

INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE MONTERREY

Campus Monterrey

Escuela de Ingeniería y Ciencias



“EVALUACIÓN DE RAP EN MEZCLAS ASFÁLTICAS CALIENTES”

TESIS PRESENTADA POR:

OSCAR HERIBERTO DÍAZ DERBEZ

Sometida a la Escuela de Ingeniería y Ciencias,
como requisito para la obtención del grado académico de:

**MAESTRIA EN CIENCIAS DE INGENIERÍA Y
ADMINISTRACIÓN DE LA CONSTRUCCIÓN**

MONTERREY, NUEVO LEÓN, A 13 DE JUNIO DE 2022

EVALUACIÓN DE RAP EN MEZCLAS ASFÁLTICAS CALIENTES

OSCAR HERIBERTO DÍAZ DERBEZ, A00787622

TECNOLÓGICO DE MONTERREY, 2022

ASESOR: DR. CARLOS HUMBERTO FRANCISCO DE ASIS FONSECA RODRIGUEZ

Resumen

La construcción y conservación de carreteras en México es importante para el crecimiento del PIB nacional ya que el 83.2% del tonelaje de productos que se mueven en el país es vía autotransportes. La mala calidad de las carreteras contribuye a un mayor costo de mantenimiento y consumo de combustibles para los que están en la industria y no permite ser competitivos contra otros países. Para tener carreteras en buen estado, es necesario su conservación y rehabilitación por diferentes metodologías, las cuales muchas veces provoca que se destruyan ecosistemas locales, así como un consumo excesivo de energías no renovables. El material que se retira de las carreteras existentes por sistema de fresado, normalmente se tira en bancos de desperdicio, pero este material contiene Cemento Asfáltico, así como agregados pétreos que pueden volver a ser utilizados. Lo que se pretende en este estudio, es evaluar la calidad del material recuperado y reutilizarlo en diferentes porcentajes en nuevas mezclas densas en caliente, con agregados pétreos vírgenes y rejuvenecedores que regresen las características al cemento asfáltico envejecido.

PALABRAS CLAVE

- RAP
- Mezclas Asfálticas en Caliente
- Reciclado de Asfalto

Contenido

Portada.....	1
Aceptación de Requisitos por Miembros del Comité.....	2
Declaración de Autoría.....	3
Resumen.....	4
Capítulo 1. Introducción.....	7
1.1 Importancia	7
1.2 Uso de RAP.....	7
1.3 Oportunidad.....	9
Capítulo 2. Revisión Bibliográfica	11
2.1 Pavimento Flexible.....	11
2.2 Agregados Pétreos.....	11
2.3 Cemento Asfáltico.....	12
2.3.1 Clasificación de los Cementos Asfálticos	13
2.3.2 Cementos Asfálticos Modificados.....	13
2.3.3 Cementos Asfálticos Recuperados	14
2.3.4 Uso de Rejuvenecedores	15
2.4 Normas Aplicables en México	16
2.5 Protocolo AMAAC	18
2.6 Fallas en Pavimentos Asfálticos.....	21
2.6.1 Defectos Superficiales.....	21
2.6.2 Defectos por Deformaciones	21
2.6.3 Defectos por Agrietamientos.....	22
2.6.4 Defectos por Baches.....	22
2.6.5 Fin de la Vida Útil.....	23
2.7 Mantenimiento y Rehabilitación de Pavimentos Flexibles	23
2.7.1 Mantenimiento Preventivo	24
2.7.2 Mantenimiento Correctivo	25
2.7.3 Reciclado de Pavimentos Flexibles.....	26
Capítulo 3. Metodología de Investigación	31
Capítulo 4. Obtención y Análisis de Información	34
4.1 Características del RAP a utilizar.....	34
4.1.1 Granulometría Existente.....	34

4.1.1 Granulometría Propuesta Aproximada.....	35
4.2 Características de los Cementos Asfálticos a utilizar.....	38
4.3 Dosificaciones a utilizar para cada uno de los casos.....	38
4.4 Propiedades Volumétricas de las diferentes Mezclas.....	40
4.4 Evaluación de Propiedades del método Marshall.....	42
4.4 Susceptibilidad de la Mezcla Asfáltica al daño inducido por Humedad.....	44
4.5 Deformaciones Permanentes.....	45
4.6 Módulos Dinámicos.....	47
4.6 Ahorro en Costos.....	48
4.7 Recomendaciones Generales.....	49
Capítulo 5. Conclusiones.....	51
Referencias.....	53
Índice de Figuras.....	54
Índice de Tablas.....	56
Anexo 1. Estabilidades y Flujos Marshall.....	57
Anexo 2. Módulos Marshall.....	58
Anexo 3. Susceptibilidad a la Humedad por Tensión Indirecta.....	59
Anexo 4. Resultados Individuales de la Rueda Cargada de Hamburgo.....	63
Anexo 5. Tarjeta de Precio Unitario de Carpeta Asfáltica Densa en Planta Virgen.....	71
Anexo 6. Tarjeta de Precio Unitario Carpeta Asfáltica Reciclada al 60%.....	72
Curriculum Vitae.....	73

Capítulo 1. Introducción

1.1 Importancia

Una buena infraestructura carretera es importante para el desarrollo de las actividades económicas de un país. En México, el 83.2% del tonelaje doméstico se mueve por carreteras. La actividad de autotransporte contribuye al 3.96% del Producto Interno Bruto y genera el 2.73% de los empleos formales. (Berrones, 2020)

En EUA el personal se mueve por vehículos privados en un 91.2%. La carga comercial se transporta en carreteras en un 89% del total (Papagiannakis, 2008), es por esto que la seguridad y buenas condiciones de la red carretera son importantes.

Los pavimentos de la infraestructura carretera están sujetas a aspectos ambientales que pueden dañar sus propiedades y aspecto como lo son la temperatura y lluvias. Otro factor que afecta estos pavimentos son la carga continua de tráfico, la cual no siempre se limitan a las cargas para las cuales fueron diseñadas. Estos factores provocan un deterioro progresivo del pavimento y con esto se disminuye la buena operación de la red generando inseguridad y bajo confort del tránsito, así como costos operativos mayores.

Es necesario entonces, mantener una infraestructura carretera en buen estado para que la actividad económica siga creciendo. Mantenimiento y rehabilitación de los pavimentos es necesario y dependen de la condición estructural y superficie existente del pavimento.

Los pavimentos pueden ser reciclados al 100%. Los de concreto hidráulico pueden ser triturados para usarlos como agregados industriales. Los pavimentos flexibles se pueden reutilizar como rellenos, pero también pueden ser usados para producir mezclas nuevas con mejores características. Este material fresado de pavimentos flexibles de les denomina RAP por sus siglas en inglés de Reclaimed Asphalt Pavement.

1.2 Uso de RAP

En países europeos, así como en Estados Unidos, el empleo de mezclas asfálticas con diferentes contenidos de RAP es muy frecuente y cada día esta tendencia está aumentando. Esto gracias a que existen metodologías de diseño y recuperación del RAP, que permite su uso de manera controlada y con diferentes contenidos de este fresado en procedimientos constructivos nuevos mejorando las condiciones de los pavimentos.

En México, el uso del RAP como metodología de apoyo en diseño de mezclas asfálticas es escaso y lo poco que se ha realizado no ha tenido buenos resultados ni son confiables para tramos carreteros. Los pocos trabajos realizados presentan carencia en metodologías de diseño para realizar recuperación de RAP en mezclas ni ha sido rentable su uso.

En 1989, Holanda declaró el Plan Nacional Ambiental donde desechos y otros productos en desuso quedaron administrados por un departamento ambiental. En este Plan, 7.7 toneladas de desperdicios de mezclas asfálticas recuperadas, serán empleadas en su totalidad en carreteras nuevas, desde bases hasta carpetas asfálticas. (Schimmoller, 2000)

En el año 1992, fue modificada la ley de depósitos de desechos en Francia y en 2002 esta ley busca que los materiales sean utilizados en construcción siempre y cuando sea técnica y económicamente posible. Ejemplo de estos desechos son las escorias, desechos de minas de carbón, RAP y otros materiales. (Schimmoller, 2000)

Gracias a diferentes guías realizadas en Estados Unidos por su Agencia de Administración Federal de Carreteras, se logró en el año 2000 reutilizar 33 millones de toneladas, de las 41 toneladas totales que se produjeron de RAP en nuevas mezclas asfálticas en caliente y en frío. (Schimmoller, 2000)

En Estados Unidos, se evaluó el uso de RAP en diferentes proporciones hasta un 50%, junto con material virgen en 3 diferentes estados. El resultado obtenido fue que, en laboratorio se puede llegar a utilizar hasta el 50% y cumplir con la normativa Superpave de ese país. En campo, en las plantas mezcladoras usaban un contenido de RAP de entre 15% y 25% para lograr cumplir con las normas de ese país. Se observó que al aumentar los contenidos de RAP aumentaban la rigidez de la mezcla, pero disminuía su capacidad a corte. (McDaniel, 2002)

El uso de RAP en capas de rodadura es utilizado por 40 Agencias Estatales de EUA hasta un 10% de su mezcla total, hasta el 20% por 30 agencias y solo por 2 agencias hasta un 30%. Esto se debe a que los contratistas, por falta de metodologías de diseño, no utilicen más cantidades de RAP a pesar de que está permitido. (Federal Highway Administration, 2011)

En el año 2020, más de 87 millones de toneladas cortas fueron usadas de RAP en nuevas mezclas en EUA. Esto provocó que 2.3 millones de toneladas métricas de CO₂ no se fueran a la atmósfera y se ahorraran aproximadamente 24 millones de barriles de cemento asfáltico virgen en nuevas mezclas. (NAPA, 2021)

En España, se evaluaron 3 carreteras diferentes con contenidos del 50% de RAP en las mezclas y se buscó determinar qué variaciones puede traer en granulometrías, estabilidades,

contenidos de Cemento Asfáltico (CA), entre otros. Se encontró que el contenido de Cemento Asfáltico puede llegar a variar hasta 1.5% del total de la mezcla y con respecto a los agregados pétreos podía generar que no llegaran a cumplir hasta en 80% la granulometría. En este estudio se menciona que existe un aumento de Estabilidad Marshall entre mayor es el porcentaje de RAP. Así también se recomienda en este estudio en carreteras de España, realizar un separado por tamaño del RAP antes de ser utilizado, con esto se controla mejor las posibles variabilidades de contenido de CA y de granulometría. (Valdés, 2008)

Más experiencias y datos históricos en estos países se pueden seguir citando, ya que son innumerables los casos de éxito en la utilización de RAP en las carreteras, con metodologías de diseño innovadoras en diferentes partes del mundo. Existe una tendencia hacia el cuidado del medio ambiente y es responsabilidad de los Ingenieros Mexicanos estudiar estos avances e innovar. Usar RAP disminuyendo los materiales de fuentes naturales vírgenes y mejorando el control de manejo de estos desperdicios mal tirados de cuidado especial.

Como se comentó, no existe una metodología normalizada para el uso de RAP en nuevas mezclas asfálticas calientes. Pero se puede realizar una propuesta de diseño, usando la metodología Marshall que es bien usada en el País, así como el nuevo protocolo AMAAC. Estas metodologías de diseño, buscan obtener un óptimo porcentaje de cemento asfáltico, así como granulometría, pero al utilizar RAP, estas circunstancias tienen que ser modificadas.

1.3 Oportunidad

El uso de RAP es más económico que la explotación de bancos vírgenes. Ayuda a conservar los recursos naturales y que este producto no sea desechado al medio ambiente ya que es un producto de manejo especial.

El costo de los materiales en los Pavimentos Asfálticos representa el 70% aproximadamente del costo total directo del pavimento tendido. El otro 30% está entre la producción en planta, los traslados de los materiales y el tendido y compactación. (Federal Highway Administration, 2011). En México, el costo de los materiales son aproximadamente el 80% del total del costo directo del pavimento tendido y compactado.

En México se utiliza el RAP junto con bases hidráulicas para mezclarlas y adicionarles Cemento Portland o Asfáltico para mejorar sus características. De igual manera, se utiliza para estabilización de taludes o para rellenos. No existe una metodología de uso de RAP en nuevas mezclas asfálticas en caliente. Lo realizado hasta ahora, es intentar cumplir con las normas actuales de mezclas vírgenes, utilizando bajos contenidos de RAP, sin realizar ningún estudio previo de las características de este. Es por esto que se desea evaluar el RAP en

diferentes proporciones, para que este material no siga siendo un desperdicio y se utilice en mayores proporciones en México como en otros países. Aprovechar de la tendencia internacional de disminuir los productos vírgenes, disminuir el calentamiento global y conservar los recursos naturales.

El Acuerdo de París es un tratado internacional que busca limitar el calentamiento mundial. Busca reducir este calentamiento global a menos de 2° C llegando a una neutralidad climática en el 2050. Cada 5 años se juntarán los países para promover sus contribuciones y ver de qué manera contribuirán a esta reducción. Busca reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y ver cómo se pueden adaptar a estos efectos. Promueve un marco para que se comparta tecnología, financiamiento y apoyo para mejora de capacidades. Cada ronda, se fijarán metas más ambiciosas entre países.

Por otro lado, las Naciones Unidas lanzaron 17 metas internacionales, para el buen desarrollo Sustentable para transformar el mundo. Entre ellas, las que aplican a la Conservación de Carreteras, son las de Crecimiento Económico, Innovación en Industria e Infraestructura, Ciudades y Comunidades Sustentables, Consumo y Producción Responsable, así como Acción en el Cambio Climático.

El uso de RAP en el mantenimiento y conservación de caminos y carreteras, está alineada con 5 de las 17 metas de la ONU. Es por esto que México tiene que tomar acción inmediata en la investigación y desarrollo y aplicación de metodologías de diseño a nivel nacional de uso de RAP en nuevas mezclas asfálticas.

Capítulo 2. Revisión Bibliográfica

Existen tres tipos de pavimentos: los rígidos, los compuestos y los flexibles. Los flexibles, materia de este estudio, consisten de un concreto asfáltico colocado sobre una capa granular llamada base y otra sub-base, soportadas por terracerías (sub-rasante y terraplén).

2.1 Pavimento Flexible

Los pavimentos flexibles están compuestos normalmente de 3 capas, a cada una realizada de diferentes materiales. La primera capa, es la superficial, la cual soporta la mayor presión e impactos del medio ambiente, es por esto que esta capa debe ser la mejor en características físicas y a la vez es la más costosa. Esta capa superficial está compuesta por una mezcla de agregados pétreos, cemento asfáltico y algún tipo de aditivo cuando este es necesario. La mezcla debe ser diseñada de manera correcta para mantener buena capacidad de carga y durabilidad para cierta vida útil.

La siguiente capa se llama Base y se encarga de soportar cargas de corte a un menor costo que la superficial. En casos especiales, esta base es modificado con cemento asfáltico o cemento Portland para que su deformación sea menor a las de las especificaciones requeridas al ser afectadas por cargas repetitivas. Esta capa debe llegar a una densidad óptima agregando humedad y compactándose en obra. La siguiente capa es Sub-Base y es muy similar a la anterior, pero puede ser de menor calidad ya que los esfuerzos que soporta son menores.

Posteriormente, están las terracerías, las cuales están compuestas por suelos naturales con ciertas especificaciones que deben cumplir exigidas por las Normas de la S.C.T. Estas capas, deben resistir a los efectos del agua y en ocasiones especiales, deben ser estabilizadas. Esta sección de terracerías, están compuestas por Sub-rasante, Sub-Yacente y Terraplén. (Malick, 2009)

2.2 Agregados Pétreos

Los agregados pétreos son materiales sólidos usados para la construcción de carreteras y estructuras. Estos se mezclan con cemento asfáltico o con cemento Portland para obtener características requeridas. Los agregados se obtienen por el dragado de ríos o por la explotación de minas. Se requiere en organizarlos por tamaños específicos con ayuda de cribas y normalmente pasan por un proceso de trituración. Los materiales pétreos más usados en México para los pavimentos son:

- Calizas. Roca sedimentaria abundante y económica, que se utiliza en la mayoría de las capas del pavimento. Si es posible, se busca minimizar su uso en la capa de rodamiento ya que se puede pulir fácilmente. Tiene buena adhesividad con el Cemento Asfáltico (CA).
- Granito. Roca Ígnea que aporta buena estructura mecánica y se busca su uso para capas superficiales. No tiene buena adhesividad con el CA.
- Basalto. Roca Ígnea abundante en el país. Aporta buena estructura mecánica y se busca utilizar en las capas superficiales.
- Escoria. Residuos de proceso de fundición de materiales ferrosos. Buena estructura para el pavimento, con buenas características estructurales y de rodamiento.

Estos agregados pétreos, para ser utilizados en una mezcla asfáltica caliente, se debe considerar cuidar dos aspectos: Las propiedades Físicas y la Granulometría. Los agregados pétreos pueden clasificarse de diferentes formas:

- a) Procedencia
 - a. Agregados Naturales. Son aquellos que se usan sin ningún cambio mecánico en estos, solo se acomodan de acuerdo a tamaños específicos
 - b. Agregados Triturados. Son aquellos que, por deficiencias de la granulometría deseada, fueron sometidas a un proceso de trituración para obtener los tamaños deseados para la granulometría de la mezcla
 - c. Agregados Artificiales. Son los que proceden de procesos industriales, demoliciones y reciclados
- b) Tamaño
 - a. Agregado Grueso. Es el agregado que se retiene en la malla #4
 - b. Agregado Fino. Es el agregado que pasa la malla #4 y es retenido en la #200
 - c. Polvo mineral. Es el que pasa la malla #200
- c) Por su forma y por su textura superficial
- d) Por propiedades físicas como densidad entre otras

2.3 Cemento Asfáltico

El CA es un material compuesto típicamente de carbón (82% - 88%), Hidrógeno (8% - 11%), Sulfato (0% - 6%), Nitrógeno (0% - 1%), y Oxígeno (0% - 1.5%). El CA es considerado un sistema coloidal complejo de hidrocarburos, la cual tiene dos fases, una discontinua formada por asfaltenos, una continua por maltenos y resinas.

El CA se puede obtener de diferentes formas: por vías naturales (Asfalto en lagos, en rocas y gilsonita) y por proceso industrial del destilado del Petróleo Crudo.

2.3.1 Clasificación de los Cementos Asfálticos

En México, el asfalto es clasificado de acuerdo a su Viscosidad Absoluta a 60°C. Esta es la medida de resistencia para que el asfalto fluya y está expresada en Poises junto con el prefijo AC por sus siglas en inglés. Un asfalto que tiene una viscosidad absoluta de 2000 poises a 60°C se le denomina AC-20. Los asfaltos comerciales son: AC-05, AC-10, AC-20 y AC-30,

La metodología SUPERPAVE, es otro sistema de clasificación de asfaltos basada en las temperaturas máximas de diseño que soporta un asfalto durante 7 días corridos. Estas van acompañadas de las temperaturas bajas que igual soporta este asfalto sin provocar fisuramiento térmico. Van acompañadas del prefijo PG (Performance Grade), seguida de su temperatura máxima y luego la mínima. Busca prevenir las deformaciones permanentes y las fisuras por fatiga y fisuras térmicas. Se clasifican en:

- PG 46 -34,-40,-46
- PG 52 -10,-16,-22,-28,-34,-40,-46
- PG 58 -16,-22,-28,-34,-40
- PG 64 -10,-16,-22,-28,-34,-40
- PG 70 -10,-16,-22,-28,-34,-40
- PG 76 -10,-16,-22,-28,-34
- PG 82 -10,-16,-22,-28,-34

2.3.2 Cementos Asfálticos Modificados

Para poder lograr cumplir con características especiales dentro de las clasificaciones antes mencionadas, es necesario modificar el cemento asfáltico. Estos modificadores son una disolución o incorporación en este CA, de polímeros o hules molidos. Ayudan a mejorar las propiedades físicas del asfalto, principalmente la Susceptibilidad a la Temperatura, Penetración, Viscosidad, Recuperación Elástica, Reblandecimiento y Oxidación entre otras. Los principales modificadores usados en México son: (SCT, 2022)

- a) Polímero Tipo I. Formado en base a bloques de estireno, en polímeros elastoméricos radiales mediante configuraciones como SBS entre otras. Es usado en pavimentos asfálticos con altos índices de tránsito y vehículos pesados, al igual que en emulsiones para tratamientos superficiales.
- b) Polímero Tipo II. Formado en base a polímeros elastoméricos lineales, mediante caucho de Estireno. Es usado en pavimentos asfálticos en los que se requiere mejorar su comportamiento de servicio, al igual que en emulsiones para tratamientos superficiales.

- c) Polímero Tipo III. Formado en base a un polímero plastómero, con polietileno de alta y baja densidad. Es usado en pavimentos asfálticos con altos índices de tránsito y vehículos pesados, donde exista clima caliente. También se usa en emulsiones para tratamientos superficiales.
- d) Hule Molido de Neumáticos. Mejora la flexibilidad y resistencia a la tensión de las mezclas, reduciendo la aparición de grietas. Principalmente se usa en granulometrías abiertas y en tratamientos superficiales.

2.3.3 Cementos Asfálticos Recuperados

El CA recuperado, proviene del reciclado de mezclas asfálticas, donde su vida útil fue sobrepasada o donde existen daños físicos. Para poder estudiar este Cemento Asfáltico Recuperado, se extrae del RAP por diferentes métodos que utilizan solventes para limpiar la mezcla asfáltica envejecida de los agregados. Se pueden usar diferentes tipos, como Xileno, Tricloroetileno, n-Propyl Bromide pero se debe tener cuidado ya que son perjudiciales para el ser humano. Se utilizan los siguientes métodos:

- AASHTO TP2-94 Standard Test Method for the Quantitative Extraction and Recovery of Asphalt Binder from Hot Mix Asphalt (HMA)
- ASTM D2172-05 Standard Test Methods for Quantitative Extraction of Bitumen From Bituminous Paving Mixtures. Este método de ensayo se puede extraer el cemento asfáltico de la mezcla por el extractor centrífugo (Test Method A) o por el Reflux (Test Method B), la cual es la siguiente imagen:



Figura 2.1. Ensayo ASTM D2172-05 (Method B)

Después de separar el Cemento Asfáltico de la mezcla, se utilizan métodos normalizados para separar el CA del solvente. Estos son el ASTM D5404-03 (Standard Practice for

Recovery of asphalt from Solution Using the Rotary Evaporator), así como el ASTM D1856-95A (Abson Method for recovery of Asphalt from Solution). Sin embargo, en el Laboratorio de Mezclas Asfálticas del ITESM campus Monterrey, se empleó un Método Modificado Abson (MMA). (Fonseca, 2009)

Con este método modificado, se realizó la Evaluación del CA Recuperado, para ver qué tan envejecido y oxidado se encontraba. Cuando el Asfalto se encuentra oxidado, pierde parte de sus maltenos y a su vez gana asfaltenos, haciendo el CA más rígido. En la siguiente tabla del estudio realizado por el Dr. Fonseca y el MCQ Villalobos, se encontraron los siguientes resultados: (Fonseca, 2009)

Tabla 2.1. Propiedades del Cemento Asfáltico Envejecido (Fonseca, 2009)

Designación	Características del cemento asfáltico	CA Recuperado	AC-20
M-MMP-4-05-006	Penetración a 25°C, 100g, 5s. (10 ⁻¹ mm)	29.0	76.0
M-MMP-4-05-009	Punto de Reblandecimiento Anillo %& Bola (°C)	56.0	46.0
M-MMP-4-05-010	Viscosidad rotacional Brookfield, 135°C, (Poises)	1,256.5	512.5
M-MMP-4-05-010	Viscosidad rotacional Brookfield, 165°C, (Poises)	420.8	120.8
M-MMP-4-05-024	Recuperación elástica por torsión, (%)	4.0	7.0

Se puede observar que el CA Envejecido, cuenta con propiedades más duras como Penetración y Reblandecimiento, así como Viscosidades, pero con características de Recuperación Elástica mucho menor.

2.3.4 Uso de Rejuvenecedores

Existen tres propósitos básicos para el uso de rejuvenecedores. Recuperar el asfalto envejecido a características de un nivel apropiado para su uso en diseño, restaurar la carpeta existente a características óptimas de durabilidad y proveer aglutinante adicional para agregados vírgenes que se tuvieran que agregar. Los rejuvenecedores son materiales orgánicos con características químicas y físicas que sirven para restaurar asfaltos envejecidos y llevarlos a alguna especificación deseada. (U.S. Department of Transportation, 1997)

2.4 Normas Aplicables en México

En México, se requiere seguir las normas que la Dirección de Servicios Técnicos aplica en la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT). Para pavimentos flexibles y su diseño de Mezclas, nos interesan los libros de Características de los Materiales (CMT) y el de Métodos de Muestreo y Pruebas de Materiales (MMP)

En el libro CMT, se encuentran las características físicas que deben cumplir los materiales. Este libro está dividido en las siguientes: Materiales para Terracerías, para Estructuras, para obras de Drenaje, para Pavimentos y para Señalamientos. Con respecto a Pavimentos, se dividen en Bases, Sub-Bases, Estabilizaciones, Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas, así como Materiales Asfálticos, Aditivos y Mezclas.

En el Título de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas, se encuentran las propiedades físicas del agregado y su granulometría que debe ser seguida. Para una mezcla densa en caliente y cualquier tránsito superior a 30×10^6 de ejes equivalentes (N-CMT-4-04/17).

Tabla 2.2. Requisitos de Calidad del Material Pétreo para Mezclas Asfálticas Densas

Característica ^[1]		Valor
GRAVA		
Densidad relativa del material pétreo seco, mínimo		2,4
Desgaste de Los Ángeles, %, máximo		30
Desgaste Microdeval, %, máximo		15
Intemperismo acelerado, %, (5 ciclos), máximo ^[2]	En sulfato de sodio	15
	En sulfato de magnesio	20
Partículas alargadas y lajeadas, %, máximo		35
Partículas trituradas, %, mínimo	Una cara	100
	Dos o más caras	90
Desprendimiento por fricción, %, máximo		20
ARENA Y FINOS		
Densidad relativa del material pétreo seco, mínimo		2,4
Angularidad, %, mínimo		45
Equivalente de arena, %, mínimo		55
Azul de metileno, mg/g, máximo		12

Tabla 2.3. Requisitos de Granulometría para Mezclas Asfálticas Densas

Malla		Tamaño nominal del material pétreo ^[1]				
Abertura mm	Designación	mm (in)				
		9,5 ($\frac{3}{8}$)	12,5 ($\frac{1}{2}$)	19 ($\frac{3}{4}$)	25 (1)	37,5 ($1\frac{1}{2}$)
Porcentaje que pasa (en masa)						
50	2 in	---	---	---	---	100
37,5	1½ in	---	---	---	100	90 - 100
25	1 in	---	---	100	90 - 100	74 - 90
19	¾ in	---	100	90 - 100	79 - 92	62 - 83
12,5	½ in	100	90 - 100	72 - 89	58 - 81	46 - 74
9,5	⅜ in	90 - 100	76 - 92	60 - 82	47 - 75	39 - 68
6,3	¼ in	70 - 89	56 - 81	44 - 71	36 - 65	30 - 59
4,75	N°4	56 - 82	45 - 74	37 - 64	30 - 58	25 - 53
2	N°10	28 - 64	25 - 55	20 - 46	17 - 42	13 - 38
0,85	N°20	18 - 49	15 - 42	12 - 35	9 - 31	6 - 28
0,425	N°40	13 - 37	11 - 32	8 - 27	5 - 24	3 - 21
0,25	N°60	10 - 29	8 - 25	6 - 21	4 - 19	2 - 16
0,15	N°100	6 - 21	5 - 18	4 - 16	2 - 14	1 - 12
0,075	N°200	2 - 10	2 - 9	2 - 8	1 - 7	0 - 6

Con respecto a la calidad de las características físicas de los materiales asfálticos, se encuentran dentro de Calidad de Materiales Asfálticos (N-CMT-4-05-001/06)

Tabla 2.4. Requisitos de Calidad del material Asfáltico

Características	Clasificación			
	AC-5	AC-10	AC-20	AC-30
Del cemento asfáltico original:				
Viscosidad dinámica a 60°C; Pa·s (P ^[1])	50 ± 10 (500 ± 100)	100 ± 20 (1 000 ± 200)	200 ± 40 (2 000 ± 400)	300 ± 60 (3 000 ± 600)
Viscosidad cinemática a 135°C; mm ² /s, mínimo (1 mm ² /s = 1 centistoke)	175	250	300	350
Viscosidad Saybolt-Furol a 135 °C; s, mínimo	80	110	120	150
Penetración a 25°C, 100 g, 5 s; 10 ⁻¹ mm, mínimo	140	80	60	50
Punto de inflamación Cleveland; °C, mínimo	177	219	232	232
Solubilidad; %, mínimo	99	99	99	99
Punto de reblandecimiento; °C	37 - 43	45 - 52	48 - 56	50 - 58
Del residuo de la prueba de la película delgada:				
Pérdida por calentamiento; %, máximo	1	0,5	0,5	0,5
Viscosidad dinámica a 60°C; Pa·s (P ^[1]), máximo	200 (2 000)	400 (4 000)	800 (8 000)	1 200 (12 000)
Ductilidad a 25°C y 5 cm/min; cm, mínimo	100	75	50	40
Penetración retenida a 25 °C; %, mínimo	46	50	54	58

Para Mezcla Asfáltica Densa, se debe buscar el N-CMT.4-05-003/16. En el caso de esta investigación, se siguió la metodología Marshall para el diseño de la mezcla.

Tabla 2.5. Requisitos de Calidad de Mezclas Asfálticas Calientes Densas

Características	Número de ejes equivalentes de diseño ΣL ^[1]	
	$\Sigma L \leq 10^6$	$10^6 < \Sigma L \leq 10^7$ ^[2]
Compactación; número de golpes en cada cara de la probeta	50	75
Estabilidad; N (lb), mínimo	5 340 (1 200)	8 000 (1 800)
Flujo; mm (10^{-2} in)	2 - 4 (8 - 16)	2 - 3,5 (8 - 14)
Vacíos en la mezcla asfáltica (VMC); %	3 - 5	3 - 5
Vacíos ocupados por el asfalto (VFA); %	65 - 78	65 - 75

2.5 Protocolo AMAAC

El protocolo AMAAC, tiene como objetivo proveer una metodología de diseño y control de calidad de Mezclas Asfálticas de Alto Desempeño, considerando los nuevos avances tecnológicos realizados en la materia. Es la que actualmente dependencias del gobierno solicitan se cumpla, por encima de las normas de México. En este sistema de diseño, existen 4 diferentes niveles dependiendo del tránsito aplicado al pavimento. Los criterios de selección dependen de que tan importante es una carretera.

Tabla 2.6. Niveles de Diseño en función de los Ejes Equivalentes (AMAAC, 2008)

Designación del nivel de tránsito	Número de ejes equivalentes	Tipo de carreteras usuales	Ensayes recomendados
Nivel I Tránsito bajo	menor a 1,000,000	<ul style="list-style-type: none"> Carreteras federales tipo D Carreteras alimentadoras Carreteras estatales y municipales Calles urbanas 	<ul style="list-style-type: none"> Diseño volumétrico y susceptibilidad a la humedad
Nivel II Tránsito medio	de 1,000,000 a 10,000,000	<ul style="list-style-type: none"> Carreteras estatales Carreteras federales tipo B y C Vialidades urbanas 	<ul style="list-style-type: none"> Diseño volumétrico y susceptibilidad a la humedad Susceptibilidad a la deformación permanente
Nivel III Tránsito alto	de 10,000,000 a 30,000,000	<ul style="list-style-type: none"> Carreteras federales tipo A Autopistas de cuota 	<ul style="list-style-type: none"> Diseño volumétrico y susceptibilidad a la humedad Susceptibilidad a la deformación permanente Módulo dinámico
Nivel IV Tránsito muy alto	más de 30,000,000	<ul style="list-style-type: none"> Carreteras federales troncales Autopistas de cuota importantes Vialidades suburbanas en ciudades muy grandes 	<ul style="list-style-type: none"> Diseño volumétrico y susceptibilidad a la humedad Susceptibilidad a la deformación permanente Módulo dinámico Fatiga

El Protocolo AMAAC, es más exigente que las propiedades físicas propuestas y requeridas por las normas de la SCT, de acuerdo a las siguientes tablas:

Tabla 2.7 Requisitos de calidad de la fracción gruesa del material pétreo para Mezclas Asfálticas Densas. (AMAAC, 2008)

Característica	Norma	Especificación
Desgaste Los Ángeles, %	ASTM C131	30 máx. (capas estructurales) 25 máx. (capas de rodadura)
Desgaste Microdeval, %	AASHTO TP 58-99	18 máx. (capas estructurales) 15 máx. (capas de rodadura)
Intemperismo acelerado, %	AASHTO T 104	15 máx. para sulfato de sodio 20 máx. para sulfato de magnesio
Caras fracturadas, % (2 caras o más)	ASTM D 5821	90 mín.
Partículas alargadas, %	ASTM D 4791	relación 3 a 1, 15% máx.
Partículas lajeadas, %	ASTM D 4791	relación 3 a 1, 15% máx.
Adherencia con el asfalto, % de cubrimiento	Recomendación AMAAC RA-08/2008	90 mín.

Tabla 2.8 Requisitos de calidad de la fracción fina del material pétreo para Mezclas Asfálticas Densas. (AMAAC, 2008)

Característica	Norma	Especificación
Equivalente de arena, %	ASTM D 2419	50 min. (capas estructurales) 55 min. (capas de rodadura)
Angularidad, %	AASHTO T 304	40 mín.
Azul de metileno, mg/g	Recomendación AMAAC RA-05/2008	15 máx. (capas estructurales) 12 máx. (capas de rodadura)

Tabla 2.9 Requisitos de granulometría para Mezclas Asfálticas Calientes Densas. (AMAAC, 2008)

Tamaño nominal del material pétreo mm (pulg)						
Designación	Abertura mm	37,5 (1-1/2")	25 (1")	19 (3/4")	12,5 (1/2")	9,5 (3/8")
		Porcentaje que pasa				
2"	50	100 - 100	-	-	-	-
1 1/2"	37,5	90 - 100	100 - 100	-	-	-
1"	25	-90	90 - 100	100 - 100	-	-
3/4"	19	-	-90	90 - 100	100 - 100	-
1/2"	12,5	-	-	-90	90 - 100	100 - 100
3/8"	9,5	-	-	-	-90	90 - 100
4	4,75	-	-	-	-	-90
8	2,36	15 - 41	19 - 45	23 - 49	28 - 58	32 - 67
16	1,18	-	-	-	-	-
30	0,60	-	-	-	-	-
50	0,30	-	-	-	-	-
100	0,15	-	-	-	-	-
200	0,075	0 - 6	1 - 7	2 - 8	2 - 10	2 - 10

Con respecto a la Calidad de los Materiales Asfálticos, el protocolo AMAAC, se basa de acuerdo a la norma de la SCT N-CMT-A-05-004/05.

Hablando ya de la Mezcla Asfáltica, el protocolo AMAAC en su primer nivel de diseño, considera este, en base al diseño volumétrico y susceptibilidad a la humedad. La resistencia de las mezclas al daño inducido por humedad debe ser mayor al 80%. Por el diseño volumétrico, el protocolo muestra la siguiente tabla a cuidar:

Tabla 2.10 Parámetros volumétricos requeridos para el Protocolo AMAAC. (AMAAC, 2008)

Nivel de tránsito	Densidad requerida (% de la gravedad específica teórica máxima – Gmm)			Vacíos de agregado mineral mínimo en % – VMA					Vacíos llenos de asfalto en % (VFA)	Relación filler asfalto
	Nivel de compactación giratoria			Tamaño nominal (mm)						
	Nini	Ndis	Nmax	37,5	25	19	12,5	9,5		
I Bajo	≤ 91,5	96	≤ 98	11,0	12,0	13,0	14,0	15,0	70 - 80	0,6 – 1,2
II Medio	≤ 90,5								65 - 78	
III Alto	≤ 90,5								65 - 78	
IV Muy alto	≤ 89								65 - 75	

Para entrar al segundo nivel de diseño, se requiere superar los parámetros de susceptibilidad a la deformación permanente. Para esto, se requiere la Rueda Cargada de Hamburgo. El protocolo exige las mínimas pasadas de la Rueda para la deformación máxima de 10mm para diferentes grados PG del asfalto. Para un asfalto PG 64 o inferior, se requieren mínimo diez mil pasadas, para un PG 70, se requieren quince mil pasadas como mínimo y para un PG 76 o superior, se requieren como mínimo veinte mil pasadas.

El tercer nivel de diseño entra con el Módulo Dinámico. Este se usa únicamente para poder calcular los espesores de la carpeta asfáltica en los nuevos métodos de diseño de pavimentos.

El cuarto nivel de diseño recomienda determinar la resistencia a la fatiga con la viga a flexión de 4 puntos. Se especifican las condiciones para la prueba y dependiendo del tipo de asfalto usado, se explican los ciclos mínimos antes de la falla para diferentes tipos de asfalto. Para un asfalto convencional, mínimo se requieren dos mil ciclos y para un asfalto modificado o con grado PG de 70 o superior, mínimo cinco mil ciclos.

2.6 Fallas en Pavimentos Asfálticos

En el artículo de Guías para Reciclado de Pavimentos, clasifican las fallas en los pavimentos en 5 categorías: (U.S. Department of Transportation, 1997)

2.6.1 Defectos Superficiales

Este tipo de defectos incluye sangrado y desintegración de la carpeta.

Figura. 2.2. El sangrado es cuando asfalto sale a la superficie del pavimento. Se debe al exceso de asfalto en la mezcla y se mide en metros cuadrados.



Figura. 2.2

Figura. 2.3. La desintegración de la carpeta se debe a la pérdida de asfalto y, por consiguiente, desplazamiento de los agregados. Se debe al agua que pasa por la superficie y por la mala compactación de la mezcla. Se mide en metros cuadrados.



Figura. 2.3

2.6.2 Defectos por Deformaciones

Este tipo de defectos incluyen Corrugaciones y Ahuellamiento.

Figura. 2.4. Las corrugaciones son deformaciones formadas lateralmente cruzando al pavimento. Se debe a la falta de estabilidad de la mezcla en lugares donde los vehículos tienen paradas y arranques.



Figura. 2.4

Figura. 2.5. El Ahuellamiento son depresiones longitudinales provocadas por el paso de los vehículos.



Figura. 2.5

2.6.3 Defectos por Agrietamientos

Estos defectos están compuestos por los agrietamientos de cocodrilo, los agrietamientos transversales, agrietamiento a los costados del pavimento, agrietamientos en cuadro, juntas longitudinales, entre otras.

Figura. 2.6. Las Grietas de Cocodrilo son agrietamientos en muchos pedazos interconectados, causada por el exceso de deflexión del pavimento sobre una base no estable.



Figura. 2.6

Figura. 2.7. Las juntas longitudinales se deben principalmente a la mala técnica constructiva. Esta se mide en metros lineales.



Figura. 2.7

Figura. 2.6. Las grietas a los costados del pavimento se forman a causa de una mala construcción de los acotamientos.

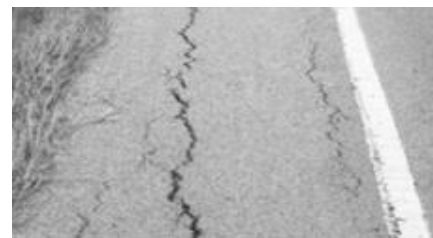


Figura. 2.8

2.6.4 Defectos por Baches

Los baches se pueden generar por la separación de una capa de asfalto de otra a causa de la mala liga entre estos. Otra causa es por la falta de un buen espesor en la carpeta al igual que por la mala implementación de drenajes. También se puede culpar a una base no estable.

2.6.5 Fin de la Vida Útil

Cuando se acaba la vida útil de un pavimento, es cuando termina su vida de servicialidad para la cual fue creada. Cuando esto sucede es porque ya paso su etapa de confiabilidad y el pavimento está expuesto a fatigas y danos. Las propiedades de los materiales ya habrán sobrepasado sus expectativas y podrán provocar fallas en el pavimento.

Cuando se diseña un pavimento, un parámetro importante es la vida útil. Esta se puede considerar de 5, 10 o hasta 20 años, dependiendo de la factibilidad económica. Los dos factores que afectan esta vida útil principalmente son el no respeto de los usuarios con las cargas permitidas y la mala técnica de construcción empleada.

2.7 Mantenimiento y Rehabilitación de Pavimentos Flexibles

Un mantenimiento adecuado del pavimento es vital para la seguridad y confort del público que la usa, y como se dijo anteriormente, es importante para la economía de la nación. Un apropiado mantenimiento resulta significativamente en la vida del pavimento al igual que en el costo de futuras rehabilitaciones que se requieran. La importancia de un adecuado mantenimiento se ha reconocido mundialmente y actualmente se están mejorando las técnicas para una mejor selección del método que se usará para mantener en buen estado el pavimento. El mantenimiento puede ser preventivo o correctivo. A continuación, se muestra la tabla 2.11, donde se muestra la posible selección de diferentes técnicas para la recuperación del pavimento existente dependiendo de su actual estado. (Papagiannakis, 2008)

Tabla 2.11 Métodos de mantenimiento y rehabilitación dependiendo del estado del pavimento

<i>Estado del pavimento</i>	<i>Mantenimiento</i>	<i>Rehabilitación</i>	<i>Reciclado</i>
Fatiga (acocodrilado)		Reconstrucción	Reciclado en frío, Reciclado en caliente
Sangrado	Chip Seal		
Agrietamiento	Slurry Seal, Chip Seal	Recubrimiento grueso	Reciclado en frío
Corrugación	Recubrimiento delgado	Recubrimiento grueso	Reciclado en frío
Agrietamiento en las uniones	Sellado		
Agregado pulido	Chip Seal, Slurry Seal		
Baches	Bacheo, Bacheo profundo		Reciclado en frío
Agrietamiento por temperatura	Recubrimiento delgado		Reciclado en caliente en sitio o en planta
Desintegración de la carpeta	Chip Seal, Slurry Seal, Recubrimiento delgado	Recubrimiento grueso	Reciclado en caliente en sitio

2.7.1 Mantenimiento Preventivo

Slurry Seal



Figura. 2.7 Colocación de Slurry Seal.

Este tratamiento consiste en usar una mezcla de agregados finos y polvo mineral embonadas junto a una emulsión asfáltica, con algún aditivo o modificador para mejorarla. Este tipo de sellado es efectivo para sellar agrietamientos menores, reduciendo la desintegración de la superficie del pavimento existente y mejorando la fricción del pavimento.

Este tipo de mantenimiento, solo requiere un periodo de curado de 2 a 6 horas. Para producir el Slurry Seal se requiere una máquina Slurry y se aplica al pavimento con un enjugador. Se requiere un compactador neumático para este sellado.

Las ventajas de este método es que trae consigo una superficie tersa para el tráfico, es resistente al agua y evita el acuaplaneo, se puede dar una corrección menor al perfil y al bombeo, incrementa la fricción, reduce el ruido y protege la base existente.

Chip Seal



Figura. 2.8 Colocación de Chip Seal.

Este tipo de tratamiento consiste en colocar una emulsión asfáltica de rompimiento rápido sobre el pavimento o base existente, seguido de una capa de agregados bien graduados. Este método es usado, gracias a que es un mantenimiento económico, aunque no dura mucho. En algunas partes, especialmente sobre avenidas rurales, es usado como una capa para completar el pavimento, sin usar una carpeta asfáltica o de concreto hidráulico en ella.

Para llevar a cabo este tratamiento, se requiere una petrolizadora que deje una capa de emulsión asfáltica constante y un tirador de agregado a lo largo de la emulsión. Después se ocupa un compactador de rodillo liso y después se barre el sobrante del agregado, ya que puede dañar los parabrisas de los vehículos.

Al igual que el Slurry Seal, este método trae consigo una superficie tersa para el tráfico, es resistente al agua y evita el acuaplaneo, incrementa la fricción y protege la base existente.

Recubrimiento delgado de mezcla caliente

Se le conoce como micro carpetas y generalmente tienen un grosor de 2.5 centímetros. Son mezclas con una granulometría quebrada y usan modificantes para mejorar sus propiedades. Se colocan como una mezcla caliente normal, solo que no es necesario compactarla para conservar su granulometría semi-abierta.

2.7.2 Mantenimiento Correctivo

Sellado de Grietas



Figura. 2.9 Sellado de Grietas

Es el poner materiales especiales dentro de grietas en el pavimento para prevenir la entrada de agua en la Base y Sub-base. El material usado para el sellado tiene que soportar temperatura y tráfico y ser aplicado de manera correcta sobre una superficie limpia y seca.

Bacheo y Bacheo Profundo



Figura. 2.10 Caja para bacheo

El bacheo debe ser realizado con una mezcla caliente de buena calidad. Para una mejor calidad de este bacheo, se recomienda usar cajas rectas (rectángulos) donde no existan piezas flojas, con una superficie limpia, luego se incorpora la mezcla a usar y se compacta con las llantas de algún vehículo.

Si el bache es profundo, se deberá sustituir el material usado en la Base y Sub-base con una de mejor calidad y estos deberán ser compactados con algún equipo mecánico. Cuando se esté a nivel de carpeta, se realizan los pasos mencionados para un bacheo normal.

2.7.3 Reciclado de Pavimentos Flexibles

Cuando una carpeta se encuentra deteriorada, esta se desecha. Este desecho, aunque se encuentre envejecido, conserva una gran parte de sus propiedades y al reutilizarlo se puede tener un ahorro de cemento asfáltico, ya que solo se requerirá de un 1% a un 3% adicional y el usar un nuevo concreto asfáltico, se puede requerir hasta un 6%. A este dato, si se le suma el costo de transporte, la energía necesaria para la producción y el costo del material virgen, tanto agregado como cemento asfáltico, hacen que el ahorro económico sea importante con respecto al de construcción convencional de pavimentos. (Fonseca, 2009)

Existen equipos que buscan reciclar pavimentos asfálticos, cada uno con diferentes tipos de configuraciones, donde buscan ser las más económicas posibles en el proceso de producción, así como las más amigables con el medio ambiente. Estos tipos de equipos pueden ser divididos por donde es que se lleva a cabo la producción, si en sitio o en la planta, así como si el tipo de mezcla será frío o caliente. Diferentes variables existen para tomar estas decisiones:

- Distancia existe entre el sitio de los trabajos y una posible planta de reciclado.
- Características del CA Recuperado y Agregados pétreos en el RAP.
- Posibles afectaciones como materia orgánica que exista en el RAP.
- Los programas de construcción y planes de infraestructura gubernamentales.
- Capacidad de empresas y dependencias de evaluar el RAP y poder almacenarlo.
- Niveles de diseño requeridos para una carretera en particular.

Diferentes plantas con diferentes características utilizan RAP en sus mezclas asfálticas nuevas. Algunos ejemplos son los siguientes:

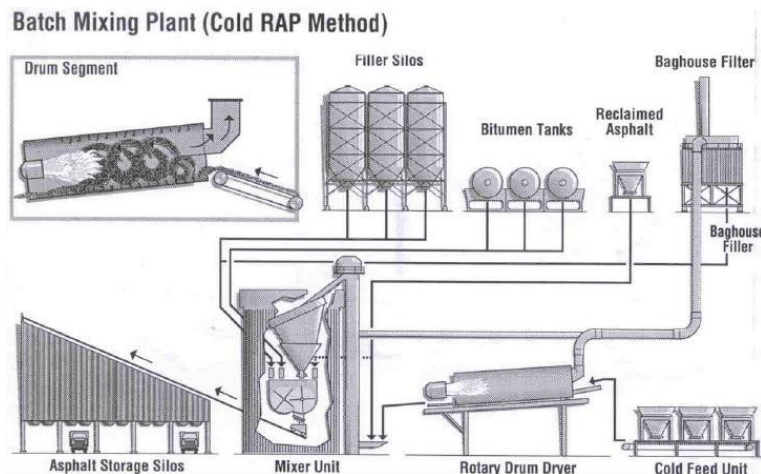


Figura. 2.11 Planta de mezclado discontinua de RAP en frío, con capacidad de mezclar RAP de 10% a 40%. (European Asphalt Pavement Association, 2005)

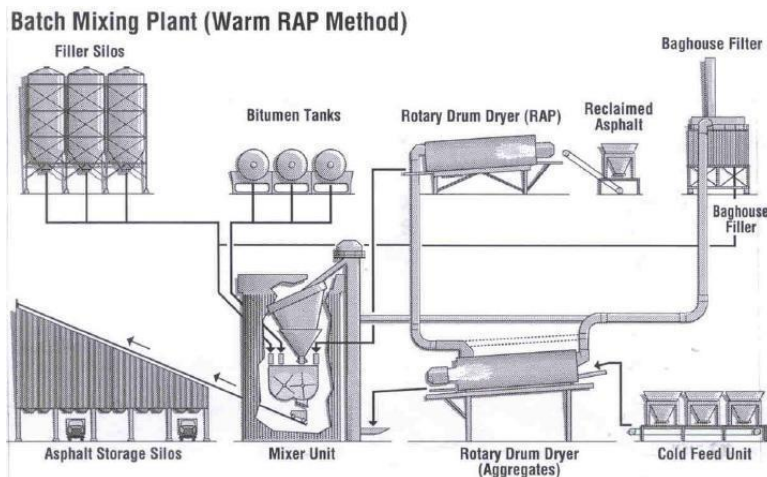


Figura. 2.12 Planta de mezclado discontinua de RAP en tibio. Puede mezclar entre 30% y 80% de RAP. (European Asphalt Pavement Association, 2005)

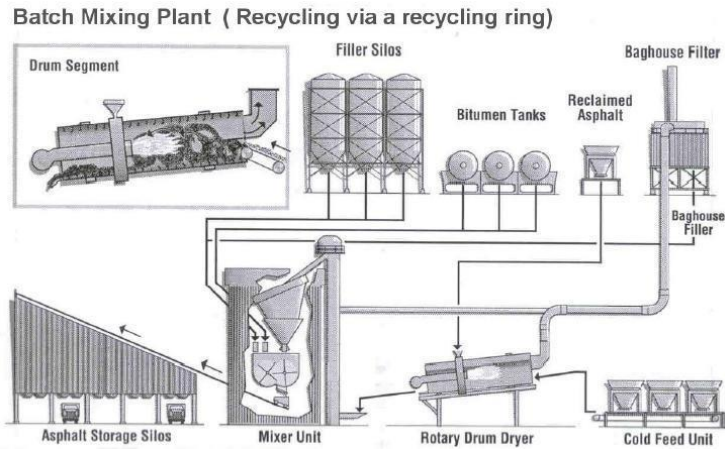


Figura. 2.13 Planta de mezclado discontinua de RAP en caliente con anillo en tambor que incorpora RAP hasta un 35%. (European Asphalt Pavement Association, 2005)

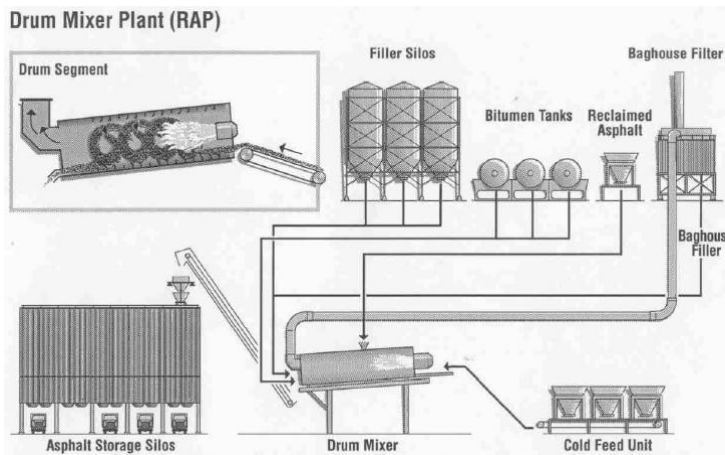


Figura. 2.14 Planta de mezclado continua de RAP en caliente con flujo paralelo. (European Asphalt Pavement Association, 2005)

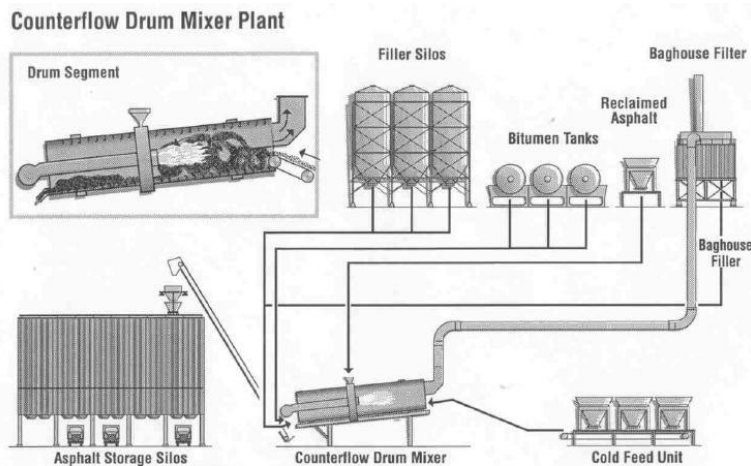


Figura. 2.15 Planta de mezclado continua de RAP en caliente con contraflujo. (European Asphalt Pavement Association, 2005)

Double Barrel Drum Mixer

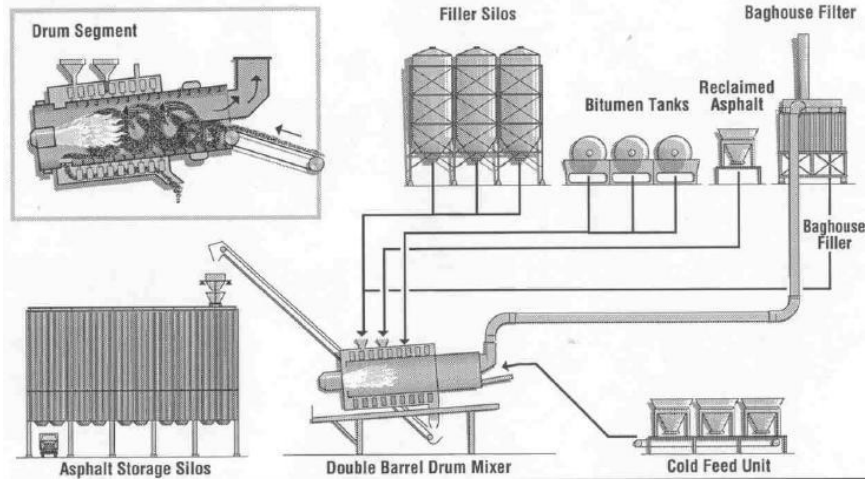


Figura. 2.16 Planta de mezclado continua de RAP en caliente con doble-tambor. (European Asphalt Pavement Association, 2005)

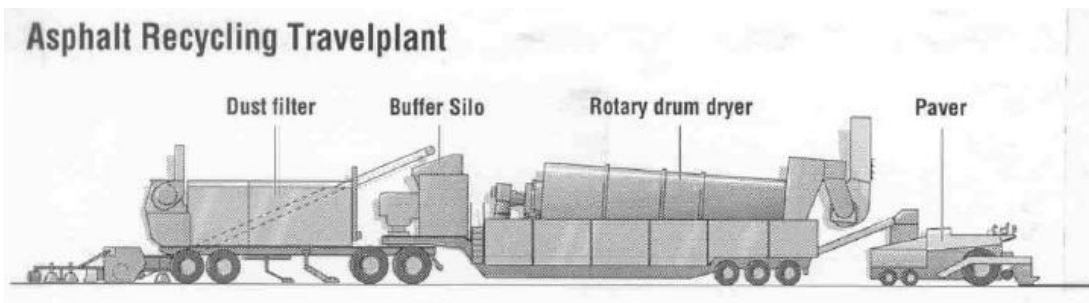


Figura. 2.17 Planta móvil para reciclaje de mezcla asfáltica en caliente. (European Asphalt Pavement Association, 2005)

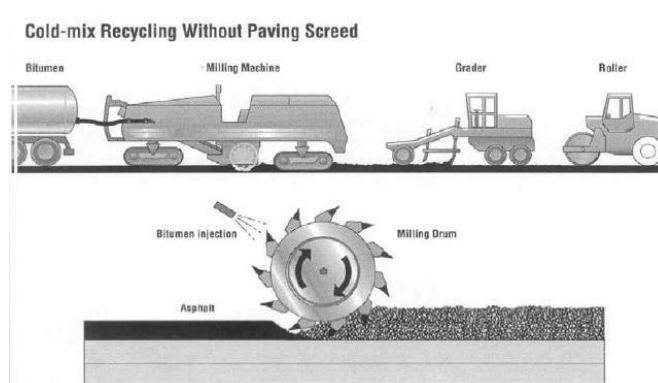


Figura. 2.18 Tren móvil de reciclaje de mezcla asfáltica en frío. (European Asphalt Pavement Association, 2005)

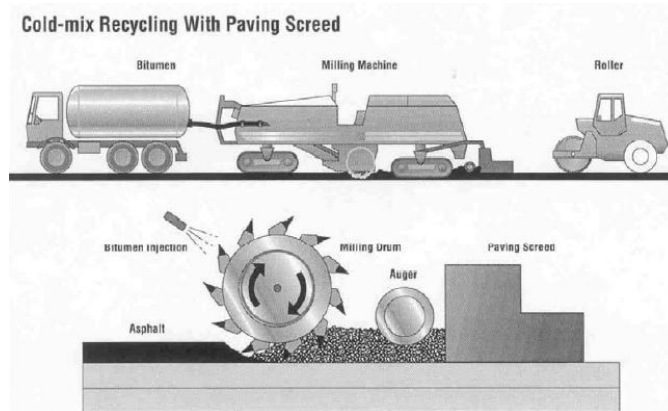
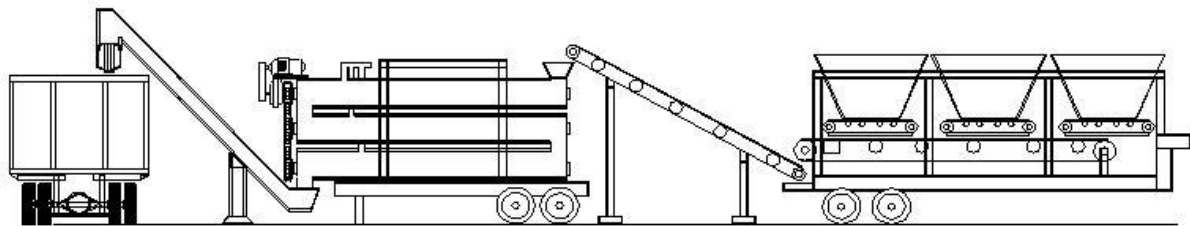


Figura. 2.19 Tren móvil de reciclaje de mezcla asfáltica en frío extendedora de carpeta. (European Asphalt Pavement Association, 2005)

En México, la empresa PETROTEKNO, S.A. de C.V. pretende secar el material RAP hasta elevarlo a una temperatura adecuada para su manejo, tendido y compactación. Es un proceso muy sencillo que tomará material RAP y mejorará sus características mecánicas mediante la adición de material pétreo virgen, que permita cumplir con una granulometría de diseño; la adición de cemento asfáltico para reponer le contenido faltante, y podrá adicionar rejuvenecedores para mejorar la calidad del cemento asfáltico envejecido.



EQUIPO PORTABLE DE RECICLADO DE RAP DE 100 TPH

Figura. 2.20 Tren móvil de reciclaje de mezcla asfáltica en caliente.

El tren móvil cuenta con tolvas para dosificar el material RAP y el material pétreo virgen, los cuales juntos pasan por un proceso de calentamiento, mezclado y adición de cemento asfáltico y/o rejuvenecedor. Una de la característica funcional de este equipo es que tiene un consumo de energía muy bajo para lograr las temperaturas adecuadas de la mezcla asfáltica, adicionalmente, la emisión de humos negros y gases en la fabricación de la mezcla asfáltica es baja, pudiéndose emplear en zonas urbanas donde exista estricto control de emisiones de gases.

Capítulo 3. Metodología de Investigación

La metodología de Investigación que se empleó en este estudio es de carácter experimental con un componente importante bibliográfico que definió el estado del arte del tema.

Los materiales utilizados para este estudio son de canteras de Nuevo León, así como el RAP obtenido. El CA convencional AC-20 y modificado PG-82 fueron proporcionadas por empresas de la región y los rejuvenecedores utilizados por la empresa Petrotekno. Nota: Los rejuvenecedores utilizados son de Secreto Industrial.

En combinación con las normas de diseño de la SCT, se utilizó el Protocolo AMAAC para comprobar su factibilidad técnica hasta llegar al tercer nivel de diseño. Las pruebas recomendadas para esto son las siguientes:

- 1) Propiedades Volumétricas y Estabilidad Marshall
- 2) Susceptibilidad a la Humedad y Tensión Indirecta
- 3) Deformación Permanente con la Rueda de Hamburgo
- 4) Módulos Dinámicos de las Mezclas Asfálticas (con apoyo de la UANL)

Para este experimento se utilizaron 4 diferentes dosificaciones de RAP, uno con 40%, 60%, 80% y 100%. En cada una de estas 4 diferentes proporciones de uso de RAP, se realizaron 6 diferentes casos donde se agregaba material de aporte:

- 1) Uso de AC-20 en la mezcla
- 2) Uso de AC-20 con un Rejuvenecedor Convencional en la mezcla
- 3) Uso de AC-20 con un Rejuvenecedor Modificado en la mezcla
- 4) Uso de PG-82 en la mezcla
- 5) Uso de PG-82 con un Rejuvenecedor Convencional en la mezcla
- 6) Uso de PG-82 con un Rejuvenecedor Modificado en la mezcla

Se realizaron 15 probetas Marshall por cada uno de los casos propuestos. Estos casos son con las diferentes dosificaciones de RAP y cada uno de los 6 casos descritos arriba, dando un total de 360 probetas para este estudio.



Figura. 3.1 Probetas realizadas para el estudio.

Los pasos a seguir para este experimento son los siguientes:

Paso 1)

Separar el CA Recuperado de su agregado pétreo contenido en el RAP, esto, para poder evaluar la granulometría existente y saber aproximadamente que dosificación será necesaria de materiales vírgenes, para que se pueda evaluar los diferentes en igualdad de circunstancias.

Paso 2)

Realizar las dosificaciones a utilizar para este experimento de acuerdo a los resultados obtenidos en el paso 1. Buscar el contenido de Cemento Asfáltico óptimo para la mezcla, así como su granulometría de aporte y el contenido de Rejuvenecedor a utilizar.

Paso 3)

Realizar las 360 probetas Marshall y etiquetarlas de manera correcta.

Paso 4)

Hacer los estudios de Densidades de la mezcla mediante el método de Especímenes Saturados Superficialmente Secos (ASTM D-2726). Obtener la Estabilidad Marshall junto con su flujo y Módulo. Encontrar la Tensión indirecta seca y húmeda para evaluar su susceptibilidad (RA-04/2008). Someter las probetas a deformaciones permanentes con la rueda cargada de Hamburgo (RA-01/2008). Finalmente obtener los módulos dinámicos (AASHTO TP 62).



Figura. 3.2 Obtención de Peso de probetas sumergidas.

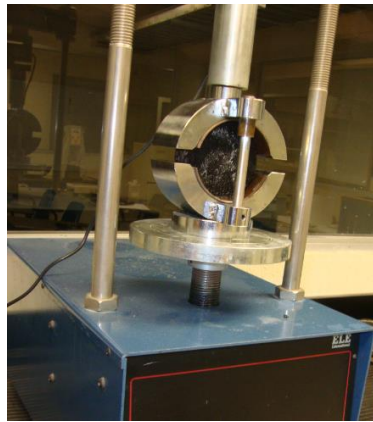


Figura. 3.3 Estabilidades Marshall



Figura. 3.4 Probetas sumergidas a la Rueda Cargada de Hamburgo.

Paso 5)

Con todos los resultados obtenidos, realizar su análisis y encontrar información relevante para ver su factibilidad de uso en México.

Paso 6)

Realizar recomendaciones generales y conclusiones

Capítulo 4. Obtención y Análisis de Información

4.1 Características del RAP a utilizar

De acuerdo a la Metodología de Investigación, el primer paso es separar el RAP de su agregado pétreo y evaluarlos. Revisar la granulometría existente y calidad del CA Recuperado. Realizar una granulometría similar que cumpla con las normas SCT con los aportes de agregados que se requieran (excepto en el caso de RAP al 100%).

Se hizo la separación del CA del RAP mediante ASTM D2172-05 y posteriormente separar el solvente del CA con el método Abson ASTM D1856-95A. Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

4.1.1 Granulometría Existente

Se hizo la separación por mallas de diferentes tamaños para obtener la granulometría de 2kg de material pétreo recuperado del RAP obtenido. Se midió cada uno de los contenidos en cada malla en gramos (g) y se obtuvo el porcentaje (%). Se obtuvo lo siguiente en promedio:

Tabla 4.1. Granulometría de Agregado Recuperado

Malla	Material (g)	% Mat	% q Pasa
1 "	0	0	100.00%
3 / 4 "	13.6	0.70%	99.30%
1 / 2 "	92.3	4.75%	94.55%
3 / 8 "	172.5	8.88%	85.67%
1 / 4 "	230.2	11.85%	73.83%
4	114.2	5.88%	67.95%
10	475.1	24.45%	43.50%
20	337.7	17.38%	26.13%
40	192.4	9.90%	16.22%
60	97.4	5.01%	11.21%
100	75.6	3.89%	7.32%
200	66.1	3.40%	3.92%
Finos	76.2	3.92%	0.00%
	1943.3		

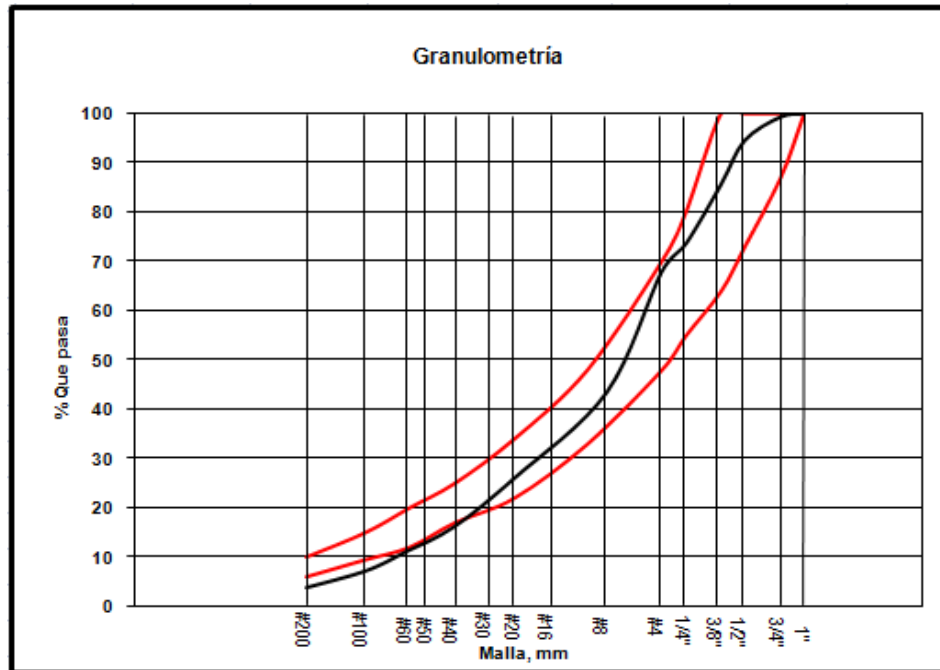


Figura. 4.1 Granulometría de Agregado Recuperado

4.1.1 Granulometría Propuesta Aproximada

Se busca lograr como Meta, una granulometría en base a la norma SCT con tamaño nominal de 1/2" de graduación gruesa. Con los datos obtenidos de granulometría recuperada, se propone intentar lograr la siguiente granulometría para después calcular los aportes:

Tabla 4.2. Granulometría de Agregado Propuesta para todos los casos

Malla	Total (g)	% Mat	% q Pasa
1 "	0.00	0.00%	100.00%
3 / 4 "	0.00	0.00%	100.00%
1 / 2 "	48.00	4.00%	96.00%
3 / 8 "	156.00	13.00%	83.00%
1 / 4 "	168.00	14.00%	69.00%
4	132.00	11.00%	58.00%
10	240.00	20.00%	38.00%
20	168.00	14.00%	24.00%
40	96.00	8.00%	16.00%
60	48.00	4.00%	12.00%
100	36.00	3.00%	9.00%
200	36.00	3.00%	6.00%
Finos	72.00	6.00%	0.00%

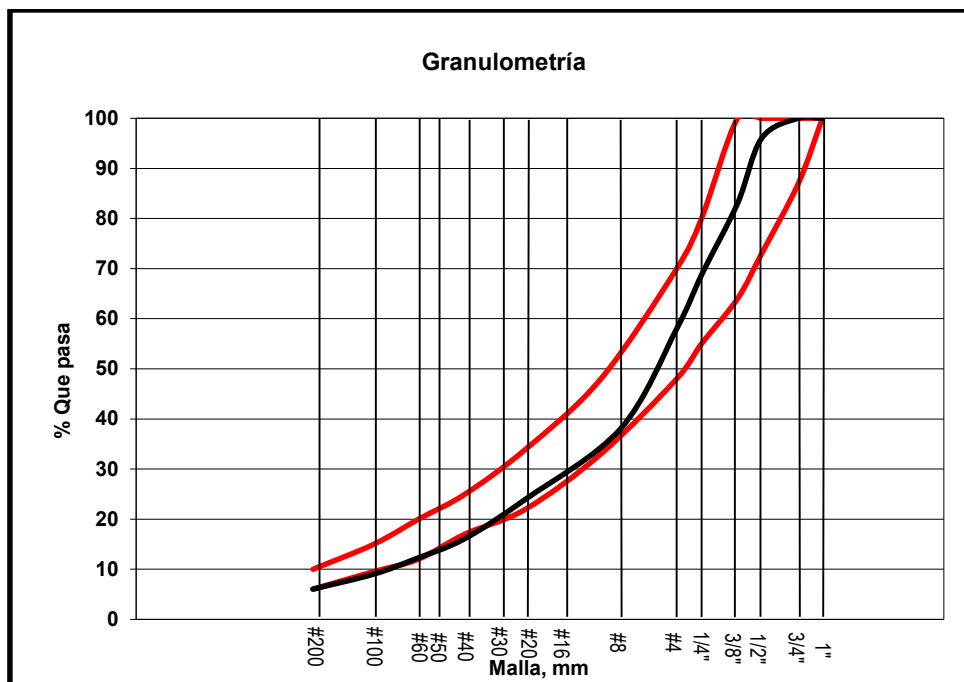


Figura. 4.2 Granulometría de Agregado Propuesta para todos los casos

En base a la granulometría propuesta para todos los casos y la granulometría promedio recuperada, se fijan los aportes para los diferentes casos. En algunos casos (los subrayados en amarillo), no se logra obtener el gramaje exacto en alguno de los tamices, pero se realiza la corrección con el siguiente tamaño.

Tabla 4.3. Aporte requerido para 40% de RAP

Malla	Viejo (g)	Total (g)	Nuevo Req. (g)	Nuv. Acum. (g)
1 "	0.00	0.00	0.00	0.00
3 / 4 "	3.37	0.00	-3.37	0.00
1 / 2 "	22.88	48.00	25.12	21.75
3 / 8 "	42.77	156.00	113.23	134.98
1 / 4 "	57.07	168.00	110.93	245.91
4	28.31	132.00	103.69	349.60
10	117.78	240.00	122.22	471.82
20	83.72	168.00	84.28	556.10
40	47.70	96.00	48.30	604.40
60	24.15	48.00	23.85	628.25
100	18.74	36.00	17.26	645.51
200	16.39	36.00	19.61	665.12
Finos	18.89	72.00	53.11	718.23
	481.77	1200.00	718.23	

Tabla 4.4. Aporte requerido para 60% de RAP

Malla	Viejo (g)	Total (g)	Nuevo Req. (g)	Nuv. Acum. (g)
1 "	0.00	0.00	0.00	0.00
3 / 4 "	5.06	0.00	-5.06	0.00
1 / 2 "	34.32	48.00	13.68	8.62
3 / 8 "	64.15	156.00	91.85	100.47
1 / 4 "	85.60	168.00	82.40	182.87
4	42.47	132.00	89.53	272.40
10	176.67	240.00	63.33	335.73
20	125.58	168.00	42.42	378.15
40	71.55	96.00	24.45	402.60
60	36.22	48.00	11.78	414.38
100	28.11	36.00	7.89	422.27
200	24.58	36.00	11.42	433.69
Finos	28.34	72.00	43.66	477.35
	722.65	1200.00	477.35	

Tabla 4.5. Aporte requerido para 80% de RAP

Malla	Viejo (g)	Total (g)	Nuevo Req. (g)	Nuv. Acum. (g)
1 "	0.00	0.00	0.00	0.00
3 / 4 "	6.74	0.00	-6.74	0.00
1 / 2 "	45.76	48.00	2.24	0.00
3 / 8 "	85.53	156.00	70.47	65.96
1 / 4 "	114.14	168.00	53.86	119.83
4	56.62	132.00	75.38	195.20
10	235.56	240.00	4.44	199.64
20	167.44	168.00	0.56	200.20
40	95.40	96.00	0.60	200.80
60	48.29	48.00	-0.29	200.80
100	37.48	36.00	-1.48	200.80
200	32.77	36.00	3.23	202.25
Finos	37.78	72.00	34.22	236.47
	963.53	1200.00	236.47	

Como se puede observar, entre mayor sea la cantidad de RAP en la mezcla, es más difícil lograr garantizar la granulometría deseada para el proyecto. Esto provoca que sea más difícil poder cumplir con la norma en algunos casos. Entre mayor RAP, mayor variabilidad de granulometría y de contenido de CA recuperado.

4.2 Características de los Cementos Asfálticos a utilizar

Se realizó la caracterización de los Asfaltos a utilizar, incluyendo el modificado, y se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 4.6. Caracterización de Cementos Asfálticos a utilizar

DESIGNACION	PROPIEDADES DEL CEMENTO ASFALTICO	CA RECUPERADO	AC-20	PG 82-22
M-MMP-4-05-006	Penetración a 25°C, 100g, 5s. (10 ⁻¹ mm)	29.0	76.0	41.0
M-MMP-4-05-009	Punto de Reblandecimiento Anillo % & Bola (°C)	56.0	46.0	78.5
M-MMP-4-05-010	Viscosidad rotacional Brookfield, 135°C, (Pa seg)	1.26	0.51	> 3.0
M-MMP-4-05-010	Viscosidad rotacional Brookfield, 165°C, (Pa seg)	0.42	0.12	0.73
M-MMP-4-05-024	Recuperación elástica por torsión, (%)	4.0	7.0	69.0

Como se puede observar, la penetración a 25°C del asfalto recuperado es menor que el PG-82 y AC-20. Esto se debe a lo rígido que obtuvo el Cemento Asfáltico Envejecido por las condiciones ambientales. Esto no se significa que es mejor, ya que su recuperación elástica por torsión es mucho menor que los otros dos asfaltos.

Con respecto a Punto de Reblandecimiento y Viscosidades, el CA Recuperado se encuentra entre el AC-20 y PG-82. Es por esto, que el CA Recuperado, puede ser usado para mezclas nuevas en caliente, siempre y cuando se logre mejorar con algún rejuvenecedor, y que con este se recuperen las propiedades elásticas.

Se realizó un diseño Marshall con la granulometría anterior y se obtuvo que el porcentaje requerido de Cemento Asfáltico virgen deberá ser siempre de 4.55% para todos los casos, esto para estar en igualdad de condiciones todas las muestras. Esto es un cemento asfáltico total de 54.6 gramos por cada probeta entre CA Recuperado y virgen AC-20 o PG-82.

4.3 Dosificaciones a utilizar para cada uno de los casos

Con 4 diferentes aportaciones de RAP y 6 casos diferentes a evaluar en cada uno de estos, se siguió las siguientes tablas para realizar cada una de las probetas Marshall. La dosificación recomendada del recuperador fue propuesta por el propietario del Secreto Industrial.

Tabla 4.7. Dosificación en gramos con el 40% de RAP en los 6 diferentes casos

RAP al 40%						
#	Tipo	R A P	Pétreo N	Asfalto N	Rejuven.	Total
1	AC-20	501.84	718.23	34.53	0.00	1254.60
2	AC-20+rejuv	501.84	715.83	34.42	2.51	1254.60
3	AC-20+rejuv mod.	501.84	715.83	34.42	2.51	1254.60
4	PG-82	501.84	718.23	34.53	0.00	1254.60
5	PG-82+rejuv	501.84	715.83	34.42	2.51	1254.60
6	PG-82+rejuv mod.	501.84	715.83	34.42	2.51	1254.60

Tabla 4.8. Dosificación en gramos con el 60% de RAP en los 6 diferentes casos

RAP al 60%						
#	Tipo	R A P	Pétreo N	Asfalto N	Rejuven.	Total
1	AC-20	752.76	477.35	24.49	0.00	1254.60
2	AC-20+rejuv	752.76	473.75	24.33	3.76	1254.60
3	AC-20+rejuv mod.	752.76	473.75	24.33	3.76	1254.60
4	PG-82	752.76	477.35	24.49	0.00	1254.60
5	PG-82+rejuv	752.76	473.75	24.33	3.76	1254.60
6	PG-82+rejuv mod.	752.76	473.75	24.33	3.76	1254.60

Tabla 4.9. Dosificación en gramos con el 80% de RAP en los 6 diferentes casos

RAP al 80%						
#	Tipo	R A P	Pétreo N	Asfalto N	Rejuven.	Total
1	AC-20	1003.68	236.47	14.45	0.00	1254.60
2	AC-20+rejuv	1003.68	231.67	14.23	5.02	1254.60
3	AC-20+rejuv mod.	1003.68	231.67	14.23	5.02	1254.60
4	PG-82	1003.68	236.47	14.45	0.00	1254.60
5	PG-82+rejuv	1003.68	231.67	14.23	5.02	1254.60
6	PG-82+rejuv mod.	1003.68	231.67	14.23	5.02	1254.60

Tabla 4.10. Dosificación en gramos con el 100% de RAP en los 6 diferentes casos

RAP al 100%						
#	Tipo	R A P	Pétreo N	Asfalto N	Rejuven.	Total
1	AC-20	1250.00	0.00	4.60	0.00	1254.60
2	AC-20+rejuv	1243.80	0.00	4.58	6.22	1254.60
3	AC-20+rejuv mod.	1243.80	0.00	4.58	6.22	1254.60
4	PG-82	1250.00	0.00	4.60	0.00	1254.60
5	PG-82+rejuv	1243.80	0.00	4.58	6.22	1254.60
6	PG-82+rejuv mod.	1243.80	0.00	4.58	6.22	1254.60

4.4 Propiedades Volumétricas de las diferentes Mezclas

Primero se obtuvieron las Densidades Aparentes de las probetas en promedio:

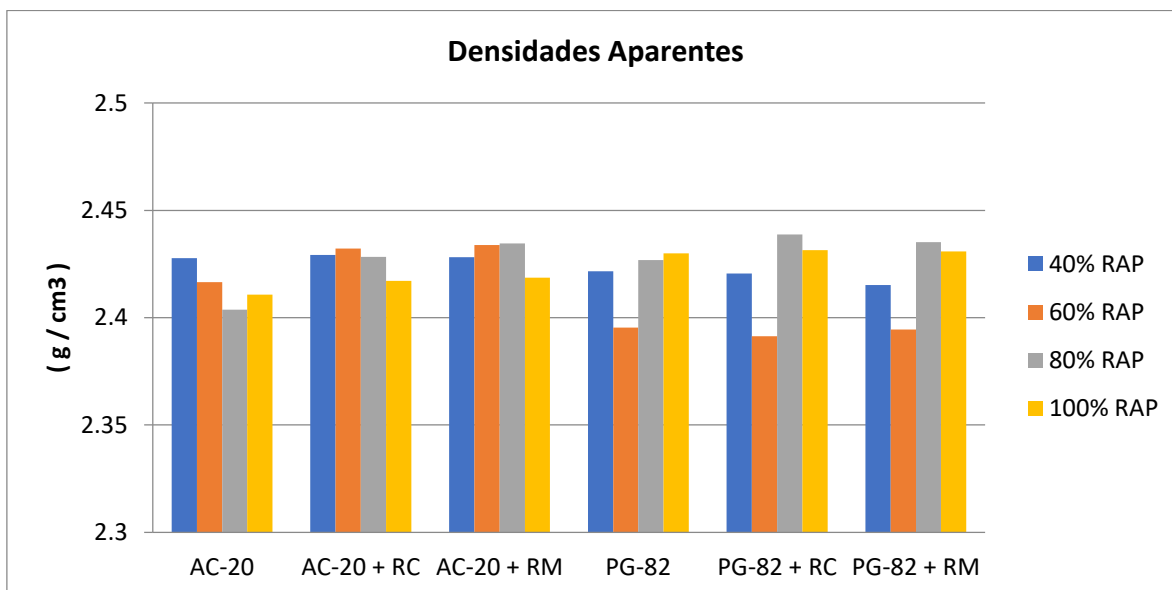


Figura. 4.3 Densidades Aparentes promedio para los diferentes Casos

Por el método de Picnómetro de Vacío, se encontró las Densidades Máximas promedio:

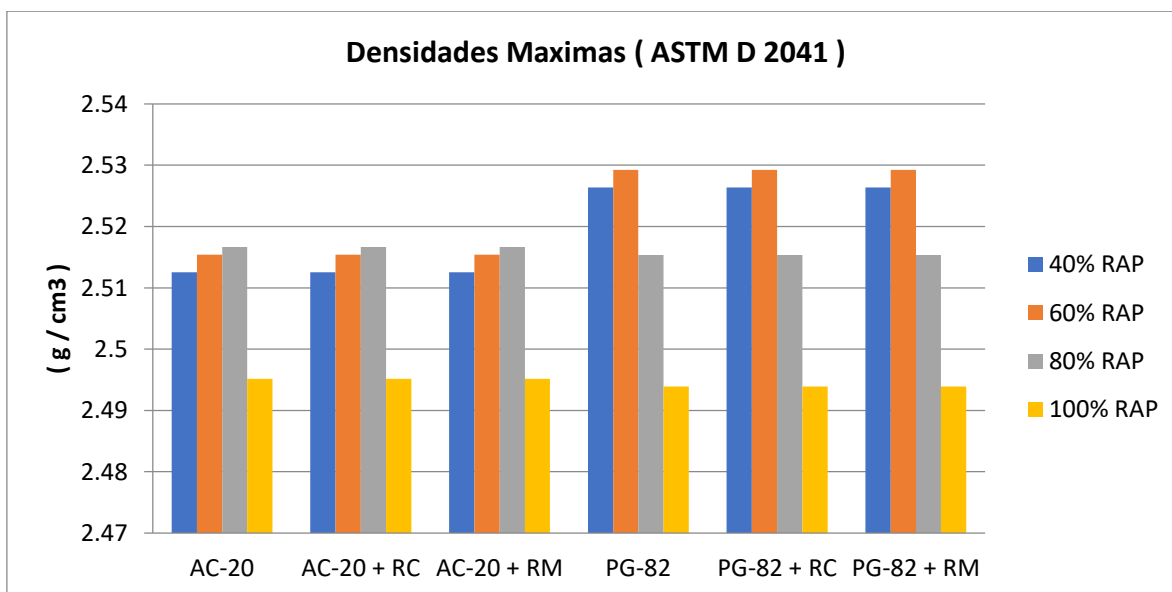


Figura. 4.4 Densidades Máximas promedio para los diferentes Casos

Posteriormente, se buscó el porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica compacta (VA), utilizando métodos de laboratorio y teóricos para obtener densidad máxima y específica.

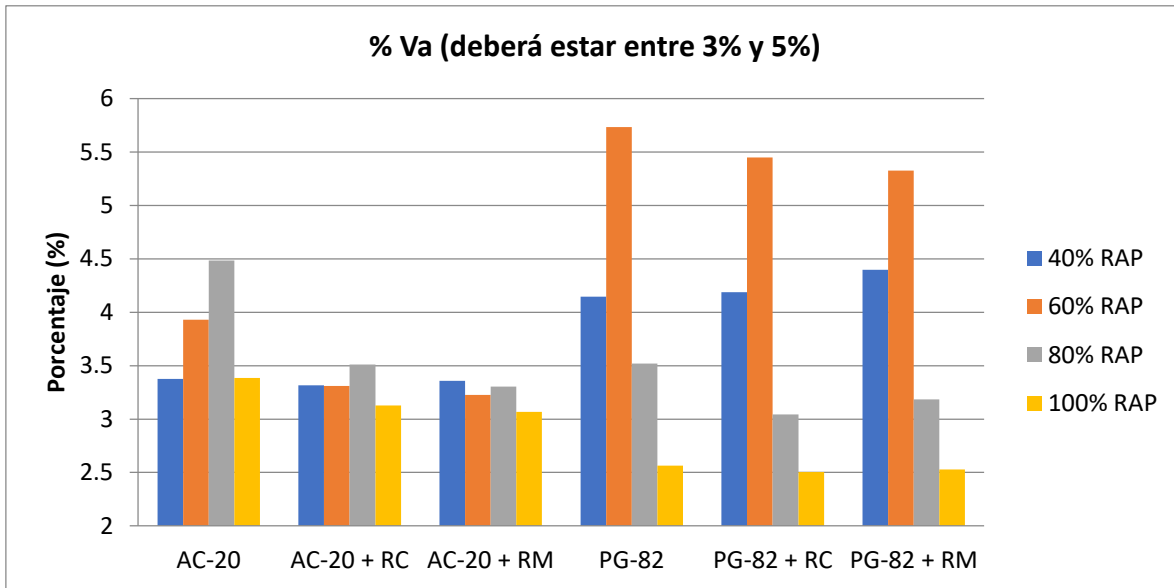


Figura. 4.5 Porcentaje de Vacíos en la Mezcla para los diferentes Casos

De acuerdo a la norma N-CMT-4-05-003/16, se requiere que todos los vacíos de la mezcla en un diseño Marshall estén entre 3% y 5%. Solo en los casos de 60% y 100% de RAP con PG82 no cumplen con este criterio. Todas las demás mezclas si cumplen y pueden ser utilizadas para mezclas asfálticas en caliente. Estos resultados se pueden deber a que las granulometrías y contenidos de CA en el RAP no eran constantes y existe variabilidad.

Posteriormente, se realizaron las mediciones para el Porcentaje de Vacíos en el agregado mineral y Porcentaje de Vacíos llenos de Asfalto de acuerdo al Protocolo AMAAC.

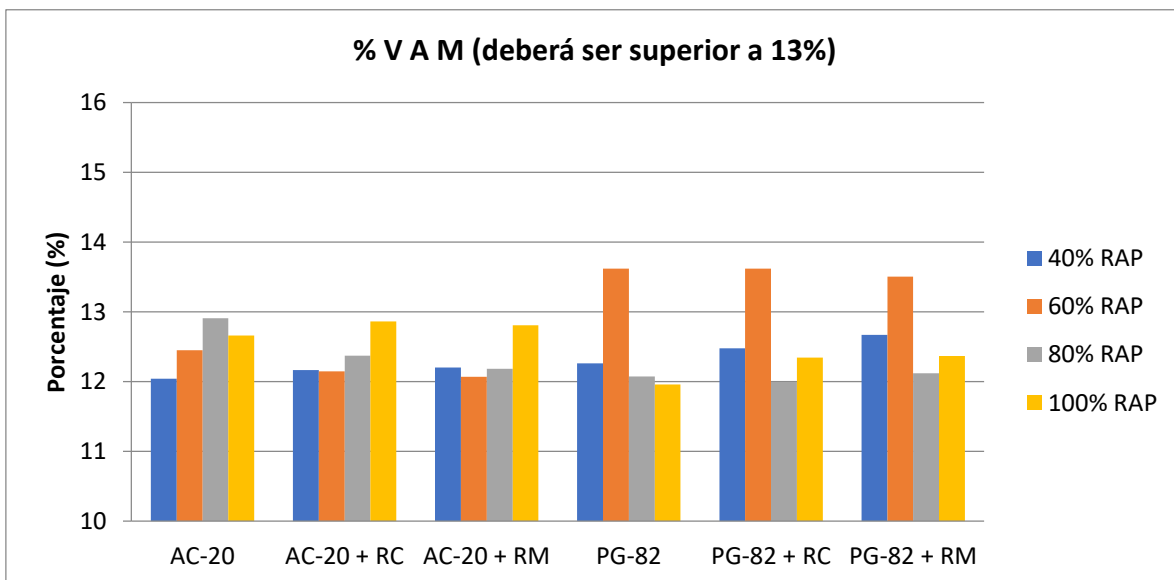


Figura. 4.6 Porcentaje de Vacíos en el Agregado Mineral para los diferentes Casos

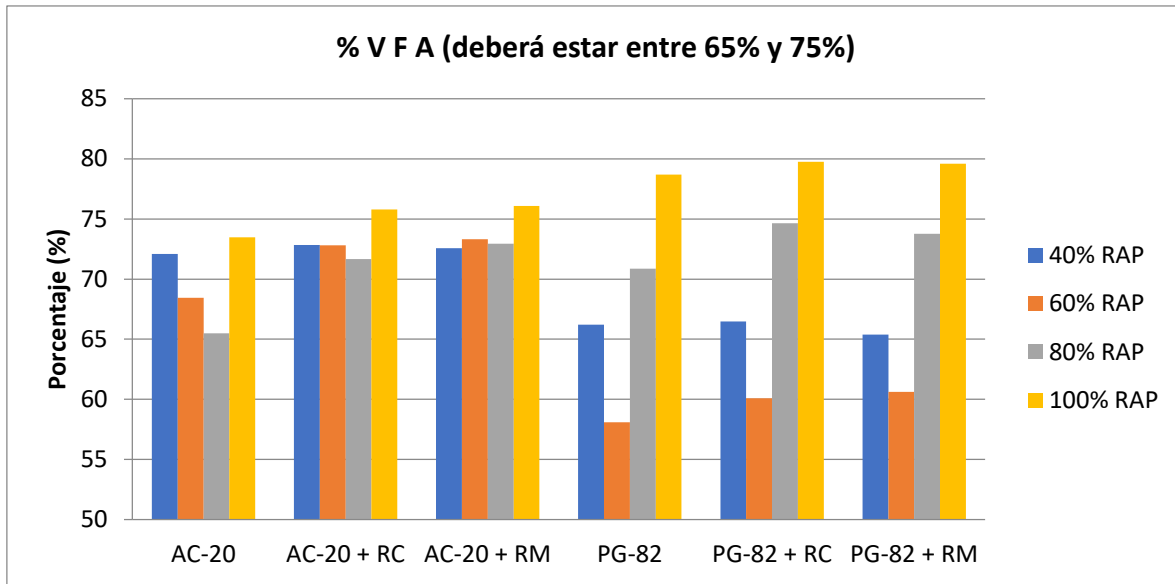


Figura. 4.6 Porcentaje de Vacíos llenos de Asfalto para los diferentes Casos

Para los Vacíos en el Agregado Mineral, las únicas mezclas que cumplen con el criterio de la AMAAC, son las que contienen 60% de RAP y asfalto PG-82. Con respecto a los Vacíos llenos de Asfalto, en todos los casos donde se utiliza AC-20 se encuentra dentro del rango. Para los casos de PG-82, solo cumplen los de 40% y 80% de RAP. Esto puede deberse a que en RAP no es homogéneo y existen dosificaciones que pudieron ser afectadas con materiales más finos o más gruesos con diferentes porcentajes de CA recuperado.

4.4 Evaluación de Propiedades del método Marshall

Para este tema, se siguieron las normas mexicanas usadas por la SCT N-CMT-05-003/16, ya que el Protocolo AMAAC no contempla esta metodología. Para mezclas densas, el valor mínimo de estabilidad debe ser de 800 kg. Para el flujo Marshall, en todas las mezclas deberá de ser de entre 2 y 3.5 mm.

Así también, se evalúa el Módulo Marshall que es una relación entre la Estabilidad expresada en kN y su Flujo expresado en mm. Este valor sirve para entender que tan rígida es la mezcla y que puede llegar a provocar fatiga si este es mayor a 8 kN/mm.

A continuación, se encuentran las gráficas obtenidas:

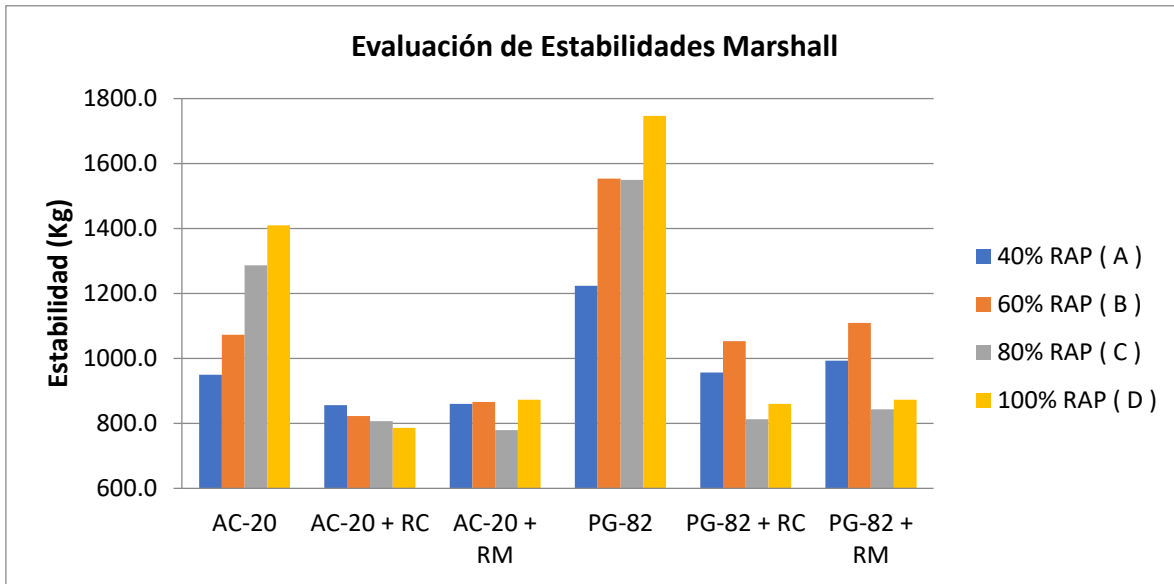


Figura. 4.7 Estabilidades Marshall para los diferentes casos (Anexo 1)

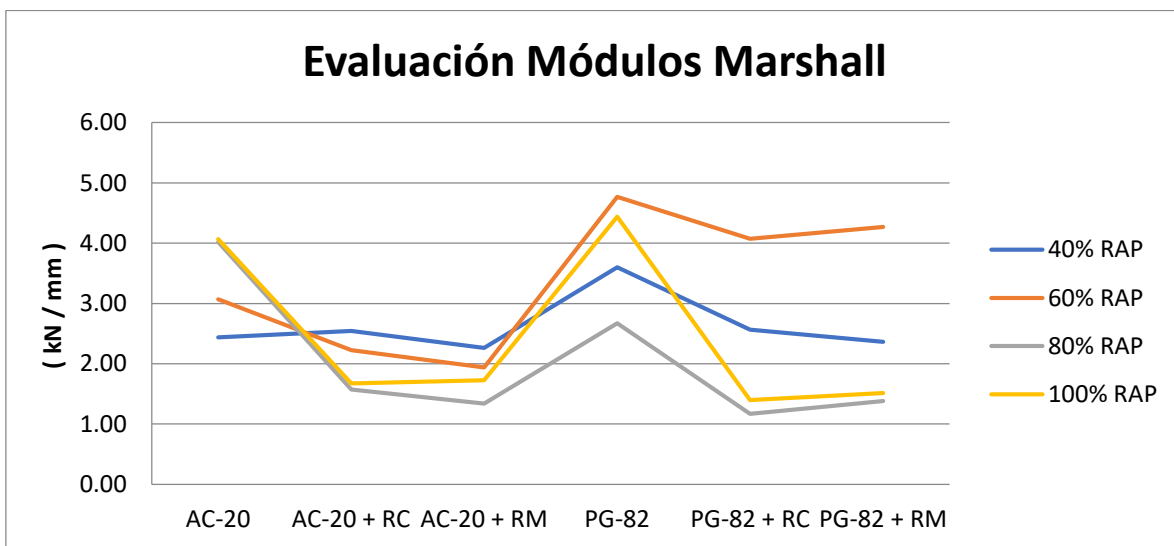


Figura. 4.8 Módulos Marshall para los diferentes casos (Anexo 2)

En todos los casos, las Estabilidades Marshall son superiores a los 800 kg. En los casos donde no se utiliza ningún tipo de rejuvenecedor, se puede observar que las estabilidades son mayores, esto ya que el RAP provoca que la mezcla sea rígida. Así también, en los casos donde no se utiliza los rejuvenecedores, se puede observar que a medida que aumenta el contenido de RAP en la mezcla, aumenta la estabilidad provocando una mezcla muy rígida.

Caso contrario con el uso de rejuvenecedores, ya que, entre mayor contenido de RAP, por el porcentaje utilizado de rejuvenecedor provoca que la mezcla sea menos rígida. No se observa un cambio importante en el uso de Rejuvenecedor convencional con el modificado.

Es importante mencionar que el RAP no era homogéneo y esto puede provocar granulometrías diferentes. Por los Flujos Marshall obtenidos, en todos los casos el Módulo de Rigidez Marshall es menor a 6 kN/mm, siendo este un valor aceptable, reduciendo la posibilidad de presentar agrietamiento por rigidez, esto se puede observar en el Anexo 2.

4.4 Susceptibilidad de la Mezcla Asfáltica al daño inducido por Humedad

Para poder obtener esta propiedad de desempeño, debe de evaluarse la capacidad que tiene la mezcla a recibir fuerzas de tensión indirecta en seco y compararla con humedad a 5° C. Se evaluó la resistencia a la tensión mediante el ensayo AASHTO T283. La relación a la tensión indirecta húmeda contra seca deberá ser mayor al 80%. Recomendación AMAAC RA-04.

En todos los casos evaluados la resistencia a la susceptibilidad por humedad fue mayor al 80%. En la mayoría de los casos esta fue superior al 100%, excepto en el uso de 60% de RAP como se muestra en la siguiente gráfica:

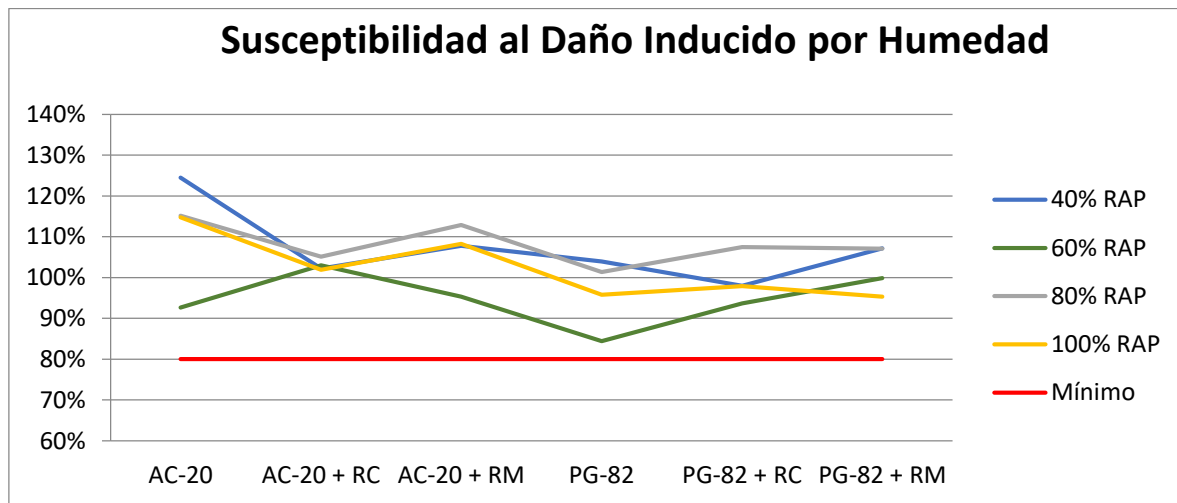


Figura. 4.9 Susceptibilidad a la Humedad (Anexo 3)

En el Anexo 3, se encuentran los cálculos y tablas utilizadas para obtener estos resultados. Se puede observar que, entre mayor uso de RAP en la mezcla, aumenta la resistencia a la tensión indirecta, esto debido a la rigidez que provoca el uso de asfaltos recuperados.

En el caso de las mezclas con 60% de RAP, se puede observar que la resistencia a la tensión indirecta en seco con el uso de rejuvenecedores genera mejores resistencias que con el uso de 80%. Esto se puede deber a que la mezcla de RAP no era homogénea. Así también, estas mismas mezclas fueron más susceptibles a la humedad generando resistencias menores. Esta información puede ser observada en el Anexo 3.

4.5 Deformaciones Permanentes

Es una prueba que se realiza para ver qué tan susceptible es una mezcla a la deformación permanente siendo afectada por humedad y temperatura al mismo tiempo. Esto es para que no presente roderas en la capa de rodamiento antes de la vida útil para la cual fue diseñada. Con la AMAAC RA-01 se busca que la deformación máxima sea menor a 10 mm en al menos 20,000 ciclos con la rueda cargada de Hamburgo. Los datos subrayados en amarillo, son los valores que no llegaron a 10 mil ciclos y los datos rojos son los que no cumplieron con la especificación señalada. En el anexo 4, podrán revisar las gráficas de Ciclos vs Deformación de cada uno de los casos

Tabla 4.11. Deformación registrada en 10,000 ciclos de la Rueda de Hamburgo

%RAP	Caso	Deformación a 10,000 Ciclos (mm)		PROMEDIO (mm)
A	1			
	2			
	3			
	4	4.597	5.115	4.856
	5	10.425	11.655	11.040
	6	5.180	7.316	6.248
B	1	4.921	2.849	3.885
	2			
	3	10.101	12.691	11.396
	4	1.166	1.295	1.231
	5	4.338	4.791	4.565
	6	2.460	2.784	2.622
C	1	1.619	1.683	1.651
	2	8.612	9.454	9.033
	3	12.750	8.548	10.649
	4	2.460	2.460	2.460
	5			
	6	11.396	8.741	10.069
D	1	1.943	2.007	1.975
	2			
	3	10.101	7.382	8.742
	4	1.295	1.554	1.425
	5	9.462	9.462	9.462
	6	7.382	7.640	7.511

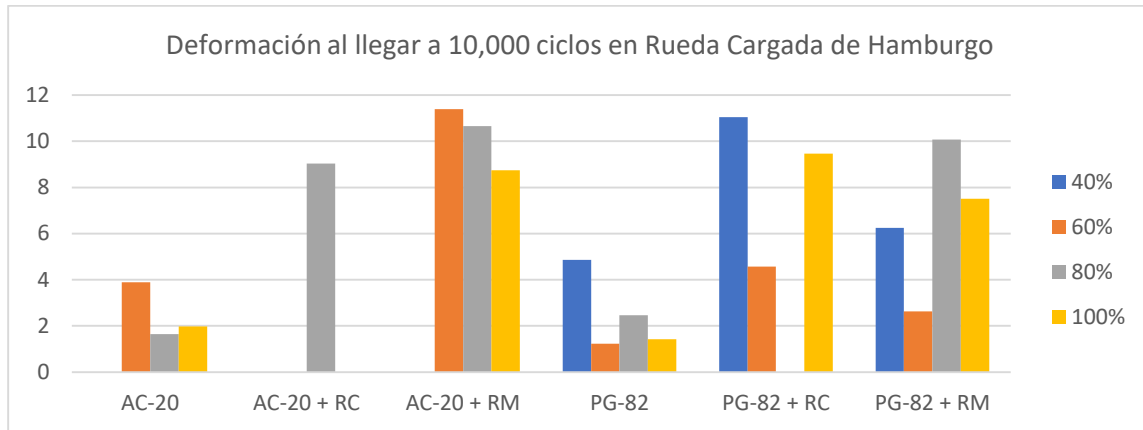


Figura. 4.10 Deformación registrada en 10,000 ciclos de Rueda de Hamburgo

Como se puede observar, en las condiciones donde se utiliza el Rejuvenecedor convencional, es más susceptible a no lograr llegar a los 10,000 ciclos. En el caso de AC-20 junto con Rejuvenecedor Convencional, no se tuvo registros, solo con 80% de RAP. En donde no se utiliza rejuvenecedores, solo aportación de AC-20 o PG-80 se obtuvieron las mejores condiciones para soportar la deformación permanente contra las demás, esto se debe a que son los casos más rígidos por el CA envejecido, sin ser rejuvenecido.

Tabla 4.12. Deformación registrada en 20,000 ciclos de la Rueda de Hamburgo

%RAP	Caso	Deformación a 20,000 Ciclos (mm)		PROMEDIO (mm)
40%	AC-20			
	PG-82	10.172	11.241	10.707
60%	AC-20	12.497	11.989	12.243
	PG-82	2.331	3.238	2.784
80%	AC-20	4.338	4.403	4.371
	PG-82	7.123	6.151	6.637
100%	AC-20	7.576	4.468	6.022
	PG-82	3.173	2.590	2.881

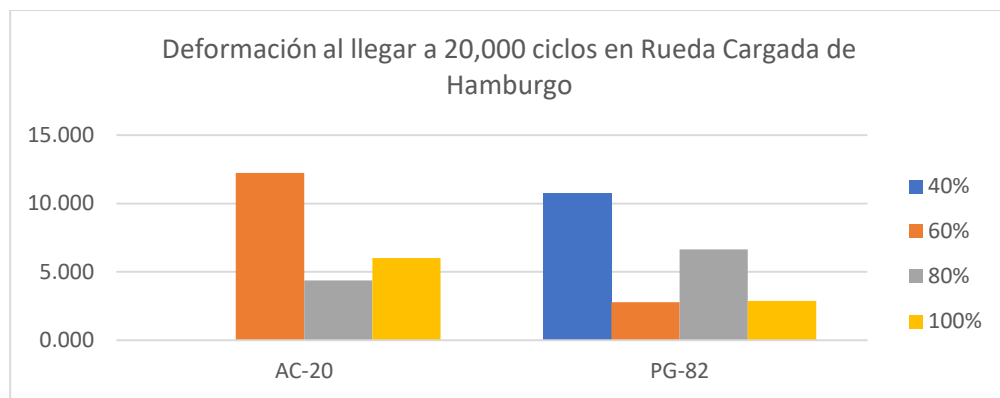


Figura. 4.11 Deformación registrada en 20,000 ciclos de Rueda de Hamburgo

Con la recomendación AMAAC RA-01, solo los casos donde se utiliza PG-82 y algunos con AC-20, serían los no rechazados en un tramo carretero. Esto se puede deber a que el rejuvenecedor fue utilizado en mayor proporción de la requerida. Cumple su función, ya que mejora las características elásticas del CA Recuperado, pero disminuye la capacidad de carga de las mezclas que las utilizan. Se recomienda tener mayor cuidado con su uso.

En el Anexo 4, se pueden observar todos los resultados individuales de cada uno de los casos de la Deformación a lo largo de los ciclos en la Rueda Cargada de Hamburgo.

4.6 Módulos Dinámicos

Sirve para definir las propiedades viscoelásticas lineales con temperaturas y velocidades repetitivas de carga para Mezclas Asfálticas. Se aplica un esfuerzo de compresión axial a una mezcla asfáltica con una temperatura y frecuencia definidas. Se utiliza la norma AASHTO T342-11. Mide la respuesta resultante recuperable de la deformación axial que sufre el material en mega-Pascales (MPa). (Delgado, 2017)

Este valor sirve para poder definir los espesores del diseño del pavimento. Depende de las temperaturas y cargas aplicadas en la zona que uno desea diseñar el pavimento. Se utilizó el NU Meter que actualmente tiene la Facultad de Ing. Civil de la Universidad Autónoma de Nuevo León, con el apoyo del Mtro. Roberto de la Mora Morteo (DEP).

Tabla 4.13. Módulos Dinámicos obtenidos por la UANL

% RAP	Caso	Módulo Dinámico			% RAP	Caso	Módulo Dinámico		
		Prob 1	Prob 2	Promedio			Prob 1	Prob 2	Promedio
		(MPa)	(MPa)	(MPa)			(MPa)	(MPa)	(MPa)
A	1	2835	2204	2519.5	C	1	5140	5423	5281.5
	2	1978	2858	2418		2	3490	2806	3148
	3	2791	2659	2725		3	2795	3624	3209.5
	4	3600	3895	3747.5		4	5457	5180	5318.5
	5	3285	2756	3020.5		5	2995	3129	3062
	6	2573	3444	3008.5		6	3426	3658	3542
B	1	4766	3559	4162.5	D	1	4208	4144	4176
	2	2730	3065	2897.5		2	2197	2469	2333
	3	3076	2829	2952.5		3	3936	3611	3773.5
	4	3766	3225	3495.5		4	5007	5403	5205
	5	3613	2109	2861		5	2913	2633	2773
	6	4025	2747	3386		6	4064	4161	4112.5

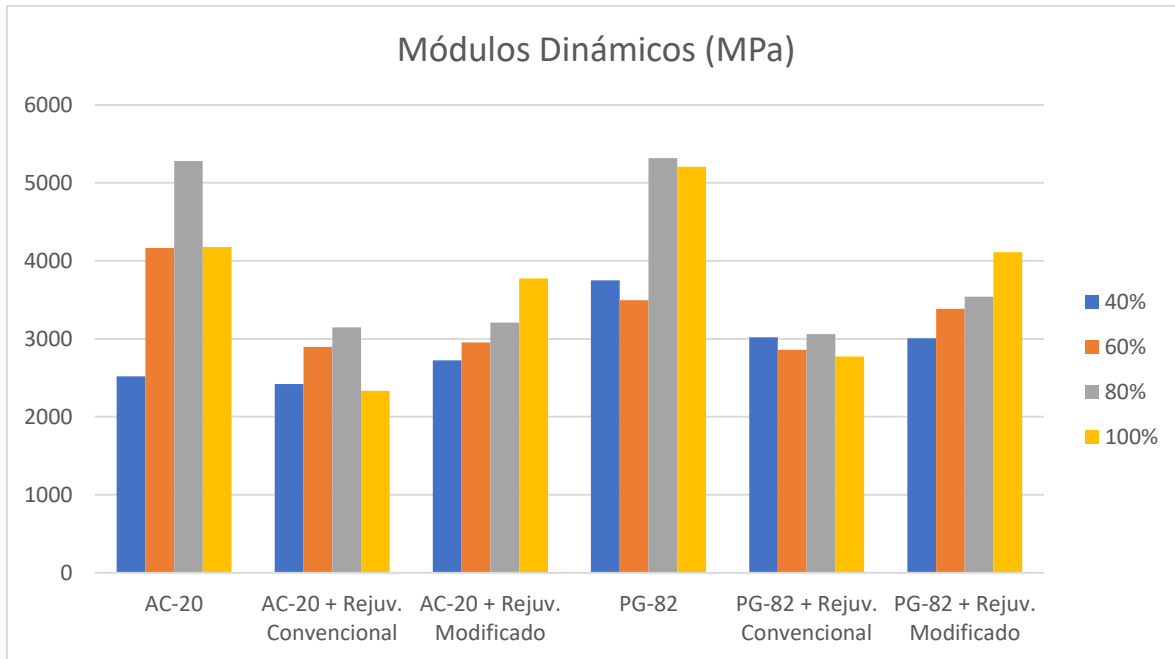


Figura. 4.12 Módulos Dinámicos en los diferentes casos.

Es importante notar que la mayoría de los casos, el Módulo Dinámico se encuentra entre 2,000 y 3,500 MPa. Estas mezclas pueden funcionar para vialidades de poco tránsito.

Este método obtiene la rigidez de la mezcla en diferentes temperaturas y con diferentes frecuencias, para simular diferentes condiciones de carga en un pavimento. El equipo pide el esfuerzo con un control de deformación y los datos obtenidos se tabula y con esto se obtiene la curva maestra, la cual sirve como entrada para el diseño estructural del pavimento.

4.6 Ahorro en Costos

Para poder hacer esta comparación, se realizaron 2 tarjetas de Precios Unitarios de Carpeta Asfáltica por metro cúbico (m³) tendido y compactado, una 100% virgen y la otra con una cantidad de RAP del 60%. No se consideró el costo adicional del fresado de la carpeta existente, ni del acarreo de este material fresado (RAP) a la planta, debido a que ambos procedimientos se tendrían que realizar y se puede suponer que la distancia de extracción al banco de tiro, es la misma a la que existe a la planta de mezclado.

En el Anexo 5, se puede ver la tarjeta de Precio Unitario para una carpeta virgen tendida y compactada. La relación del costo de los materiales vírgenes ya puestos en la planta con el costo total de la carpeta es del 82.8%. Esto se significa que la mayor cantidad del costo de una carpeta virgen es de los materiales, lo demás es el acarreo de la planta al sitio de tiro, así como la maquinaria, equipo y mano de obra requerida para su tendido y compactación.

El uso de RAP al 60%, provoca una reducción de hasta el 42.9% del costo directo de los materiales. Esta reducción no es proporcional al uso del 60% de RAP, ya que el costo del rejuvenecedor y aporte de CA al RAP debe ser adicionado, como se muestra en el Anexo 6. La relación del costo de los materiales con respecto al costo total usando el reciclado al 60%, disminuye del 82.8% al 68.1%.

Esto representa una reducción en el Costo total del uso de 100% de materiales vírgenes y el uso de un 60% de RAP del 30.6% aproximadamente. Este ahorro se debe gracias a que se disminuye a un 40% el uso de materiales pétreos vírgenes y en un porcentaje similar el CA, ya que el CA tiene que ser aportado también al RAP. El rejuvenecedor utilizado es de Secreto Industrial y el costo de este material es aproximado con respecto al CA virgen.

4.7 Recomendaciones Generales

Al estar recuperando RAP y utilizarlo en mezclas nuevas, se recomienda realizar caracterizaciones del agregado pétreo que viene en la mezcla, así como del CA, por secciones no mayores a 500 metros, para poder ajustar parámetros en la planta de dosificado. Puede suceder que, de un tramo a otro por temas económicos en los acarrees de los materiales, se hayan utilizado agregados de diferentes minas o incluso un CA diferente.

Tener cuidado con las dosificaciones de Rejuvenecedores en las mezclas, así como en la obtención de las muestras de RAP, ya que podrían entregar resultados incorrectos y así realizar un mal diseño. Esto se pudo observar al realizar las pruebas de Estabilidad Marshall y Deformación permanente, donde existen resultados variados para las mismas dosificaciones, donde posiblemente las dosificaciones internas del RAP no eran iguales.

Una opción es usar RAP triturado para garantizar una mejor granulometría y posiblemente un contenido de CA más estable. Esto provoca un uso mayor de energía para procesar en RAP y agrega costo al procedimiento. Pero al tener el material triturado en diferentes tamaños, se puede garantizar una mezcla más homogénea.

El tipo de rejuvenecedor que se utilizará en la mezcla, dependerá de la calidad del CA recuperado y el CA que se utilizará como aporte a la nueva mezcla. Se debe realizar una metodología que busque los porcentajes óptimos de cada uno de estos, así como del rejuvenecedor a usar, para lograr las características de diseño estructural.

Puede llegar a existir un problema térmico al mezclar RAP en temperatura ambiente con los agregados vírgenes que se utilizarán para la mezcla. Esto podría provocar que no se obtengan

las temperaturas óptimas para un buen mezclado y para un buen compactado ya después de haber sido tendido. Esto depende del tipo de procedimiento a utilizar.

Realizar una metodología de diseño que pueda ser usada en México de una manera más sencilla, para que diferentes tramos carreteros del país puedan ser reciclados. Para esto, se debe seguir con la investigación experimental para buscar correlación entre los resultados con otras metodologías de diseño y aplicación de equipos existentes por la mayoría.

Para este estudio, las compactaciones realizadas fueron con golpes de acuerdo a la metodología Marshall. Sería más conveniente, realizar la compactación por la recomendación AMAAC y el compactador giratorio.

Es posible que los espesores del pavimento cambien, ya que el módulo de esta nueva mezcla asfáltica cambia. Esto puede provocar que se requiere una carpeta asfáltica adicional a la recuperada, para cumplir con el nivel de servicio de la vialidad que se esté rehabilitando. Ejemplo de esos métodos es la del AASHTO 93. Esto suponiendo que no es necesario realizar modificaciones en la Base Hidráulica y capas inferiores.

Se debe evaluar en un tramo real, el ahorro energético gracias al uso de estas metodologías. Esto para poder determinar con exactitud, cuanto CO₂ no se está liberando a la atmosfera y la contribución al retroceso del calentamiento global que repercute el uso del RAP.

Capítulo 5. Conclusiones

Cuando se diseña una mezcla nueva para un pavimento asfáltico, su objetivo principal es proveer de una buena estructura, siempre siendo económicamente, técnicamente y ambientalmente factible. El uso de RAP en mezclas nuevas, cumple con esos tres objetivos, siempre y cuando se lleve una metodología de diseño apta y bien ejecutada.

Existe un ahorro de hasta el 35% del Costo Total de una carpeta tendida y compactada, con el uso de un 60% de RAP. Gracias al ahorro en los materiales vírgenes que no serán usados, muy independiente del Capital Natural que representa estos materiales.

El procedimiento de reciclado de asfalto en mezclas asfálticas calientes realizadas en planta, se recomienda cuando se requiere cambiar toda la capa superficial de rodadura o esta, junto con la capa estructural asfáltica de un tramo carretero que presenta fallas. Solo revisar los módulos para saber los espesores a utilizar, ya que posiblemente se requiera un aporte adicional o una carpeta de rodadura adicional.

De acuerdo a lo observado, la homogenización de RAP no se puede garantizar. Se pueden realizar procesos de trituración y cribado para garantizar una granulometría más controlada, pero el porcentaje de CA Recuperado no podrá ser garantizado. De acuerdo al artículo del Dr. Félix Pérez y el Dr. Valdés de 2008, el RAP evaluado para cada tramo carretero varió su contenido de CA hasta en un 1.5% del total y no cumplir hasta en un 80% de las veces la granulometría de ese país.

Se debe seguir evaluando la continuidad del uso de RAP utilizando el método de diseño Marshall, ya que este fue diseñado para condiciones especiales en granulometrías y para asfaltos no modificados. El uso de RAP introduce factores no evaluados con anterioridad y predispone a una nueva metodología de diseño.

En el caso de las Estabilidades Marshall, se puede observar que su aumento de estabilidad es proporcional al aumento de RAP en la mezcla en los casos que no existe rejuvenecedores en la mezcla. Pero cuando se utilizan, esta estabilidad disminuye con el aumento de porcentaje de RAP en la mezcla. Esto puede deberse a que el porcentaje de rejuvenecedor usado no fue el correcto o a que entre menos materiales vírgenes de aporte se utilicen, menor es la garantía de una mezcla homogénea con las demás.

Con respecto a los Módulos Marshall, todos los casos están entre 1 y 4 kN/mm, este valor quiere decir que las mezclas no presentan una rigidez importante, lo cual es bueno, pero pueden llegar a provocar deformaciones permanentes prematuras.

En todos los casos se cumple con la Susceptibilidad a la Humedad mínima del 80%, pero los valores no son coherentes ya que, en muchos casos, la resistencia a la tensión indirecta húmeda después de congelamiento, llegó a ser superior a 100%. Se puede concluir que esto se debe a que las granulometrías y cemento asfáltico integrado entre un mismo caso seco y un mismo caso afectado por humedad eran diferentes. Interesante que el caso de 60% de RAP no sucedió esto y los resultados estuvieron entre 80% y 100%.

El uso de RAP al 60% y con uso de PG-82 en los tres diferentes casos obtuvimos resultados diferentes contra los demás casos, por ejemplo: dieron las densidades aparentes más bajas y densidades máximas más altas. Los vacíos en mezcla son los más altos y no cumplen, pero son los únicos en cumplir con el porcentaje de vacíos en agregado mineral. Así también se obtienen las estabildades más altas y buenos valores en susceptibilidad a la humedad.

Es importante mencionar, que este experimento fue propuesto para flujos vehiculares entre 1 y 10 millones de ejes equivalentes, ya que en todas las probetas se utilizó la compactación Marshall. Para nivel de tránsito superior a 10 millones de ejes equivalentes, se deberá de utilizar el Compactador Giratorio.

Deformaciones mayores a 10mm antes de los 20 mil ciclos en la Rueda Cargada de Hamburgo, significa que existe un problema en la mezcla realizada. Los posibles errores que se encuentran para que este no llegue a los 20 mil ciclos es que existe una granulometría incorrecta, un bajo porcentaje de asfalto o no se obtuvo el porcentaje de vacíos requerido. Esto es difícil cumplir usando altas cantidades de RAP en la mezcla por la falta de garantía en la homogeneidad.

Una nueva metodología de diseño debe ser evaluada. Debe incluir la evaluación de los agregados recuperados y vírgenes, junto con sus porcentajes a utilizar. Así también el CA Recuperado y Virgen, y el Grado de Desempeño al cual se quiere llevar la mezcla, para saber cuál es el mejor rejuvenecedor que debería ser usado. Utilizar de apoyo los procedimientos propuestos por el protocolo AMAAC y buscar otros métodos que tengan correlación con métodos más lentos y complicados de evaluar.

Referencias

- AMAAC. (2008). *Diseño de Mezclas de Granulometría Densa de Alto Desempeño*. México.
- Berrones, L. (2020). *Análisis Económico Universidad Autonomía Metropolitana*. Obtenido de Autotransporte de Carga en México:
<http://www.analisiseconomico.azc.uam.mx/index.php/rae/article/view/585>
- Delgado, H. (2017). *Propuesta de Método de Prueba de Módulo Dinámico en Mezclas Asfálticas para México*. Querétaro: IMT.
- European Asphalt Pavement Association. (2005). *Industry Statement on the Recycling of Asphalt Mixes and Use of Waste of Asphalt Pavements*. Bruselas: EAPA.
- Federal Highway Administration. (2011). *Reclaimed Asphalt Pavement in Asphalt Mixtures: State of the Practice*. McLean, VA: US DOT.
- Fonseca, C. y. (2009). Evaluación del Cemento Asfáltico Recuperado en una Mezcla Asfáltica para su Caracterización en RAP. *Sexto Congreso Mexicano del Asfalto AMAAC*.
- Malick, R. (2009). *Pavement Engineering, Principles and Practice*. EUA: CRC Press.
- McDaniel, R. (2002). *Use of RAP Under Superpave Specification*. West Lafayette IN: Purdue University.
- NAPA. (2021). *Recycling*. Obtenido de <https://www.asphalt pavement.org/expertise/sustainability/sustainability-resources/recycling>
- Papagiannakis, A. (2008). *Pavement Design and Materials*. EUA: Wiley.
- Schimmoller. (2000). *Recycled Materials in European Highway Environments: Uses, Technologies and Policies*. Washington: Federal Highway Administration.
- SCT. (2022). *Normativa para la Infraestructura del Transporte*. Obtenido de <https://normas.imt.mx/>
- U.S. Department of Transportation. (1997). *Pavement Recycling Guidelines for State and Local Governments*. EUA: National Center for Asphalt Technology.
- Valdés, G. (2008). Estudio de Variabilidad en Mezclas Asfálticas en Caliente Fabricadas con Altas Tasas de RAP. *Revista de la Construcción. Pontificia Universidad Católica de Chile*, 60-71.

Índice de Figuras

- Figura 2.1. Ensayo ASTM D2172-05 (Method B).... 14
- Figura. 2.2. Sangrado de Asfalto.... 21
- Figura. 2.3. Desintegración de Carpeta.... 21
- Figura. 2.4. Corrugaciones en Carpeta.... 21
- Figura. 2.5. Deformación por huella... 22
- Figura.2.6. Grietas de Cocomoduro... 22
- Figura. 2.7. Juntas Longitudinales... 22
- Figura. 2.6. Grietas en acotamientos.... 22
- Figura. 2.7 Colocación de Slurry Seal.... 24
- Figura. 2.8 Colocación de Chip Seal.... 24
- Figura. 2.9 Sellado de Grietas.... 25
- Figura. 2.10 Caja para bacheo.... 26
- Figura. 2.11 Planta de mezclado discontinua de RAP en frío, con capacidad de mezclar RAP de 10% a 40%. (European Asphalt Pavement Association, 2005)....27
- Figura. 2.12 Planta de mezclado discontinua de RAP en tibio. Puede mezclar entre 30% y 80% de RAP. (European Asphalt Pavement Association, 2005)....27
- Figura. 2.13 Planta de mezclado discontinua de RAP en caliente con anillo en tambor que incorpora RAP hasta un 35%. (European Asphalt Pavement Association, 2005).... 28
- Figura. 2.14 Planta de mezclado continua de RAP en caliente con flujo paralelo. (European Asphalt Pavement Association, 2005).... 28
- Figura. 2.15 Planta de mezclado continua de RAP en caliente con contraflujo. (European Asphalt Pavement Association, 2005).... 28
- Figura. 2.16 Planta de mezclado continua de RAP en caliente con doble-tambor. (European Asphalt Pavement Association, 2005).... 29
- Figura. 2.17 Planta móvil para reciclaje de mezcla asfáltica en caliente. (European Asphalt Pavement Association, 2005).... 29
- Figura. 2.18 Tren móvil de reciclaje de mezcla asfáltica en frío. (European Asphalt Pavement Association, 2005).... 29
- Figura. 2.19 Tren móvil de reciclaje de mezcla asfáltica en frío extendedora de carpeta. (European Asphalt Pavement Association, 2005).... 30
- Figura. 2.20 Tren móvil de reciclaje de mezcla asfáltica en caliente.... 30
- Figura. 3.1 Probetas realizadas para el estudio.... 32
- Figura. 3.2 Obtención de Peso de probetas sumergidas.... 33
- Figura. 3.3 Estabilidades Marshall.... 33
- Figura. 3.4 Probetas sumergidas a la Rueda Cargada de Hamburgo.... 33
- Figura. 4.1 Granulometría de Agregado Recuperado.... 35

Figura. 4.2	Granulometría de Agregado Propuesta para todos los casos....	36
Figura. 4.3	Densidades Aparentes promedio para los diferentes Casos....	40
Figura. 4.4	Densidades Máximas promedio para los diferentes Casos....	40
Figura. 4.5	Porcentaje de Vacíos en la Mezcla para los diferentes Casos....	41
Figura. 4.6	Porcentaje de Vacíos en el Agregado Mineral para los diferentes Casos....	41
Figura. 4.6	Porcentaje de Vacíos llenos de Asfalto para los diferentes Casos....	42
Figura. 4.7	Estabilidades Marshall para los diferentes casos (Anexo 1)....	43
Figura. 4.8	Módulos Marshall para los diferentes casos (Anexo 2)....	43
Figura. 4.9	Susceptibilidad a la Humedad (Anexo 3)....	44
Figura. 4.10	Deformación registrada en 10,000 ciclos de Rueda de Hamburgo....	46
Figura. 4.11	Deformación registrada en 20,000 ciclos de Rueda de Hamburgo....	46
Figura. 4.12	Módulos Dinámicos en los diferentes casos....	48

Índice de Tablas

Tabla 2.1. Propiedades del Cemento Asfáltico Envejecido (Fonseca, 2009)...	15
Tabla 2.2. Requisitos de Calidad del Material Pétreo para Mezclas Asfálticas Densas ...	16
Tabla 2.3. Requisitos de Granulometría para Mezclas Asfálticas Densas....	17
Tabla 2.4. Requisitos de Calidad del material Asfáltico....	17
Tabla 2.5. Requisitos de Calidad de Mezclas Asfálticas Calientes Densas....	18
Tabla 2.6. Niveles de Diseño en función de los Ejes Equivalentes (AMAAC, 2008)....	18
Tabla 2.7 Requisitos de calidad de la fracción gruesa del material pétreo para Mezclas Asfálticas Densas. (AMAAC, 2008)....	19
Tabla 2.8 Requisitos de calidad de la fracción fina del material pétreo para Mezclas Asfálticas Densas. (AMAAC, 2008)....	19
Tabla 2.9 Requisitos de granulometría para Mezclas Asfálticas Calientes Densas. (AMAAC, 2008)....	19
Tabla 2.10 Parámetros volumétricos requeridos para el Protocolo AMAAC. (AMAAC, 2008)....	20
Tabla 2.11 Métodos de mantenimiento y rehabilitación dependiendo del estado del pavimento...	23
Tabla 4.1. Granulometría de Agregado Recuperado....	34
Tabla 4.2. Granulometría de Agregado Propuesta para todos los casos....	35
Tabla 4.3. Aporte requerido para 40% de RAP....	36
Tabla 4.4. Aporte requerido para 60% de RAP.....	37
Tabla 4.5. Aporte requerido para 80% de RAP.....	37
Tabla 4.6. Caracterización de Cementos Asfálticos a utilizar.....	38
Tabla 4.7. Dosificación con el 40% de RAP en los 6 diferentes casos.....	39
Tabla 4.8. Dosificación con el 60% de RAP en los 6 diferentes casos.....	39
Tabla 4.9. Dosificación con el 80% de RAP en los 6 diferentes casos.....	39
Tabla 4.10. Dosificación con el 100% de RAP en los 6 diferentes casos....	39
Tabla 4.11. Deformación registrada en 10,000 ciclos de la Rueda de Hamburgo....	45
Tabla 4.12. Deformación registrada en 20,000 ciclos de la Rueda de Hamburgo....	46
Tabla 4.13. Módulos Dinámicos obtenidos por la UANL....	47

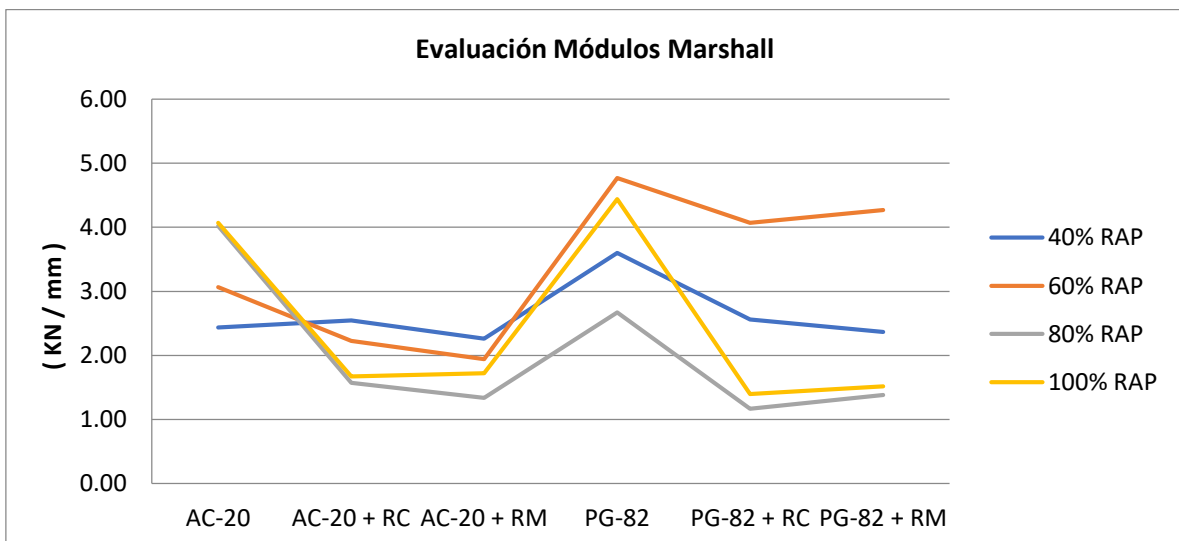
Anexo 1. Estabilidades y Flujos Marshall

Probeta			Estabilidad (kg)		Flujo (cms)	
%	Comb	#	Individ.	Promed.	Individ.	Promed.
A	1	1	950	950	4	3.9
		2	950		3.7	
		3	950		4	
A	2	1	870	856.66	3.3	3.37
		2	850		3.4	
		3	850		3.4	
A	3	1	850	860	4	3.8
		2	870		3.8	
		3	860		3.6	
A	4	1	1180	1223.33	3.2	3.4
		2	1250		3.5	
		3	1240		3.5	
A	5	1	950	956.66	3.6	3.73
		2	950		4.1	
		3	970		3.5	
A	6	1	1000	993.33	3.9	4.2
		2	980		4.5	
		3	1000		4.2	
B	1	1	1070	1073.33	3.4	3.5
		2	1100		3.5	
		3	1050		3.6	
B	2	1	820	823.33	3.4	3.7
		2	850		4.1	
		3	800		3.6	
B	3	1	850	866.67	4.4	4.47
		2	900		4.8	
		3	850		4.2	
B	4	1	1620	1653.33	3.4	3.47
		2	1790		3.6	
		3	1550		3.4	
B	5	1	1150	1153.33	2.8	2.83
		2	1140		2.7	
		3	1170		3	
B	6	1	1180	1210	2.9	2.83
		2	1250		2.7	
		3	1200		2.9	

Probeta			Estabilidad (kg)		Flujo (cms)	
%	Comb	#	Individ.	Promed.	Individ.	Promed.
C	1	1	1280	1286.67	3.3	3.2
		2	1350		2.9	
		3	1230		3.4	
C	2	1	800	806.67	4.9	5.13
		2	820		5.1	
		3	800		5.4	
C	3	1	820	780	5.7	5.83
		2	770		6.3	
		3	750		5.5	
C	4	1	1340	1263.33	5.1	4.73
		2	1250		4.5	
		3	1200		4.6	
C	5	1	800	813.33	6.7	6.97
		2	840		7.3	
		3	800		6.9	
C	6	1	760	843.33	6.6	6.1
		2	800		6.6	
		3	970		5.1	
D	1	1	1410	1410	3	3.47
		2	1370		3.5	
		3	1450		3.9	
D	2	1	790	786.67	4.8	4.7
		2	770		4.8	
		3	800		4.5	
D	3	1	850	873.33	4.9	5.07
		2	900		5.4	
		3	870		4.9	
D	4	1	1800	1746.67	3.8	3.93
		2	1890		3.8	
		3	1550		4.2	
D	5	1	950	860	6	6.17
		2	780		6.7	
		3	850		5.8	
D	6	1	850	873.33	4.9	5.77
		2	920		6.4	
		3	850		6	

Anexo 2. Módulos Marshall

Probeta	Estabilidad (KN)	Flujo (mm)	Mod. Marshall (KN / mm)
A1	9.50	3.9	2.44
A2	8.57	3.4	2.54
A3	8.60	3.8	2.26
A4	12.23	3.4	3.60
A5	9.57	3.7	2.56
A6	9.93	4.2	2.37
B1	10.73	3.5	3.07
B2	8.23	3.7	2.23
B3	8.67	4.5	1.94
B4	16.53	3.5	4.77
B5	11.53	2.8	4.07
B6	12.10	2.8	4.27
C1	12.87	3.2	4.02
C2	8.07	5.1	1.57
C3	7.80	5.8	1.34
C4	12.63	4.7	2.67
C5	8.13	7.0	1.17
C6	8.43	6.1	1.38
D1	14.10	3.5	4.07
D2	7.87	4.7	1.67
D3	8.73	5.1	1.72
D4	17.47	3.9	4.44
D5	8.60	6.2	1.39
D6	8.73	5.8	1.51

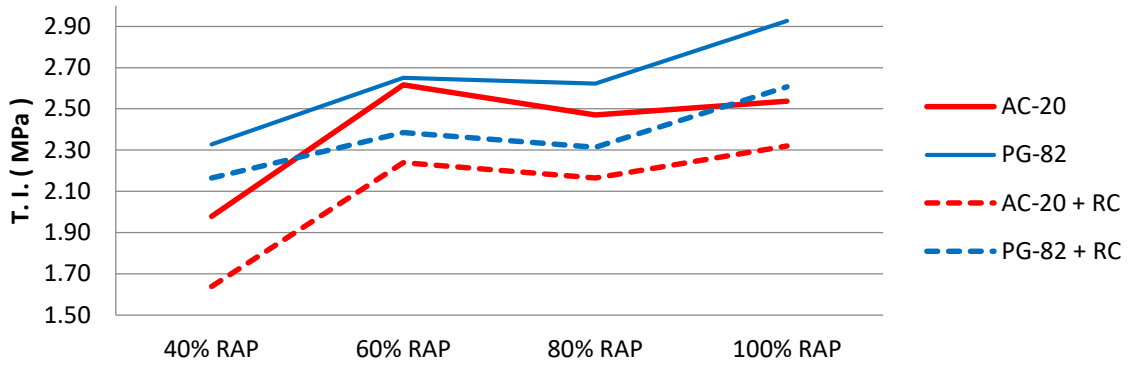


Anexo 3. Susceptibilidad a la Humedad por Tensión Indirecta

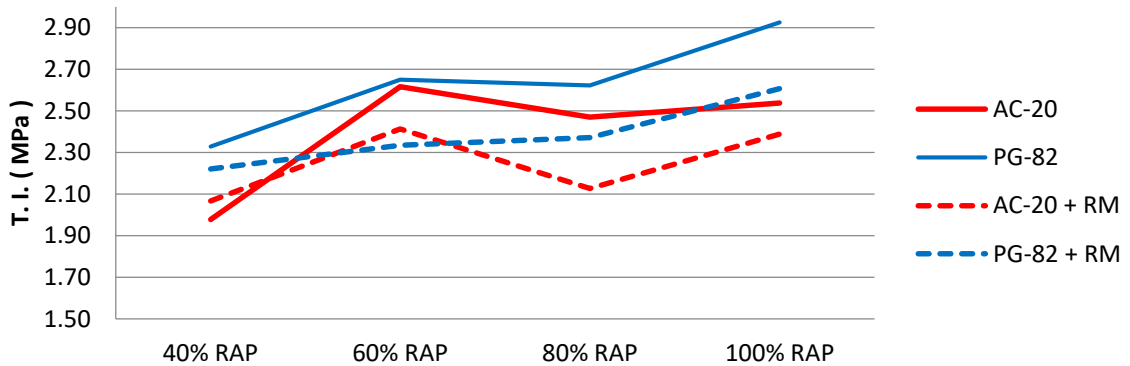
%	Comb	Resistencia en Húmedo		Resistencia en Seco		T. S. R.
		(N/mm ²)	Prom	(N/mm ²)	Prom	
A	1	2.59	2.46	1.75	1.98	1.24
		2.36		1.81		
		2.44		2.37		
	2	1.59	1.67	1.42	1.64	1.02
		1.61		1.62		
		1.83		1.88		
	3	2.09	2.23	1.88	2.07	1.08
		2.30		2.01		
		2.30		2.32		
	4	2.46	2.42	1.81	2.33	1.04
		2.63		2.40		
		2.17		2.77		
	5	2.19	2.12	1.96	2.17	0.98
		1.86		1.97		
		2.31		2.56		
	6	2.42	2.38	2.00	2.22	1.07
		2.51		2.25		
		2.21		2.41		
B	1	2.51	2.42	2.60	2.62	0.93
		2.45		2.60		
		2.31		2.65		
	2	2.17	2.31	2.21	2.24	1.03
		2.32		2.18		
		2.42		2.33		
	3	2.32	2.30	2.34	2.41	0.95
		2.37		2.44		
		2.21		2.46		
	4	2.06	2.24	2.54	2.65	0.84
		2.28		2.58		
		2.37		2.83		
	5	2.16	2.23	2.12	2.38	0.94
		2.26		2.28		
		2.29		2.75		
	6	2.41	2.33	2.34	2.33	1.00
		2.26		2.38		
		2.33		2.28		

%	Comb	Resistencia en Húmedo		Resistencia en Seco		T. S. R.
		(N/mm ²)	Prom	(N/mm ²)	Prom	
C	1	2.62	2.61	2.01	2.27	1.15
		2.56		2.19		
		2.67		2.61		
	2	2.21	2.28	1.87	2.16	1.05
		2.20		2.22		
		2.42		2.40		
	3	2.38	2.40	1.96	2.13	1.13
		2.37		1.98		
		2.45		2.44		
	4	2.62	2.66	2.60	2.62	1.01
		2.82		2.56		
		2.54		2.71		
	5	2.37	2.49	2.39	2.31	1.07
		2.42		2.28		
		2.67		2.27		
	6	2.41	2.54	2.25	2.37	1.07
		2.45		2.32		
		2.75		2.55		
D	1	2.80	2.91	2.25	2.54	1.15
		2.92		2.38		
		3.01		2.99		
	2	2.38	2.36	2.21	2.32	1.02
		2.24		2.04		
		2.47		2.71		
	3	2.51	2.59	2.45	2.39	1.08
		2.55		2.35		
		2.69		2.36		
	4	3.22	2.80	2.73	2.93	0.96
		2.90		2.79		
		2.29		3.25		
	5	2.59	2.55	2.36	2.61	0.98
		2.55		2.63		
		2.51		2.83		
	6	2.50	2.49	2.51	2.61	0.95
		2.66		2.50		
		2.29		2.82		

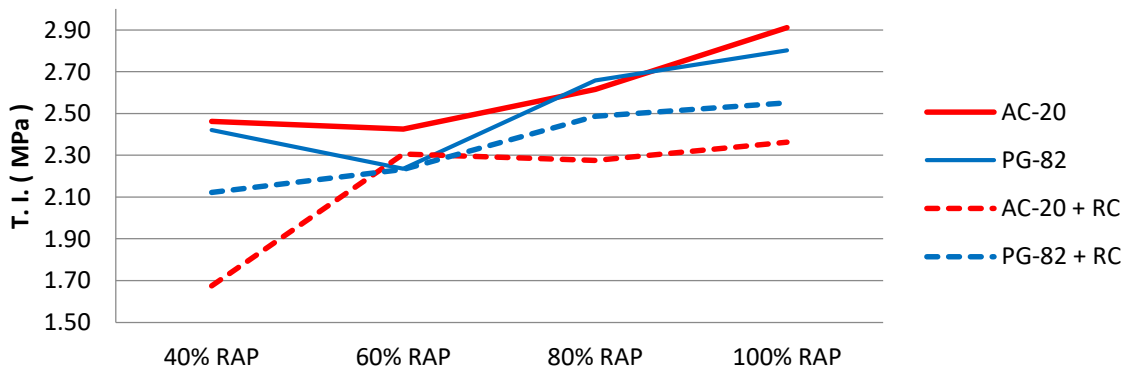
Resistencia a T.I., Seco Rejuvenecedor Convencional



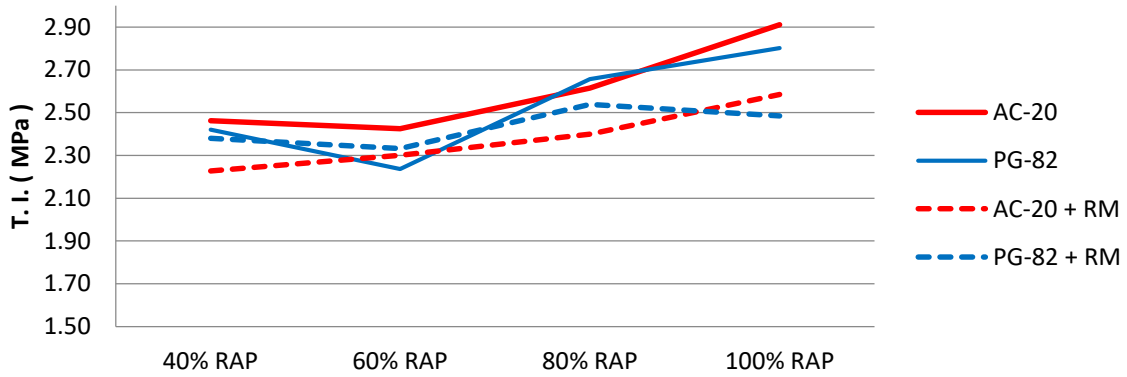
Resistencia a T.I., Seco Rejuvenecedor Modificado



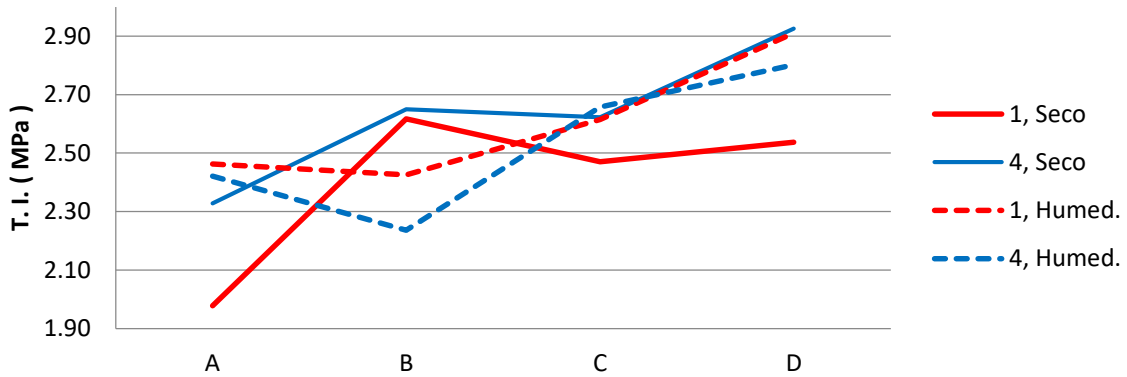
Resistencia a T.I., Húmedo Rejuvenecedor Convencional



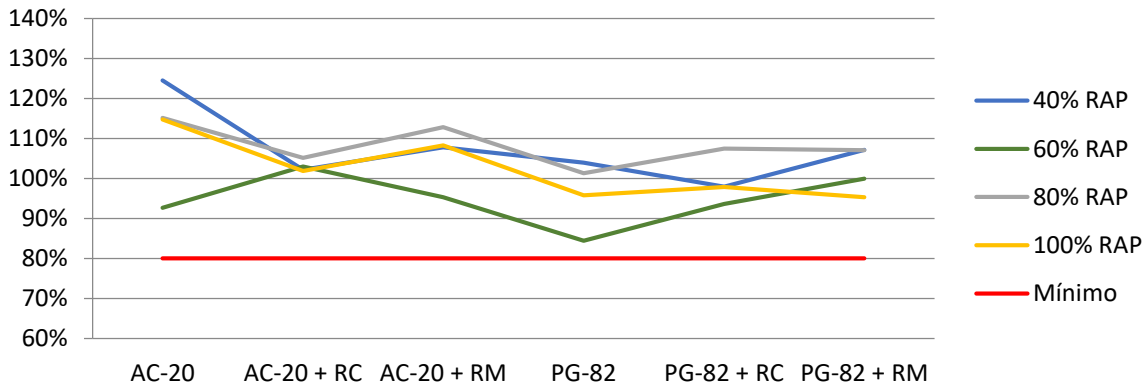
Resistencia a T.I., Húmedo Rejuvenecedor Modificado



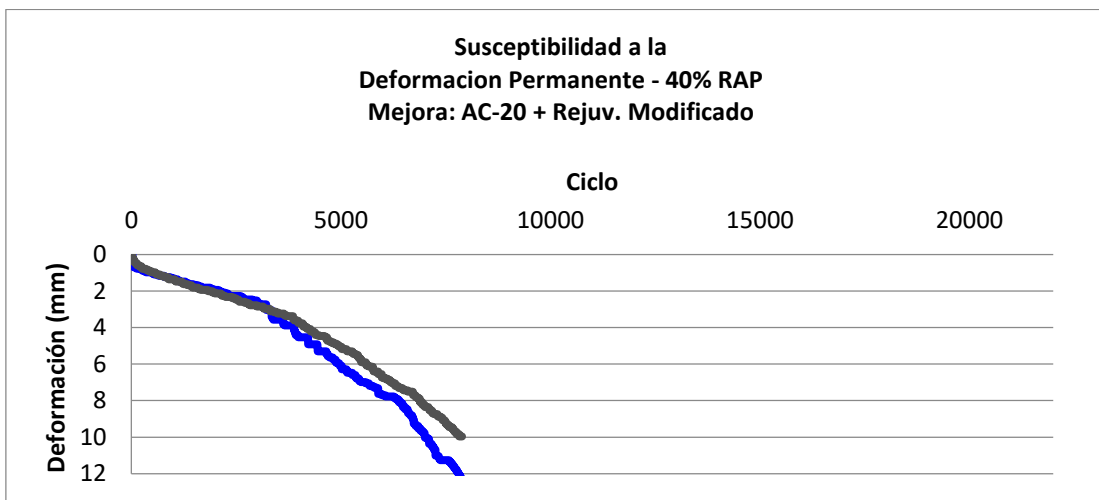
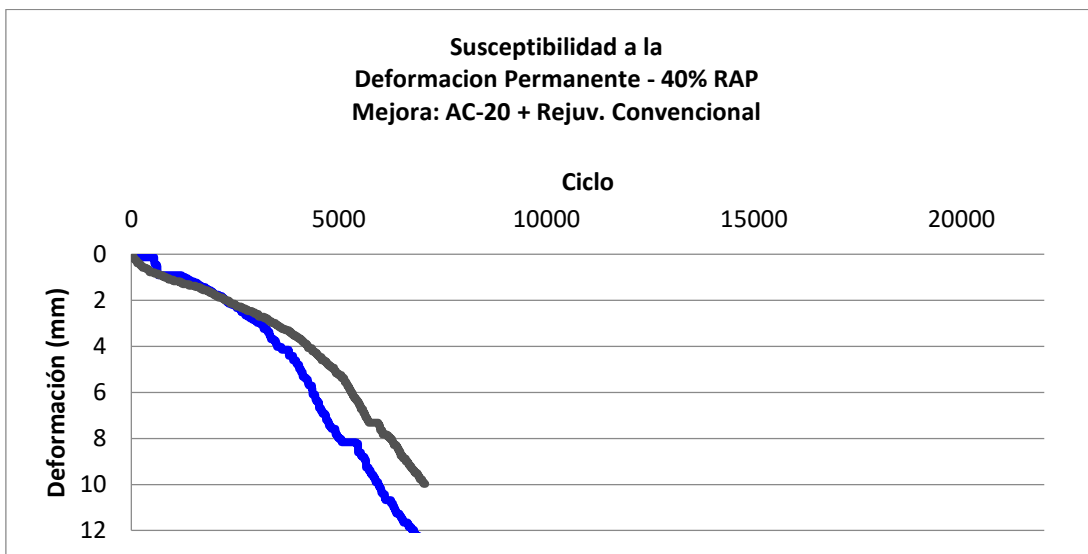
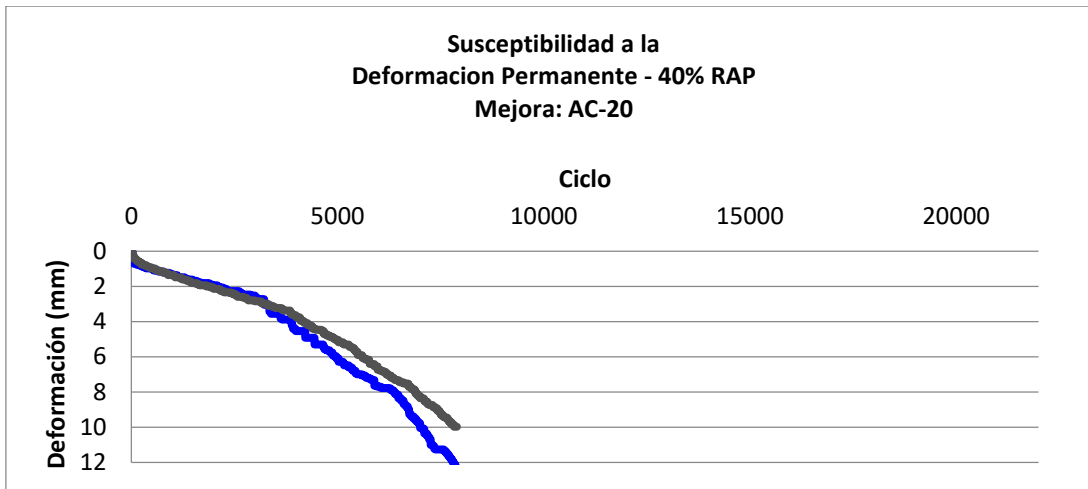
Resistencia a T.I. Seco VS Húmedo

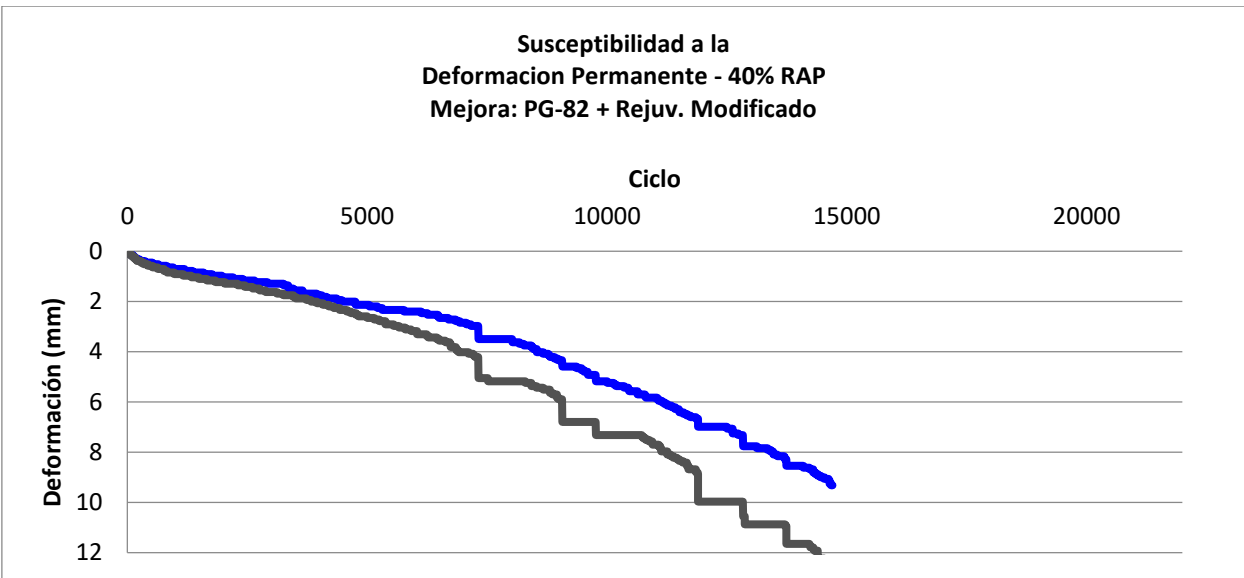
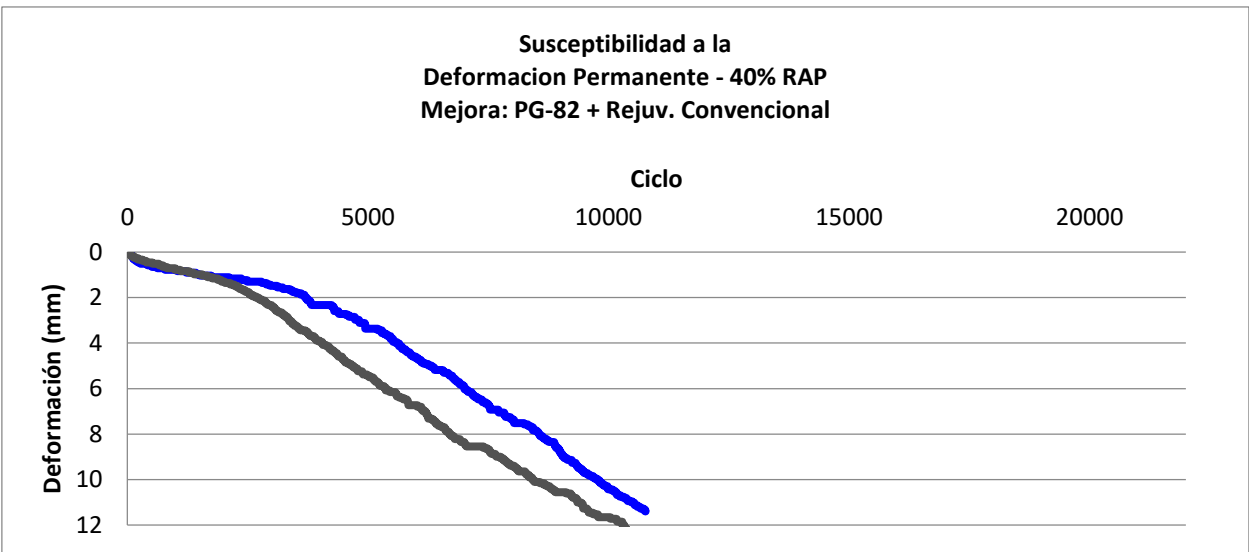
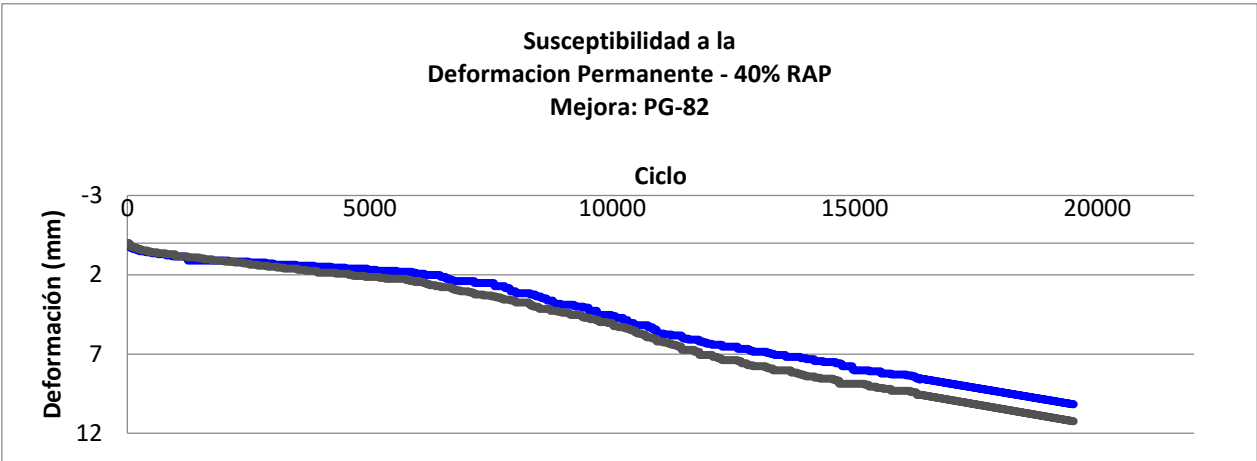


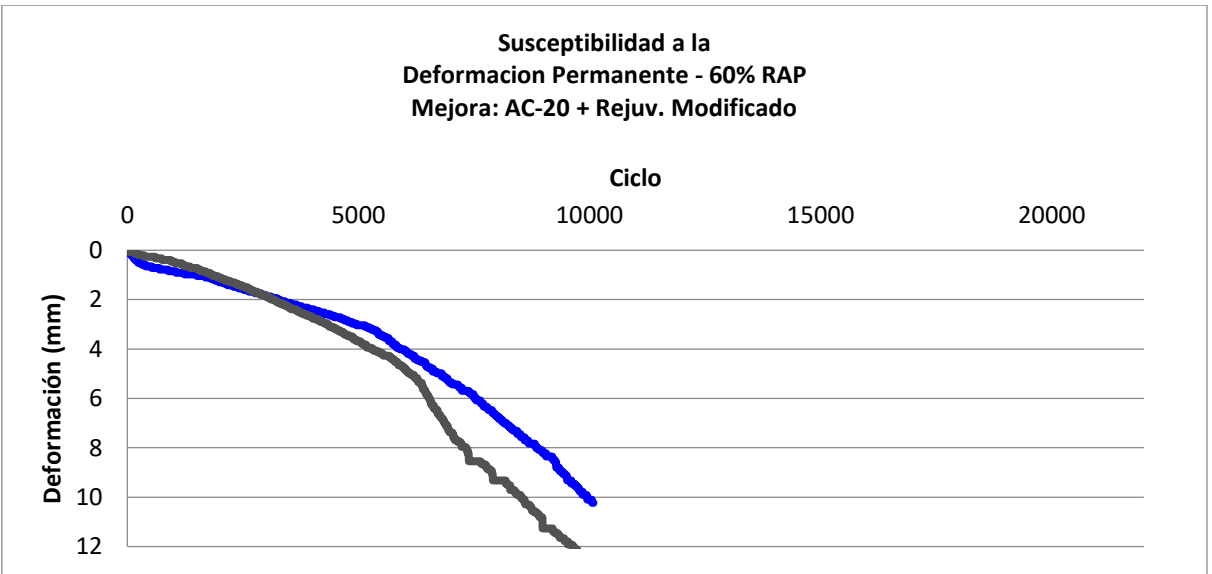
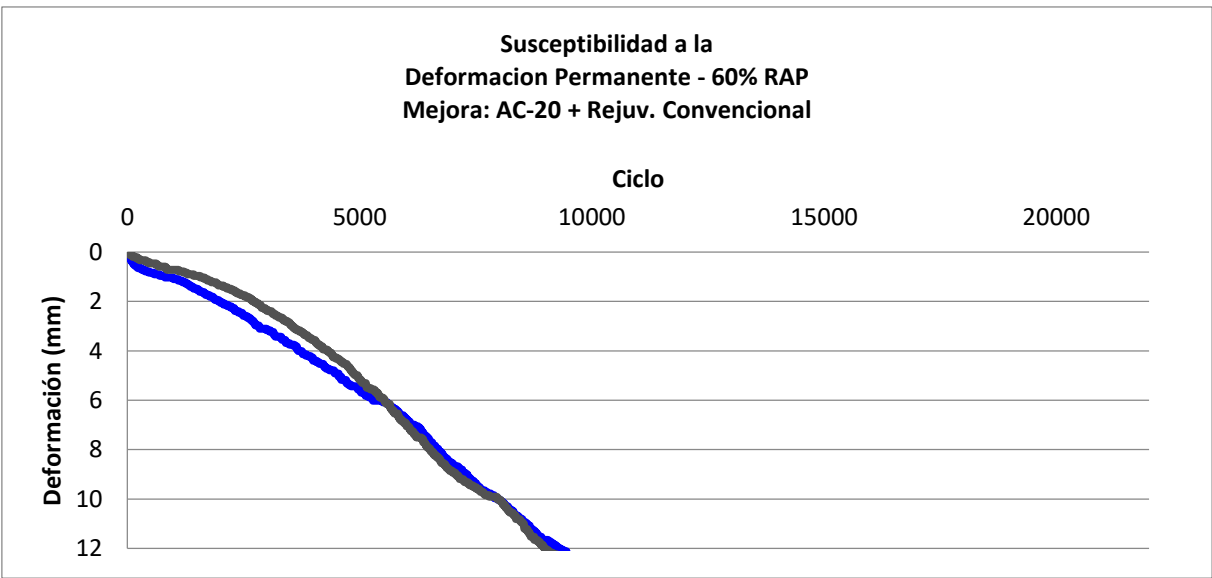
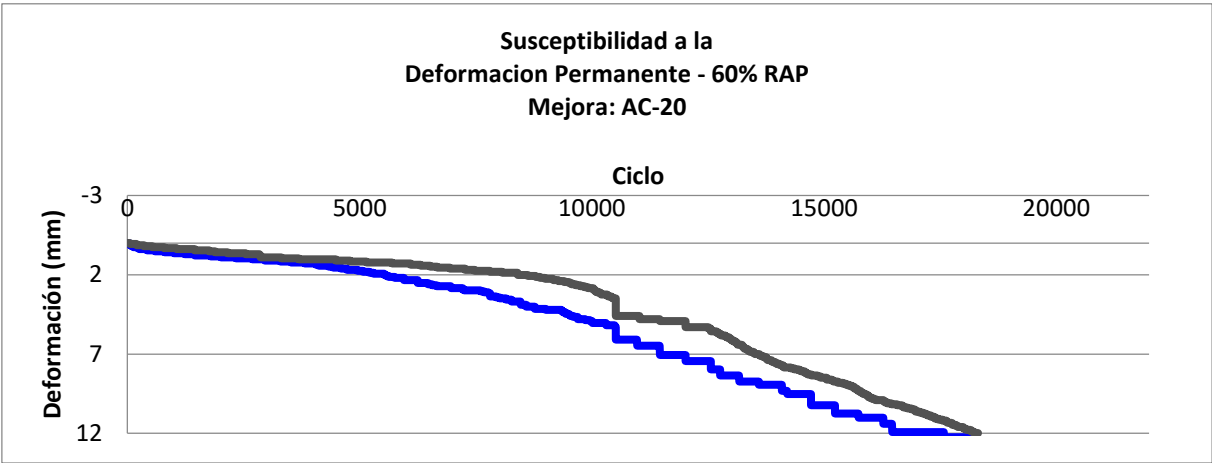
Susceptibilidad al Daño por Humedad

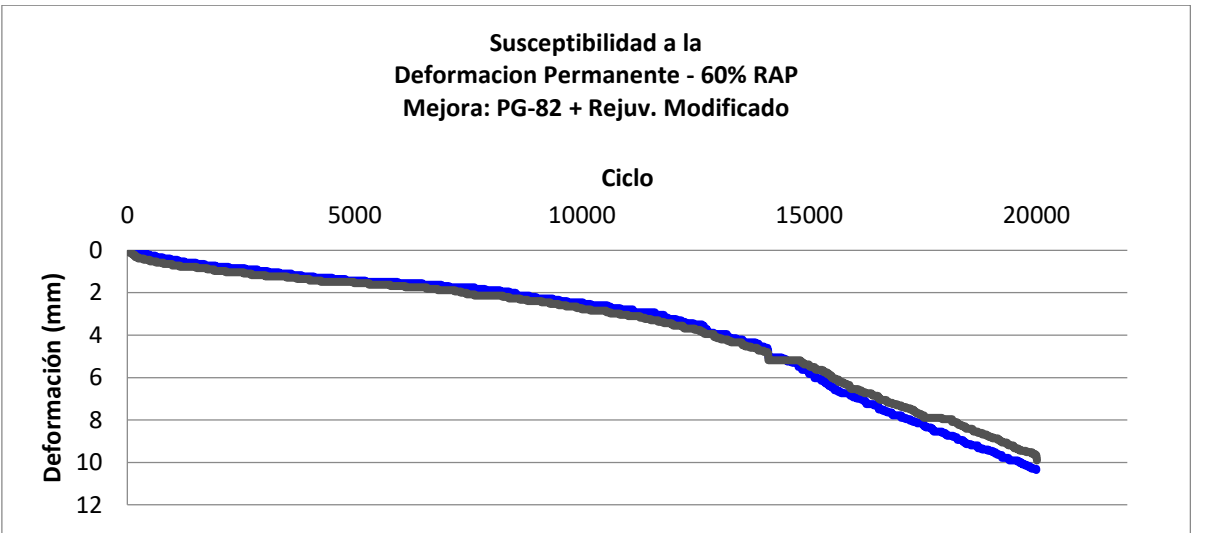
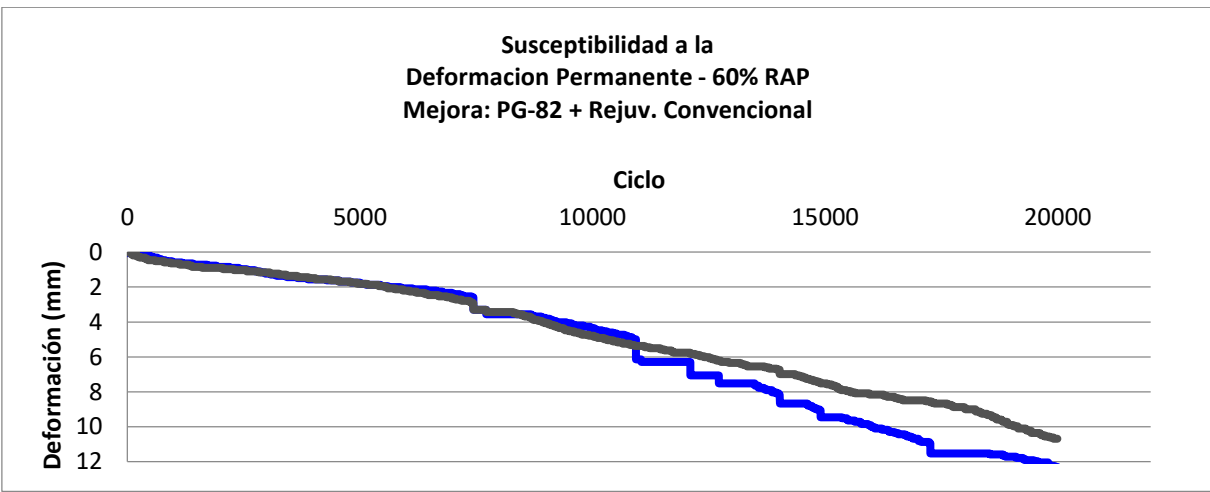
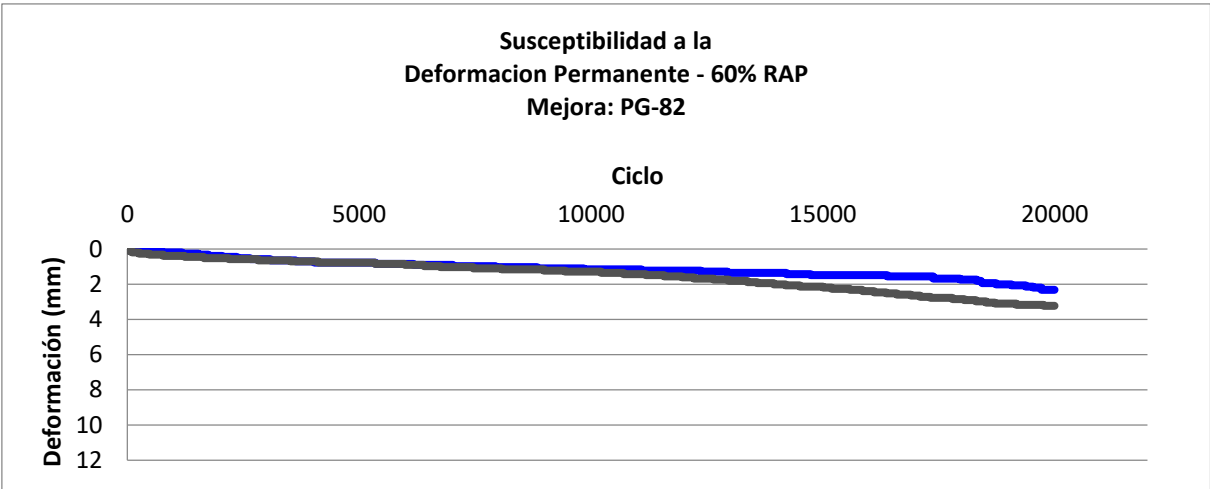


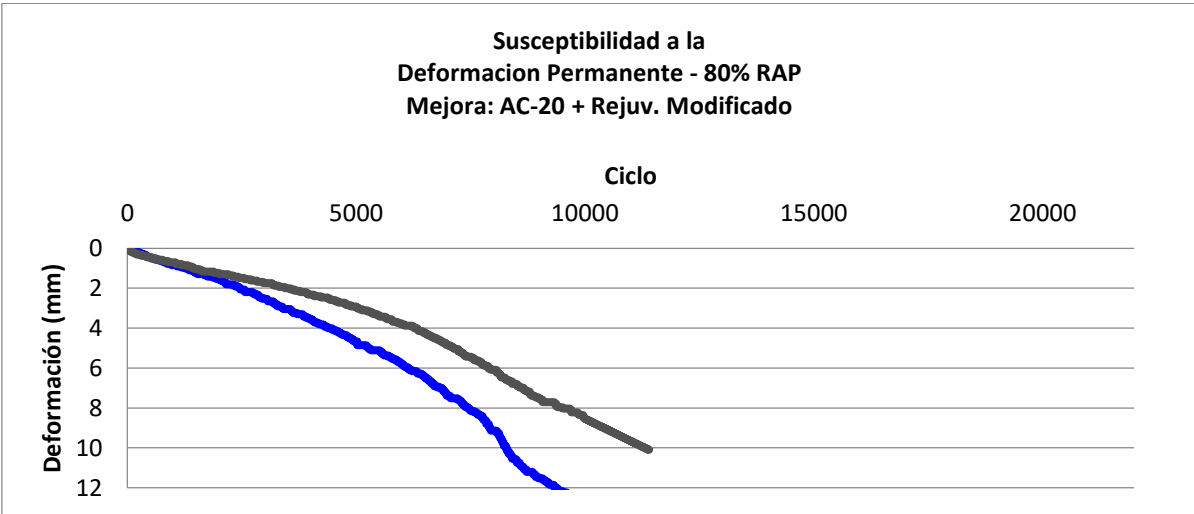
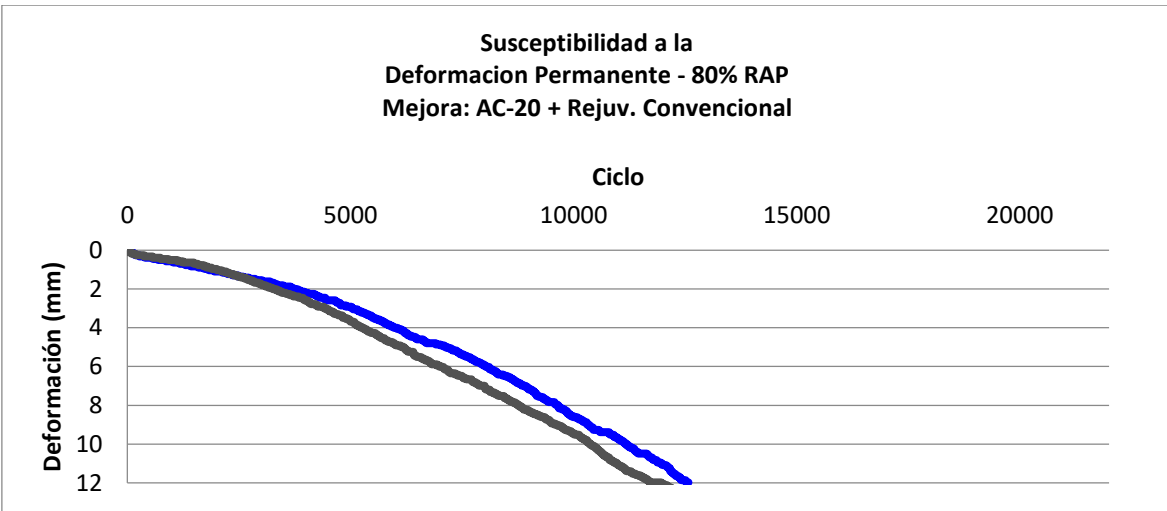
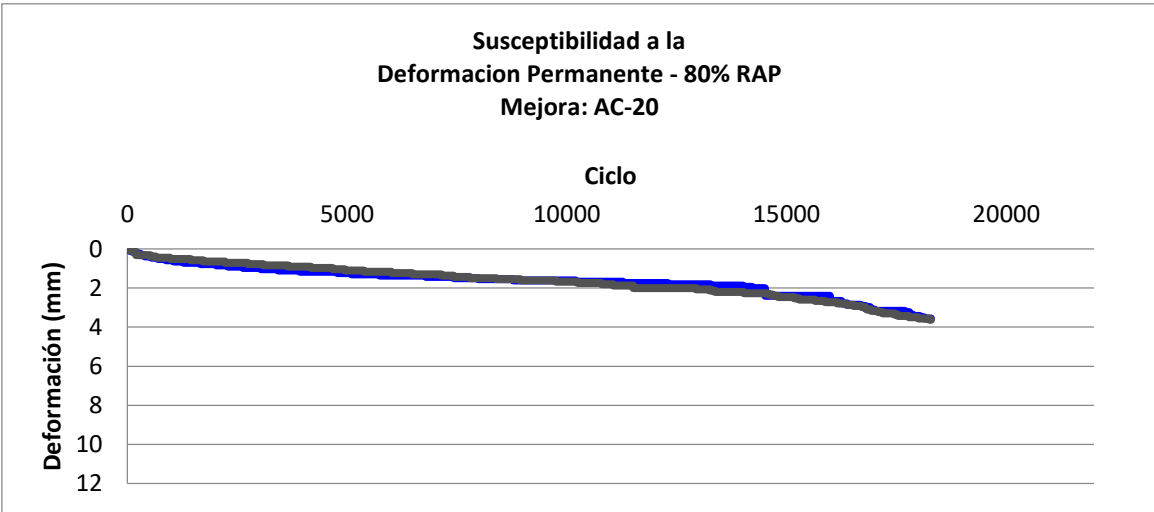
Anexo 4. Resultados Individuales de la Rueda Cargada de Hamburgo

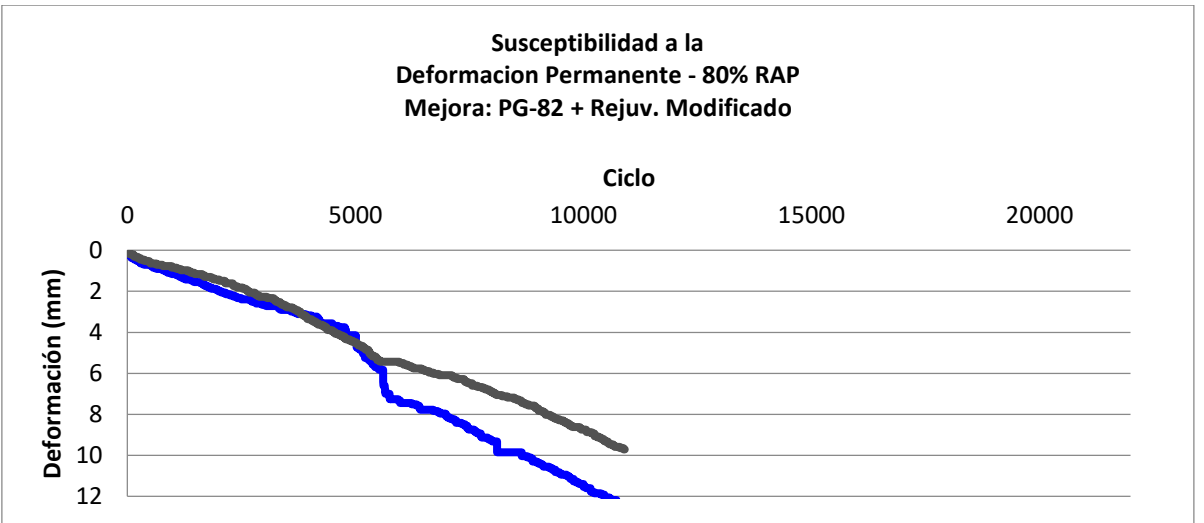
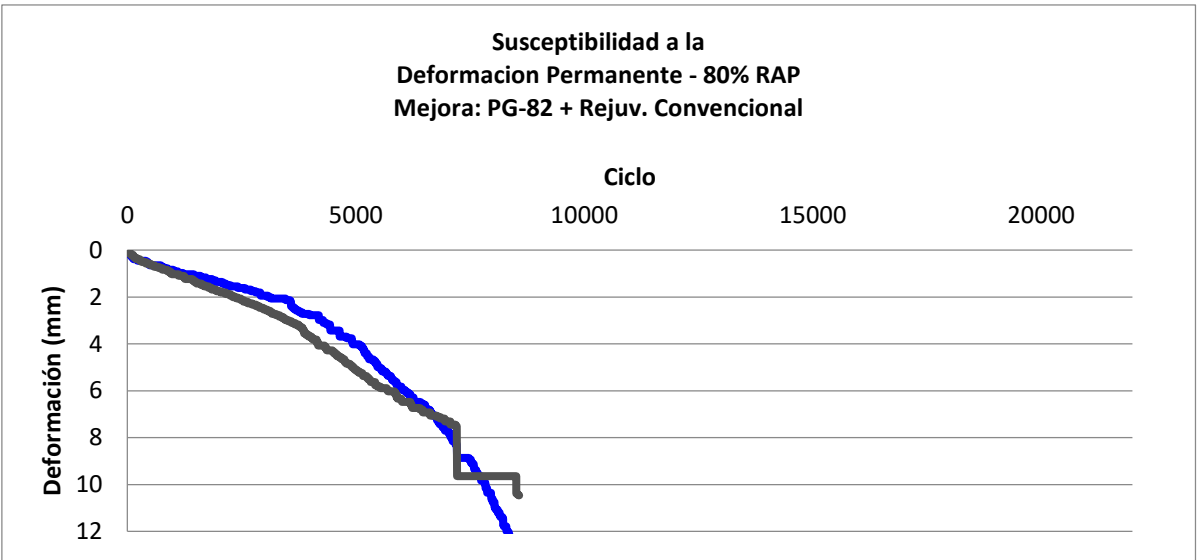
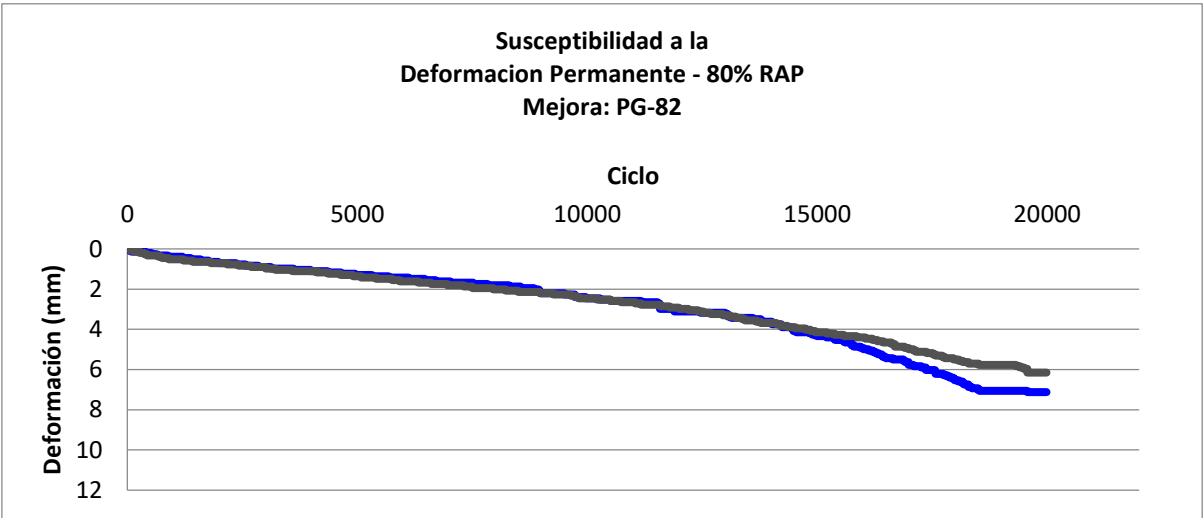


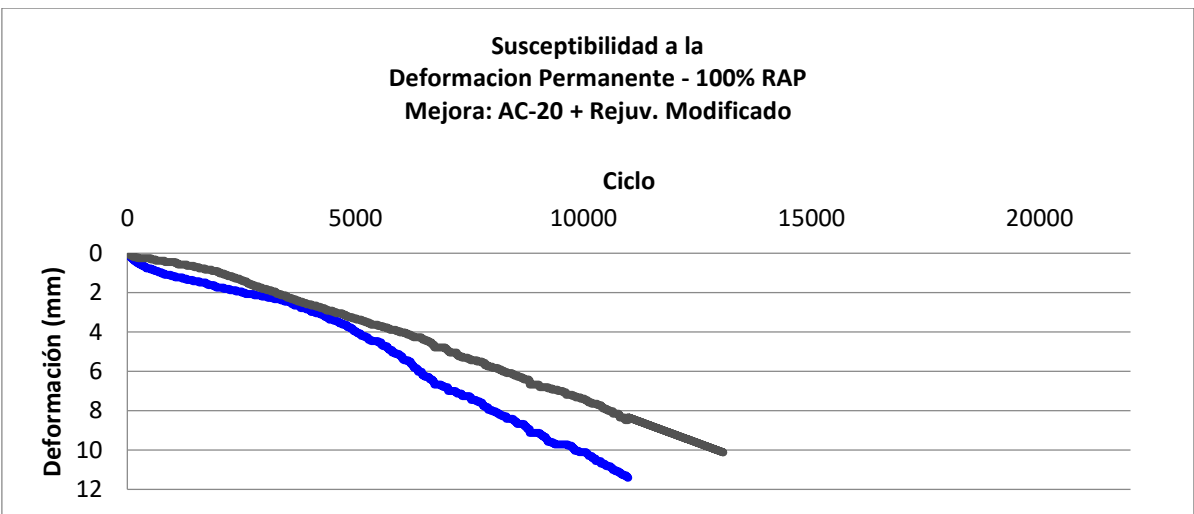
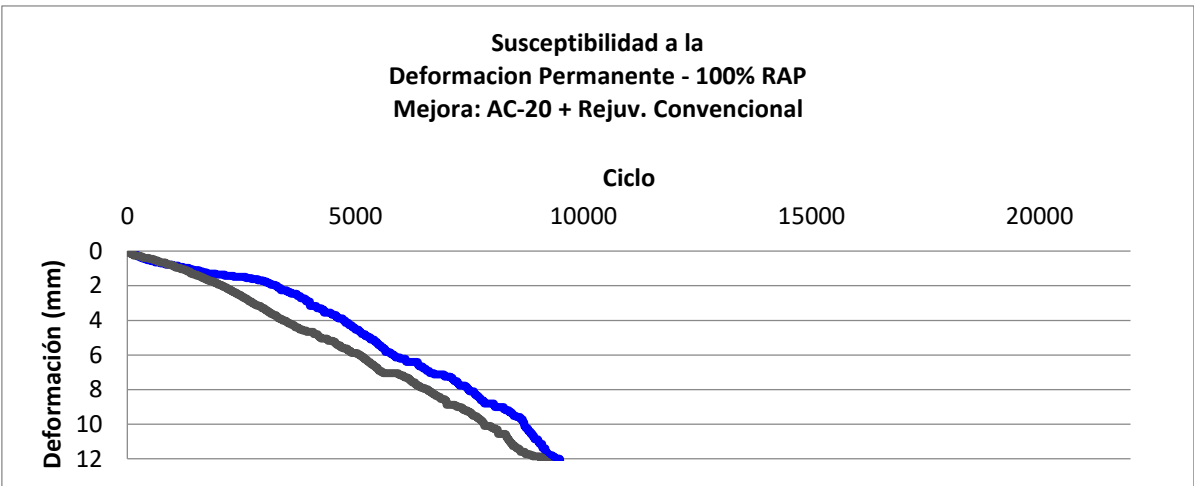
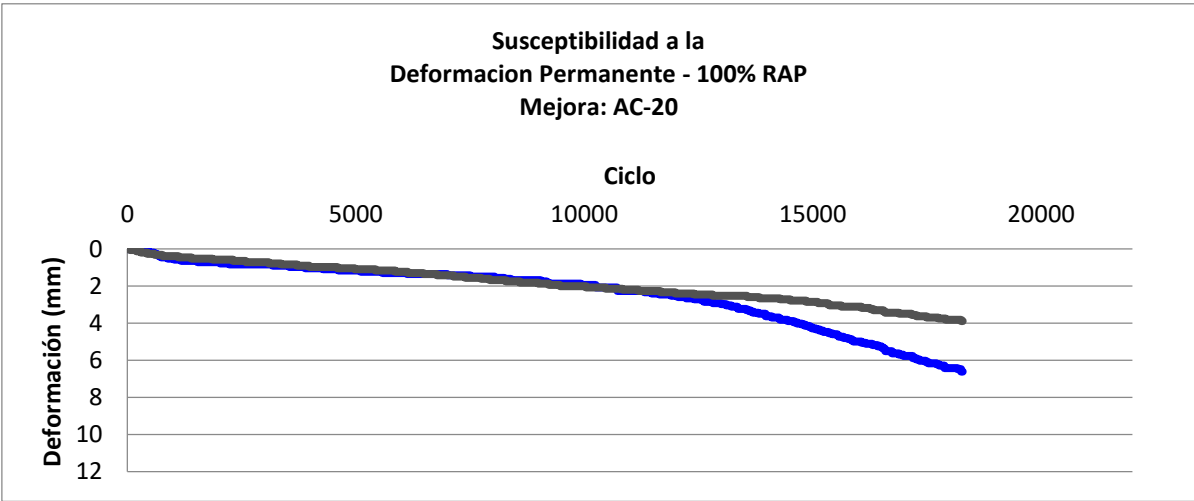


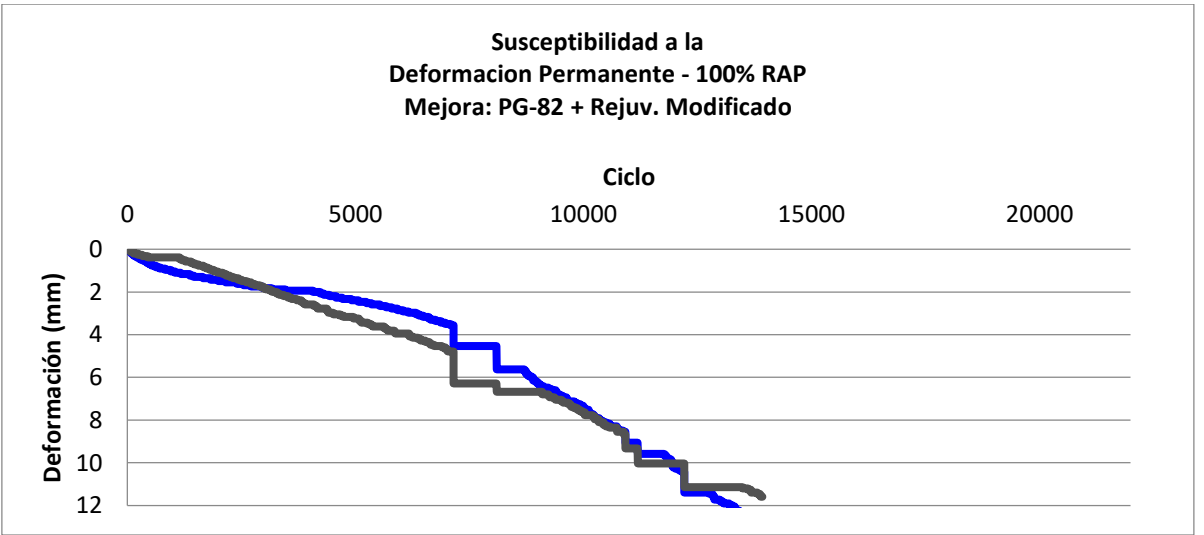
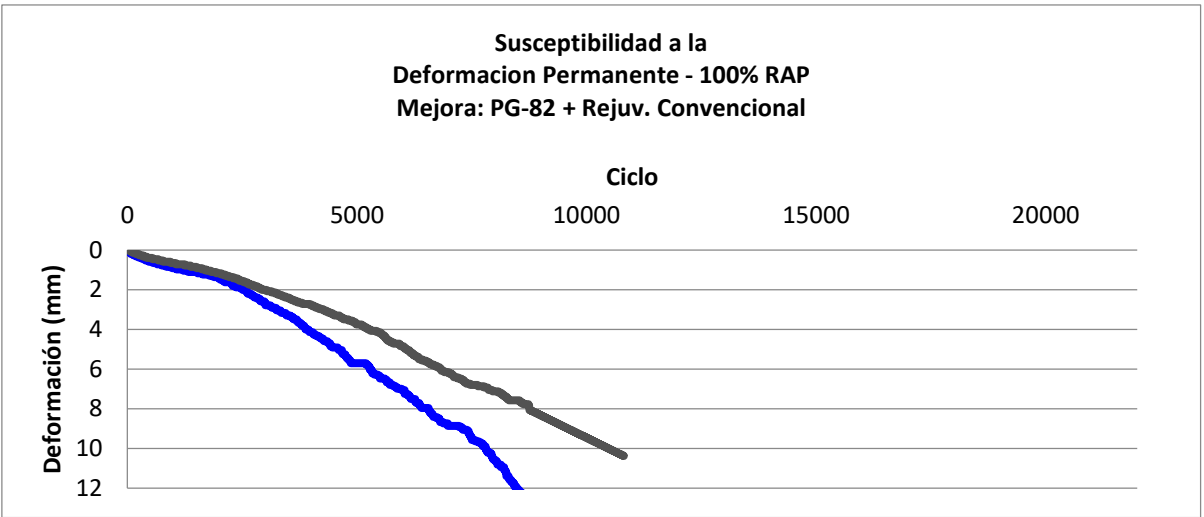
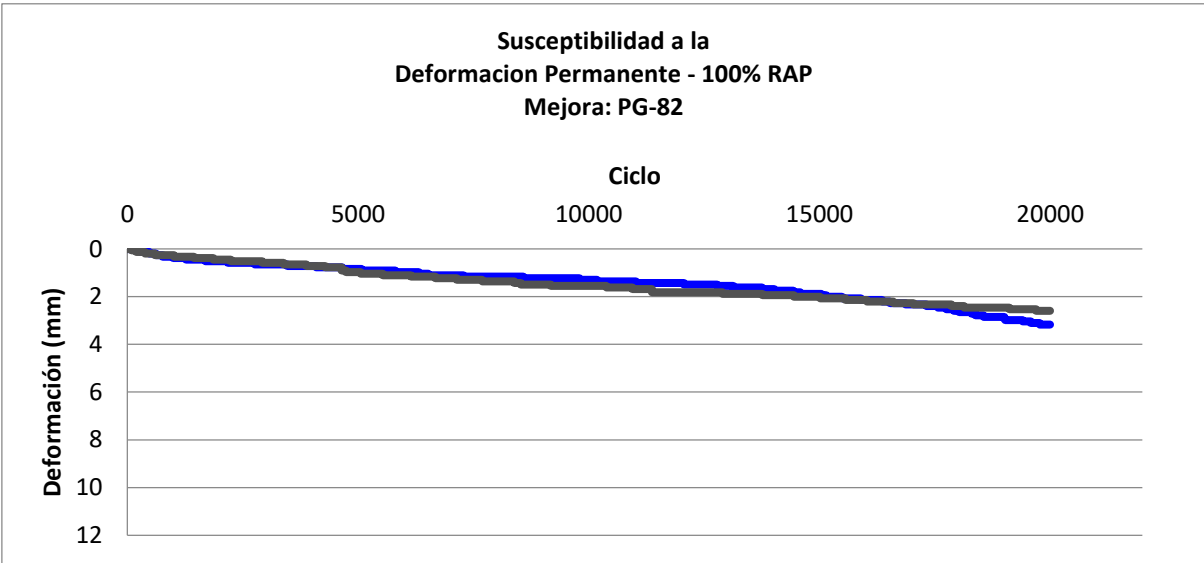












Anexo 5. Tarjeta de Precio Unitario de Carpeta Asfáltica Densa en Planta Virgen

Análisis: CarpetaAsfáltica		Unidad: M3				
CARPETA DE CONCRETO ASFALTICO MODIFICADO, P.U.O.T.						
MATERIALES						
MASF-CAMPG7022	CEMENTO ASFALTICO MODIFICADO CON POLIMEROS GRADO PG 70-22, LAB. INSTALACIONES DEL PRODUCTOR	TON	\$16,760.00	0.110	\$1,843.60	
MAPET-AC1/4AF	ARENA DE TRITURACION PARA MEZCLA ASFALTICA, DE 1/4" A FINOS, VOLUMEN MEDIDO SUELTO, LAB LAB. PLANTA DE ASFALTO	M3	\$502.00	0.579	\$290.66	
MAPET-GTA3/4AF	GRAVA TRITURADA DE 3/4" A 1/4" (FINOS) PARA CARPETA ASFALTICA, VOLUMEN MEDIDO SUELTO, LAB. LAB. PLANTA DE ASFALTO	M3	\$492.00	0.386	\$189.91	
MAPET-FILLERASF	FILLER PARA MEZCLA ASFALTICA, VOLUMEN MEDIDO SUELTO, LAB. PLANTA DE ASFALTO	M3	\$482.00	0.050	\$24.10	
Subtotal: MATERIALES					\$2,348.27	
MANO DE OBRA						
CUAJ-02080CA	PERSONAL: 2 OFICIAL ASFALTERO + 6 AYUDANTES GRAL					
MO56	AYUDANTE GENERAL	JORN	\$376.62	6.000	\$2,259.72	
MO73A	OFICIAL ASFALTERO	JORN	\$715.06	2.000	\$1,430.12	
MO65	CABO DE OFICIOS	JORN	\$773.81	1.000	\$773.81	
Importe:					\$4,463.65	
Rendimiento:					48.000	\$92.99
Subtotal: MANO DE OBRA					\$92.99	
EQUIPO Y HERRAMIENTA						
BEQUI-PTA	EQUIPO: PLANTA ASFALTO + CARGADOR, GENERADOR, TANQUE ESTACIONARIO					
EQPLASFG	GENERADOR ELECTRICO 520 KW	HR	\$574.08	1.000	\$574.08	
EQPALF160	CARGADOR FRONTAL 3 YD3	HR	\$628.42	2.000	\$1,256.84	
EQPLAS150	PLANTA PORTATIL ASFALTO EN CALIENTE, 150 TON/HR, INCLUYE 3 TOLVAS, TANQUE ALMACEN DE ASFALTO	HR	\$7,303.61	1.000	\$7,303.61	
BEQUI-CA10A	EQUIPO: PAVIMENTADORA + 2 RODILLOS LISOS+ 1 RODILLO DE NEUMATICOS					
EQCOM080	COMPACTADOR DOBLE RODILLO LISO 10 TON	HR	\$463.58	2.000	\$927.16	
EQCAM020	CAMION PIPA PARA AGUA DE 10 M3	HR	\$475.34	0.350	\$166.37	
EQO356	PAVIMENTADORA FINISHER DE ALTA DENSIDAD	HR	\$1,095.81	1.000	\$1,095.81	
EQCOM040	COMPACTADOR DE 9 NEUMATICOS DE 8 TON CAP.	HR	\$380.04	1.000	\$380.04	
Importe:					\$11,703.91	
Rendimiento:					48.000	\$243.83
Subtotal: EQUIPO Y HERRAMIENTA					\$243.83	
BASICOS						
BASF-RL0.6L-M2	BASICO: RIEGO DE LIGA ASFALTICA ECR 65-20 EN PROPORCION DE 0.6 LT/M2, INCLUYE BARRIDO DE LA SUPERFICIE.	M2	\$7.93	10.000	\$79.30	
BASUM-AGUA	BASICO: AGUA PARA RIEGOS Y CONCRETOS, INCLUYE: ACARREO INTERNO HASTA 15 KM (NO INCLUYE RIEGOS)	M3	\$36.27	0.035	\$1.27	
BACAR-CARPETA	BASICO: ACARREO DE MEZCLA ASFALTICA, DE LA PLANTA DE ELABORACION AL SITIO DE UTILIZACION, VOLUMEN MEDIDO SUELTO	M3	\$59.38	1.200	\$71.26	
Subtotal: BASICOS					\$151.83	
COSTO DIRECTO					\$2,836.92	

Anexo 6. Tarjeta de Precio Unitario Carpeta Asfáltica Reciclada al 60%

Análisis: Carpeta Asfáltica R60% Unidad: M3
 CARPETA DE CONCRETO ASFALTICO MODIFICADO CON 60%
 DE RAP EN LA MEZCLA, P.U.O.T.

MATERIALES

MASF-CAMPG7022	CEMENTO ASFALTICO MODIFICADO CON POLIMEROS GRADO PG 70-22, LAB. INSTALACIONES DEL PRODUCTOR	TON	\$16,760.00	0.058	\$965.38
MAPET-AC1/4AF	ARENA DE TRITURACION PARA MEZCLA ASFALTICA, DE 1/4" A FINOS, VOLUMEN MEDIDO SUELTO, LAB. PLANTA DE ASFALTO	M3	\$502.00	0.261	\$130.80
MAPET-GTA3/4AF	GRAVA TRITURADA DE 3/4" A 1/4" (FINOS) PARA CARPETA ASFALTICA, VOLUMEN MEDIDO SUELTO, LAB. PLANTA DE ASFALTO	M3	\$492.00	0.174	\$85.46
REJUV-SI	REJUVENECEDOR MODIFICADO SECRETO INDUSTRIAL	TON	\$20,000.00	0.008	\$160.00

Subtotal: MATERIALES

\$1,341.63

MANO DE OBRA

CUAJ-02080CA	PERSONAL: 2 OFICIAL ASFALTERO + 6 AYUDANTES GRAL				
MO56	AYUDANTE GENERAL	JORN	\$376.62	6.000	\$2,259.72
MO73A	OFICIAL ASFALTERO	JORN	\$715.06	2.000	\$1,430.12
MO65	CABO DE OFICIOS	JORN	\$773.81	1.000	\$773.81

Importe:

\$4,463.65

Rendimiento:

48.000 \$92.99

Subtotal: MANO DE OBRA

\$92.99

EQUIPO Y HERRAMIENTA

BEQUI-PTA	EQUIPO: PLANTA ASFALTO + CARGADOR, GENERADOR, TANQUE ESTACIONARIO				
EQPLASFG	GENERADOR ELECTRICO 520 KW	HR	\$574.08	1.000	\$574.08
EQPALF160	CARGADOR FRONTAL 3 YD3	HR	\$628.42	2.000	\$1,256.84
EQPLASF150	PLANTA PORTATIL ASFALTO EN CALIENTE, 150 TON/HR, INCLUYE 3 TOLVAS, TANQUE ALMACEN DE ASFALTO, SEC. IND	HR	\$14,000.00	1.000	\$14,000.00
BEQUI-CA10A	EQUIPO: PAVIMENTADORA + 2 RODILLOS LISOS+ 1 RODILLO DE NEUMATICOS				
EQCOM080	COMPACTADOR DOBLE RODILLO LISO 10 TON	HR	\$463.58	2.000	\$927.16
EQCAM020	CAMION PIPA PARA AGUA DE 10 M3	HR	\$475.34	0.350	\$166.37
EQO356	PAVIMENTADORA FINISHER DE ALTA DENSIDAD	HR	\$1,095.81	1.000	\$1,095.81
EQCOM040	COMPACTADOR DE 9 NEUMATICOS DE 8 TON CAP.	HR	\$380.04	1.000	\$380.04

Importe:

\$18,400.30

Rendimiento:

48.000 \$383.34

Subtotal: EQUIPO Y HERRAMIENTA

\$383.34

BASICOS

BASF-RL0.6L-M2	BASICO: RIEGO DE LIGA ASFALTICA ECR 65-20 EN PROPORCION DE 0.6 LT/M2, INCLUYE BARRIDO DE LA SUPERFICIE.	M2	\$7.93	10.000	\$79.30
BASUM-AGUA	BASICO: AGUA PARA RIEGOS Y CONCRETOS, INCLUYE: ACARREO INTERNO HASTA 15 KM (NO INCLUYE RIEGOS)	M3	\$36.27	0.035	\$1.27
BACAR-CARPETA	BASICO: ACARREO DE MEZCLA ASFALTICA, DE LA PLANTA DE ELABORACION AL SITIO DE UTILIZACION, VOLUMEN MEDIDO SUELTO	M3	\$59.38	1.200	\$71.26

Subtotal: BASICOS

\$151.83

COSTO DIRECTO

\$1,969.79