51
Tabla 9. Porcentajes de suelo para la Grava 53
Tabla 10. Composición granulométrica del sello 53
Tabla 11. Porcentajes de suelo para la grava 54
Tabla 12. Composición granulométrica de la arena 55
Tabla 13. Porcentaje de suelo para la arena 56
Tabla 14. Granulometría resultante 59
Tabla 15. Porcentaje de partículas lajeadas y alargadas del agregado natural 60
Tabla 16. Características de calidad para material pétreo ΣL≤10^6 61
Tabla 17. Porcentaje de desgaste Los Ángeles del agregado Natural 61
Tabla 18. Resultados de porcentaje de equivalente de arena 62
Tabla 19. Resultados de densidad del material pétreo mayor a la Malla 4 62
Tabla 20.Resultado prueba Desgaste Los Ángeles para el Concreto Reciclado 63
Tabla 21. Porcentaje de partículas lajeadas y alargadas para el concreto reciclado 64
Tabla 22. Resultados de densidad de material concreto reciclado mayor a la malla 4. 65
Tabla 23. Requisitos de calidad para el cemento asfáltico 66
Tabla 24. Resultados de la Densidad del cemento asfáltico 66
Tabla 25. Resultados de penetración al cemento asfáltico 67
Tabla 26. Resultados del punto de reblandecimiento 67
Tabla 27. Peso del material pétreo separado para prueba Marshall 68
Tabla 28. Resultados de contenido mínimo de cemento asfáltico 68
Tabla 29. Peso de mezcla asfáltica para cada espécimen 69
Tabla 30. Determinación del peso volumétrico 70
Tabla 31. Determinación de estabilidad y flujo 71
Tabla 32. Determinación del porcentaje de Vacíos para la mezcla con agregado natural 72
Tabla 33. Determinación del porciento de vacíos en el agregado mineral (VAM) 74
Tabla 34. Determinación del porcentaje de vacíos ocupados por el asfalto 75

Tabla 35. Determinación del contenido óptimo de asfalto 76
Tabla 36. Datos obtenidos para el Contenido óptimo 76
Tabla 37. Determinación del peso volumétrico para la mezcla con Agregado reciclado 77
Tabla 38. Determinación de estabilidad y flujo para la mezcla con agregado reciclado 78
Tabla 39 Determinación del porcentaje de vacíos para la mezcla con agregado reciclado 80
Tabla 40. Determinación del porcentaje de vacíos en el espécimen de la mezcla asfáltica 81
Tabla 41. Determinación del porcentaje de vacíos ocupados por el asfalto para la mezcla con agregado reciclado 82
Tabla 42. Determinación del contenido óptimo de cemento asfaltico para la mezcla con agregado reciclado 83
Tabla 43. Datos obtenidos para el Contenido óptimo 84
Tabla 44. Tabla comparativa entre el uso de Agregados reciclados y naturales. 85

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Sección transversal de un pavimento. 10
Figura 2. Capas que forman un pavimento rígido 11
Figura 3. Capas que forman un pavimento flexible 13
Figura 4. Capas que forman una obra vial de tránsito mayor a 5000 vehículos 15
Figura 5. Regiones geográficas para la utilización de asfaltos 23
Figura 6. Planta de producción de agregados para carpeta asfáltica de la constructora MAS 34
Figura 7. Recolección de escombro tipo concreto 35
Figura 8. Mallas para la prueba de granulometría. 36
Figura 9. Calibrador para la prueba de partícula alargada 37
Figura 10. Calibrador de espesores para prueba de partículas lajeadas 38
Figura 11. Cilindro rotatorio para prueba Desgaste Los Ángeles 39
Figura 12. Planta estacionaria de la Constructora MAS 42
Figura 13. Picnómetro para la prueba de densidad de cementos asfálticos. 43
Figura 14. Tanque de inmersión o baño María. 46
Figura 15. Prueba Marshall. 47
Figura 16. Curva granulométrica de la grava 52
Figura 17. Curva Granulométrica del Sello (Agregado Natural). 54
Figura 18. Curva granulométrica de la arena 55
Figura 19. Diseño granulométrico con grava y arena 57
Figura 20. Diseño granulométrico con los 3 agregados. 58
Figura 21. Granulometría resultante. 59
Figura 22. Peso volumétrico vs CA 70
Figura 23. Estabilidad vs CA 71
Figura 24. Flujo vs CA 72
Figura 25 Porcentaje de vacíos VS CA 73
Figura 26. VAM VS CA 74
Figura 27. VAF vs CA 75
Figura 28. PV. Vs CA para la mezcla con agregado reciclado 78
Figura 29. Estabilidad Vs CA para la mezcla con agregado reciclado 79
Figura 30. Flujo vs CA para mezcla con agregado reciclado 79
Figura 31. Porcentaje de vacíos Vs CA para mezcla con agregado reciclado 81
Figura 32. VAM vs CA para la mezcla con agregado reciclado 82
Figura 33. VAF vs CA para la mezcla con agregado reciclado 83

RESUMEN

Esta tesis fue elaborada con la finalidad de corroborar la calidad de los agregados para pavimentación de la Constructora MAS, de la ciudad de Navojoa, Sonora, a su vez diseñar una mezcla asfáltica utilizando estos agregados y por último la implementación de concreto reciclado en una mezcla asfáltica.

La importancia de estos resultados recae en la utilización de nuevas formas de pavimentación en los cuales se ayude al medio ambiente y atraiga beneficios a la sociedad y a las empresas constructoras, evitando costos excesivos de acarreos de escombro a lugares ya establecidos.

Las pruebas de calidad que se realizaron para el agregado natural y reciclado y fueron: Granulometría, desgaste Los Ángeles, la prueba de partículas alargadas y lajeadas, el equivalente de arena y por último la densidad. Cada uno de estos resultados obtenidos fueron comparados con los rangos de valores que muestra la SCT para agregados para mezclas asfálticas en los cuales se obtuvieron valores positivos.

De igual forma se realizaron pruebas de clasificación del cemento asfáltico utilizado por esta empresa como lo son densidad, penetración y el punto de reblandecimiento.

En lo que respecta al diseño de mezcla se realizó la prueba Marshall, para lo cual fue necesaria la elaboración de un diseño de granulometría y la elaboración de 6 especímenes, con agregado natural y agregados reciclados.

Dedicatorias

A mi mamá María Guadalupe, por el gran amor y la devoción que tienes a tus hijos, por el apoyo incondicional que me has dado, por darme la fortaleza para salir siempre adelante, por ser siempre mi amiga y por haberme formado como un hombre de bien, por darme la vida y enseñarme a vivirla, no hay palabras para agradecerte todo lo hecho por mí. T.Q.M.

A mi papá Jesús Octavio, por el esfuerzo que has realizado para sacar adelante a nuestra familia, por las enseñanzas que me has dado y por guiarme por el camino del bien y también por todo tu cariño y tu apoyo, gracias por todo. Te quiero.

A mi hermano Octavio Álvarez, por estar siempre en el momento en que te necesite, gracias por cada uno de tus consejos además por ayudarme en algunos trabajos de la escuela, por ser mi mejor amigo y por ser un gran ejemplo a seguir para mí...

También me gustaría agradecer a mis profesores durante toda mi carrera profesional porque todos han aportado con un granito de arena a mi formación.

A mis amigos, por el cariño y apoyo incondicional que me han brindado; siempre los recordaré.

Agradecimientos.

A Dios, por haberme dado la vida y permitirme el haber llegado hasta este momento tan importante de mi formación profesional.

Al ITSON en donde tuve la oportunidad de formarme como un Ingeniero Civil.

Con especial gratitud a mis Asesores, Lic. Gloria Isabel Bojórquez y al Mtro. Raúl Gutiérrez Durán por brindarme su tiempo y apoyo en la elaboración de este trabajo, de igual forma un agradecimiento a mis revisores Ing. Luis Herrera y al Mtro. Dolores Beltrán.

A mi familia por estar siempre conmigo en las buenas y en las malas y por darme todo su amor y cariño.

A mis amigos Enrique Gastelúm, Javier Zazueta, Salvador Velderrain y Karla Navarro, por todos los momentos vividos durante estos 4 años y medio, por tantas desveladas haciendo trabajos y por todo su apoyo, gracias por ayudarme en algunas pruebas de este trabajo y por ser como mis hermanos.. Éxito para los 4.