

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
QUERÉTARO

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESTUDIO DEL EFECTO DE LA PUREZA DE LA CAL
HIDRATADA UTILIZADA COMO FILLER EN UNA BASE
ESTABILIZADA CON ASFALTO ESPUMADO

TESIS

QUE COMO PARTE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN
CIENCIAS CON LINEA TERMINAL CONSTRUCCIÓN.

PRESENTA:

JOSÉ WILBERT VIVEROS RAMOS

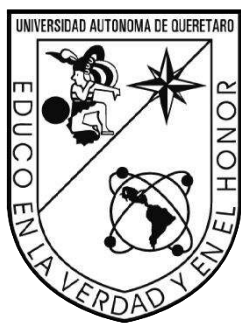
DIRIGIDO POR:

JOSÉ LUIS REYES ARAIZA

CO-DIRECTOR:

HORACIO DELGADO ALAMILLA

QUERÉTARO, QRO. A 25 DE JUNIO DE 2021.



UNIVERSIDAD AUTONOMA DE QUERÉTARO

FACULTAD DE INGENIERÍA

MAESTRÍA EN CIENCIAS CON LINEA TERMINAL
CONSTRUCCIÓN

ESTUDIO DEL EFECTO DE LA PUREZA DE LA CAL HIDRATADA
UTILIZADA COMO FILLER EN UNA BASE ESTABILIZADA CON
ASFALTO ESPUMADO

TESIS

QUE COMO PARTE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN
CIENCIAS CON LINEA TERMINAL CONSTRUCCIÓN.

PRESENTA:

JOSÉ WILBERT VIVEROS RAMOS

DIRIGIDO POR:

JOSÉ LUIS REYES ARAIZA

CO-DIRECTOR:

HORACIO DELGADO ALAMILLA

Presidente: José Luis Reyes Araiza

Secretario: Horacio Delgado Alamilla

Vocal: Wilfrido Martínez Molina

Suplente: Elia Mercedes Alonso Guzmán

Suplente: Roberto Israel Hernández Domínguez

Centro Universitario, Querétaro, Qro.

Aprobado por el H. Consejo Universitario en Junio de 2021, México.



Dedicatorias

Quiero dedicar este proyecto y esta jornada a través de la maestría principalmente a mi madre Ma. De Jesús y a mis sobrinas Yaneli y Sofía, también a mis hermanos Idalia, Diodoro y Eduardo quienes pese a la distancia están constantemente apoyándome en todo. Todos ellos son mi principal motivación para levantarme todos los días y hacer las cosas como Dios manda.

“Entrega el Corazón”

Dirección General de Bibliotecas UAQ



Agradecimientos

Agradecer principalmente a Dios, como sea que los concibamos cada uno de nosotros.

Gracias infinitas a mi madre, mis hermanos, mis tíos y mis familiares, quienes están apoyándome constantemente.

Gracias al equipo de trabajo del Laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Ruelas” por ayudarme a con las bases para desarróllame como profesionista, principalmente a la Dra. Elia Mercedes, al Dr. Wilfrido Martínez, al Dr. Hugo Luis y a la Mta. Cindy Lara.

Gracias al Grupo de Asfaltos y Mezclas Asfálticas del Instituto Mexicano del Transporte en especial al Dr. Horacio Delgado y al Ingeniero Aldo Salazar, por todo el apoyo técnico y académico que me brindaron para la realización de este proyecto, sin su apoyo no sería posible la culminación en forma.

Gracias a los académicos de la Universidad Autónoma de Querétaro, vertebra principal para el inicio y culminación de la Maestría, principalmente al Dr. Reyes Araiza, al M. Roberto Israel y a la Dra. Ma de la Luz Pérez Rea.

Gracias al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por su apoyo para los proyectos participantes en el programa de posgrado de calidad incluyendo este.

Gracias a Grupo Cimaf por la oportunidad de laborar con ellos y por la capacitación que me brindaron, principalmente a los Ingenieros Joel Amezcua y Refugio Barajas así como al Licenciado Rodrigo Ponce y a la mano de obra del taller.

Gracias a mis amigos, los del barrio, los del trabajo y los de la escuela, gracias Fredy, Giovanni, Cardiel, Iliana, Ariel, Moisés, Colín, Lalo, Chely, Omar, Zoe, etc.



Índice

Dedicatorias.....	i
Agradecimientos	ii
Índice de Tablas	v
Índice de Figuras	vii
Índice de Imágenes.....	ix
Abreviaturas y Siglas	x
Resumen.....	xi
Abstract.....	xii
1. Introducción	1
1.1. Justificación.....	2
1.2. Motivación.....	3
1.3. Planteamiento y delimitación del problema.....	5
1.4. Descripción de la propuesta de solución.....	6
1.5. Fundamentación teórica	7
2. Estado del arte.....	9
2.1. Proceso de espumado a base de agua	10
2.2. Reciclaje de pavimentos y agregados.....	12
2.3. Materiales de relleno.....	14
2.4. Métodos de estabilización de agregados.....	16
2.5. Matrices de agregado reciclado estabilizadas con asfalto espumado.....	18
2.6. Estudios de impacto ambiental.....	20
3. Hipótesis.....	25
4. Objetivos	26
5. Materiales y Metodología	26
5.1. Caracterización de materiales.....	27
5.1.1. Asfalto.....	27
5.1.2. Agregado pétreo	28
5.1.3. Asfalto Espumado	32
5.2. Diseño de una base estabilizada con asfalto espumado.....	35
5.2.1. Nivel 1: Determinación del tipo y cantidad de filler a utilizar.....	35



5.2.2.	Nivel 2: Contenido óptimo de asfalto espumado	39
5.2.3.	Nivel 3: Características mecánicas de la mezcla.....	40
5.3.	Caracterización mediante ERX	44
5.4.	Análisis costos	47
5.4.1.	Diseño de una estructura de pavimento	47
5.4.2.	Integración de un precio unitario para la construcción de una estructura de pavimento.....	49
6.	Resultados y Discusiones.....	50
6.1.	Clasificación del Asfalto utilizado	50
6.2.	Agregado pétreo	51
6.2.1.	Granulometría	52
6.2.2.	Plasticidad	55
6.2.3.	Densidad Máxima del Agregado.....	55
6.3.	Propiedades espumantes del asfalto	57
6.4.	Características del Hidróxido de Calcio	59
6.5.	Características de las mezclas estabilizadas con asfalto espumado	60
6.5.4.	Correlación de las propiedades mecánicas.....	73
6.6.	Caracterización química de las matrices de asfalto espumado.....	74
6.6.1.	Caracterización de la Mezcla CAL 80.	74
6.6.2.	Caracterización de la Mezcla CAL 90.	76
6.6.3.	Caracterización de la Mezcla RAG 80.....	78
6.6.4.	Caracterización de la Mezcla RAG 90.....	79
6.7.	Análisis y comparativa de costos	81
6.7.1.	Generador	81
6.7.2.	Análisis de Precios Unitarios	84
6.7.3.	Presupuestos y comparación	89
7.	Conclusiones	94
8.	Referencias.....	97



Índice de Tablas

Tabla 1. Concepto de recuperación de pavimentos asfálticos.....	3
Tabla 2. Técnicas de espumado.	10
Tabla 3. Consumo de Materiales por método de reconstrucción de pavimento	22
Tabla 4. Vida de fatiga para cada variable	25
Tabla 5. Origen de Agregados Utilizados.	28
Tabla 6. Características de calidad Granulométricas del Agregado	29
Tabla 7. Calidad de Cal a utilizar como Material Filler	36
Tabla 8. Valores Mínimos de ITS y TSR para el Nivel 1	39
Tabla 9. Recomendación de Contenido de Asfalto Espumado según la Granulometría del Material	39
Tabla 10. Valores Mínimos de ITS y TSR para el Nivel 2	40
Tabla 11. Valores Mínimos de Cohesión y Ángulo de Fricción Interno.	43
Tabla 12. Características Propuestas de Tránsito (Propuesta).	47
Tabla 13. Distribución Vehicular (Propuesta).	47
Tabla 14. Tipos de Estructuras de Pavimento (Propuesta).	48
Tabla 15. Propiedades mecánicas de los materiales (Garnica y otros, 2018).	48
Tabla 16. Parámetros de Calidad para la Caracterización del Asfalto.	51
Tabla 17. Resultados Granulométricos de los Agregados.	52
Tabla 18. Combinación de Agregados Utilizados.	53
Tabla 19. Granulometría de la combinación de agregados.	54
Tabla 20. Reporte de Ensaye de Plasticidad en Agregado.	55
Tabla 21. Resultados de Ensaye de Plasticidad en Agregados.	55
Tabla 22. Densidad de Agregados.	57
Tabla 23. Resultados de Corridas a Diferentes Temperaturas.	59
Tabla 24. Calidad de cal hidráulica con Pureza del 80% (CALHIDRA, 2020).	59
Tabla 25. Calidad de cal hidráulica con Pureza del 90% (CALHIDRA, 2020).	59
Tabla 26. Resumen de Mezclas Propuestas a Ensayar.	60
Tabla 27. Contenidos de Asfalto Espumado para la Mezcla REF.	62
Tabla 28. Contenidos de Asfalto Espumado para la Mezcla CAL80.	63
Tabla 29. Contenidos de Asfalto Espumado para la Mezcla CAL90.	64
Tabla 30. Contenidos de Asfalto Espumado para la Mezcla RAG80.	65
Tabla 31. Contenidos de Asfalto Espumado para la Mezcla RAG90.	66
Tabla 32. Resultados de Nivel 2 con un Contenido Óptimo de Asfalto Espumado de 2.4%.	67
Tabla 33. Valor de Mr en diferentes confinamientos para cada mezcla.	74
Tabla 34. Contenido den Masa de Elementos de Mezcla CAL80.	75
Tabla 35. Contenido den Masa de Elementos de Mezcla CAL90.	77
Tabla 36. Contenido den Masa de Elementos de Mezcla RAG80.	79
Tabla 37. Contenido de Masa de Elementos de Mezcla RAG90.	80
Tabla 38. Cuantificación de Materiales.	83



Tabla 39. APU Carpeta de Concreto Asfáltico.....	84
Tabla 40. APU Riego de Liga.....	85
Tabla 41. APU Sub Base.....	85
Tabla 42. APU Base Hidráulica.....	86
Tabla 43. APU Base Asfáltica en Caliente.....	87
Tabla 44. APU Base estabilizada con AE.....	88
Tabla 45. Presupuesto Caso 1.....	89
Tabla 46. Presupuesto Caso 2.....	90
Tabla 47. Presupuesto Caso 3.....	91
Tabla 48. Presupuesto para un valor de MR de 1240.06MPa en una Base Estabilizada con AE.....	93

Dirección General de Bibliotecas UAQ



Índice de Figuras

Figura 1. Modelo Multi-Criterio para el Reciclaje de Pavimentos	13
Figura 2. Comportamiento Mecánico del Pavimento.	17
Figura 3. Tipo de Proceso y repercusión del mismo en términos de emisiones y consumo de energía	22
Figura 4. Estructura de pavimento propuesta para la variable C	23
Figura 5. Estructura de pavimento propuesta para la variable B.	24
Figura 6. Estructura de pavimento propuesta para la variable C.	24
Figura 7. Procedimiento para la Caracterización de Asfalto Espumado.....	27
Figura 8. Procedimiento para la Caracterización del Agregado.	27
Figura 9. Límites Granulométricos	30
Figura 10. Ejemplo de una curva de compactación	32
Figura 11. Gráfica Expansión contra Tiempo.	34
Figura 12. Niveles de Diseño según el Método Wirtgen.	35
Figura 13. Estado de Esfuerzos del Ensaye Triaxial.....	41
Figura 14. Fenómeno de Florescencia	44
Figura 15. Ejemplo de Espectrómetro	45
Figura 16. Integración de un Precio Unitario	49
Figura 17. Gráficas Granulométricas de las Muestras.	53
Figura 18. Gráficas Granulométricas de la Combinación de Agregados.....	54
Figura 19. Gráfica de Compactación de Agregado RAP.	56
Figura 20. Gráfica de Compactación de Agregado RAP+MV.	56
Figura 21. Corrida de Tiempo Contra Volumen a 160 °C.	57
Figura 22. Corrida de Tiempo Contra Volumen a 170 °C.	58
Figura 23. Corrida de Tiempo Contra Volumen a 180 °C.	58
Figura 24. Comparación y Resultados del Nivel 1.	60
Figura 25. Gráfica de Contenidos de Asfalto Espumado para la Mezcla REF.....	61
Figura 26. Gráfica de Contenidos de Asfalto Espumado para la Mezcla CAL80.	62
Figura 27. Gráfica de Contenidos de Asfalto Espumado para la Mezcla CAL90.	63
Figura 28. Gráfica de Contenidos de Asfalto Espumado para la Mezcla RAG80.....	64
Figura 29. Gráfica de Contenidos de Asfalto Espumado para la Mezcla RAG90.....	65
Figura 30. Comparación de Resultados de Nivel 2 con un Contenido Óptimo de Asfalto Espumado de 2.4%.....	67
Figura 31. Envoltente de la Mezcla CAL80.....	68
Figura 32. Envoltente de la Mezcla CAL90.....	69
Figura 33. Envoltente de la Mezcla RAG80.	70
Figura 34. Envoltente de la Mezcla RAG90.	71
Figura 35. Resultados de Ángulo de Fricción y Cohesión de las Mezclas Ensayadas.	72
Figura 36. Valores de Cohesión Retenida para cada Mezcla.....	72
Figura 37. Módulo de resiliencia para una base estabilizada con 2.4% de A.E. y 1% de cal	73



Figura 38. Espectrómetro de Fluorescencia de Mezcla CAL80.	75
Figura 39. Espectrómetro de Florescencia de Mezcla CAL90.	76
Figura 40. Espectrómetro de Florescencia de Mezcla RAG80.	78
Figura 41. Espectrómetro de Florescencia de Mezcla RAG90.	80
Figura 42. Espesores de Pavimento para Caso 1.....	81
Figura 43. Espesores de Pavimento para Caso 2.....	82
Figura 44. Espesores de Pavimento para Caso 3.....	82
Figura 45. Comparación de presupuestos para la construcción de caminos.	92
Figura 46. Estructura de pavimento para un Mr de1240.06 MPa.	92
Figura 47. Comparación del valor de Mr para cada variable propuesta.	95

Dirección General de Bibliotecas UAQ



Índice de Imágenes

Imagen 1. Recuperación de Pavimento en Frio .	7
Imagen 2. Proceso de Recuperación y Pavimentación.	8
Imagen 3. Cámara de Espumado de Asfalto.	8
Imagen 4. Cuarteo de Agregado en Laboratorio.	28
Imagen 5. Ensaye de Plasticidad en Agregado Utilizado.	31
Imagen 6. Especificaciones de Molde para el Ensaye Proctor.	32
Imagen 7. Equipo de espumado WLB-10S.	33
Imagen 8. Cubeta para Medición de Volumen	33
Imagen 9. Mezcladora WLM30.	36
Imagen 10. Compactador Giratorio SERVOPAC.	37
Imagen 11. Probetas para Ensaye Marshall.	37
Imagen 12. Ensaye de Espécimen en Prensa Marshall.	38
Imagen 13. Acondicionamiento de Espécimen en Horno.	40
Imagen 14. Equipo para la compactación de Especímenes de 30cm.	42
Imagen 15. Acondicionamiento de Especímenes para Ensaye Triaxial.	42
Imagen 16. Ensaye Triaxial.	43
Imagen 17. Muestra de Agregado Estabilizado con Asfalto Espumado.	47
Imagen 18. Muestra de Agregado RAP.	52
Imagen 19. Muestra de Mezcla CAL80 en Microscopio.	76
Imagen 20. Muestra de Mezcla CAL90 en Microscopio.	77
Imagen 21. Muestra de Mezcla RAG80 en Microscopio.	79
Imagen 22. Muestra de Mezcla RAG90 en Microscopio.	81



Abreviaturas y Siglas

AE	Asfalto Espumado
ASH	Hidratos de Aluminosilicatos
ASSHTO	La Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transportes
ASTM	Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales
CASH	Hidratos de Aluminosilicatos de Calcio
CPCR	Reciclaje frío en planta
CPHR	Reciclaje caliente en planta
CIR	Reciclaje frío en sitio
CSH	Hidratos de Silicato de Calcio
ESAL	Carga de Eje Equivalente
EUA	Estados Unidos de América
FA	Fly Ash (Ceniza Volante)
FSCOPV	Factor de sobre costo sobre el valor de venta
GGBFS	Planta explosión granulada de horno de escoria
HIR	Reciclaje caliente en sitio
HL	Hidróxido de calcio o cal hidráulica
HMA	Mezcla Asfáltica en Caliente
HWMA	Mezcla Asfáltica en Semi-Tibia
IMT	Instituto Mexicano del Transporte
IP	Índice Plástico
ITS	Resistencia a la Tensión Indirecta
kPa	Kilo Pascales
LL	Límite Líquido
LP	Límite Plástico
MCDM	Modelos de optimización multi-criterio para el reciclaje de pavimentos
MCS	Materiales Cementantes Suplementarios
MPa	Mega Pascales
MV	Material (agregado) Virgen
PG	Grado de Desempeño del Asfalto
PVSM	Peso Volumétrico Seco Máximo
RAP	Pavimento Asfáltico Recuperado
RC	Agregado Reciclado de Concreto
SCT	Secretaría de Comunicaciones y Transportes
SEM	Microscopio Electrónico de Barrido
SF	Silica Fume (Humo de Silice)
TDPA	Tránsito Diario Promedio Anual
TSR	Susceptibilidad a la Humedad
WMA	Mezcla Asfáltica Templada



Resumen

Las actuales condiciones para la construcción de pavimentos en México han hecho que los constructores busquen nuevos materiales y diferentes métodos de construcción; esto ya que por un lado, la obtención de agregados pétreos es cada día más costoso debido a su escasez, y por otro lado, la inflación de insumos hace que aumenten los costos de los métodos constructivos. Por esta razón hay una constante innovación en el uso de materiales y en métodos de construcción, un ejemplo de esto es la reutilización de agregados reciclados para la elaboración de las diferentes capas de un pavimento, o también los diferentes métodos de estabilización de agregados. En este proyecto se hace uso de agregado reciclado producto de la recuperación de pavimento asfáltico y se estabiliza con una mezcla de asfalto espumado con cal hidráulica para obtener un material el cual se puede utilizar como base. Siguiendo la metodología de diseño de Wirtgen se obtiene la cantidad de espuma a mezclar con el agregado y para el caso de la cal se utiliza en purezas del 80 y 90% el cual se agrega un contenido del 1%, se caracterizan las mezclas a razón de tensión indirecta, ángulo de fricción, cohesión y mediante el ensaye de Fluorescencia de rayos X, además se hace un análisis de precios unitarios para saber qué tan conveniente es la implementación de este método de estabilización. Con los datos obtenidos podemos comprobar la calidad de este método de estabilización el cual ya es muy utilizado en diferentes partes del mundo pero apenas está siendo aplicado en México.



Abstract

The actual conditions for the construction of pavements in Mexico have done builders to search for new materials and different methods for the construction of pavements; all this because obtaining stone aggregates is becoming more expensive each year due to shortages and inflation of supplies for construction, all this increases the costs of construction methods. For this reason there is a constant innovation in the use of material and methods of construction, as an example of this is the reuse of recycled aggregates in the elaboration of the different layers of a pavement, also the many different methods to stabilize aggregates. In this project reclaimed asphalt pavement aggregate is used and stabilized with a mix of asphalt pavement in combination with lime to obtain a material which can be used as a based course. Based on the Wirtgen design methodology is possible to obtain the amount of foam to mix with the aggregate, and for the case of the lime this is used in purity of the 80 and 90 percent which is added in content of 1 percent; the mix is characterized in tests like indirect stress tension, friction angle, cohesion and by testing X-ray fluorescence; also an analysis of unit prices is made to know how convenient is the implementation of this stabilization method. With the data obtained, it will be possible check the quality of this method, which is already often used in many countries of the world, but just beginning to be used in Mexico.



1. Introducción

Para la construcción de las capas que conforman la estructura de un pavimento es necesario el uso de agregados pétreos los cuales en su estado natural no cumplen con la calidad necesaria para poder ser utilizados. Materiales tales como suelos, rocas, gravas, arenas, etc., normalmente son extraídos y procesados en bancos de materiales, que se encuentran en estado natural en principio. De éstos, se obtienen materiales con características especiales, que generalmente presentan impactos ambientales durante su extracción y tratamiento (Damián, Martínez, & Aguirre, 2000).

Una vez que se tienen los agregados con las características necesarias para poder ser usados es necesario una estabilización de los mismos para mejorar su desempeño al ser usados en la construcción de capas para pavimentos. La estabilización se define como la mezcla de dos o más materiales para adquirir las características deseadas. Se distinguen dos tipos de estabilización: mecánica y química (Bustamante, 2009).

“La construcción de pavimentos nuevos consume muchos recursos tanto económicos como naturales, principalmente por cuanto a los materiales que conforman las capas estructurales del pavimento por ser éstos no renovables. Por esta razón, es importante mencionar que una de las metodologías utilizadas a nivel mundial para mitigar el consumo de los materiales en la construcción de pavimentos es la reutilización del material de la carpeta asfáltica. A este método se le conoce en inglés como Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)” (García, Delgado, & Campos, 2017).

“Las diferentes técnicas utilizadas para la implementación del RAP dependen principalmente de la temperatura de aplicación del material reciclado, las cuales se dividen en mezclas de reciclaje en frío, en tibio o en caliente. En lo referente al reciclaje en frío, el material recuperado (RAP) generalmente se utiliza en la capa de base hidráulica mediante el uso de un agente estabilizador, siendo los agentes más utilizados la emulsión asfáltica o el asfalto espumado” (García, Delgado, & Campos, 2017).

La capa de Base es la segunda de mejores especificaciones. La espuma de asfalto se emplea para la estabilización de bases, por la adición de materiales o mejoramiento de los mismos, los que se utilizan para reducir el índice de plasticidad, incrementar cohesión o disminuir el desgaste del “esqueleto mineral” del pavimento. Es así como se incrementa el módulo de resiliencia de la capa, que esto a su vez aumenta el número de repeticiones necesarias para presentar deformaciones, se incrementa la zona elástica recuperable del material. Al estabilizar una base con asfalto, no sólo se incrementan las propiedades mecánicas de la capa de base, también crea un efecto de reducción de la permeabilidad de la base, por lo que sufre menores deformaciones por el efecto de la variación del contenido de agua (García, Delgado, & Campos, 2017).

Para la elaboración de una base estabilizada con asfalto espumado se deben de tomar en cuenta principalmente los factores de calidad que deben de cumplir los materiales a utilizar



los cuales son: asfalto, agregado y filler; para esto se cuenta con la normativa establecida por la ASTM, ASSHTO y la normativa mexicana vigente; para el caso de la espuma de asfalto así como la base estabilizada, ambos deben cumplir con las características establecidas en el manual de diseño Wirtgen, ya que aún no se cuenta con normativa de calidad.

La normativa mexicana contempla los materiales a utilizar en la construcción de bases incluso cuando se les tiene que dar algún tratamiento adicional para que cumplan con la calidad necesaria, así se les puede clasificar como base negra, base hidráulica o base cementada; pero no se abarca la estabilización con asfalto espumado ni el uso de materiales reciclados.

1.1. Justificación

La estabilización de bases con asfalto espumado es una tecnología de reciente aplicación en México, por lo cual no se cuenta con normativa enfocada en este método, investigaciones anteriores muestran la calidad de las bases estabilizadas con asfalto espumado destacando las propiedades mecánicas del material en comparación con otros métodos tradicionales; comúnmente como material de filler se utiliza cal en purezas del 80%; además cuando se utiliza agregado producto del reciclaje de pavimento es en porcentajes no mayores al 70%. Para este trabajo se utilizará cal en purezas del 80% y 90% como materiales de filler y agregado reciclado en diferentes porcentajes, si se comprueba la calidad de la base con el uso de diferentes tipos de filler, se puede abrir el campo para otros materiales como sílice, metacaolín, cenizas, etc., además, se pueden reducir de costos al no necesitar material de aporte (agregado virgen), de esta manera se obtendrá una base con calidad aceptable, económica y se agilizará la rehabilitación de caminos en comparación con otros métodos de estabilización tradicionales.

Desde diciembre de 2018 se cuenta con 528,175 km existentes de carretera, de los cuales 171,347 km son pavimentados. De esta red de pavimentos, la mayor longitud de carreteras y caminos, por estado, que corresponden en orden decreciente son: Veracruz, Michoacán, Jalisco, Guerrero, Oaxaca, Chiapas, Tamaulipas, Chihuahua, Estado de México y Sonora (Federal, 2019). Para el sexenio de 2018-2024 el Gobierno Federal presentó el “Programa Nacional de Infraestructura Carretera” en el que se destinarán 30 mil millones de pesos para mantenimiento de carreteras federales y caminos rurales: se atenderán los 40 mil km de carreteras federales, serán construidos 5 mil 500 km de carretera y se invertirán 8 mil 170 millones de pesos en el Programa de Conservación y Rehabilitación de Caminos rurales para atender 600 caminos (Federal, 2019).

Como se puede ver en la construcción y rehabilitación de caminos las inversiones que se hacen son generalmente grandes, de ahí que siempre se busque dar la mejor calidad sin exceder en el costo de los materiales utilizados y proceso constructivo, es aquí donde la combinación de material RAP y Asfalto espumado como material estabilizador para la construcción de bases presentan ventajas al reducir costos cuando se aplican en la recuperación de pavimentos.



En la tabla 1 se muestra el costo por metro cúbico de la recuperación en frío de pavimentos asfálticos.

Tabla 1. Concepto de recuperación de pavimentos asfálticos (SCT, 2018).

Línea	Clave	Descripción	Unidad	Costo 2018
5862	4-02-001/03_010	Recuperación en frío de pavimentos asfálticos, conforme lo indicado en el proyecto, por unidad de obra terminada.	m3	\$ 1,581.38

El concepto está definido como el conjunto de actividades que se realizan para desintegrar la carpeta asfáltica y parte o la totalidad del material de base o subbase, por medios mecánicos en frío; remezclar en el lugar el material recuperado con materiales pétreos nuevos, modificados o estabilizados con materiales asfálticos, cemento Pórtland, Cal u otros o transformarlo en concreto hidráulico de baja resistencia; tender y compactar el material recuperado para formar una base o subbase sobre la que, posteriormente, se construirá una nueva carpeta (N-CSV-CAR-4-02-001/03). Es en este concepto donde se verá principalmente reflejado el uso de materiales estabilizados con asfalto espumado y agregado reciclado, esto último permite agilizar el flujo de trabajo en caso de no ser necesario el mezclado con material pétreo de aporte.

1.2. Motivación

En la construcción de carreteras siempre se contemplan los impactos ambientales generados tanto por la construcción así como por la obtención de los agregados y materiales utilizados. La magnitud del impacto ambiental está en función del tipo de banco que se pretenda explotar (virgen o ya utilizado con anterioridad), del equipo y la maquinaria que se utilice durante el proceso de extracción y triturado de los materiales (taladros, barrenos con voladuras, dragas, etc.).

A lo largo de todo el proceso que involucra la explotación parcial o total del banco de material seleccionado, incluyendo el equipo y maquinaria requerida, así como el transporte del material obtenido al lugar de la obra, impactan en mayor o menor medida a la naturaleza. La determinación de impactos ambientales y la implantación de medidas de mitigación inherentes, corresponde a quien vaya a explotar el banco de materiales, por lo que si se trata de un banco que se encuentre en su estado natural (virgen), los impactos ambientales causados y las medidas de mitigación deberán sumarse a los impactos causados por la construcción de las carreteras (Damián, Martínez, & Aguirre, 2000).

Una de las metodologías utilizadas a nivel mundial para mitigar el consumo de los materiales en la construcción de pavimentos es la reutilización del material de la carpeta asfáltica. A este método se le conoce en inglés como Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) (García, Delgado, & Campos, 2017). En lo referente al reciclaje en frío, el material recuperado (RAP) generalmente se utiliza en la capa de base hidráulica mediante el uso de un agente



estabilizador, siendo los agentes más utilizados la emulsión asfáltica o el asfalto espumado (García, Delgado, & Campos, 2017). Estas tecnologías de estabilización permiten reutilizar el material RAP existente ya sea en sitio o en planta, lo que se traduce en una disminución principalmente de los costos energéticos y las emisiones al medio ambiente —al ser un método de estabilización en frío—, así como en una reducción en el consumo de material pétreo y asfáltico virgen, al aprovecharse el material existente en el pavimento, además de la posibilidad de acotar los tiempos de ejecución de obras debido a que son procesos rápidos en comparación con otras metodologías (García, Delgado, & Campos, 2017).

Es importante mencionar que el manual de diseño Wirtgen contempla la posibilidad de usar un porcentaje de hasta el 100% de material RAP, en este caso no sería necesario el uso de material de aporte ni todo lo que implica su traslado al lugar de obra, además de que el RAP a utilizar se encuentra a disposición del constructor inmediatamente después de su recuperación, todo esto siempre y cuando el RAP tenga la calidad necesaria para su utilización.

Diferentes tipos de aditivos, incluyendo desechos de materiales, materiales naturales o producidos de la industria, y productos diseñados específicamente, han sido utilizados para modificar las mezclas asfálticas. Algunos ejemplos de los más utilizados son los fillers, desechos de neumáticos, fibras, polímeros y extendedores (Taherkhani & Tajdini, 2019). La cal hidráulica está compuesta de hidróxido de calcio $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ el cual es producto del apagado de cal viva utilizando agua en un hidratador. Diferentes ensayos en laboratorio y estudios de campo han demostrado que la cal hidráulica es igual o mejor que aditivos como químicos anti-desprendimiento y cemento (Taherkhani & Tajdini, 2019).

La cal hidráulica ha sido considerada como aditivo en las mezclas asfálticas desde hace mucho tiempo. Comúnmente se utilizaba para mejorar la resistencia a la humedad, envejecimiento químico y propiedades mecánicas como los módulos, resistencia, fatiga y falla térmica (Han, y otros, 2020). Es importante mencionar que para una base estabilizada con asfalto espumado el rol de la cal hidráulica es tanto con el asfalto como en el agregado utilizado, ya que se puede utilizar para compensar el material fino inexistente o faltante de la granulometría.

Las mezclas asfálticas en calientes hoy en día son las más utilizadas en México para la construcción de pavimentos flexibles. Las mezclas asfálticas en caliente son producidas con asfalto calentado a temperaturas mayores a los 150 °C; la producción y colocación consumen grandes cantidades de energía y emite grandes cantidades de gases de efecto invernadero (Chomicz-Kowalska, Gardziejczyk, & Iwański, 2017). Más de una docena de años atrás, la tecnología de las mezclas asfálticas templadas (WMA) fue introducida a la industria de la construcción de caminos Polaca; la temperatura de producción de mezclas WMA está en un rango de 100 °C a 140 °C, esta reducción de temperatura en el proceso de producción es gracias al uso de aditivos químicos o por la reducción de la viscosidad con modificadores



orgánicos, como son las ceras sintéticas obtenidas del proceso Fischer-Tropsch (Chomicz-Kowalska, Gardziejczyk, & Iwański, 2017).

Según Mohd Hasan y You (2016) las técnicas de espumado de asfalto se han usado desde hace ya 20 años como una alternativa a los métodos tradicionales para producir mezclas asfálticas. El proceso a base de agua es un simple concepto que depende del vapor de agua cuando se mezcla con asfalto precalentado. Esto permite una reducción de temperatura en la mezcla de asfalto de 20 °C a 30 °C. Aunque las WMA han demostrado un mejor desempeño en términos de ahorro de energía y reducción de emisiones, estudios a futuro son esenciales para comprender y mejorar su desempeño y eficacia (Mohd Hasan, You, & Yang, 2017).

En México el Instituto Mexicano del Transporte es el principal organismo donde se ha hecho investigación sobre las propiedades mecánicas de las bases estabilizadas con asfalto espumado usando como referencia de diseño el manual Wirtgen, el trabajo a futuro es establecer normativa de calidad para la República Mexicana en cuanto a metodología y especificaciones.

1.3. Planteamiento y delimitación del problema

Como ya se mencionó anteriormente, la utilización de materiales ya sea como adiciones o sustituciones es muy común en las mezclas asfálticas; en cuanto a asfalto espumado se refiere, en México no hay documentos que muestren el efecto directo del uso de la cal hidráulica como material de filler, mucho menos en cuanto a la pureza de la cal se refiere. Como menciona Han & Liu, (2020) la adherencia del asfalto mejora con la finura de la cal hidráulica; una cal con mayor pureza tienen mayor finura en sus partículas. Tomando en cuenta este aspecto al usar una cal más pura podemos mejorar la adherencia del asfalto con el agregado a utilizar, sin caer en un excesivo contenido de cal hidráulica.

En el caso de una base estabilizada con asfalto espumado más la adición de cal hidráulica como filler, el manual de diseño Wirtgen no especifica la pureza de la cal a utilizar. En el mercado se cuenta con cal hidráulica en diferentes tipos de pureza, las más utilizadas en la construcción son con una pureza del 80%, la cal grado químico tienen una pureza del 90%, 95% y 97% pero esta es más comúnmente utilizada en la industria alimenticia y farmacéutica. Para este proyecto se propone el uso de cal hidráulica con pureza del 80% y 90%, ya que en cuanto a costo la cal con mayor pureza puede ser muy costosa para ser utilizada en la construcción de bases para pavimentos.

Los porcentajes comúnmente utilizados de material RAP no exceden del 80%, esto dependerá de las características granulométricas del agregado, para este proyecto en caso de que el agregado RAP lo permita, se propone utilizar hasta un porcentaje del 100% en la elaboración de las probetas; dependiendo de los resultados en los ensayos mecánicos se podrá saber que tan factible es la utilización de RAP en contenidos de hasta el 100%. En caso de que sea necesario material de aporte el contenido del mismo dependerá de las características granulométricas.



Con una caracterización mineralógica de los materiales a utilizar (agregado, cal hidráulica y asfalto) por separado se espera conocer todos los elementos químicos que puedan reaccionar al hacer las mezclas de asfalto espumado, una vez hechas las probetas se tomarán muestras y se caracterizarán mediante Fluorescencia de Rayos X con el objetivo de conocer la interacción entre la cal, el asfalto y el agregado.

Las propiedades mecánicas se correlacionan con los estudios de microscopía se podrá demostrar cómo la pureza de la cal hidráulica impacta o no en la estabilización con asfalto espumado y qué tan conveniente es el uso de cal con mayores purezas.

1.4. Descripción de la propuesta de solución

El uso del asfalto espumado como método de estabilización mejora las propiedades mecánicas de las mezclas, esto para que tengan un buen funcionamiento al ser usadas en la construcción de pavimentos. El comportamiento mecánico de una base estabilizada con asfalto espumado se encuentra en un punto medio entre una base hidráulica y una base negra, siendo así rígida y permitiendo la presentación de deformaciones antes de su falla. Sumado a esto, se obtienen ventajas de impermeabilidad por la misma composición del asfalto que recubre el agregado fino.

Al hacer uso de la técnica de recuperación de pavimento en frío y usar el agregado producto de este proceso se pueden reducir costos de fabricación al evitar el uso de agregado y el transporte del mismo, el porcentaje a utilizar de agregado reciclado RAP dependerá del proyecto, de la calidad del agregado y de la zona, pudiendo hacer uso en su defecto de incluso un 100% de contenido de RAP. Una mezcla estabilizada con asfalto espumado se clasifica como una mezcla tibia (WMA), donde se usan temperaturas de mezclado a razón de 20 a 30°C menores a una mezcla en caliente (HMA); de aquí ventajas como usar menos energía en su producción lo que se refleja en costos y menos emisiones contaminantes.

Para este proyecto se proponen mezclas con un contenido del 100% de agregado RAP las cuales se estudian mecánicamente y en su defecto mezclas con un % de agregado virgen el cual dependerá de ajuste según el comportamiento mecánico de las mismas o la calidad del agregado.

Estas mezclas se hicieron en combinación de cal hidráulica en purezas del 80 y 90%, donde se conocerá de manera cuantitativa el efecto que tienen las mismas en el comportamiento mecánico; para esto se realizaron probetas para ensayos de Tensión Indirecta y Triaxial donde se obtuvieron valores de ITS, Ángulo de Fricción Interna y Cohesión.

Una vez que se obtuvo la caracterización de las mezclas se pudieron comparar entre sí mismas para conocer la mejor opción de combinación de variables para la estabilización de agregados.

Para conocer la opción más conveniente también se debe estudiar el costo de este método de estabilización frente a otros, esto se hizo mediante un Análisis de Precios Unitarios tratando de ser lo más apegado posible a los costos de los materiales al año en curso.

Sumado a esto se realiza un estudio de Fluorescencia de Rayos X, donde se puede observar el recubrimiento del agregado por el material filler y la presencia de elementos químicos en la mezcla.

1.5. Fundamentación teórica

En el caso de pavimentos flexibles siempre es necesario un tratamiento a los agregados una vez tendidos para mejorar su comportamiento y que se desempeñen correctamente en cada una de las capas del pavimento. En algunos casos cuando se cuenta con agregados de muy buena calidad solo es necesario agregar agua y compactarlos, pero en la mayoría de los casos y en especial en carreteras o caminos sometidos a altas solicitaciones es necesario mejorar aún más la calidad de las capas, para esto es necesario el uso de diferentes materiales como: cemento, cal, asfalto aditivos químicos, etc., que sirven como estabilizadores, los cuales se mezclan con los agregados se tienden y se compactan.

La calidad del agregado RAP depende de las condiciones en las que se encuentre el tramo de carretera de donde fue extraído y de la máquina renovadora de pavimento la cual puede ser configurada para que el agregado retirado tenga diferentes granulometrías. Las máquinas recicladoras modernas hoy día son más largas y poderosas, están montadas en vías o en neumáticos de alta flotación, estas máquinas contienen un tambor de corte el cual está equipado con un gran número de herramientas puntuales de ataque, este tambor normalmente gira hacia arriba y mientras la máquina avanza, el material en sitio es pulverizado transportado a las cámara de mezclado. La máquinas recicladoras están equipadas con al menos un sistema de bombeo para agregar agua al material recuperado mediante dispersores.

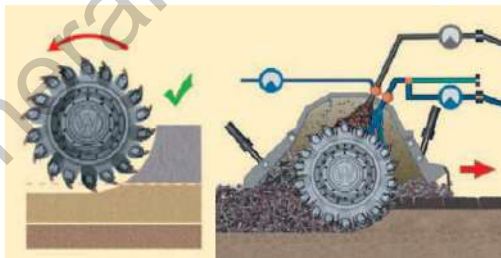


Imagen 1. Recuperación de pavimento en frío (Wirtgen GmbH, 2012).

La combinación más simple de reciclaje consiste de la máquina recicladora más un contenedor de agua, en caso de ser necesario el mezclado con asfalto también será necesario el acoplado de un contenedor de asfalto. Conforme la máquina avanza, los materiales mezclados caen detrás del tambor y golpean la puerta instalada en la parte trasera del tambor para ser tendidos de nuevo.



Imagen 2. Proceso de recuperación y pavimentación (Wirtgen GmbH, 2012).

La tecnología de espumado de asfalto de las Mezclas Asfálticas Templadas (WMA) puede ser clasificada en dos diferentes técnicas, las cuales son proceso a base de agua y proceso a base de aditivos contenedores de agua. La técnica de base de aditivos contenedores de agua es un sistema que usa humedad contenida en los sólidos para generar burbujas cuando están en contacto con el asfalto caliente (Mohd Hasan, You, & Yang, 2017).

El proceso a base de agua es un concepto simple que depende de la espuma generada por el agua cuando es introducida en asfalto precalentado. Cuando una pequeña cantidad de agua es agregada al asfalto caliente, se evapora, incrementa el volumen del asfalto y disminuye la viscosidad, lo que da como resultado un mejor recubrimiento y tabajabilidad de las mezcla de asfalto. Las altas temperaturas durante el proceso de mezclado hacen que las burbujas colapsen, y se convierta en un asfalto normal. Este proceso permite una reducción en temperatura en rangos de 20°C a 30°C (Mohd Hasan, You, & Yang, , 2017).



Imagen 3. Cámara de espumado de asfalto (García, Delgado, & Campos, 2017).

Para producir asfalto espumado, además de requerir ajustes de parámetros como la temperatura, y cantidad del agua y asfalto, también se requiere regular las condiciones en las que se recolecta la espuma. Con ese propósito, se utilizan dos parámetros a saber: la razón de expansión (Re) y la vida media ($T_{1/2}$), los cuales dependen de la temperatura y la forma del recipiente en donde se recolecta la espuma (García, Delgado, & Campos, 2017).

- Re: Representa el volumen de espuma expandido, dividido entre el volumen de asfalto original, y se mide como la altura de la espuma en función del tiempo (García, Delgado, & Campos, 2017).
- $T_{1/2}$: Equivale al tiempo transcurrido en que la altura de la espuma disminuye a la mitad de su valor máximo (García, Delgado, & Campos, 2017)

Como ya se mencionó antes los materiales filler como la cal mejoran algunas propiedades del asfalto y esto se logra sin que el material se disuelva, sino más bien se disperse. Al utilizarse en una base no se mezcla directamente con el asfalto, si no con la mezcla para la base estabilizada con asfalto espumado, de esta manera el filler no solo se mezcla con el asfalto sino que también actúa compensando el material fino necesario en la granulometría de la base, esto se refleja principalmente en el comportamiento mecánico de la base en presencia de humedad.

2. Estado del arte

Las mezclas calientes de asfalto (HMA) son mezcladas a temperaturas que van de 140°C a 160°C. En los países de Europa y Australia se centraron en el uso e implementación de Mezclas Asfálticas Templadas (WMA) en el año 2000, algunos años después se extendió el interés hacia Estados Unidos de América (EUA) y Canadá. En EUA se ha innovado en las temperaturas de las mezclas WMA, debido a que se ha logrado disminuir las temperaturas de compactación de 10°C a 40°C respecto a las mezclas asfálticas en caliente (HMA), la producción de las WMA son 20°C a 40°C menores que las HMA, pero cuidando el aspecto de que las temperaturas de producción sean mayores al punto de ebullición del agua (100° C aproximadamente) (Mohd Hasan, You, & Yang, , 2017).

La temperatura de producción de las WMA está en el rango de 100°C a 140°C. Además han surgido otras mezclas llamadas “Semi-tibias” o “Semi-templadas” (HWMA), dentro de las cuales se han desarrollado mezclas de asfalto espumado, para el cual, su temperatura en el proceso de elaboración está por debajo de los 100°C (Chomicz-Kowalska, Gardziejczyk, & Iwański, 2017).

En la Universidad Estatal de Iowa, en el año de 1956, se utilizó por primera vez un proceso de inyección de vapor al asfalto para formar espuma, esto para la construcción de caminos para la armada norteamericana en las islas del Pacífico utilizando cenizas volcánicas como agregado, Posteriormente, en los años 60's, la empresa Mobil Oil de Australia adquirió los

derechos de la patente de invención para la automatización del proceso de inyección de agua. Este proceso pudo ser internacionalizado una vez expirada la patente en los años 90. A partir de esto, el uso de asfalto espumado ha sido investigado, probado e implementado y se ha expandido en muchos países (García, Delgado, & Campos, 2017).

2.1. Proceso de espumado a base de agua

Varios tipos de sistemas de espumado a base de agua están disponibles hoy día para la aplicación del espumado é con una WMA.

En la tabla 2 se muestra una lista de las técnicas de espumado utilizadas para la producción de WMA.

Tabla 2. Técnicas de espumado (A. Kvasnak, 2010).

Tecnología/Fabricante	Temperatura recomendada de producción	Composición requerida (por peso de asfalto)
Tipo de Proceso Base Agua	°C	% Agua
WAM Foam Shell (Reino Unido) y Kolo-Veidekke (Noruega)	100-120	2 a 5
LEA (Low Energy Asphalt) LEA-CO (Francia)	<100	3 a 4
Gencor ^(R) Ultrafoam GX ^(R) Gencor Industries Inc. (EUA)	100-120	1.25 a 2
Aquablack WMA Maxam Equipment Inc. (EUA)	125-140	1.5 a 3
Double – Barrel Green Astec Industries (EUA)	116-135	≈2
Terex WMA system Terex (EUA)	130	≈2
LT Asphalt Nynas (Países Bajos)	90	Asfalto espumado con aditivo hidrofílico (≈0.5-1%)
LEAB Royal BAM Group (Países Bajos)	90	Asfalto espumado con aditivo especial (0.1%)
Accu-Shear TM Stansteel (EUA)	122-158	Agua y/o aditivos (depende del tipo de aditivo)

El proceso desarrollado por Shell Global Solutions y Kolo Veidekke en Noruega conocido como WAM-foam, está basado en la combinación de dos diferentes grados de aglutinante, suave y duro, con agregado. Inicialmente, el asfalto aglutinante de menor grado (suave), aproximadamente de 20 a 30% del total de contenido de aglutinante, es mezclado con agregados de cuarzo. Después, los agregados pre-cubiertos son mezclados con la cantidad designada de asfalto aglutinante duro el cual ya está espumado. El grado final del asfalto está basado en combinaciones de aglutinantes suaves y duros (B. Middleton, 2009). Con este



sistema, las mezclas asfálticas pueden ser manufacturadas a menores temperaturas y compactadas a temperaturas de 80 a 110°C (Mohd Hasan, You, & Yang, , 2017).

En el proceso de Lea desarrollado en Francia, un aditivo de recubrimiento y adhesión, el cual es del 0.5% del contenido de asfalto en masa, es agregado en la línea de suministro de asfalto en planta. Después una porción de agregados calientes es recubierta con asfalto a temperaturas normales de una mezcla asfáltica caliente, el agregado fino y húmedo es agregado (contenido de humedad de 3 a 4%). Durante el proceso de calentado, la humedad se evapora y espuma la capa de asfalto, y encapsula el agregado fino sin recubrimiento (F. Olard, 2008).

El Sistema Gencor® Green Machine Ultrafoam GX® es conocido por ser el único sistema de WMA que solo usa energía para espumar asfalto sin un dispositivo adicional de mezclado. Este sistema permite el control del asfalto y la incorporación de agua en varias temperaturas, presiones y suministro de asfalto. Además, este dispositivo puede ser incorporado a diferentes tipos de plantas mezcladoras de asfalto (A. Kvasnak, 2010).

Maxam Equipment Inc. desarrolló otro sistema, llamado Aquabkack™ WMA, el cual está equipado con una pistola de espumado y una boquilla central para producir el asfalto espumado. Tiene la capacidad de producir micro burbujas que pueden ser retenidas en el asfalto durante el mezclado manteniendo la trabajabilidad durante un largo periodo de tiempo. Puede ser también utilizado para pavimentaciones en clima frío por el sistema de cerrado de calentamiento (MAXAM Inc., 2021).

Un sistema verde de Astec Inc. Double Barrel fue desarrollado con una serie de diez boquillas para espumar asfalto y mezclarlo con el agregado. Sin embargo, las aplicaciones para esta tecnología requieren menores modificaciones en planta, incluyendo la instalación de un recolectora de espumado sobre el sistema de inyección de asfalto y alimentar la líneas de la recolectora para el agua y el asfalto (ASTECC Inc., 2021).

El sistema Terex® WMA es una cámara de expansión adjunta el tambor rotatorio de mezclado para producir asfalto espumado. En el LT de asfalto, un asfalto de grado especial de penetración es espumado con boquillas especiales y mezclado con agregados (precalentado a 90°C). Durante el proceso de mezclado, un filler hidrosκόpico es aplicado en contenidos del 0.5 al 1.0% para controlar la elevación del espumado (Y. Brosseau, 2007).

En el Sistema LEAB, series de seis boquillas son instaladas en la línea de suministro de asfalto caliente, el agregado es calentado a 95°C. Un aditivo es introducido al asfalto antes del proceso de mezclado para mejorar el recubrimiento y adhesión del agregado, también para extender la vida de la espuma y la trabajabilidad de la mezcla (Beemt, 2007).

Accu-Shear™ de Stansteel® es el primer sistema ingenierilmente ajustable que espuma asfalto dinámicamente, el cual es manejado por una bomba coloidal para aumentar la producción de asfalto espumado. El diseño elimina el flujo laminar y la separación de



líquidos, y también provee un posibilidad de mezclado con otros químicos modificadores para mejorar el espumado de asfalto (Stanstee, 2021).

2.2. Reciclaje de pavimentos y agregados.

En diferentes partes del mundo se comienza a presentar el fenómeno de la escasez de materiales vírgenes para la construcción y mantenimiento de caminos, con la preocupación de la contaminación del medio ambiente. El reciclaje de los materiales de pavimento asfáltico genera considerables ahorros de fuentes naturales y minimiza la exención de impactos negativos en el ambiente (Cao, Wang, Yu, Liu, & Hou, 2019).

La utilización de materiales reciclados en autopistas es de interés debido a su impacto al hacer uso en grandes volúmenes, cuidando así fuentes naturales y disminuyendo costos de transporte. Uno método de reciclaje en carreteras es raspar y fresar la capa de asfalto existente y el producto generado durante este proceso es llamado Pavimento Asfáltico Reciclado por sus siglas en inglés RAP (Mijic y otros, 2019).

Los métodos de reciclaje de pavimentos pueden dividirse principalmente en reciclaje caliente en planta (CPHR), reciclaje caliente en sitio (HIR), reciclaje frío en planta (CPCR) y reciclaje frío en sitio (CIR) dependiendo principalmente de los modos de construcción y características técnicas del proyecto. El reciclaje frío en sitio (CIR) también puede dividirse en reciclaje en frío de la capa de asfalto y en reciclaje profundo en frío de la capa de asfalto y bases (Cao, Wang, Yu, Liu, & Hou, 2019).

El reciclaje de pavimentos es una importante medida para el mantenimiento y rehabilitación de carreteras. Muchos estudios conducen a la selección y optimización para los planes de mantenimiento, lo que conduce a un importante rol de investigación en el método de reciclaje. En muchos países, la toma de decisiones de mantenimiento de un pavimento generalmente se divide en niveles de red y proyecto; el primero asegura que las secciones del pavimento lleven un adecuado mantenimiento a su tiempo y que las bases están correctamente distribuidas, y el último garantiza que las secciones adopten óptimas medidas de mantenimiento. Muchos estudios han sido desarrollados en la optimización de planes de mantenimiento al nivel de red. En investigaciones sobre métodos de optimización los algoritmos de optimización y la estabilización de modelos de predicción de desempeño de pavimentos son cruciales. Sin embargo, la selección de un método de reciclaje se inclina hacia la selección de esquema específico, el cual pertenece al alcance de nivel de proyecto. La optimización de los planes de mantenimiento de pavimentos debe mejorar el comportamiento del pavimento, reducir la inversión y la contaminación al medio ambiente, y poder tomar decisiones multi-criterio (MCDM). Los modelos de optimización multi-criterio y los arboles de decisiones de mantenimiento de pavimentos son muy comúnmente usados para seleccionar planes de mantenimiento a nivel proyecto (Cao y otros, 2019).

Como un método de mantenimiento de pavimentos, el reciclaje de tiene características de MCDM. Sin embargo, varios métodos de reciclaje tienen diferentes requerimientos para condiciones de envejecimiento de caminos y el desempeño de asfalto envejecido y agregados reciclados durante sus modos construcción y características técnicas. Por lo tanto, un método adecuado para la selección del tipo de reciclaje debe ser propuesto en base a la selección de planes de mantenimiento. Algunos estudios previos en la selección del método de reciclaje estaban basados en el desempeño de caminos antiguos, las características de trabajo, y factibilidad de aplicación. Sin embargo, un método opcional de reciclaje de pavimentos no solamente se basa en los requerimientos de desempeño si no también reducir costos, consumo de energía y emisiones contaminantes (Cao, Wang, Yu, Liu, & Hou, 2019).

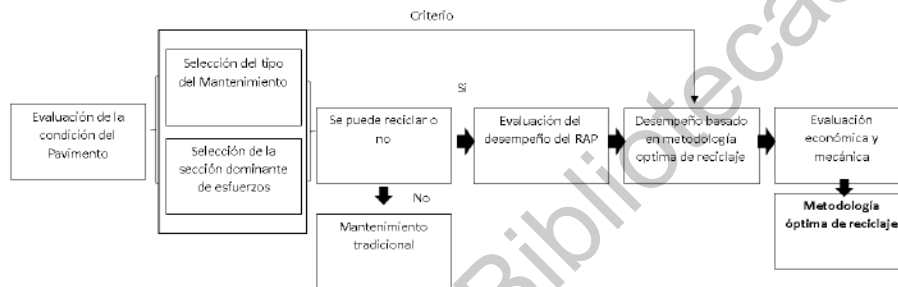


Figura 1. Modelo Multi-Criterio para el reciclaje de pavimentos (Cao y otros, 2019).

Cada proyecto de rehabilitación o mantenimiento es diferente en términos de estructura del pavimento existente, la calidad de los materiales en las diferentes capas del pavimento y los requerimientos de la vida de servicio. El mejor método costo-beneficio de rehabilitación siempre será específico para cada proyecto. Por lo tanto, es importante definir la solución más apropiada para cada proyecto la cual no necesariamente debe estar basada en el uso de productos de reciclaje. Algunos factores importantes que necesitan ser considerados en la evaluación del uso de métodos de reciclaje son: el tipo de proyecto, el entorno de proyecto y la disposición de materiales (Wirtgen GmbH, 2012).

El proceso de reciclaje tiene numerosas aplicaciones para el mantenimiento y rehabilitación de caminos. Sin embargo, cada aplicación será específica según: el tipo de deterioro del pavimento, la calidad del material reciclado y el resultado requerido (Wirtgen GmbH, 2012).

Cuando se tiene un deterioro estructural es común reciclar el pavimento existente en profundidades mayores a los 200mm. El material recuperado normalmente incluirá la capa superior y las capas base y típicamente abarca también la capa superior y el material granular de la capa inferior. El deterioro en los pavimentos normalmente se manifiesta en forma de un agrietamiento severo en la superficie, la deformación de las capas granulares y pérdida de material fino. La capacidad estructural demandada y el tipo de tráfico determinarán si los materiales recuperados del pavimento existente son adecuados o necesitan ser mejorados mediante una estabilización (Wirtgen GmbH, 2012).



“Hacia los años de 1970, durante la crisis petrolera, surgió la necesidad de reciclar los pavimentos asfálticos debido a los altos costos del petróleo, aunque en ese entonces existía poca experiencia de diseño de pavimentos reciclados y su tecnología, no se conocían procedimientos constructivos aptos para su reaprovechamiento, ya que prácticamente las mezclas recicladas se consideraban solo experimentales o desconocidas” (García, Delgado, & Campos, 2017).

“Es por ello que, al implementar el uso del material RAP, es posible reutilizar la capa de rodadura e incluso los materiales existentes en la estructura de pavimento, lo que representa economía en el mantenimiento y rehabilitación de los pavimentos en servicio. Por ende, se reducen los acarrees, costos por explotación de bancos de materiales y recursos naturales; los dos factores principales que influyen para utilizar el RAP son los ahorros económicos y los beneficios ambientales” (García, Delgado, & Campos, 2017).

“Con base en lo anterior, cada vez se incursiona más en dicha alternativa de reciclaje en diferentes países, e incluso ha alcanzado un considerable impulso por la Asociación Europea de Pavimentación Asfáltica, por el hecho de implementar materiales reciclados como un factor en favor del medio ambiente del que se ha ido cobrando conciencia en los últimos años. Cabe señalar, además, que, al utilizar materiales reciclados de la estructura de pavimentos, se abre un amplio abanico de posibilidades para su aprovechamiento, los cuales van de acuerdo con la aplicación o el diseño final del material recuperado. Éstos pueden clasificarse de acuerdo con su temperatura (es decir, pueden reciclarse en frío o en caliente), y el proceso de reciclaje puede tener lugar en planta o en sitio” (García, Delgado, & Campos, 2017).

2.3. Materiales de relleno.

Dependiendo del país, región o época se le pueden dar diferentes nombres cuando se trata de materiales cementantes o suplementarios. Los cuales pueden ser desde materiales sustitutos de cemento, adiciones minerales, materiales inertes, materiales cementantes o polvos activos. El uso del término suplementario, hace referencia a la función de suplementar o complementar que poseen estos materiales en relación al material base ya que pueden potenciar las propiedades del mismo o en determinados casos, suplir algunas deficiencias de este para cumplir con las especificaciones de algún proyecto.

Según la ASTM, los materiales cementantes suplementarios (MCS) son materiales inorgánicos que contribuyen en las propiedades de una mezcla cementicia a través de la actividad hidráulica, puzolánica o ambas. En general, se denomina material cementante, aquel capaz por sí solo o en combinación con otros materiales, de formar productos de hidratación como hidratos de silicato de calcio (C-S-H), hidratos de aluminosilicatos (A-S-H) o también hidratos de aluminosilicatos de calcio (C-A-S-H). Dentro de esta clasificación podemos encontrar materiales como el cemento, las cenizas volantes o “Fly Ash” (FA), las puzolanas naturales o artificiales, el humo de sílice o “Silica Fume” (SF) y la escoria



granulada de alto horno o “Ground Granulated Blast Furnace Slag” (GGBFS) (Argos, 2021).

“Se conoce como material hidráulico, aquel que presenta una alta tasa de disolución al entrar en contacto con el agua, generando silicato de calcio hidratado (CSH) y portlandita o hidróxido de calcio; un ejemplo de este tipo de material es el cemento Pórtland o simplemente cemento” (Argos, 2021).

Por otro lado, se encuentran los materiales puzolánicos, que son aquellos que presentan una baja tasa de disolución en relación con un material hidráulico y que en algunos casos requieren de un activador que facilite el inicio de la reacción. El activador en el caso de las puzolanas puede ser el hidróxido de calcio (CaOH_2), el cual es uno de los subproductos de la reacción del cemento con el agua (ARGOS, 2021).

Para este proyecto en específico se abarca ampliamente en el uso del hidróxido de calcio ya que es el definido como filler activo para la experimentación. El hidróxido de calcio o cal hidráulica (HL) puede actuar tanto en las propiedades mecánicas del asfalto así como en la mezcla asfáltica ya sea un concreto asfáltico o una base estabilizada con asfalto.

La cal hidráulica ha sido considerada como un aditivo para las mezclas asfálticas desde el principio. Era más comúnmente utilizada para mejorar el mezclado del asfalto, además, hoy día se sabe que mejora la resistencia ante la humedad, también evitaba el envejecimiento químico, evita la fatiga y el agrietamiento térmico. La cal hidráulica agrega iones de calcio a la superficie del agregado permitiendo que la interfaz entre el agregado y el asfalto tenga mayor afinidad para resistir el daño por humedad. Además, cuando la superficie del agregado esta húmeda o la humedad del ambiente es alta, la cal hidráulica reacciona con el agua y con el dióxido de carbono en el aire para formar carbonato de calcio, resultando en el endurecimiento de la superficie del agregado y generando una matriz más firme con el asfalto. El método de la liberación de energía en superficie (SFE) has sido muy utilizado para evaluar la mejora de la adhesión entre el asfalto y el agregado (Han y otros, 2020).

Estudios conducen a que la cal hidráulica evita el daño por humedad, además de reducir el envejecimiento químico del asfalto y endurece las mezclas aún más que otros tipos de fillers minerales. Los resultados de investigaciones anteriores también han demostrado que ciertas cantidades de cal en el asfalto pueden mejorar sus propiedades reológicas. La utilización de polvo de piedra caliza como filler puede hacer que el material tenga un comportamiento hidrófobo. El aglutinante del asfalto, por otro lado, tiene efectos significativos sobre las propiedades de la mezcla, la modificación del aglomerante asfáltico puede tener una contribución considerable en el rendimiento general de la mezcla (Han y otros, 2020).

El comportamiento de la rigidez en la mezcla ante la fatiga y la durabilidad son las principales propiedades a tomar en cuenta en el diseño de una mezcla asfáltica. El módulo resiliente de las mezclas está relacionado con su capacidad para distribuir la carga de tráfico a las capas



subyacentes, así como la resistencia a la fatiga, el agrietamiento térmico y la formación de surcos. El comportamiento ante la fatiga es tan importante como su relación con la aparición de grietas en pavimentos asfálticos. La durabilidad de las mezclas asfálticas es la resistencia ante los efectos ambientales perjudiciales como la humedad y los ciclos de congelamiento y deshielo.

Agencias de investigación en Norteamérica estiman que usando un porcentaje de cal hidráulica del 1% al 2%, la durabilidad de las mezclas de asfalto en carreteras aumenta del 25% al 50%. De los muchos beneficios conocidos por el uso de la cal hidráulica en mezclas asfálticas, una gran cantidad de este material es utilizado para esta aplicación. Tan solo en los Estados Unidos de América, 40 millones de toneladas de mezclas asfálticas producidas cada año contienen cal hidráulica. Países Europeos comenzaron con su utilización tiempo después. Sin embargo los países Europeos actualmente hacen uso de una gran cantidad de mezclas asfálticas con cal hidráulica (Taherkhani & Tajdini, 2019).

2.4. Métodos de estabilización de agregados.

Los materiales con buena calidad para la construcción de caminos cada día son más escasos o el acceso a los mismos no es factible. El impacto económico y ambiental generado por el transporte de materiales adecuados ha alentado la innovación y formulación de soluciones alternativas como técnicas de estabilización que utilizan materiales disponibles en cada zona. La resistencia y rigidez de la capa requerida a menudo se puede alcanzar usando algún material originario de la zona con la adición de pequeñas cantidades de agentes estabilizadores a costos relativamente bajos.

La estabilización de un material es la incorporación de un determinado filler o material cementante, para modificarle algunas características del mismo y con esto mejorar su comportamiento mecánico; el material utilizado puede ser algún producto químico o en su defecto empleando algún método de estabilización físico (Wirtgen GmbH, 2012).

Las técnicas de estabilización pueden usarse en agregados reciclados. Al agregar un agente estabilizador el material recuperado del pavimento existente puede ser mejorado, de este modo se elimina la necesidad de material virgen para alcanzar la resistencia necesaria en la estructura rehabilitada del pavimento.

Actualmente, un gran rango de agentes estabilizadores son utilizados, algunos como: agentes hidratadores, sales, polímeros, resinas, bitumen y estabilizadores cementantes. Estos agentes van dirigidos en razón de unir las partículas individuales del agregado para incrementar la resistencia y la rigidez y/o hacer el material estabilizado más resistente al agua y durable. Dependiendo del objetivo algunos agentes son más efectivos que otros, algunos tienen ventajas de costo, precio, disponibilidad, características, durabilidad y políticas de uso, todos estos influyen en la utilización de los mismos en los proyectos carreteros (Wirtgen GmbH, 2012).

Los materiales granulares en pavimentos flexibles presentan una dependencia al esfuerzo, lo que significa que cuando se confinan con una capa compactada de pavimento, la rigidez efectiva aumenta conforme el estado de esfuerzos lo hace también. Cuando los materiales son constantemente cargados a niveles de esfuerzo cercanos de su resistencia máxima, se presentan deformaciones por cortante, las cuales se acumulan, resultando en deformaciones permanentes. Al agregar un agente estabilizador se unen las partículas, combinado con el comportamiento bajo carga, de tal manera que la capa de material granular tiende a actuar más como una losa con diferentes tipos de patrones de esfuerzo (Wirtgen GmbH, 2012).

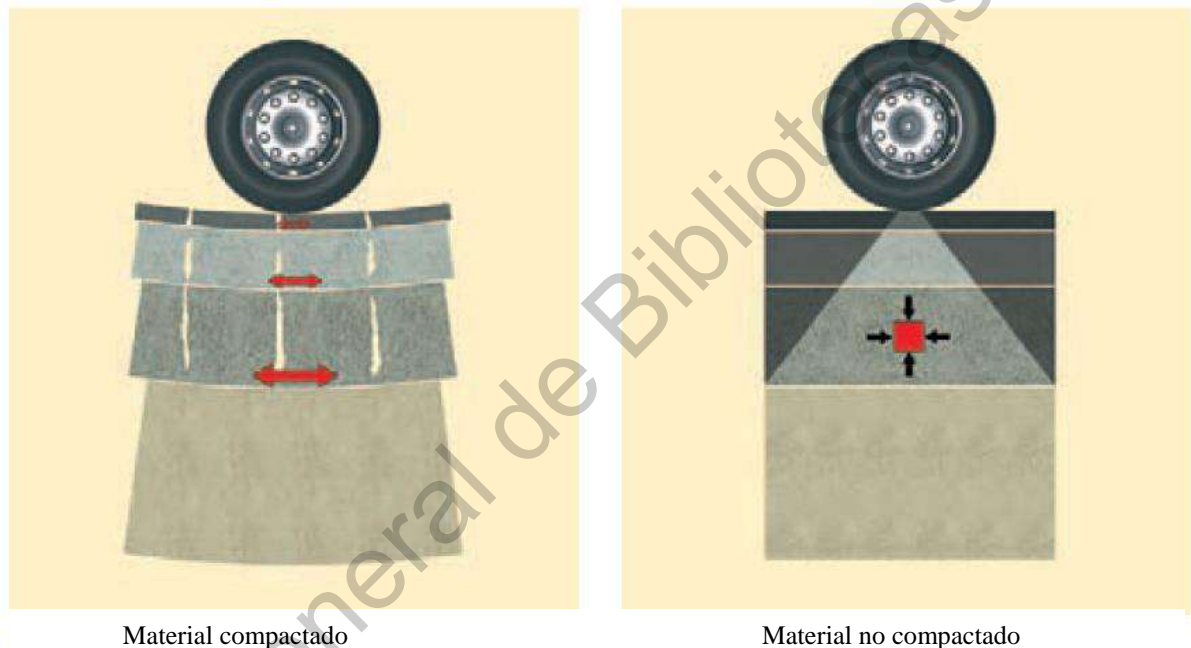


Figura 2. Comportamiento mecánico del pavimento (Wirtgen GmbH, 2012).

Los materiales cementantes son muy efectivos permitiendo rigidez, mientras que la utilización de bitumen permite flexibilidad. Sin que se dejen de considerar como materiales granulares, los materiales estabilizados con cemento son propensos a la contracción que se manifiesta como agrietamiento, el cual se puede propagar mediante la aplicación de cargas repetidas. La aplicación de cargas repetidas causa fallas por fatiga o agrietamiento. El tipo de agente estabilizador a usar será determinado por el número de repeticiones de carga que la capa puede soportar antes de la falla o el agrietamiento, esto se aplica tanto en la estabilización con materiales cementantes así como en mezclas asfálticas en caliente (HMA) (Han y otros, 2020).

Cal, cemento y sus derivados con ceniza volante, escoria de alto horno y otros como materiales puzolánicos, son los agentes estabilizadores más comúnmente utilizados. La función primaria de estos es incrementar el esfuerzo a las cargas. Esto se logra incrementando



la resistencia a tensión y compresión del material, o reduciendo su plasticidad. El cemento proporciona una considerable mejora en la resistencia del material. Y el hidróxido de calcio liberado durante el proceso de hidratación reacciona con cualquier partícula de arcilla que pueda estar presente, reduciendo su plasticidad (Wirtgen GmbH, 2012). La cal, además, está compuesta principalmente de cal libre la cual es el principal agente estabilizador para materiales plásticos.

La resistencia que se pueda alcanzar dependerá de la cantidad del estabilizador utilizado. Al agregar mayores cantidades del mismo se obtendrán mejores resultados. Estos agentes provocan materiales semi-frágiles, presentándose una reducción considerable de la flexibilidad. Como consecuencia se pueden generar mayores esfuerzos en las capas cementadas provocadas por la carga de tráfico, esto genera la aceleración de la proliferación de grietas bajo cargas constantes de tráfico, reduciendo así su desempeño estructural. Por lo tanto es importante que los requerimientos de desempeño de la capa establecida estén bien considerados y que el diseño de la mezcla apropiada este conducida con muestras representativas para establecer un rango correcto de aplicación del agente estabilizador.

Con el avance tecnológico que se ha tenido en los últimos años, el uso de asfalto como agente estabilizador se ha hecho muy popular. A pesar de que existen diferentes tipos de asfalto, solo dos son utilizados como materiales estabilizadores: la emulsión y el asfalto espumado, estos producen un asfalto de grado suave. Ambos pueden ser utilizados para tratar un amplio rango de materiales para pavimento, dispersando el asfalto de una manera semicontinua. Materiales estabilizados con asfalto no sufren de contracción y es relativamente flexible comparados con el mismo material tratado con cemento. El tráfico puede ser abierto después de la construcción debido al aumento substancial de la cohesión que obtiene el material al ser compactado. Lo que reduce la tendencia del material a disgregarse bajo la acción del tráfico. Sumado a todo este tipo de estabilización promueve la resistencia y reduce los efectos del agua (Wirtgen GmbH, 2012).

2.5. Matrices de agregado reciclado estabilizadas con asfalto espumado

El método de estabilización con asfalto espumado ya es muy utilizado en diferentes partes del mundo, anteriores estudios se centran en el comportamiento de la espuma de asfalto al modificar sus variables de entrada o al hacer uso de modificadores. En cuanto a su utilización como método de estabilización también se cuenta con estudios previamente hechos.

El caso de Khosravifar & Goulias(2013), donde se hace uso de una combinación de agregado RAP y agregado reciclado de concreto (RC) en porcentajes del 40 y 60% con un contenido de AE del 2.8% a temperatura ambiente. El asfalto utilizado fue un grado PG 64-22 el cual fue espumado con un contenido de agua del 2.2% a 160°C. El principal objetivo del estudio fue conocer la capacidad de compactación de la base en campo días después de su colocación lo cual se hizo mediante un monitoreo haciendo mediciones de Humedad y Densidad Nuclear donde al momento de la colocación y compactación se alcanzó un 99.3% de compactación.



Después de colocada y compactada se revisó la rigidez de la base a los tres y siete días de edad, donde el aumento fue de 16.1 ksi a 32.8ksi, siendo así un aumento del 224%; esto se debe a que al evaporarse el agua de la mezcla las partículas de agregado se acercan unas con otras aumentando la densidad del material; la evaporación de la humedad también ayuda a que las burbujas del asfalto unan las partículas de agregados. Todo esto tomando en cuenta que las condiciones climáticas fueron apropiadas, sin exceso de temperatura o lluvia.

Concluye así Khosravifar & Goulias(2013), en su estudio que la rigidez aumento un 234% en una semana por el proceso de curado que llevo el material al ser colocado.

Por otro lado en un estudio realizado por Chomicz-Kowalska, Gardziejczyk, & Iwan´ski(2016), donde se ensaya un concreto asfaltico producido con asfalto espumado a razón de Contenido de Vacíos y Resistencia a la Humedad, se estudió y se comparó con un concreto asfaltico producto de una mezcla en caliente, donde este fue compactado a una temperatura de 140 °C mientras la mezcla tibia se compactó a una temperatura de 95 °C y se produjo a temperatura de 115 °C y como material filler se utilizó agregado de piedra caliza en un contenido del 6.6%; para la mezcla en caliente se utilizó un contenido de 5.8% de asfalto mientras que para la mezcla tibia se utilizó un 2.5% de espuma de asfalto.

Para los resultados de volumen de vacíos se obtuvo que la mezcla en caliente obtuvo un valor de 2.11% mientras que la Mezcla Tibia 3.37%, siendo esta última mayor, aun así ambas cumplen con los valores de referencia utilizados, los cuales son de mínimo 2.0% y máximo 4.0%.

Los resultados de Resistencia a la Humedad muestran que la mezcla en caliente alcanza un valor de 1052.35 kPa en estado húmedo y 1024.11 kPa en estado seco; mientras que la mezcla tibia obtuvo un valor de 844.70 kPa en estado seco y 727.62 kPa en estado húmedo; teniendo así un TSR del 97.32% para la mezcla caliente y un 86.14% para la mezcla tibia, donde según los valores utilizados como referencia el mínimo es de 90%, cumpliendo así, solo la mezcla en caliente.

Concluyen Chomicz-Kowalska, Gardziejczyk, & Iwan´ski(2016), en su estudio que la mezcla tibia no tiene suficientes propiedades de manejo y compactación lo que resulta en limitar la resistencia a humedad requerida; recomienda la adición de un agente que mejore la viscosidad del asfalto.

Un estudio hecho por Mallick & Hendrix Jr(2004), en un estacionamiento en Bald Hill Cultural Center en Farmingville, Nueva York, donde se construyó una sección de pavimento de 73x18m, la cual se retiraron 200mm del pavimento asfaltico existente, después se colocaron dos secciones de base debajo de una carpeta asfáltica. Las dos secciones consistieron en una sección experimental con cenizas de incinerador recicladas tratadas con asfalto espumado y una sección de "control" hecha con 100% agregado de concreto reciclado tratado con asfalto espumado, una al lado de la otra. Se utilizó un 2% de contenido de cal



hidráulica como filler y un 4% de asfalto espumado, ambos porcentajes por masa de agregado para la sección experimental.

Al revisar la resistencia a la humedad se obtuvo un valor de ITS seco de 208 kPa y 95 kPa húmedo para la sección control obteniendo así un TSR de 45%; para la sección experimental se obtuvo un valor de ITS seco y húmedo de 585 kPa y 343 kPa respectivamente dando un valor de TSR del 59%, se puede ver un mejoramiento en la última mezcla, donde el autor hace énfasis al uso de ceniza.

Mallick & Hendrix Jr(2004), concluyen que la combinación de cenizas producto del incinerador puede ser utilizada en agregados estabilizados. Además una mezcla apropiadamente diseñada puede ser implementada al hacer uso de agregado reciclado estabilizados con asfalto espumado.

De esta manera y dándole seguimiento a estudios previos hechos podemos ver la manipulación de variables como contenido de asfalto espumado, contenidos de agregados de diferentes fuentes, tipo y cantidad de filler, condiciones de curado y compactado; son los factores principales que afectan directamente el desempeño de las mezclas estabilizadas con Asfalto Espumado.

2.6. Estudios de impacto ambiental

Con el paso del tiempo y mientras más se indaga en el tema del asfalto espumado los beneficios de la aplicación de esta tecnología han sido identificados por investigadores, ingenieros, gobiernos y agencias. La mayoría de observaciones hechas indican que la aplicación de esta tecnología disminuye significativamente las emisiones de efecto invernadero y consumo de energía, específicamente durante la producción de la mezcla con asfalto, es en este proceso donde se consume un 60% de toda la energía requerida para la construcción y mantenimiento de una carretera (Hopmann y otros, 2016).

Esta tecnología puede disminuir el consumo de energía en rangos de 20 al 75% en comparación con la energía utilizada para la elaboración de mezclas en caliente. Estudios hechos por D'Angelo y otros (2008), especifican que el ahorro en la quema de combustibles está en un rango aproximado del 20 al 35%. Algunas de estas ventajas las menciona (Jenkins), donde el uso de asfalto espumado sobre las mezclas en frío y mezclas en caliente puede disminuir la contaminación climática, al disminuir el consumo de energía, así como conservando fuentes de energía no renovables (2008).

Algunas de las ventajas del uso del espumado de asfalto las mencionadas por Jenkins (2008), son:

- Reducción de la contaminación atmosférica, con una mínima o nula emisión de hidrocarburos.

- Conservación de calor, el asfalto puede ser aplicado en agregados fríos, evitando así el precalentamiento de los mismos, proceso que consume cantidades significativas de energía.
- Sustentabilidad de tipos de agregado, hay una gran variedad de tipo de agregado a utilizar.
- Disminución del contenido óptimo de asfalto, esto debido a que la espuma del asfalto recubre de forma parcial las partículas.
- Uso de desperdicios, altas proporciones de material marginado y reciclado en mezclas con asfalto espumado resulta en disminuir el impacto ambiental a través de la utilización de desperdicios provenientes de fuentes no renovables.

En comparación con las mezclas en caliente también hay reducción de la contaminación en el aire de un 24%. Esta reducción esta también benéfica para la salud del cuerpo de trabajo, y de los pobladores vecinos a lugares de producción (Hassan, 2009).

En un estudio realizado por Turk y otros (2016), se proponen dos métodos de rehabilitación, el primero un método tradicional el cual se describe a continuación:

- Excavación del pavimento existente retirando la capa de la superficie de rodamiento junto con la base asfáltica un espesor total de 10cm, refiriéndonos a una sección de 6.4km y 6.25m de ancho tenemos entonces un total de $4,000\text{m}^3$ extraídos y transportados. El material de sub-base con un total de $16,800\text{m}^3$. Ambos materiales con transportados a un depósito autorizado.
- Transporte de $15,200\text{m}^3$ de agregado virgen desde banco suponiendo que el material es transportado desde el banco más cercano a la obra. El tendido de este material sobre el camino para la construcción de una nueva base sub-base de 38cm se hace con equipo tractores y niveladoras, además de la utilización de equipo de compactación.
- Colocación de base asfáltica con un espesor de 10cm. Se produce en planta mediante el uso de una mezcla en caliente y se transporta a la obra.
- Se coloca la capa de rodamiento de 4cm de espesor, se hace uso de una carpeta asfáltica mezclada en caliente.

Teniendo así un espesor total de la estructura de pavimento de 52cm. Para el segundo método de rehabilitación proponen el procedimiento de reciclaje frio en sitio.

- Se retira la existente carpeta y el material de base, siendo así un total de $4,000\text{m}^3$ de material extraído sumado a $8,800\text{m}^3$ del material de sub-base. El pavimento asfaltico recuperado (RAP) es transportado a un sitio de almacenamiento temporal.
- Reciclaje en sitio de la existente sub-base y reutilización del material mezclado con cemento para la colocación de la nueva capa sub base.
- Reutilización del agregado reciclado para la colocación de base de 18cm y estabilizado con cemento.

Teniendo así un espesor de la estructura de 38cm, sumado a la carpeta asfáltica de 14cm.

En la tabla 3, Turk y otros (2016), hacen la comparación de consumo de materiales para cada método implementado.

Tabla 3. Consumo de materiales por método de reconstrucción de pavimento (Turk y otros, 2016).

Material	Unidad	Reciclaje frío en sitio	Reconstrucción tradicional
Cemento	Tonelada	960	0
Agua	Tonelada	1027	0
Agregado Virgen	Tonelada	0	33440
Consumo de diésel en maquinaria (No Transporte)	Litro	47513	28415

En la siguiente figura Turk y otros (2016), muestran la comparación de los procesos de excavación (a), transporte (b), agregado triturado (c), cemento al alto horno (d), transporte de materiales (e), trabajos terrestres (f) y la sumatoria (g) de estos en aspectos como: emisiones de CO₂, acidificación SO₂, agotamiento abiótico de combustibles fósiles, consumo de energía.

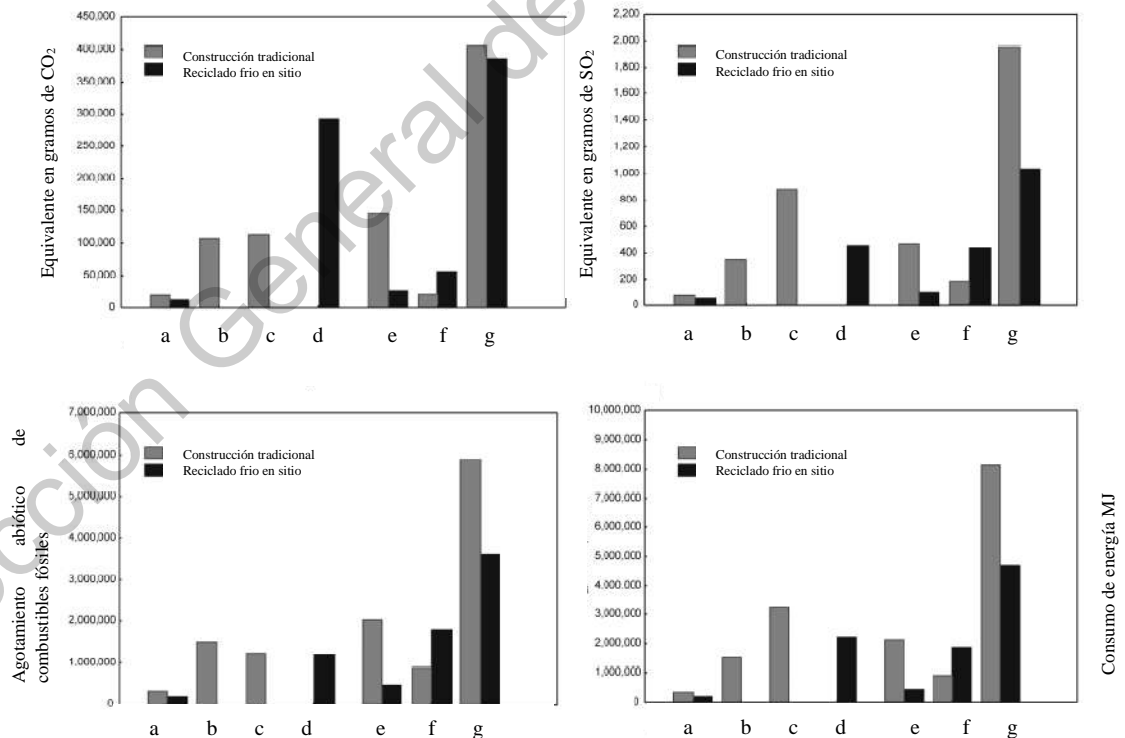


Figura 3. Tipo de Proceso y repercusión del mismo en términos de emisiones y consumo de energía (Turk y otros, 2016).

Turk y otros, (2016), concluyen que tomando en cuenta los resultados a dicho caso de estudio, el reciclaje puede reducir impactos ambientales en porcentajes del 15 al 18%. Se alcanza a notar una gran emisión de CO₂ por el uso de cemento como material estabilizador, lo cual se puede evitar utilizando otro método de estabilización como una emulsión o espuma de asfalto (2016).

Otro estudio del mismo tipo hecho por Stepien & Chomicz Kowalska (2016), donde se comparan tres alternativas de reconstrucción de un pavimento haciendo uso de espuma de asfalto como agente estabilizador en dos de estas alternativas, además de la reutilización del agregado recuperado RAP.

El pavimento antes de su reconstrucción esta severamente deteriorado, no cuenta con las propiedades para soportar el flujo de tráfico y la operación del mismo puede empeorar las entonces condiciones, convirtiéndose en un riesgo para el usuario.

El tráfico del tramo en estudio se clasificaba según El Catalogo Polaco en KR3, pero después del estudio realizado el entonces tráfico en el tramo fue de un total de 3.2×10^6 ESAL de 100kN, clasificándolo así como un KR4($2.5 - 7.3 \times 10^6$ ESAL_{100kN}), esta clasificación se hace de KR1 (tráfico ligero) a KR7 (tráfico muy pesado) (Stepien & Chomicz Kowalska, 2016).

Haciendo los estudios correspondientes de los materiales a utilizar y presentes en la cimentación del pavimento se realiza el diseño de la estructura proponiendo tres variables nombradas por el autor como A, B y C.

- Variable A:

Estructura de pavimento basada en material virgen, con la base hecha con una mezcla de agregados sin estabilizar y la capa sub base hecha de agregado hidráulicamente estabilizado.

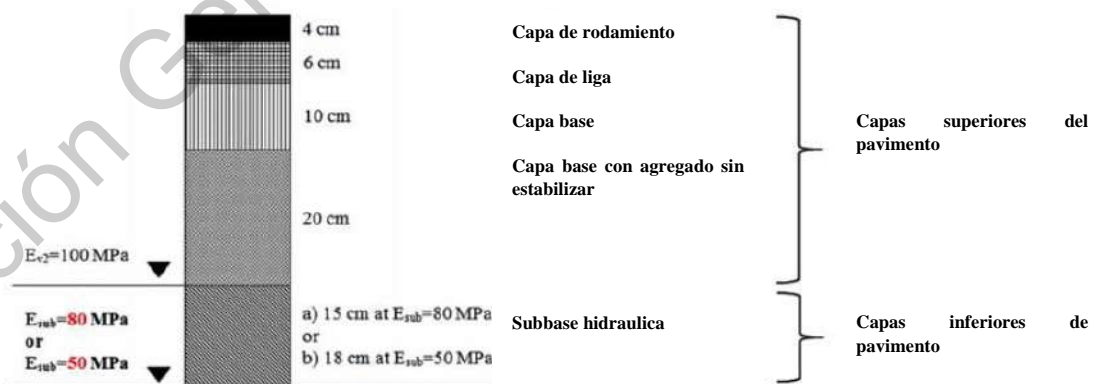


Figura 4. Estructura de pavimento propuesta para la variable A (Metodología Tradicional) (Stepien & Chomicz Kowalska, 2016).

- Variable B:

Estructura de pavimento donde se utiliza mezcla fría con agregado reciclado estabilizado con espuma de asfalto o emulsión asfáltica, y la sub base hecha con agregado virgen estabilizado hidráulicamente.

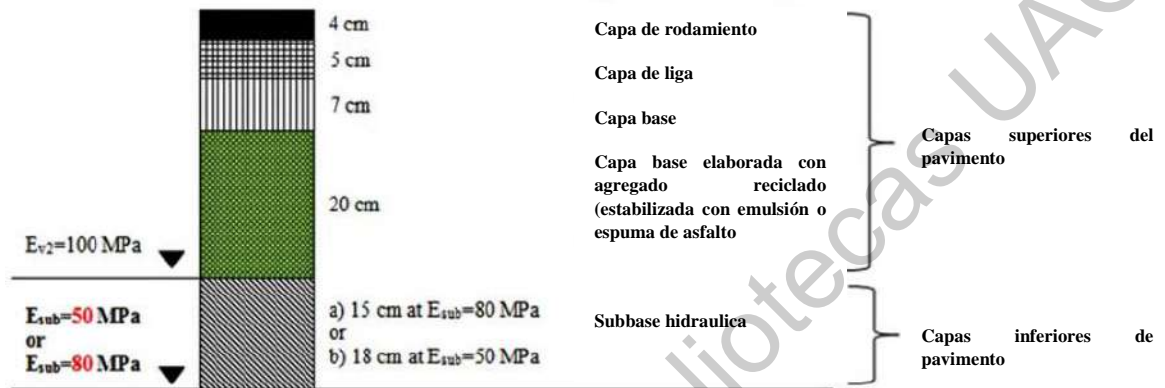


Figura 5. Estructura de pavimento propuesta para la variable B (Stepien & Chomicz Kowalska, 2016).

- Variable C:

Estructura de pavimento con base y sub base elaboradas con la metodología de reciclaje frío en sitio con asfalto espumado.

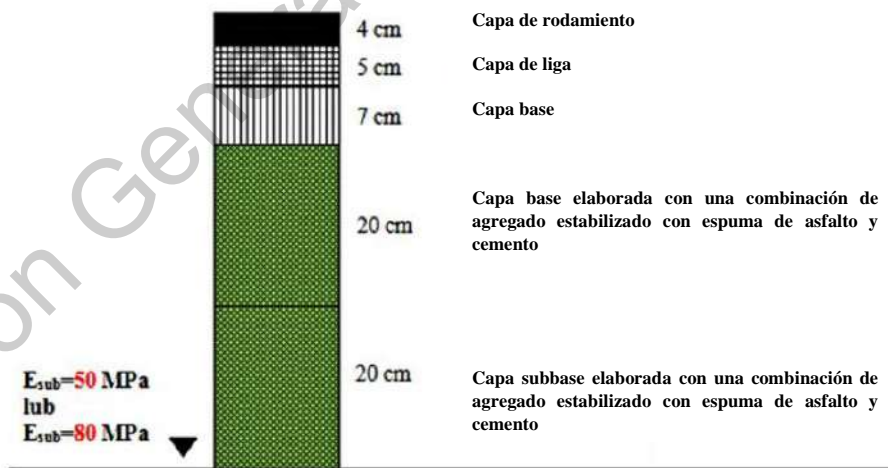


Figura 6. Estructura de pavimento propuesta para la variable C (Stepien & Chomicz Kowalska, 2016).

Todas las estructuras presentes cuentan con una carpeta de rodadura de asfalto, capa ligante de asfalto y base asfáltica.

En la siguiente tabla se muestran los resultados de vida de fatiga para cada una de las variables propuestas, para un valor de soporte de 80 y 50 MPa en la subrasante.

Tabla 4. Vida de fatiga para cada variable (Stepien & Chomicz Kowalska, 2016).

	Variable A		Variable B		Variable C	
	80MPa	50MPa	80MPa	50MPa	80MPa	50MPa
Falla en la superficie	7949116ESAL	7331151 ESAL	8894597 ESAL	8884701 ESAL	11821239 ESAL	11325484 ESAL
Deformación permanente	22541044 ESAL	12045410 ESAL	20184737 ESAL	14818927 ESAL	54853263 ESAL	26535685 ESAL

Se puede ver el aumento de ESAL en la estructuras B y C, llegando a duplicar en comparación con la variable A. El uso de las metodologías de estabilización en las variables B y C aumentan los parámetros mecánicos de los materiales en comparación con los materiales estándar, esto tiene un efecto significativo en el cálculo del esfuerzo de tensión horizontal debajo de las capas de asfalto, y disminuyendo el esfuerzo a compresión en la subrasante, aumentando así el ciclo de mantenimiento del pavimento (Stepien & Chomicz Kowalska, 2016).

A pesar de la necesidad de utilizar aglutinantes adicionales y betún espumado, se obtienen evidentes beneficios económicos y ecológicos debido a la limitación de los procedimientos de extracción, transporte y eliminación de materiales de desecho. Por ejemplo en la variante B se ahorran 2800 toneladas de material crudo por cada kilómetro del segmento, el equivalente a 108 camiones transportando cada uno 26 toneladas de material, y para la variable C es posible evitar el uso de 5300 toneladas de material crudo, lo que corresponde a 204 camiones. La variable A corresponde a una estructura tradicional, donde se hace la compra del material crudo, el cual se trasporta y se coloca, lo que implica costos en cada una de estas fases (Stepien & Chomicz Kowalska, 2016).

Stepien & Chomicz Kowalska (2016) concluyen que el uso de la metodología de reciclaje frío in situ y estabilizando con asfalto espumado permite convertir materiales de pavimento existente en capas de calidad nueva para capas de base y sub base, trayendo beneficios económicos y ecológicos. La reutilización de materiales existentes debe ser evaluada prioritariamente. Se puede hacer uso de hasta un 100% del pavimento existente, contribuyendo a la reducción del uso y transporte de material crudo (2016).

3. Hipótesis

Una mayor pureza en la cal hidráulica usada como filler mejora las propiedades mecánicas de las bases estabilizadas con asfalto espumado para que estas puedan ser utilizadas en la construcción de caminos, además al disminuir el uso de agregado de aporte se reducen costos.

4. Objetivos

Objetivo General

Hacer una evaluación mecánica y química de una base estabilizada con asfalto espumado utilizando agregado reciclado en combinación con material de aporte y cal hidráulica en purezas del 80% y 90% como material de filler y estudiar el efecto de este en la matriz de la base.

Objetivo Específico

Hacer un estudio de costo y calidad de una base estabilizada con asfalto espumado con los diferentes tipos de agregado y filler utilizados aplicado en el proceso de recuperación en frío de pavimentos.

Objetivo Específico

Estudiar las fases presentes en la base, por la interacción entre filler, agregado y asfalto; para determinar cuál de los materiales de filler utilizados tiene un mayor efecto.

5. Materiales y Metodología

Los principales materiales con los que se trabaja en este proyecto son: agregado pétreo, asfalto y cal hidráulica; cada uno de los mismos deben de cumplir con una cierta especificación de calidad, en este caso la que nos concierne es la del “Instituto Mexicano del Transporte”. Para el caso de agregados pétreos dependiendo del uso que se le vayan a dar a los mismos ya sea para capetas, concretos, terracerías, etc., en este proyecto trabajaremos con el diseño de una base por lo cual nos enfocaremos principalmente en la norma N·CMT·4·02·003/19, “Materiales para Bases Tratadas” y sus especificaciones. De esta norma los apéndices que más concierne a este trabajo son: “Apéndice F, Requisitos de calidad de materiales para una base de mezclas asfálticas (Base Negra) provenientes de un banco” y “Apéndice H, Requisitos de calidad de materiales provenientes de la recuperación de pavimentos existentes”. En proyectos de construcción es vital darle seguimiento a las especificaciones marcadas por la normativa; en casos de experimentación, si se justifica se puede trabajar con material que no cumpla en un ciento por ciento con la calidad.

Refiriéndose al asfalto se usará la norma N·CMT·4·05·004/18(2018) “Calidad de Cementos Asfálticos según su Grado de Desempeño (PG)”, para hacer la caracterización del mismo además de asignar su grado de desempeño (PG). El asfalto utilizado también debe de cumplir con los requerimientos de calidad de la norma N·CMT·4·05·001/06(2006) “Calidad de Materiales Asfálticos”.

Para el material filler que en este caso es hidróxido de calcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en purezas del 80% y 90%, se hace uso de la ficha técnica del proveedor para conocer las características del contenido de minerales presentes.

La metodología a usar tanto para el diseño de las mezclas como el proceso de experimentación es el marcado en el Manual de reciclaje de Wirtgen, en donde se menciona que se debe de tener en cuenta las diferentes etapas de análisis:

- Caracterización de los materiales a utilizar (Material pétreo, asfáltico y RAP)
- Determinación de la granulometría de diseño
- Determinación de las propiedades espumantes del asfalto
- Diseño de la mezcla de materiales (Fórmula de trabajo)
 - Nivel 1: Determinación de la necesidad de “Filler Activo”
 - Nivel 2: Determinación del contenido óptimo de asfalto espumado
 - Nivel 3: Determinación de propiedades mecánicas

Se deben de caracterizar las propiedades del asfalto espumado y de los agregados pétreos, siguiendo el procedimiento que se describe a continuación.

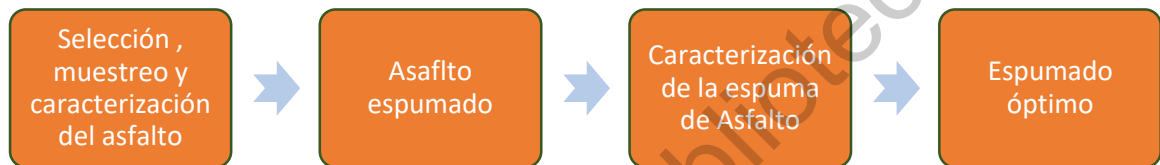


Figura 7. Procedimiento para la Caracterización de Asfalto Espumado (García, Delgado, & Campos, 2017).

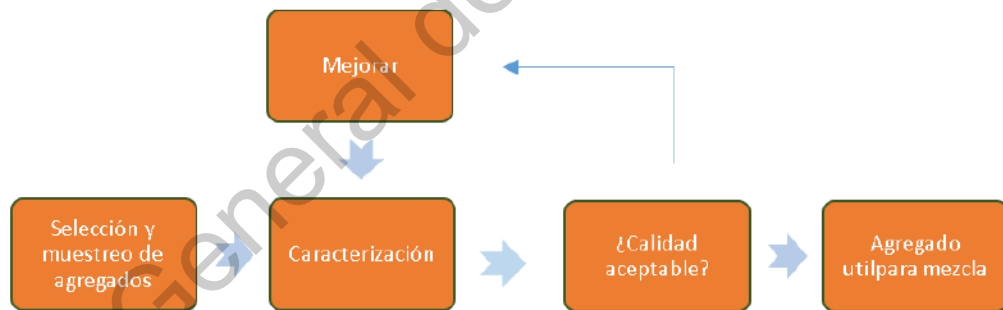


Figura 8. Procedimiento para la Caracterización del Agregado (García, Delgado, & Campos, 2017).

5.1. Caracterización de materiales

5.1.1. Asfalto

La clasificación del asfalto se hace mediante las normas N-CMT-4-05-001/06(2006) Clasificación por Viscosidad y N-CMT-4-05-004/18(2018) “Clasificación por grado PG. Aunque existan 3 clasificaciones para asfalto en la normativa del país, sólo se consideran estas dos debido que para las mezclas con asfalto espumado no se pueden utilizar asfaltos modificados (N-CMT-4-05-002/06, 2006), esto es porque la creación de espuma se ve afectada por los asfalto modificados, los cuales obstruyen las líneas de conducción (tubería), boquillas y aspersor en la máquina de espumado, además de que se requiere aumentar más la

temperatura ($> 180^{\circ}\text{C}$) para poder conducir de manera fluida y poder crear espuma con estos asfaltos (modificados).

5.1.2. Agregado pétreo

Una vez realizado el muestreo del material que se utilizó, se determinaron tres características físicas fundamentales para la mezcla de la capa estabilizada: granulometría, plasticidad y densidad del agregado.

En la siguiente tabla se muestra un resumen de los agregados pétreos utilizados en la elaboración de mezclas para esta experimentación.

Tabla 5. Origen de Agregados Utilizados.

Tipo de Material	Origen
RAP 1 (3/4)	Durango
RAP 2 (3/4)	Durango
Grava triturada (3/4)	Planta los Cues (Querétaro)
Arena	Bernal (Querétaro)

5.1.2.1. Granulometría

Previamente al ensayo de granulometría se debe de realizar la homogeneización y reducción del material, de acuerdo a lo descrito en la norma “Práctica normativa para reducir las muestras de agregados a tamaño de prueba” (ASTM C702/C702M - 18, 2018), el tamaño final de la muestra dependerá del tamaño de las probetas a elaborar, el procedimiento se repite para cada tipo de material a utilizar en el ensaye. En la imagen 4 se puede ver la reducción de las muestras hasta la obtención del tamaño necesario para la experimentación.



Imagen 4. Cuarteo de agregado en laboratorio.

El ensayo de granulometría nos permite conocer los tamaños de las partículas de los agregados, así como la distribución de los mismos, también se obtiene el tamaño máximo en el caso del estudio en grava, el cual es usado en los métodos de dosificación de mezclas de concreto. Para la ejecución del ensayo granulométrico se realiza una variación del “Método de prueba estándar para análisis granulométrico del material pétreo finos y gruesos” (ASTM C136 / C136M - 19, 2019).

Procedimiento:

1. Se toma una muestra representativa seca de grava de aproximadamente 15 kilogramos.
2. Se ordenan las mallas con las de mayor abertura en la parte superior y en descenso hasta colocar la malla número 200, y finalmente se coloca la charola.
3. Se coloca la muestra en partes y se hace pasar por toda la serie de mallas, hasta pasar toda la muestra.
4. Se pesa el material retenido de cada una de las mallas registrándolo como masa retenida.

La normativa mexicana N·CMT·4·02·003/19 (2019), establece límites de aceptación para los agregados pétreos a emplear como material para “Bases estabilizadas”, los cuales se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 6. Características de calidad granulométricas del agregado (N-CMT-4-02-003/19).

Abertura de malla		% Que pasa	
in	mm	Inferior	Superior
2"	50.8	100%	100%
1 1/2"	36.1	87%	100%
1"	25.4	76%	100%
3/4"	19	65%	100%
1/2"	12.7	55%	90%
3/8"	9.52	50%	80%
No. 4	4.75	35%	62%
No. 8	2.36	25%	47%
No. 16	1.18	18%	36%
No. 30	0.6	13%	28%
No. 50	0.3	9%	22%
No. 100	0.15	6%	17%
No. 200	0.075	6%	12%

Para poder visualizar la distribución granulométrica también se hace uso de la siguiente gráfica, donde una vez obtenidos los datos granulométricos de nuestro material se comparan con los límites establecidos en la norma.

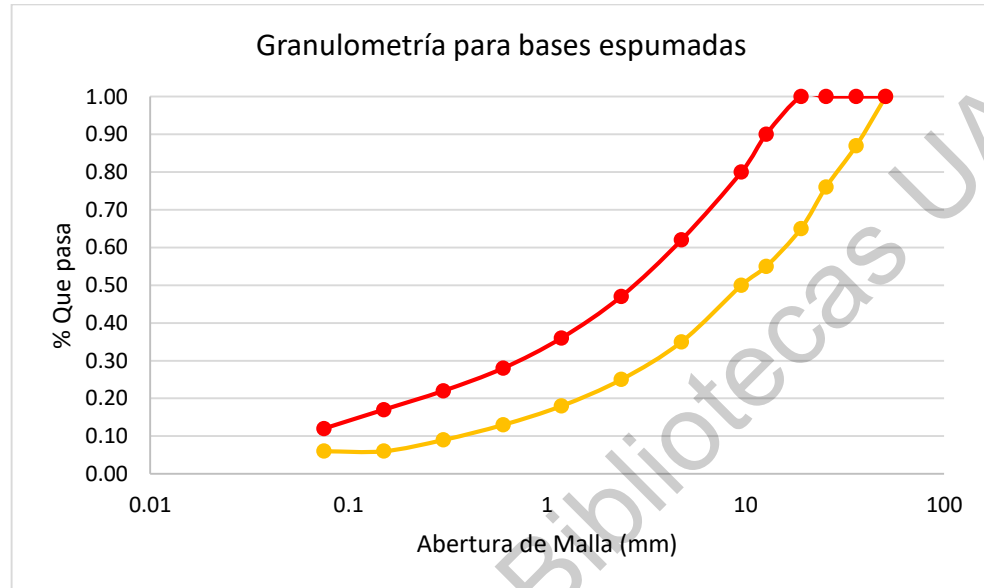


Figura 9. Límites granulométricos (N-CMT-4-02-003/19).

En cualquier proceso de elaboración de mezclas es requerimiento que la curva granulométrica este dentro de los límites marcados, esto para asegurar un buen desempeño de las mezclas ante las sollicitaciones de experimentación en laboratorio.

5.1.2.2. Plasticidad

El objetivo principal de este ensaye es conocer las características de plasticidad de la porción de suelo que pasa la malla Núm. 0.425 (N° 40), cuyos resultados se utilizan principalmente en edificación, construcción y clasificación de los suelos. Además con la obtención del valor de Índice Plástico (IP) se puede saber que tan necesario es realizar un pretratamiento al agregado pétreo para evitar un comportamiento plástico.

El procedimiento a seguir es el establecido en la Norma “Límites de consistencia” (M-MMP-1-07/07, 2007).

Una vez obtenido el valor de Índice Plástico se puede proceder según el valor obtenido:

- Índice Plástico < 10: Llevar a cabo pruebas con especímenes de 100 mm de diámetro para determinar la necesidad de añadir cemento o cal hidráulica.
- Índice Plástico > 10: Pretratamiento del material con cal hidráulica.

Este pretratamiento se hace directamente en el agregado y no va de la mano con el filler utilizado para la elaboración de las mezclas. En la imagen 5 se aprecia que al tratar de obtener el valor de Límite Líquido (LL) la muestra no presentó plasticidad alguna, de eso se hablará a fondo más adelante.



Imagen 5. Ensayo de plasticidad en agregado utilizado.

5.1.2.3. Ensayo Proctor Modificado

Una vez definida la granulometría de la mezcla de materiales, se determina el peso volumétrico seco máximo (PVSM), conocido también como γ_d . Esta determinación se realiza con la referencia de la norma de la SCT: M-MMP-1-09/06(2006) “Compactación AASHTO”, en su variante “D”.

Este ensayo permite determinar la curva de compactación de los materiales para terracerías y a partir de esta inferir en su masa volumétrica seca máxima y su contenido de agua óptimo. Permitiendo determinar la masa volumétrica seca de un material compactado con diferentes contenidos de agua, mediante la aplicación de una misma energía de compactación en prueba dinámica, y graficando los puntos correspondientes a cada determinación para así trazar la curva de compactación del material.

Para el ensayo modificado se utiliza un pisón de 5.54kg, con un diámetro de 50.8mm y una altura de caída de 457mm. En la imagen 6 se muestran las especificaciones de dimensiones del molde a utilizar.

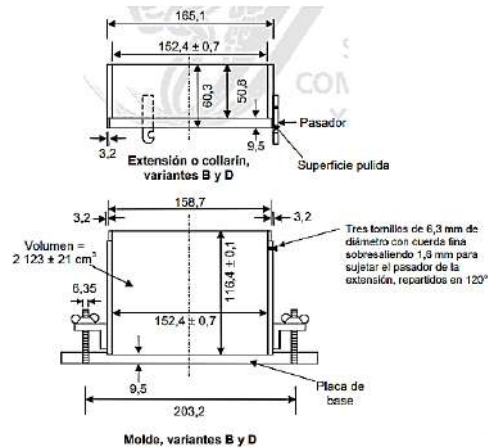


Imagen 6. Especificaciones de molde para el ensaye Proctor (M-MMP-1-09/06, 2006).

La compactación se realiza en cinco (5) capas, aplicando cincuenta y seis (56) golpes por capa; este procedimiento se repite por mínimo 5 veces para así poder obtener una tendencia al graficar los valores obtenidos. De la gráfica se puede obtener el punto máximo de compactación con la humedad óptima para obtener este valor, resumiendo así se obtienen los valores de Masa Volumétrica Seca Máxima ($\gamma_{d_{max}}$) y Humedad Óptima (W_o).

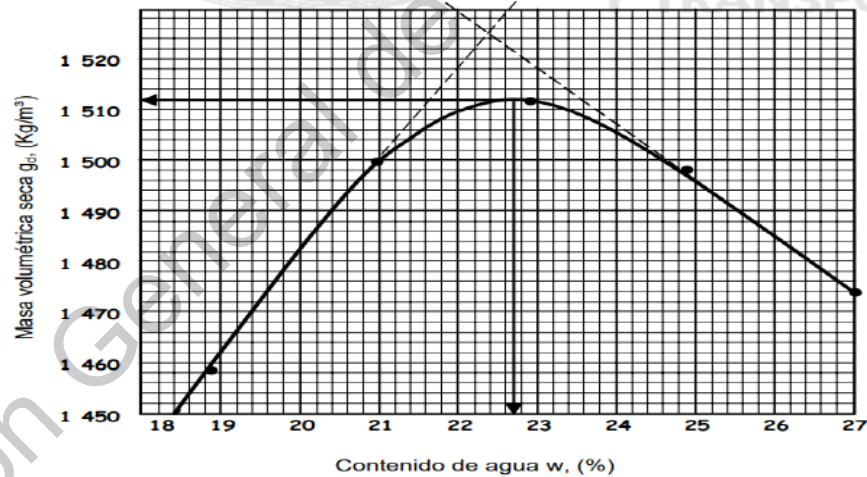


Figura 10. Ejemplo de una curva de compactación (M-MMP-1-09/06, 2006).

5.1.3. Asfalto Espumado

La mezcla de asfalto espumado funciona encapsulando y uniendo las pequeñas partículas finas, las que, en conjunto con los agregados, trabajan como pequeños puntos de soldadura. Esto se traduce en una mezcla rígida propia por el agregado y flexible por los ahora nuevos puntos de unión de asfalto (García, Delgado, & Campos, 2017).

Además de la caracterización del ligante asfáltico, se deben determinar las sus propiedades espumantes. Esta determinación se realiza con el equipo de espumado de laboratorio WLB-10S el cual se muestra en la imagen 7, este equipo se encuentra en el Laboratorio de Infraestructura en el IMT.



Imagen 7. Equipo de espumado WLB-10S (García, Delgado, & Campos, 2017).

Las propiedades espumantes del asfalto Re y $\tau_{1/2}$ se determinan al utilizar una varilla estandarizada y el recipiente mostrado en la imagen 8, precalentado a 75 °C, dentro del cual se procede a descargar el asfalto espumado (García, Delgado, & Campos, 2017).



Imagen 8. Cubeta para medición de volumen (García, Delgado, & Campos, 2017).

En este contenedor y con ayuda de un cronometro se analiza el volumen expandido y su consecuente colapso dentro del recipiente conforme transcurre el tiempo.

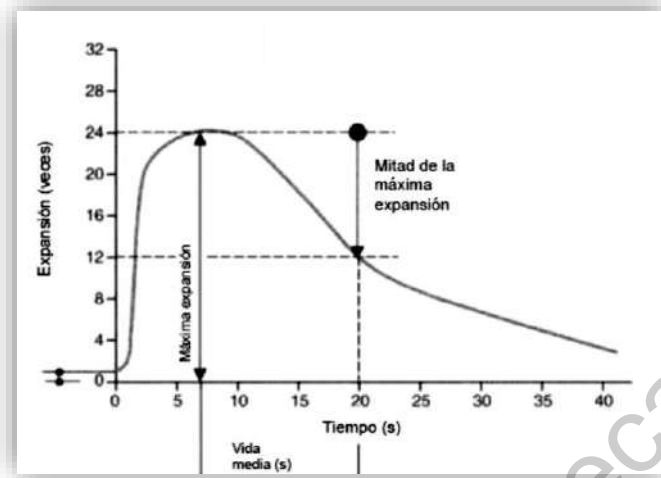


Figura 11. Gráfica expansión contra tiempo (Wirtgen GmbH, 2012).

Del ejemplo mostrado en la figura 11, se puede observar un aumento del volumen de asfalto llegando a su punto máximo (24 veces) a los 7 segundos, a los 20 segundos se puede apreciar que llega al colapso de la mitad del volumen máximo, después de los 25 segundos el volumen expandido del asfalto ha colapsado por completo.

Entendemos así que las propiedades espumantes del asfalto se caracterizan principalmente por los parámetros de Relación de Expansión (Re) y Vida Media (T/2):

- Relación de expansión (Re).

Es la medición de la viscosidad de la espuma y se determina que tan dispersa está en la mezcla. Indica la trabajabilidad del asfalto y su capacidad de recubrir las partículas del agregado. Se calcula dividiendo el volumen máximo de la espuma del asfalto entre el volumen original del asfalto (García, Delgado, & Campos, 2017).

- Vida media (T/2).

Es la medición de la estabilidad de la espuma del asfalto e indica la tasa de colapso de la espuma. Se calcula como el tiempo en segundos que le toma a la espuma de asfalto en regresar a la mitad de su volumen máximo (García, Delgado, & Campos, 2017).

Al obtener una relación de expansión mayor, es posible alcanzar una mayor área de contacto para revestir los agregados, mientras que una vida media más larga favorecerá una viscosidad más baja, y por consiguiente, se asegura una buena trabajabilidad de la mezcla (Jiménez, M., 2011). Se puede presentar un ligero endurecimiento en el asfalto por el proceso de espumado, pero no se afecta el comportamiento reológico del mismo. La composición del asfalto no influye en forma considerable en las propiedades espumantes, ya que la espuma se forma de manera similar, sin importar el origen del asfalto por lo que se dice que es el fenómeno físico

es el responsable de la formación de la espuma y no las propiedades del asfalto (Jiménez, M., 2011).

Las variables principales que pueden afectar en la elaboración de asfalto espumado son:

- La temperatura del asfalto. Es recomendable calentar el asfalto a temperaturas mayores a los 149 °C (Jiménez, M., 2011).
- La cantidad de agua a utilizar, esto debido a la baja conductividad térmica del agua que puede provocar un colapso temprano de el volumen de asfalto espumado (Jiménez, M., 2011).

Un ligero cambio en los parámetros de espumado (temperatura del asfalto y contenido de agua) pueden alterar de manera muy significativa la relación de expansión y vida media de la espuma de asfalto (Ali y otros, 2013).

5.2. Diseño de una base estabilizada con asfalto espumado

Las propiedades mecánicas a las que se someterá la estructura de un pavimento se definen según el tránsito al cual va a estar sometido el pavimento asfáltico. Refiriéndose directamente al diseño de la base estabilizada con asfalto espumado se utilizará como ya se mencionó el procedimiento del Manual de Diseño Wirtgen.



Figura 12. Niveles de diseño según el Método Wirtgen (Wirtgen GmbH, 2012).

En la figura 12 se muestran los niveles a seguir para el diseño de la mezcla, en cada nivel se van mejorando las propiedades mecánicas lo que repercute directamente en los millones de Ejes Equivalentes Acumulados que pueda soportar el material.

5.2.1. Nivel 1: Determinación del tipo y cantidad de filler a utilizar

Para la determinación del filler a utilizar se debe primero seleccionar el tipo de material ya sea cal o cemento y el porcentaje del mismo que se le debe mezclar con el agregado, esto se hace al obtener el valor de IP. Sumado a esto se elaboran especímenes de 150mm de diámetro y 95mm de altura, que se someten a ensayos de tensión indirecta (ITS) en estado seco y húmedo con el propósito de conocer el valor de TSR. Para esto se elaboran 6 especímenes

por cada tipo de filler a utilizar, de los cuales tres especímenes se ensayan después de tres días de curado en horno a una temperatura de 70°C, los otros tres especímenes después de los tres días se sumergen en agua a una temperatura de 25°C y se ensayan en estado húmedo pasadas 24 horas.

Para este proyecto se utilizaron dos variables de filler, las cuales se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 7. Calidad de cal a utilizar como material filler (Wirtgen GmbH, 2012).

Tipo De Filler	Descripción	% de Contenido
Cal en pureza de 80%	Ca(OH) ₂ en contenido mínimo del 82%.	1%
Cal en pureza de 90%	Ca(OH) ₂ en contenido mínimo del 92%.	1%

*También se realiza una mezcla sin ningún tipo de filler.

5.2.1.1. Elaboración de Mezclas

El equipo WLB-10S se complementa con la mezcladora WLM30 la cual está compuesta por un par de charolas una suelta que se utiliza para tapan el material al mezclarlo y recibirlo una vez mezclado, y la otra que es el cuerpo del equipo y cuenta con un eje doble de hélices que giran en sentido contrario una respecto a la otra donde se mezclan los agregados (Imagen 9).



Imagen 9. Mezcladora WLM30.

El equipo se activa en intervalos de tiempo de un minuto y puede ser regulada la velocidad en la que giran las hélices; para la elaboración de la mezclas primeramente se coloca el agregado con el filler y se mezclan durante un minuto. Posteriormente se activa el equipo nuevamente y se le añade un 75% del agua necesaria para alcanzar la humedad óptima, por último se activa la mezcladora nuevamente y se inyecta la espuma de asfalto requerida según el proyecto añadiendo en el mismo intervalo de tiempo el 25% del agua restante.

La mezcla obtenida debe ser rápidamente almacenada en bolsas selladas para evitar la pérdida de humedad o en su defecto hacer la elaboración de especímenes inmediatamente.

5.2.1.2. Elaboración de Especímenes

Para compactar el material una vez mezclado, hay diferentes métodos que se pueden llevar a cabo en cualquier laboratorio, el más comúnmente utilizado es la compactación manual, pero también se puede hacer la compactación Marshall, compactación giratorio, martillo vibratorio y mesa vibratoria.



Imagen 10. Compactador Giratorio SERVOPAC.

Estos procedimientos son válidos, pero siempre se debe garantizar que se logre alcanzar la densidad especificada previamente en el ensaye Proctor Modificado, es decir un 100% de compactación. Para este proyecto en específico se hizo uso de un compactador giratorio SERVOPAC el cual se muestra en la imagen 10, en el cual se elaboran especímenes de 150mm de diámetro y 95mm de peralte. Conociendo las características de la mezcla y las dimensiones del espécimen se puede calcular la masa necesaria para alcanzar la compactación máxima, esta masa se coloca dentro del molde y se ingresa al equipo de compactación.



Imagen 11. Probetas para Ensaye Marshall.

5.2.1.3. Relación de esfuerzo a la Tensión (TSR)

De los seis especímenes elaborados tres se ensayan a tensión indirecta en estado seco para obtener el ITSSECO después de tres días de curado en horno a una temperatura de 70°C, así

mismo los otros tres especímenes se sumergen en agua durante 24 horas para después ser ensayados en estado húmedo obteniendo así el valor de ITSHUMEDO. Es necesario aclimatar las probetas secas manteniendo una temperatura en las mismas de $25^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, y para las probetas húmedas se requiere mantener la misma temperatura en el agua, para posteriormente secarlas superficialmente antes de ser ensayadas.



Imagen 12. Ensayo de Espécimen en Prensa Marshall.

Al fin de conocer el esfuerzo máximo soportable por la probeta, es necesario determinar la carga máxima antes de que se presente la falla, la carga se aplica sobre el diámetro de la probeta a una velocidad de deformación constante de 50.8 milímetros por minuto.

El valor de ITS se obtiene con la siguiente ecuación:

$$ITS = \frac{2 \times P}{\pi \times h \times d} \quad \text{Ecuación 1.0}$$

donde:

ITS = resistencia a la tensión indirecta (kPa).

P = carga máxima aplicada (kN).

h = peralte del espécimen (mm).

d = diámetro del espécimen (mm).

Se ensayan entonces los especímenes en estado seco y estado húmedo obtenido así los valores de ITSSECO e ITSHUMEDO respectivamente, de esta manera se puede obtener la Relación de esfuerzo a la Tensión por sus siglas en ingles TSR el cual básicamente nos proporciona un dato cuantitativo de que tanto se ven afectadas las propiedades mecánicas de la mezcla ensayada.

El valor de TSR se obtiene con la Ecuación 2.0 (Delgado Alamilla y otros, 2019):

$$TSR = \frac{\bar{x}ITS_{saturado}}{\bar{x}ITS_{seco}} \times 100 \quad \text{Ecuación 2.}$$

donde:

$\bar{x}ITS_{saturado}$ = valor de ITS saturado promedio (kPa).

$\bar{x}ITS_{seco}$ = valor de ITS seco promedio (kPa).

En la tabla 8 se muestran los valores mínimos especificados de ITS para las muestras ensayadas en Nivel 1.

Tabla 8. Valores Mínimos de ITS y TSR para el Nivel 1 (Wirtgen GmbH, 2012).

Descripción	Esfuerzo mínimo (kPa)	TSR mínimo %
ITS seco	225.0	75
ITS saturado	100.0	

5.2.2. Nivel 2: Contenido óptimo de asfalto espumado

Para este nivel, se tiene como objetivo determinar el contenido óptimo de asfalto espumado que requiere el material. Para cada una de las variantes de material descritas en la parte del “Nivel I” se realiza un barrido de contenidos de asfalto espumado, regularmente se hace para 4 porcentajes, esto con el fin de determinar cuál de los contenidos cuenta con el mejor desempeño en el ensayo de susceptibilidad a la humedad. No existe una relación única para obtener los contenidos de asfalto espumado, ya que estos varían debido a factores como el material utilizado, porcentaje de RAP y las características de compactación de las mezclas de materiales; pero sí se puede establecer que por lo general los contenidos se encuentran dentro de un rango de 2 a 3% de asfalto espumado.

El contenido de asfalto espumado se obtiene mediante tanteos partiendo de los porcentajes establecidos en la tabla 9, partiendo del valor seleccionado se hacen aumentos del 0.2%.

Tabla 9. Recomendación de contenido de asfalto espumado según la granulometría del material (Wirtgen GmbH, 2012).

Fracción que pasa la malla 0.075mm (%)	Adición de Asfalto Espumado (% de masa del agregado seco)		Descripción del material
	Fracción que pasa la malla 4.75mm		
	<50%	>50%	
<4	2.0	2.0	Asfalto reciclado (RAP)
4-7	2.2	2.4	RAP/grava triturada/grava natural/mezclas
7-10	2.4	2.8	
>10	2.6	3.2	grava-arena

El procedimiento de ensaye es similar al descrito en el “Nivel I”, para este caso el proceso de condicionamiento es diferente, ya que las muestras secas (3 probetas) deben de tener un contenido óptimo de humedad del 50%, esto se logra al curar las muestras durante 24 horas a una temperatura de 40 °C, para después colocarlas dentro de bolsas selladas durante 48 horas a una temperatura de 40 °C y así ensayarlas a tensión indirecta. El resto de las muestras (3 probetas) se sumergen en agua durante 24 horas a una temperatura de 25°C antes del ensaye.



Imagen 13. Acondicionamiento de Espécimen en Horno.

En la tabla 10 se muestran los valores mínimos especificados de ITS para las muestras ensayadas en el Nivel 2.

Tabla 10. Valores Mínimos de ITS y TSR para el Nivel 2 (Wirtgen GmbH, 2012).

Descripción	Esfuerzo mínimo (kPa)	TSR mínimo %
ITS equi	175.0	75
ITS equi-saturado	100.0	

5.2.3. Nivel 3: Características mecánicas de la mezcla.

Una vez que se alcanza el nivel 3 es porque ya se conoce el tipo y porcentaje de filler a utilizar, además del contenido óptimo de asfalto espumado. El objetivo primordial del nivel 3 es conocer las propiedades mecánicas de las mezclas elaboradas bajo parámetros funcionales o solicitaciones a las que se someterán las mezclas teóricamente en su uso en caminos. Para este nivel los parámetros a estudiar son la cohesión y ángulo de fricción interna. Estos se obtienen al realizar el Ensayo Triaxial donde básicamente se miden los esfuerzos a los que se somete un cuerpo de dimensiones conocidas en tres direcciones perpendiculares.

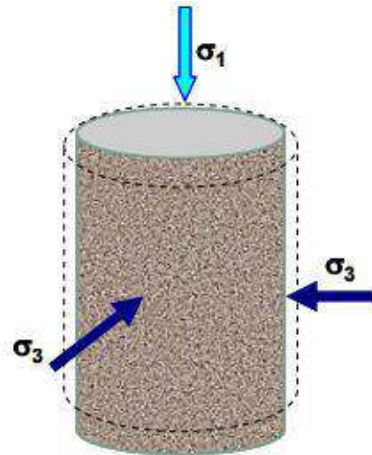


Figura 13. Estado de Esfuerzos del Ensaye Triaxial (Delgado Alamilla, Garnica Anguas, & Aguerrebere Salido, 2019).

A partir de la teoría de Mohr-Coulomb se pueden conocer los valores de cohesión y ángulo de fricción interna los cuales pueden ejemplificarse a través de la Ecuación 3.0 (Delgado Alamilla, Garnica Anguas, & Aguerrebere Salido, 2019):

$$T_f = C + \sigma \tan \varphi \quad \text{Ecuación 3.0}$$

donde:

T_f = esfuerzo cortante.

C = cohesión

s = esfuerzo normal actuando en el plano de falla.

φ = ángulo de fricción interna.

La ejecución de la prueba se lleva a cabo a una temperatura ambiente de 25°C, utilizando cuatro diferentes presiones de confinamiento (0, 50, 100 y 200 kPa), a una velocidad de aplicación de carga constante (3 mm/min).

5.2.3.1. Elaboración de especímenes

Para efectuar el ensaye triaxial, se requiere elaborar al menos ocho especímenes, cuyas dimensiones son 150 mm de diámetro y 300 mm de altura. La condición de humedad a utilizar en las pruebas triaxiales es de 50% de la humedad óptima de la mezcla, misma que se alcanza entre 48 y 72 horas después de la fabricación de los especímenes de ensayo.

El molde a utilizar tiene un diámetro interior de 150mm y 300mm de altura efectiva, el cual es desmontable de la base y del collarín y se puede separar por la mitad, para facilitar la extracción del espécimen sin dañarlo. La compactación se hace con el compactador

neumático donde el espécimen se llena en 9 capas y a cada capa se le induce el número de golpes necesarios para alcanzar 1/9 de la altura total del espécimen (33.33mm).



Imagen 14. Equipo para la compactación de especímenes de 30cm.

Conociendo la humedad óptima y la masa volumétrica seca máxima es posible conocer el peso total de espécimen y así determinar la masa de cada capa mediante la siguiente ecuación (Delgado Alamilla, Garnica Anguas, & Aguerrebere Salido, 2019):

$$W_{\text{capa}} = \frac{\text{Peso total del espécimen}}{\text{número de capas}} \quad \text{Ecuación 4.0}$$

Se debe registrar la masa de cada espécimen para así poder corroborar que han alcanzado el 100% de su compactación máxima.

Los especímenes se someten a un curado de 24 horas en horno a una temperatura de 40 °C, posteriormente se coloca dentro de una bolsa y se sella y se deja curar durante 48 horas mas a una temperatura de 40°C antes del ensaye, en la imagen 15 se muestran algunos especímenes listos para continuar con su curado dentro de bolsas.



Imagen 15. Acondicionamiento de especímenes para ensaye Triaxial.

Para la realización del ensaye se hace uso de una membrana de látex la cual cubre el rededor del espécimen y a través de la cual se le ejerce la presión de confinamiento al espécimen, esta membrana está dentro de un molde de ensaye el cual tiene la salida de una válvula a la cual se conecta un generador de aire a presión que se puede regular según se requiera.

Una vez listo el espécimen y el confinamiento se da inicio al ensaye, donde se van tomando lecturas de carga y deformación. Para este caso el valor que nos interesa es el de la carga presentada antes de la falla para así obtener un esfuerzo máximo de la probeta. En este punto ya se cuentan con los valores de esfuerzo máximo y confinamiento por lo cual siguiendo la teoría de Mohr-Coulomb podemos conocer la Cohesión y el Ángulo de Fricción interna.



Imagen 16. Ensaye Triaxial.

Para conocer la confiabilidad del ensaye es necesario encontrar la Cohesión Retenida (C_{Ret}). Esta se determina de la misma forma que en las probetas anteriores, pero en condición saturada y para un confinamiento de 100kPa, resumiendo así se necesitan un total de 10 especímenes para hacer una corrida de prueba. El valor de C_{Ret} se obtiene mediante la siguiente ecuación (Delgado Alamilla, Garnica Anguas, & Aguerrebere Salido, 2019):

$$C_{Ret} = \frac{(\sigma_{sat} - 100)}{(\sigma_{Equil.} - 100)} \times 100 \quad \text{Ecuación 5.0}$$

Los valores mínimos requeridos para la clasificación de los materiales estabilizados con asfalto (MEA) se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 11. Valores mínimos de cohesión y ángulo de fricción interno (Wirtgen GmbH, 2012).

Parámetro	Valores mínimos aceptables
Cohesión (kPa)/(kg/cm ²)	250/2.55
Ángulo de Fricción (°)	40°
Cohesión Retenida (%)	75%

5.3. Caracterización mediante Fluorescencia de Rayos X

El concepto básico de todos los espectrómetros es una fuente de radiación, una muestra y un sistema de detección. En espectrómetros de Fluorescencia de Rayos X de Dispersión por Longitud de Onda, el tubo de rayos X que actúa como fuente irradia una muestra directamente, y la fluorescencia procedente de la muestra se mide con un sistema de detección de dispersión por longitud de onda. La radiación característica procedente de cada elemento individual se puede identificar mediante el análisis de los cristales que separan los rayos X en función de la longitud de onda, o por el contrario, de las energías. Este análisis se puede hacer mediante la medición de la intensidad de los rayos X en diferentes longitudes de onda, una tras otra (secuencial), o en posiciones fijas mediante la medición de la intensidad de los rayos X en diferentes longitudes de onda, todas al mismo tiempo (Donald R. & Wendelin J., 2017).

El proceso de fluorescencia puede comprenderse más fácilmente en el caso de excitación monocromática (una sola longitud de onda), planteando luego la excitación policromática, que es la correspondiente al tubo de rayos X (H.J. & M.C., 2006).

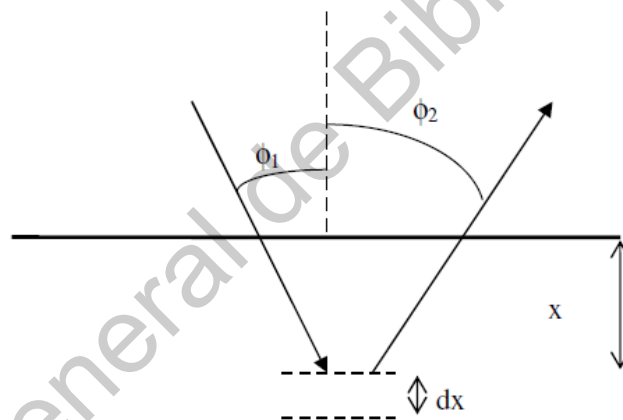


Figura 14. Fenómeno de fluorescencia (H.J. & M.C., 2006).

En el esquema anterior se muestra un espesor dx que se encuentra a una profundidad x de la superficie de la muestra de densidad P y una radiación incidente y longitud de onda. La radiación que llega a esa profundidad y puede excitar al elemento dx es aquella que sobrevivió al atravesar la distancia x . Los fotones fluorescentes viajan desde la profundidad x hasta la superficie de la muestra; en este trayecto sufren cierta absorción, después se dirigen al detector el cual recibe solo una fracción de los mismos (H.J. & M.C., 2006).

De esta manera, mediante la radiación fluorescente emitida por la muestra que llega al detector puede obtenerse información no sólo cualitativa de la muestra si no también cuantitativa. Es decir, se conoce qué elementos constituyen la muestra y además la concentración de los mismos.

La radiación fluorescente emitida por la muestra viaja hacia el detector; en el caso de que sea un semi conductor (de Si dopado con Li) los fotones fluorescentes que llegan a él causan ionizaciones y cada una de ellas es convertida a señal de voltaje con amplitud proporcional a la energía incidente. Se obtiene de esta manera un espectro como el que se muestra en la figura 15. Se observan picos correspondientes a las líneas de emisión características (K, Ca, Ti, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn; el pico de Ar corresponde a la absorción en el aire); el área bajo los picos representa el número de fotones fluorescentes que llegan al detector (H.J. & M.C., 2006).

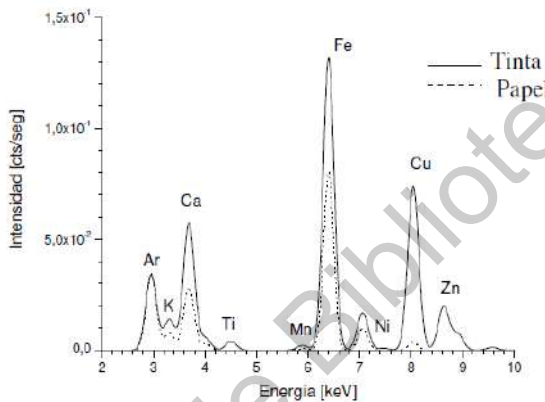


Figura 15. Ejemplo de espectro de fluorescencia (H.J. & M.C., 2006).

En los espectros hay dos contribuciones al ruido: en amplitud y en energía. La primera se debe a la estadística en el proceso de conteo causando fluctuaciones en los canales. La segunda hace que las líneas características presenten un ancho mayor al que deberían tener que es de entre 5 eV y 10 eV. Si estas dos contribuciones no estuviesen, la evaluación de un espectro sería trivial, ya que consistiría en líneas características bien definidas sobre un fondo también definido. Si bien el ruido no puede eliminarse, puede reducirse: el ruido en amplitud puede ser menor adquiriendo el espectro por un período de tiempo mayor o con un haz primario más intenso; el ruido en energía puede disminuirse mediante un detector y un sistema electrónico de buena calidad. El espectro fluorescente brinda importante información acerca de la muestra, por lo tanto, es importante la adquisición de un buen espectro para luego llevar a cabo los procesos de evaluación (Donald R. & Wendelin J., 2017).

Hay distintos fenómenos que contribuyen al espectro fluorescente y es necesario conocerlos para evaluarlo correctamente:

- Líneas de Emisión Características

La radiación característica de una línea tiene una distribución de Lorentz y al ser observada con un detector semi conductor es convolucionada con la función respuesta del mismo que es una Gaussiana, lo que da lugar a un perfil de Voigt. Las líneas características pueden aproximarse en primer orden por una gaussiana ya que el ancho de Lorentz es de unos 10 eV

para elementos con número atómico menor a 50 y el ancho de la función gaussiana del detector es de unos 160 eV (Donald R. & Wendelin J., 2017).

- Fondo

En fluorescencia de rayos X el fondo se debe principalmente a procesos de dispersión coherente e incoherente sufridos por la radiación en la muestra; la forma del fondo puede ser muy compleja y depende de la forma del espectro de excitación y de la composición de la muestra. La colección incompleta de cargas de las líneas fluorescentes constituye una contribución importante al fondo (Donald R. & Wendelin J., 2017).

- Picos de Escape

Puede ocurrir que un fotón fluorescente que llegue al detector sea absorbido por la capa de Si del mismo mediante efecto fotoeléctrico, emitiéndose un fotón característico de Si. Debido a esto, la energía depositada en el detector corresponde a la del fotón fluorescente menos la energía del fotón característico de Si (1.742 keV). De esta manera, el pico de escape se encuentra 1.742 keV a la izquierda del pico original, teniendo un ancho menor correspondiente a la resolución del espectrómetro para esa energía (Donald R. & Wendelin J., 2017).

- Picos suma

Cuando las cuentas se producen a una rapidez considerable, dos fotones pueden impactar en el detector simultáneamente y se crea un pulso que corresponde a la suma de las energías de esos dos fotones (Donald R. & Wendelin J., 2017).

La técnica de microscopía que tiene viabilidad en la aplicación a la materia orgánica, como lo es el asfalto, es uno de los métodos de “Scan Electronic Microscope” (SEM), que en español significa Microscopio Electrónico de Barrido, el cual no trabaja a temperaturas altas, como lo es el método convencional (mayor a 400°C), porque esto ocasionaría una incineración y ebullición del asfalto, perdiendo el alto vacío en la cámara. Se trabaja con celdas de criogenización en donde los materiales son procesados en una celda tipo peltier a -30°C, para obtener la imagen del asfalto-filler y observar las imágenes a tamaños de 200 a 50 micrómetros (μm). Es de esta manera como se pueden demostrar las características de la interfaz con asfalto (materia orgánica), la dispersión del filler y el cubrimiento que tiene el asfalto con el filler (fenómeno denominado como “coating”) (Wen y otros, 2018).

En la imagen 17 se puede ver una muestra de material fino proveniente de probetas ensayadas, esta muestra tiene que ser representativa y tener el tamaño de necesario para poder ser estudiada, el material es estudiado obteniendo del mismo una espectroscopia de rayos X de energía dispersiva; con los resultados obtenidos de este análisis se conoce de manera cuantitativa y con un error calculable la composición química de la muestra y en su defecto se puede visualizar la interfaz de los componentes de la misma (asfalto, agregado y filler).

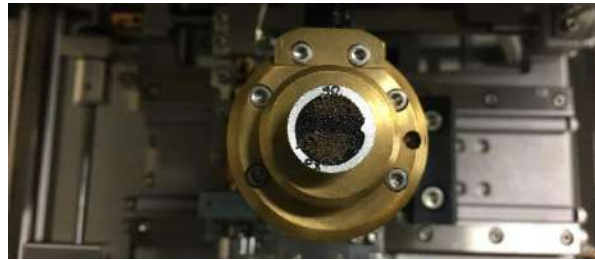


Imagen 17. Muestra de agregado estabilizado con asfalto espumado.

5.4. Análisis costos

5.4.1. Diseño de una estructura de pavimento

Para hacer la integración de precios unitarios primeramente se debe definir una estructura de pavimento, la cual será la base para poder realizar un análisis de costos. Para poder hacer una comparativa de costos con otros tipos de estructura se debe definir principalmente los Millones de ejes equivalentes del proyecto y la vida del proyecto.

Comenzado por el cálculo del tránsito, el cual se obtiene a partir de los valores propuestos en la siguiente tabla:

Tabla 12. Características propuestas de tránsito (Propuesta).

TDPA, vehículos/día:	2785
Coefficiente de distribución por sentido:	0.5
Coefficiente de distribución por carril:	0.5
Periodo de diseño:	20
Tasa de crecimiento:	3%

La distribución vehicular se muestra en la tabla 13, se considera el 80% de los vehículos cargados.

Tabla 13. Distribución vehicular (Propuesta).

Vehículo	Porcentaje, %
A	62.5
B2	2.0
B3	4.8
C2	6.6
C3	7.1
T3-S2	8.0
T3-S3	2.8
T3-S2-R4	6.2

Así mismo en la tabla 14 se muestran los casos propuestos y los materiales a utilizar en la estructura del pavimento.

Tabla 14. Tipos de estructuras de pavimento (propuesta).

Caso	Tipo de Pavimento	Material para Base	Material de SubBase
1	Carpeta Asfáltica	Base Hidráulica	SubBase sin tratamiento
2	Carpeta Asfáltica	Base Negra	SubBase sin tratamiento
3	Carpeta Asfáltica	Base estabilizada con asfalto espumado	SubBase sin tratamiento

Las propiedades mecánicas de los materiales a utilizar se muestran en la tabla 15, estas son necesarias para poder realizar el diseño de la estructura de pavimento, los valores presentes en esta tabla son obtenidos de la base de datos de la herramienta “IMT PAVE Versión 3.1 (Garnica y otros, 2018), excepto por la base estabilizada con AE, valor que obtuvimos en el de la correlación de los valores obtenidos en el subcapítulo 5.3.

Tabla 15. Propiedades mecánicas de los materiales (Garnica y otros, 2018).

Material	Mr (MPa)	Mr (kg/cm ²)
Carpeta Asfáltica	3446.77	35147.27
Base Estabilizada con Asfalto Espumado	1000.61	10197.2
Base Hidráulica	220.63	2243.38
Base Negra	1500.00	15295.00
Sub Base sin Tratamiento	144.79	1476.45
Sub Rasante sin Tratamiento	176.00	1794.70

Para el diseño de los diferentes casos de estructura de pavimento se utilizará la herramienta “IMT PAVE Versión 3.1” (Garnica y otros, 2018), el cual es un software digital creado por el IMT para el diseño y revisión de pavimentos rígidos y flexibles. Esto por que como

herramienta permite la utilización de una “Base estabilizada con asfalto espumado”; es aquí donde como variable se puede hacer uso de la base en estudio.

5.4.2. Integración de un precio unitario para la construcción de una estructura de pavimento.

En esencia el planteamiento conceptual de un precio unitario es el mismo indistintamente del tipo de obra al que se aplique. Dicho planteamiento conceptual de la estructuración del precio unitario se muestra en el siguiente esquema:

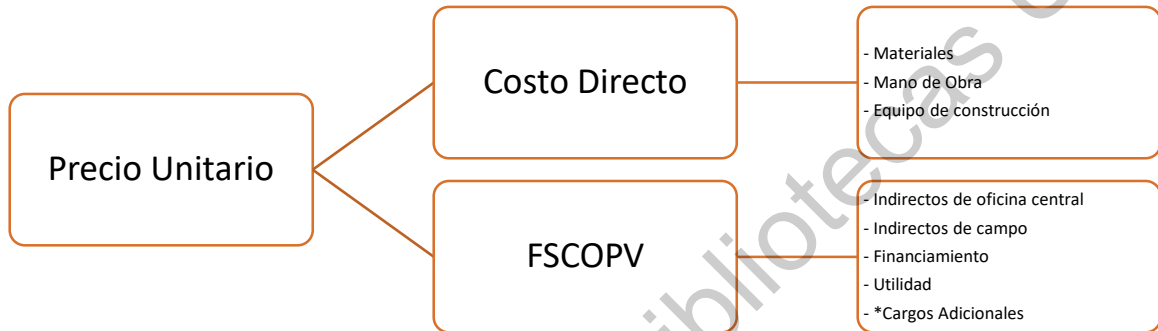


Figura 16. Integración de un precio unitario (Varela Alonso, 2009).

* Factor de Sobrecosto para Obtener el Precio de Venta

El costo directo se define como la suma de materiales, mano de obra y equipo necesario para la realización de un proceso productivo. Como variables se considera el valor de los materiales, el valor de la mano de obra y el valor de los equipos; como variables condicionadas se considera las cantidades que se consumen cada uno de estos integrantes, esto es, la parte que representan dentro de un costo directo (Varela Alonso, 2009).

La secuencia para la elaboración del costo directo comienza con planos y especificaciones, determinación de los conceptos de obra, lista de materiales, cuantificación de conceptos, maquinaria, equipos y costos horarios.

El costo indirecto, relacionado específicamente en las empresas constructoras, es el costo adicional al costo directo, esto es, la suma total de los gastos y beneficios que se agregan al costo directo, hasta integrar el precio total de venta (Varela Alonso, 2009).

Durante el cálculo de los costos indirectos, se presenta la necesidad de evaluar, en especial, dos de los costos, indirectos ya mencionados que se deriva de la organización propia de cada empresa y de cada proyecto. El costo indirecto a su vez se divide en costo indirecto de oficina central y costo indirecto de campo.

Para el análisis del costo de una organización central, independientemente de su estructura orgánica, sus gastos pueden agruparse en cuatro principales rubros, que en forma enunciativa y no limitativa, pueden ser: gastos administrativos, técnicos, alquileres,



depreciaciones, obligaciones, seguros, materiales de consume, capacitación y promoción. Los costos indirectos de obra se definen como la suma de todos los gastos que, por su naturaleza intrínseca, son aplicables a todos los conceptos de una obra en especial. Los componentes de los costos indirectos de obra se dividen en dos: costos indirectos fijos y costos indirectos variables (Varela Alonso, 2009).

El financiamiento corresponde a los gastos derivados por la inversión de recursos propios o contratados que realice el contratista para dar cumplimiento al programa de ejecución de los trabajos calendarizados y valorizados por periodos. El cargo por utilidad es la ganancia que recibe el contratista por la ejecución del concepto de trabajo, este valor de fija por el propio contratista (Varela Alonso, 2009).

Para poder realizar la integración del precio unitario es necesario tener el proyecto definido, en este caso la estructura del pavimento se define por las propiedades mecánicas de los materiales además de las especificaciones del proyecto, para que el costo obtenido en este análisis dependa esencialmente de los materiales utilizados es necesario definir las mismas especificaciones de proyecto para cada caso; de esta manera podremos conocer el valor de una estructura de pavimento cuando se hace uso de diferentes tipos de materiales en las base, y definir cuál opción es la más económica (Varela Alonso, 2009).

Es importante mencionar que para el análisis de costos a realizar en este proyecto no se tomara en cuenta el Factor de Sobrecosto para Obtener el Precio de Venta (FSCOPV) y ninguna de sus variables. Esto para que el valor obtenido dependa directamente de los materiales utilizados y del proceso constructivo implementado.

6. Resultados y Discusiones

6.1. Clasificación del Asfalto utilizado

El asfalto utilizado en el estudio es un AC-20 proveniente de la refinería de Salamanca. La caracterización del material asfáltico se realizó siguiendo la metodología de la Norma (N·CMT·4·05·004/18); el resumen de las características se muestra en la tabla 16.

Tabla 16. Parámetros de calidad para la caracterización del asfalto (N-CMT-4-05-004/18).

Ensayo	Norma	Temperatura de prueba	Parámetro	Resultado	Especificación
Condición Original					
Viscosidad	ASTM D4402-15	135 °C	η	0.466 Pa·s	≤ 3 Pa·s
Reómetro de Corte	ASTM D7175-15	64 °C	$G^*/\text{sen}\delta$	1.80 kPa	≥ 1 kPa
Envejecimiento en Horno Rotatorio de Película Delgada (RTFO), ASTM D2878-12					
Cambio de masa	ASTM D2872-12	163 °C	CM	-0.519 %	$\leq 1.0\%$
Reómetro de corte dinámico (DSR)	ASTM D7175-15	64 °C	$G^*/\text{sen}\delta$	9.38 kPa	≥ 2.2 kPa
Envejecimiento en vasija de presión y temperatura (PAV), ASTM D6521-13					
Reómetro de corte dinámico (DSR)	ASTM D7175-15	22 °C	$G^*(\text{sen}\delta)$	3881 kPa	$\leq 5,000$ kPa
Reómetro de viga a flexión (BBR)	ASTM D6648-08	-6 °C	S	66.7 MPa	≤ 300 MPa
			m	0.331	≥ 0.300

De los resultados obtenidos tenemos entonces que el asfalto se clasifica como un PG 64-16, lo cual indica que es un asfalto adecuado para su utilización en el proceso de espumado, ya que su viscosidad es la adecuada y no contiene polímeros que modifiquen sus propiedades reológicas.

6.2. Agregado pétreo

En la tabla 5 se describen los tipos de agregados utilizados en este proyecto; la caracterización de los mismos en el ensaye de granulometría y plasticidad se hacen de manera independiente. Una vez que se tiene esta caracterización se procede a hacer mezclas de agregados para poder cumplir con la granulometría de diseño, y una vez teniendo la combinación de agregados se procede a realizar el ensaye Proctor.



Imagen 18. Muestra de agregado RAP.

6.2.1. Granulometría

En la siguiente tabla se muestran los resultados de granulometría de cada uno de los agregados utilizados.

Tabla 17. Resultados Granulométricos de los Agregados.

Abertura de Malla		% Que pasa				Límites	
in	mm	RAP 1 (3/4)	RAP 2 (3/4)	GRAVA TRITURADA (3/4)	ARENA TRITURADA	Inferior	Superior
2"	50.8	100.00	100.00	100.00	-	100%	100%
1 1/2"	36.1	100.00	100.00	100.00	-	87%	100%
1"	25.4	96.76	98.58	89.24	-	76%	100%
3/4"	19	91.48	93.13	75.58	-	65%	100%
1/2"	12.7	76.19	78.76	54.38	-	55%	90%
3/8"	9.52	66.75	68.52	43.14	-	50%	80%
1/4"	6.3	60.33	51.85	32.61	-	43%	71%
No. 4	4.75	47.23	41.50	26.47	99.34	35%	62%
No. 8	2.36	31.42	18.28	10.84	74.41	25%	47%
No. 16	1.18	20.22	10.88	6.49	43.31	18%	36%
No. 30	0.6	11.50	5.61	3.58	26.54	13%	28%
No. 50	0.3	4.83	2.90	2.06	16.43	9%	22%
No. 100	0.15	1.88	1.39	1.30	10.69	6%	17%
No. 200	0.075	0.54	1.01	0.85	7.25	6%	12%

La distribución granulométrica se muestra en la figura 17, donde es más fácil apreciar cada una de las muestras así como los límites de calidad.

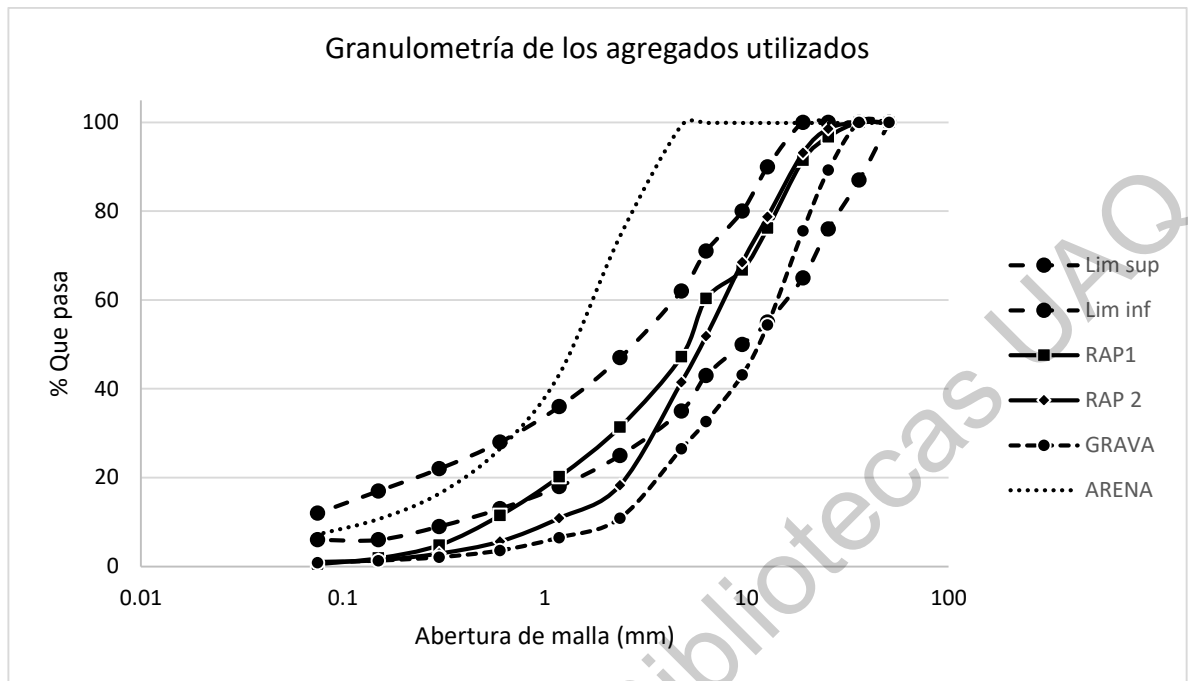


Figura 17. Gráficas granulométricas de las muestras.

Como se puede ver en la figura 17 ninguno de los agregados a utilizar esta dentro de los límites en un 100%, es muy normal que se presente esta condición en campo, ya que las propiedades granulométricas de los agregados son siempre intrínsecas. Cuando esto sucede es recomendable hacer un ajuste granulométrico lo cual se hace con la mezcla de dos o más agregados con diferentes tipos de granulometría.

Para este proyecto en específico se busca conocer las características de las mezclas al hacer uso de Agregado Reciclado (RAP), por lo cual una de la variable a utilizar es hacer uso del RAP en un 100% y la otra una combinación de RAP con grava y arena como material de aporte. Teniendo así dos tipos diferentes de mezcla de agregado a utilizar.

Tabla 18. Combinación de agregados utilizados.

Tipo de Mezcla	Contenido de RAP	Contenido de Grava Virgen	Contenido de Arena Virgen
RAP	100%	0%	0%
RAP+MV	20%	20%	60%

Siendo así la tabla 18 muestra la combinación de materiales pétreos a utilizar, esto a considerarse como la primera variable dentro de la elaboración de mezclas.

De esta manera en la tabla 19 se muestran la granulometría solamente de los dos tipos de agregados a utilizar.

Tabla 19. Granulometría de la combinación de agregados.

Abertura de Malla		% Que pasa		Límites	
in	mm	RAP 1 (3/4)	RAP+MV	Inferior	Superior
2"	50.8	100.00	99.96	100%	100%
1 1/2"	36.1	100.00	99.96	87%	100%
1"	25.4	96.76	97.48	76%	100%
3/4"	19	91.48	93.85	65%	100%
1/2"	12.7	76.19	86.77	55%	90%
3/8"	9.52	66.75	82.41	50%	80%
1/4"	6.3	60.33	76.84	43%	71%
No. 4	4.75	47.23	73.17	35%	62%
No. 8	2.36	31.42	50.45	25%	47%
No. 16	1.18	20.22	29.46	18%	36%
No. 30	0.6	11.50	17.75	13%	28%
No. 50	0.3	4.83	10.86	9%	22%
No. 100	0.15	1.88	6.95	6%	17%
No. 200	0.075	0.54	4.71	6%	12%

De igual manera en la figura 18 se muestran las gráficas granulométricas de ambos agregados.

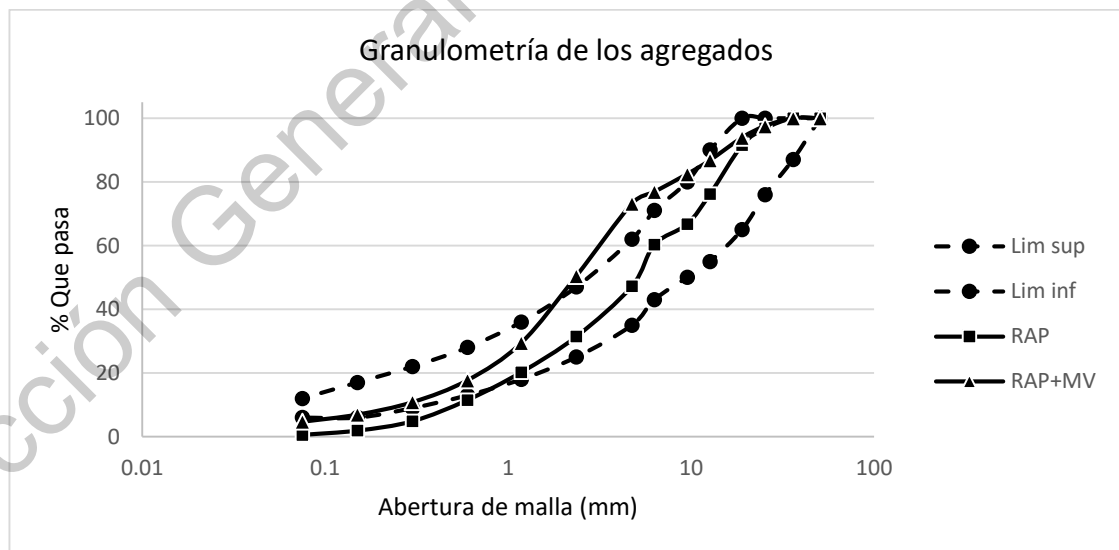


Figura 18. Gráficas granulométricas de la combinación de agregados.

Lo que se busca de esta combinación de agregados es que se cumpla en lo más permisible la calidad de la granulometría especificada por la norma, dentro de lo más aceptable según los

agregados disponibles. De esta manera podemos apreciar que ninguna de las dos combinaciones de agregados está dentro de los límites en un 100%, para evitar la inversión de tiempo y aprovechando las opciones disponibles (agregados) se hace uso de estas propuestas.

6.2.2. Plasticidad

Es importante mencionar que por la naturaleza misma de los agregados utilizados se supone que estos tienen un alto contenido de limos, y un contenido de arcilla muy bajo el cual pudiese evitar un comportamiento plástico en los agregados.

En la siguiente tabla se muestra el comportamiento del material al ser ensayado en la copa de casa grande, donde se puede apreciar que no se alcanzan los golpes mínimos necesarios para registrar un valor de límite líquido.

Tabla 20. Reporte de ensaye de plasticidad en agregado.

No. Golpes: 07	No. Golpes: 01	No. Golpes: 01	No. Golpes: 02	No. Golpes: 03
				
RAP	Agregado Triturado	Agregado Triturado	Agregado Triturado	RAP

En la siguiente tabla se muestra el resumen de los resultados finales del ensaye de límites de consistencia. Se puede apreciar que los agregados utilizados no tienen plasticidad, en este punto se puede decir que no necesitamos darle un pretratamiento al agregado.

Tabla 21. Resultados de ensaye de plasticidad en agregados.

Tipo de Agregado	Ensaye	Resultado
RAP	Límite líquido %	NP
	Límite plástico %	NP
	Índice plástico %	NP
AGREGADO TRITURADO	Límite líquido %	NP
	Límite plástico %	NP
	Índice plástico %	NP

6.2.3. Densidad Máxima del Agregado

En la figura 19 se muestra la curva de compactación del agregado RAP, donde se tiene un valor de peso volumétrico seco máximo de 2270.78 kg/m^3 , el cual se obtiene con una humedad de 8.50%.

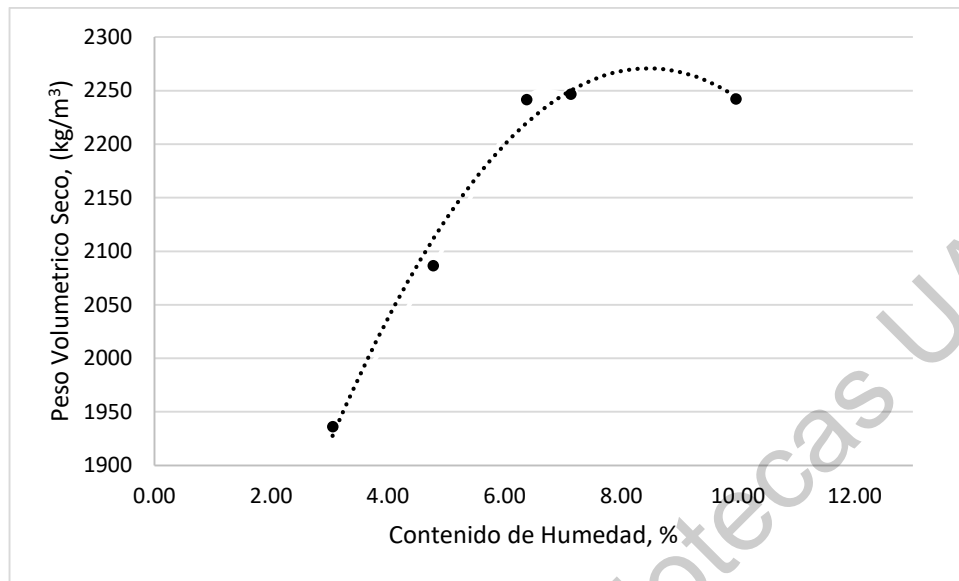


Figura 19. Gráfica de compactación de agregado RAP.

En la figura 20 se muestra la curva de compactación del agregado RAP+MV, donde se tiene un valor de peso volumétrico seco máximo de 2271.38 kg/m³, el cual se obtiene con una humedad de 8.30%.

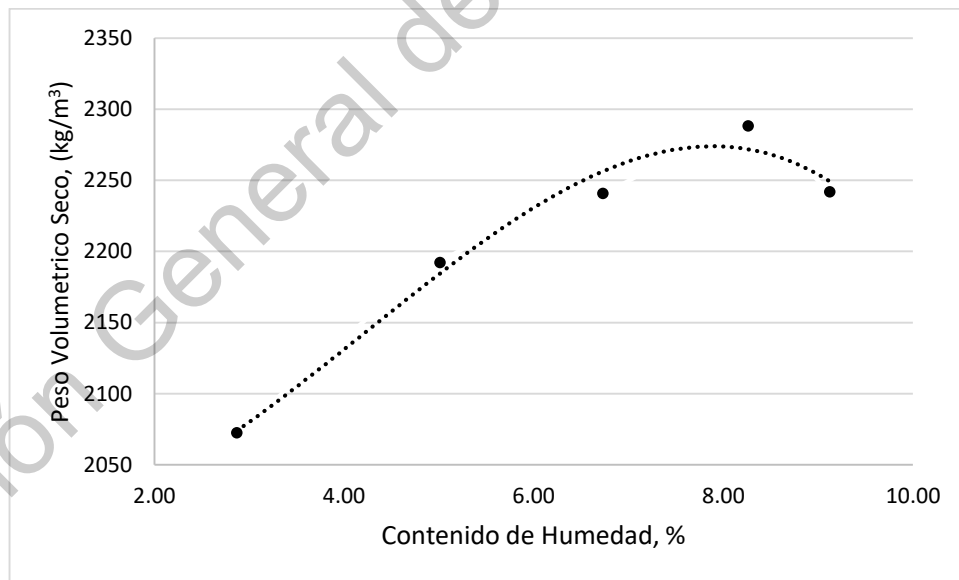


Figura 20. Gráfica de compactación de agregado RAP+MV.

En la tabla 22 se muestra el resumen de las características de compactación y humedad óptima de las muestras de agregado, estos datos son esenciales principalmente para el proceso de compactación de especímenes.

Tabla 22. Densidad de agregados.

Tipo de Mezcla	Humedad Óptima	PVSM
-	%	Kg/m ³
RAP	8.50	2270.78
RAP+MV	8.30	2271.38

6.3. Propiedades espumantes del asfalto

Para conocer los valores de Re y T/2, se hacen diferentes corridas de temperatura a 160, 170 y 180 °C, con contenidos de agua en porcentajes de 2, 3 y 4%. Los resultados de las corridas se muestran a continuación.

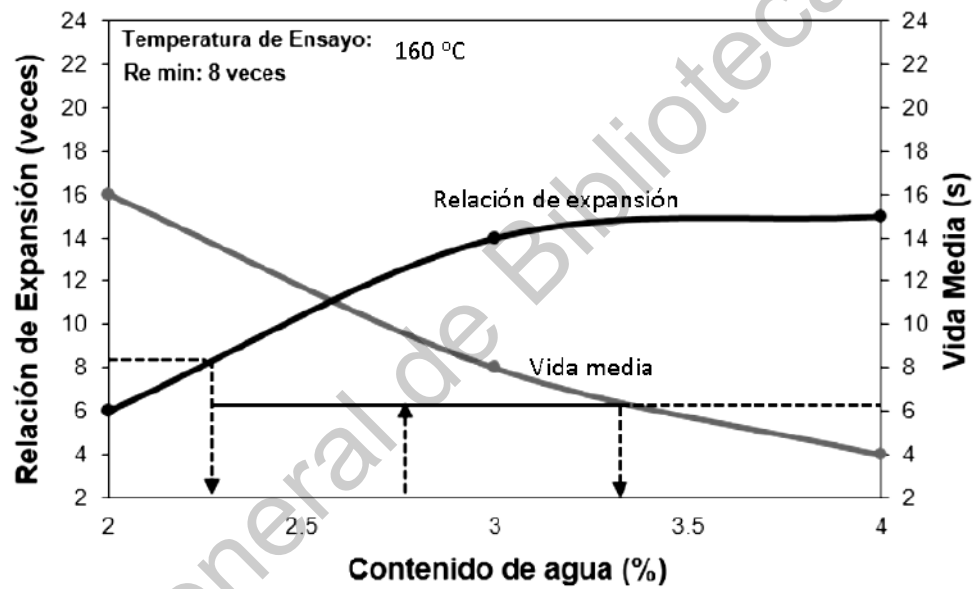


Figura 21. Corrida de tiempo contra volumen a 160 °C.

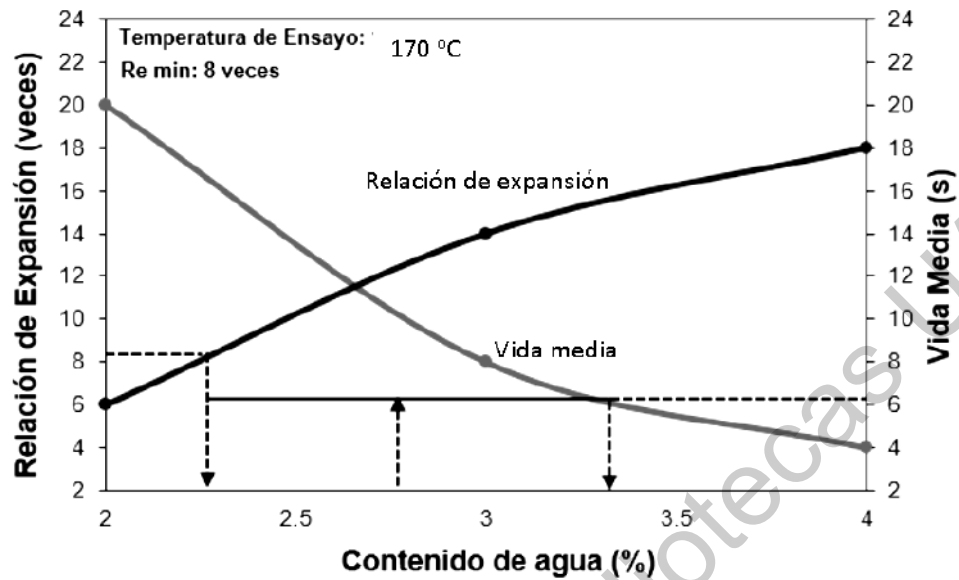


Figura 22. Corrida de tiempo contra volumen a 170 °C.

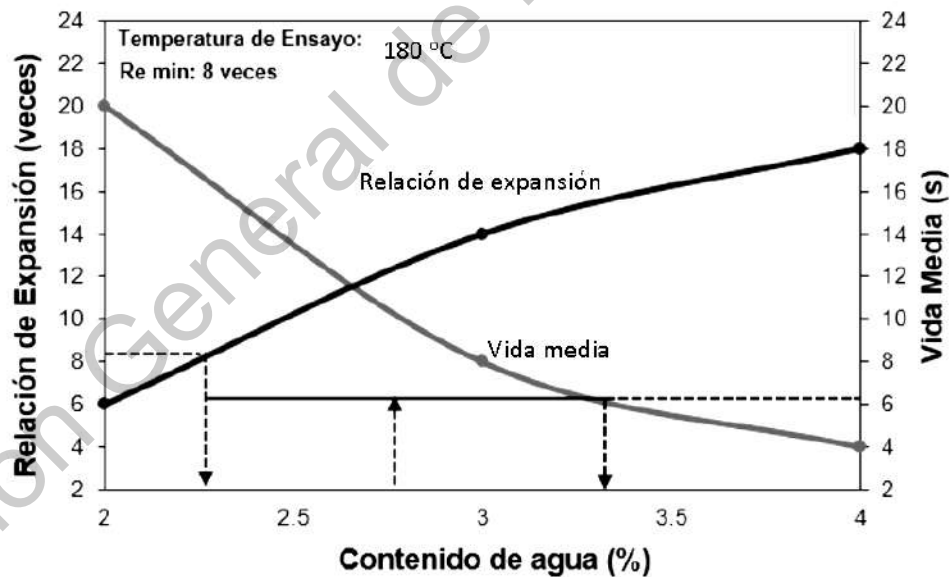


Figura 23. Corrida de tiempo contra volumen a 180 °C.

El contenido de óptimo de agua se realiza al trazar una línea a partir de los valores límites mínimos encontrados en el ensaye y en las figuras se prolonga dicha línea hasta cruzar las curvas y para así prolongar hacia el eje de las abscisas. Una vez trazadas y extendidas ambas líneas, se realiza la media de ambos contenidos de agua para obtener el contenido óptimo de agua. El resumen de los valores obtenidos se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 23. Resultados de corridas a diferentes temperaturas.

Temperatura (°C)	Contenido de Agua (%)	Vida media (s)	Relación de expansión (veces)
160	2.7	8.5	9.8
170	2.7	10.5	12.2
180	2.7	8.5	9.5

Se obtiene que una combinación de temperatura de 170 °C con 2.7% de contenido de agua es la que brinda las mejores condiciones de vida media y de relación de expansión. Por ello, para fines de diseño se considera que ésta es la condición óptima de espumado del asfalto.

6.4. Características del hidróxido de calcio.

Como ya se ha venido mencionado el material a utilizar como “filler activo” es hidróxido de calcio o cal hidráulica, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, en purezas del 80 y 90%.

La cal hidráulica en pureza del 80% es normalmente utilizada en la construcción para la elaboración de mezclas de morteros y estabilización de suelos arcillosos. En la tabla 24 se muestran algunas características e información de la misma.

Tabla 24. Calidad de cal hidráulica con pureza del 80% (CALHIDRA, 2020).

Hidróxido de calcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$	Concentración: 75 - 85%
Oxido de sílice SiO_2	Concentración: 0.10 - 2.0%
Peso Molecular	74.10 g/M
Color	Blanco
pH	12.45 al 1% en agua a 25 °C
Densidad Relativa	0.50 – 0.70kg/l
Temperatura de Descomposición	540 °C

La cal hidráulica en pureza del 90% es normalmente utilizada en tratamiento de agua, lagunas y lodos. En la tabla 25 se muestran algunas características e información de la misma.

Tabla 25. Calidad de cal hidráulica con pureza del 90% (CALHIDRA, 2020).

Hidróxido de calcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$	Concentración: 90 - 94%
Oxido de sílice SiO_2	Concentración: 0.10 - 2.0%
Peso Molecular	74.10 g/M
Color	Blanco
pH	12.45 al 1% en agua a 25 °C
Densidad Relativa	0.60 – 0.70kg/l
Temperatura de Descomposición	540 °C

6.5. Características de las mezclas estabilizadas con asfalto espumado

Teniendo como principales variables el agregado y tipo de filler a utilizar, en la siguiente tabla se muestran las propuestas de mezclas a estabilizar con asfalto espumado siendo un total de 5 mezclas a caracterizar.

Tabla 26. Resumen de mezclas propuestas a ensayar.

Mezcla	Agregado	Tipo y contenido de filler
REF	100% RAP	Sin filler activo
CAL 80	100% RAP	Hidróxido de calcio en pureza del 80%
CAL 90	100% RAP	Hidróxido de calcio en pureza del 90%
RAG 80	RAP+MV	Hidróxido de calcio en pureza del 80%
RAG 90	RAP+MV	Hidróxido de calcio en pureza del 90%

6.5.1. Nivel 1.

Los resultados obtenidos muestran que las mezclas RAP y RAP+MV obtuvieron un valor de ITSseco de 232.00 y 230.91kPa respectivamente, ambos valores son mayores al mínimo especificado (225kPa); en condición saturada el valor de ITShumedo es de 174.00 y 182.44 kPa ambos valores cumplen con los requerimientos (100kPa). Los valores de TSR también son aceptables obteniéndose 75% para la mezcla RAP y 79.01% para la mezcla RAP+MV, ambos son mayores al 60%.

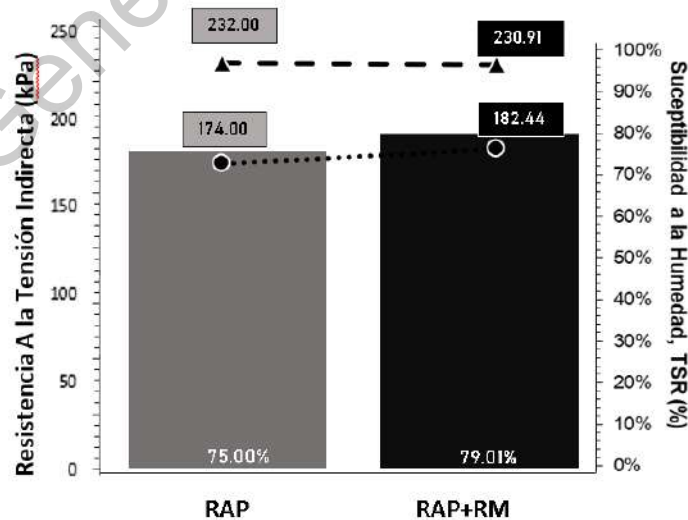


Figura 24. Comparación y resultados del Nivel 1.

Podemos ver entonces que ambas mezclas cumplen con los requerimientos mínimos de calidad, por lo cual podemos decir que ninguna se ve afectada en sus propiedades mecánicas por la humedad, además no resulta necesaria la adición de filler.

6.5.2. Nivel 2.

Como vimos en el nivel 1 ambas mezclas cumplen con los requerimientos mínimos; pero para fines de este proyecto y estudiar el efecto de la cal hidráulica en las mezclas estabilizadas con asfalto espumado se hace la adición de la misma en purezas del 80 y 90%. Siendo así se proceda a determinar el contenido de asfalto óptimo. Como ya se mencionó anteriormente esto se realiza mediante tanteos y en este caso comenzaremos con un valor de 2.3% y se ajustara en incrementos de 0.1% para así analizar el comportamiento mecánico de cada mezcla y seleccionar así el porcentaje más aceptable, y que de los mejores resultados de ITS y TSR.

De la figura 25 a la 29 se muestran los resultados obtenidos del ensaye de las mezclas con contenido de asfalto espumado en porcentajes 2.3, 2.4 y 2.5% para cada diferente tipo de combinación de filler y agregado utilizada.

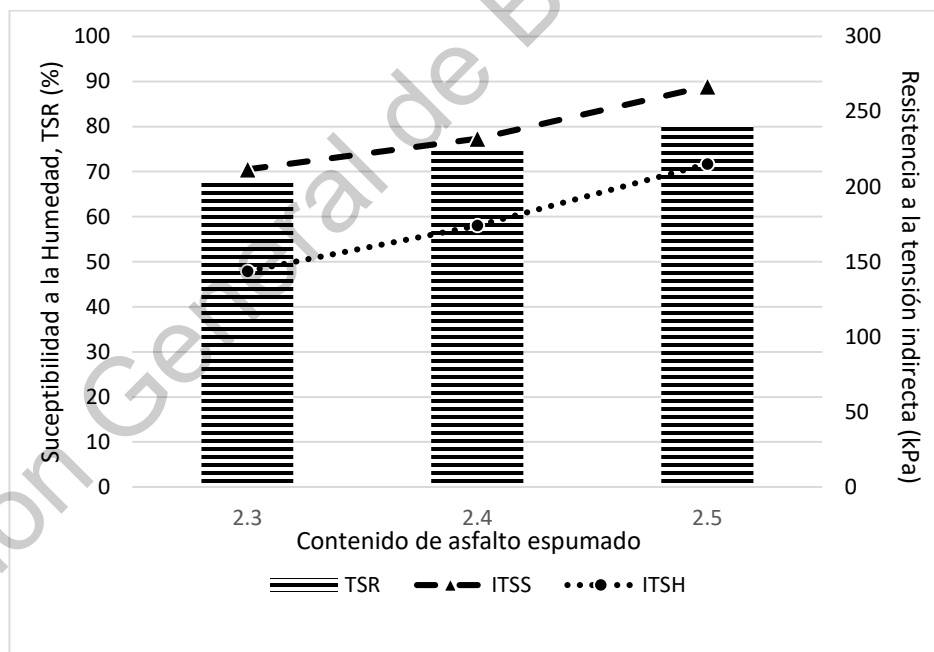


Figura 25. Gráfica de contenidos de asfalto espumado para la mezcla REF.

Tabla 27. Contenidos de asfalto espumado para la mezcla REF.

REF	ITSequi (kPa)	ITSequi-sat (kPa)	TSR (%)
2.3	211.54	143.65	67.91
2.4	232.00	174.00	75.00
2.5	266.78	215.08	80.62

Para la mezcla REF, se puede ver que usando un 2.3% asfalto espumado se logra alcanzar valores mayores a los mínimos especificados en la tabla 10, por lo tanto se puede hacer uso de este valor como el contenido óptimo de asfalto espumado para esta mezcla, aunque también depende de los resultados del resto de las mezclas.

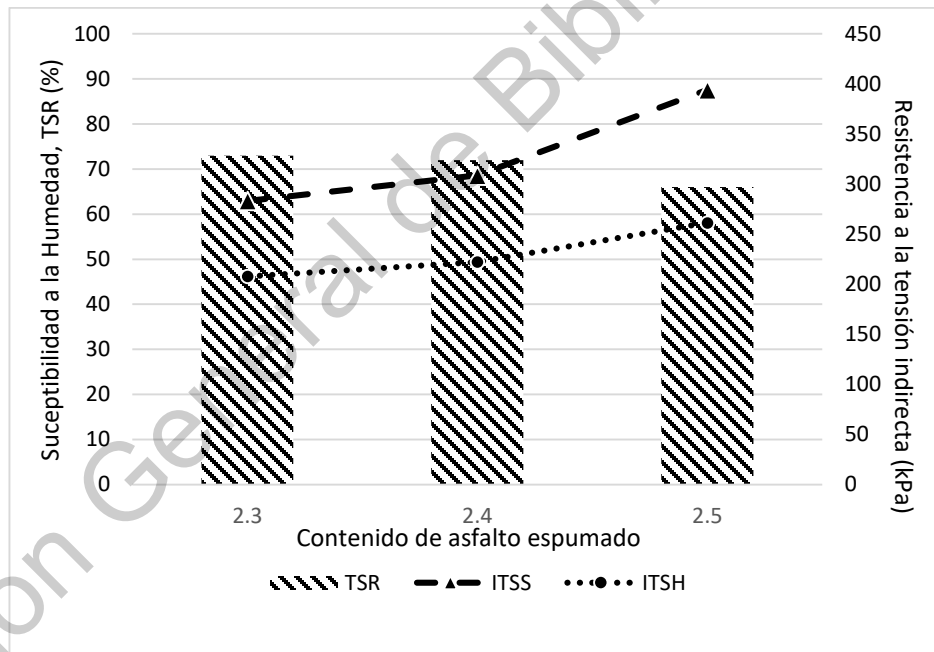


Figura 26. Gráfica de contenidos de asfalto espumado para la mezcla CAL80.

Tabla 28. Contenidos de asfalto espumado para la mezcla CAL80.

CAL 80	ITSequi (kPa)	ITSequi-sat (kPa)	TSR (%)
2.3	283.30	207.80	73.00
2.4	308.70	222.20	72.00
2.5	394.00	261.40	66.00

Para la mezcla CAL 80, se puede ver que usando un 2.3% asfalto espumado se logra alcanzar valores mayores a los mínimos especificados en la tabla 10, por lo tanto también se puede hacer uso de este valor como el contenido óptimo de asfalto espumado para esta mezcla, aunque también depende del resultado de la mezcla CAL90. Se puede apreciar que al hacer uso de un 2.5% de asfalto espumado los valores de ITS aumentan, pero el valor de TSR es bajo en comparación con los otros porcentajes, lo que nos dice que es más susceptible a la humedad.

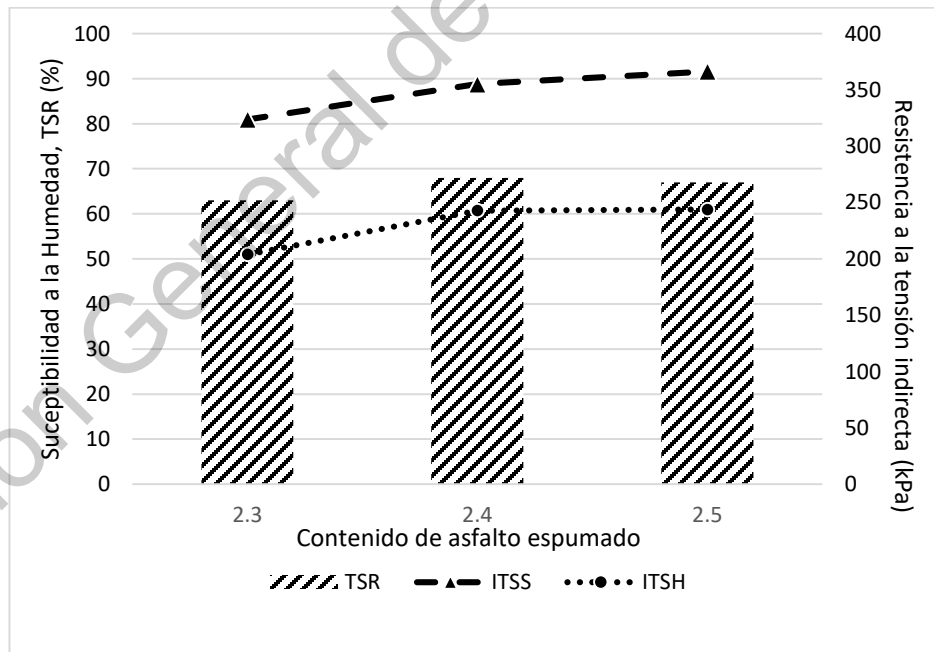


Figura 27. Gráfica de contenidos de asfalto espumado para la mezcla CAL90.

Tabla 29. Contenidos de asfalto espumado para la mezcla CAL90.

CAL 90	ITSequi (kPa)	ITSequi-sat (kPa)	TSR (%)
2.3	323.80	203.90	63.00
2.4	355.20	242.80	68.00
2.5	366.40	243.90	67.00

Para la mezcla CAL 90, se puede ver que usando un 2.3% asfalto espumado se logra alcanzar valores mayores a los mínimos especificados en la tabla 10, por lo tanto se puede hacer uso de este valor como el contenido óptimo de asfalto espumado para esta mezcla. Se puede apreciar que al aumentar el contenido de asfalto espumado los valores de ITS tienden a estabilizarse.

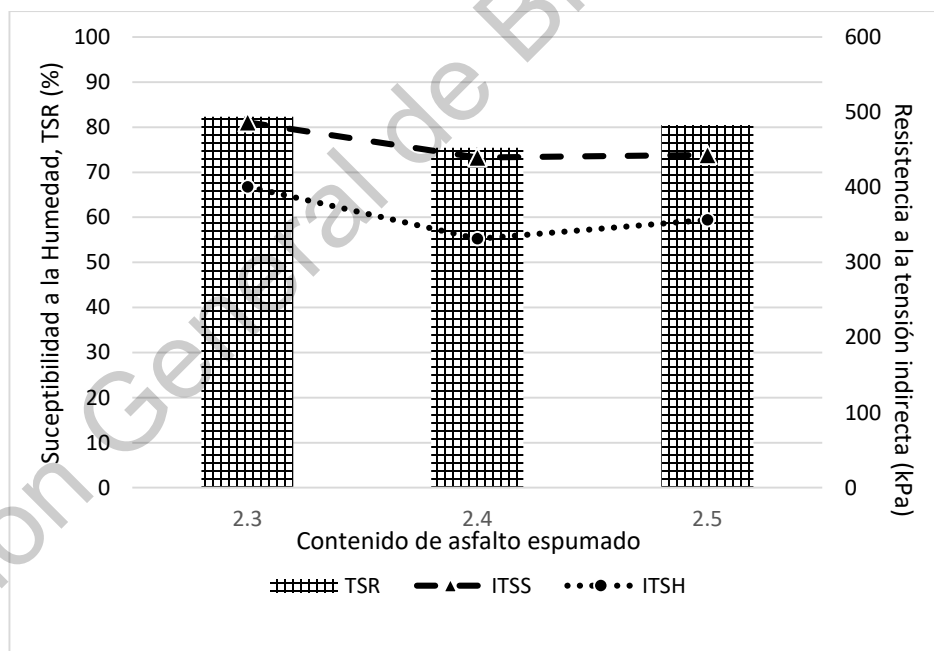


Figura 28. Gráfica de Contenidos de asfalto espumado para la mezcla RAG80.

Tabla 30. Contenidos de asfalto espumado para la mezcla RAG80.

RAG 80	ITSequi (kPa)	ITSequi-sat (kPa)	TSR (%)
2.3	486.64	400.81	82.36
2.4	439.69	331.57	75.41
2.5	443.17	356.61	80.47

Para la mezcla RAG80, se puede ver que usando un 2.3% asfalto espumado se logra alcanzar valores mucho mayores a los mínimos especificados en la tabla 10, por lo tanto se puede hacer uso de este valor como el contenido. Se puede apreciar que a diferencia de las mezclas anteriores los valores de ITS aumentaron considerablemente esto se debe a la presencia de material fino que se logró obtener al hacer la combinación de agregados.

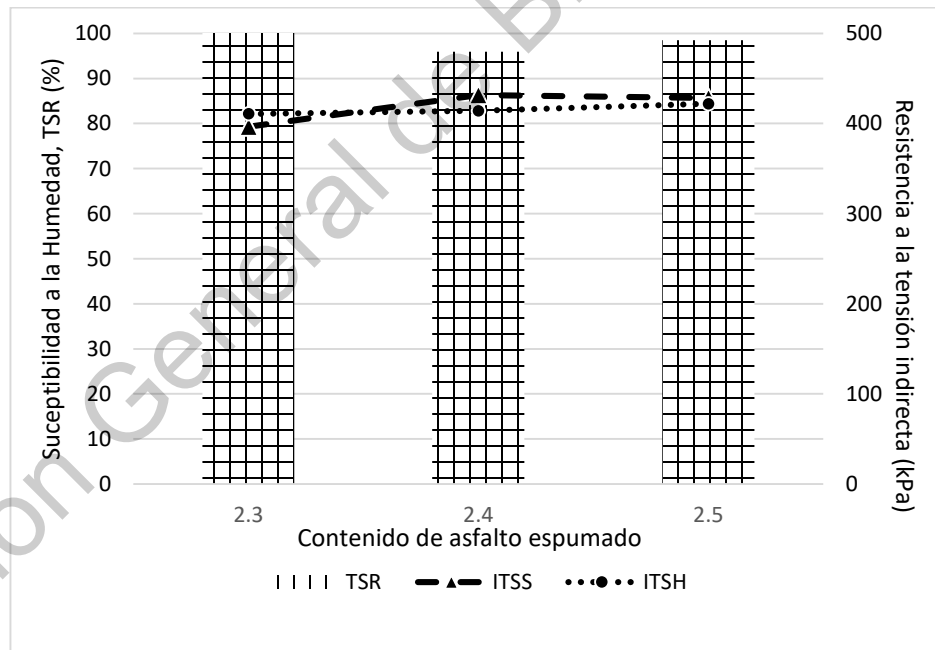


Figura 29. Gráfica de contenidos de asfalto espumado para la mezcla RAG90.

Tabla 31. Contenidos de asfalto espumado para la mezcla RAG90.

RAG 90	ITSequi (kPa)	ITSequi-sat (kPa)	TSR (%)
2.3	396.54	410.77	103.59
2.4	431.63	414.09	95.94
2.5	428.43	421.96	98.49

Para la mezcla RAG 90, se puede ver que usando un 2.3% asfalto espumado se logra alcanzar valores mayores a los mínimos especificados en la tabla 10, por lo tanto se puede hacer uso de este valor como el contenido. Así como la mezcla anterior en este caso también se puede ver resultados mucho mayores; en este punto podemos decir que la presencia de finos beneficia bastante el comportamiento mecánico de las mezclas ante la presencia de humedad.

Revisando los resultados podemos entonces ver que con un 2.3% de asfalto espumado se cumplen con los valores de ITS y TSR para todas las mezclas por lo cual se considera ese valor como el contenido óptimo de asfalto espumado. La metodología indica que se debe aumentar un 5% de asfalto espumado a la primera concentración que cumpla con todos los parámetros. Esto con el fin de cubrir las variaciones que se puedan presentar durante el proceso de producción en campo.

Para este caso fue 2.3 %, dando como resultados de porcentaje de asfalto espumado óptimo de 2.4% ($2.3\% * 1.05 = 2.415\% \sim 2.4\%$).

Para este caso tenemos entonces:

$$\text{Contenido óptimo} = 2.3 * 1.05 = 2.415 \approx 2.4\%$$

El contenido óptimo de asfalto se de 2.4%

6.5.2.1. Comparación de propiedades mecánicas al Nivel 2.

En este punto se hace un resumen de los resultados de TSR para todas las mezclas con 2.4% de asfalto espumado como contenido óptimo, esto para poder hacer una comparativa entre las mismas y ver cual tiene el mejor desempeño en este nivel de diseño, se muestran los datos en la tabla 32 y también se grafican en la figura 30 para poder visualizarlos más fácilmente.

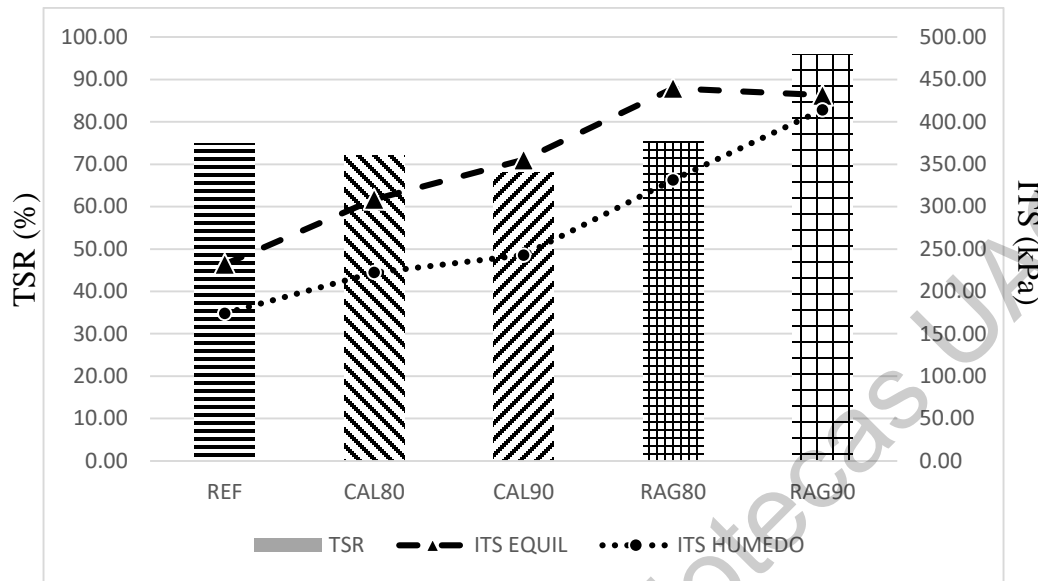


Figura 30. Comparación de resultados de Nivel 2 con un contenido óptimo de asfalto espumado de 2.4%.

Tabla 32. Resultados de Nivel 2 con un contenido óptimo de asfalto espumado de 2.4%.

	REF	CAL 80	CAL 90	RAG 80	RAG 90
ITSequi (kPa)	232.00	308.70	355.20	439.69	431.63
ITSequi-sat (kPa)	174.00	222.20	242.80	331.57	414.09
TSR (%)	75.00	72.00	68.00	75.41	95.94

Se puede apreciar que los valores de ITS tienen tendencia a aumentar conforme se mejoran las características de las mezclas. Por ejemplo en el caso de la mezcla REF la cual no tiene filler y además presenta un bajo contenido de finos, se tiene un valor de ITS de 232 y 174 kPa en estado equilibrado y húmedo respectivamente; comparándola con la mezcla RAG 90 la cual tiene valores de 431.63 y 414.09kPa, podemos decir que la resistencia a la tensión indirecta aumento en un 86.05%. Esta última mezcla se hace con una granulometría con un mayor contenido de finos, ya que son estos últimos los que permiten la cohesión entre el asfalto espumado y el agregado (uniones discontinuas). Además la cal hidráulica utilizada en este mezcla tiene una mayor pureza, lo que se refiere a un mayor contenido de hidróxido de calcio; todo esto se resumen en un mejoramiento de la calidad de los materiales utilizados lo que repercute directamente en el comportamiento mecánico de la mezcla. Es importante mencionar que todas las mezclas cumplen con los requerimientos especificados en la metodología, la aplicación de las mejoras hechas en este proyecto dependerá de las

especificaciones del usuario, por ejemplo si el constructor quiere garantizar en lo más posible que la mezcla no se vea afectada por la humedad la mezcla RAG 90 sería la indicada.

6.5.3. Nivel 3.

Para esta evaluación, se elaboraron ocho especímenes para evaluarlos en el ensayo triaxial. Se utilizaron cuatro condiciones de confinamiento (0, 50, 100 y 200 kPa) y se realizó una réplica en cada condición. La determinación de los valores de cohesión (C), Cohesión retenida (C_{RET}) y del ángulo de fricción (" ϕ ") se realizó mediante el círculo de Mohr-Coulomb. De la figura 31 a la 34 se muestran la envolvente de cada una de las mezclas en las que se hizo uso de filler activo, esto por condiciones de disponibilidad del agregado para la experimentación, suponiendo que se opta por alguna de estas mezclas para su uso.

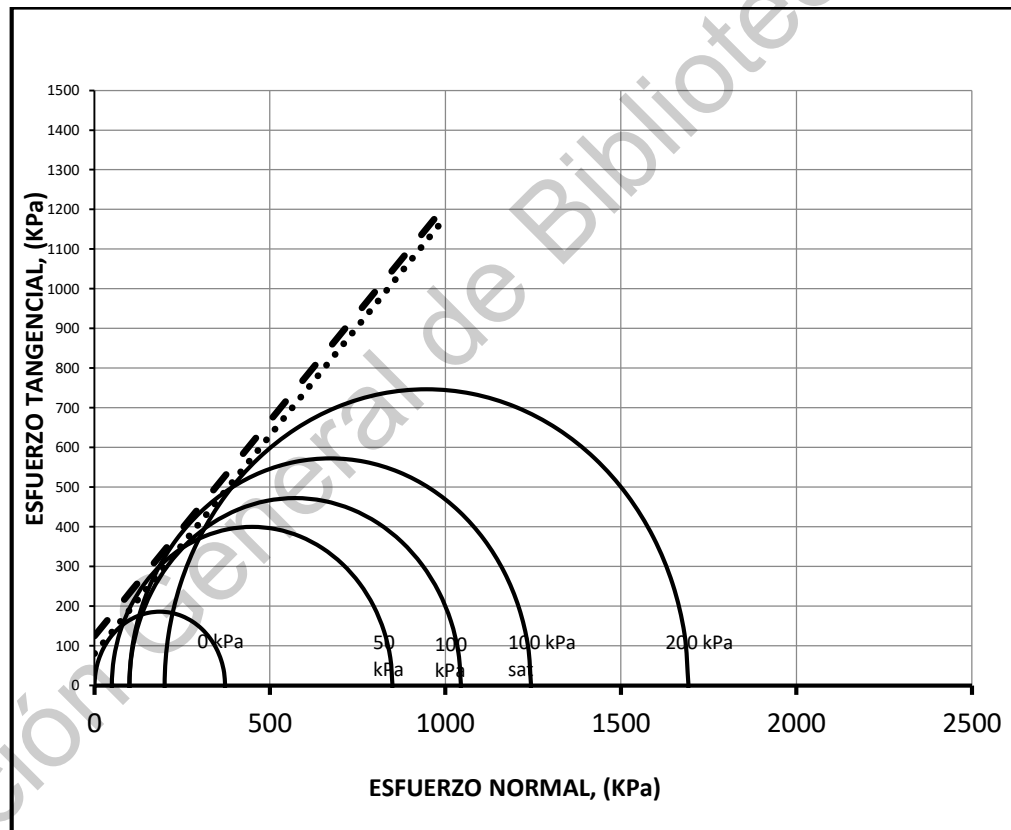


Figura 31. Envolvente de la mezcla CAL80.

La mezcla CAL 80 se obtuvo un valor de cohesión de 80 kPa, 123.70% de cohesión retenida y un ángulo de fricción interna de 47.98°; revisando los datos anteriores podemos ver que el valor del ángulo de fricción obtenido es mayor a los 40°, así mismo la cohesión retenida con un valor de 123.70% supera el mínimo especificado en la metodología; el valor de cohesión obtenido está muy por debajo de los 250kPa, esto se debe básicamente a la ausencia de finos en esta mezcla.

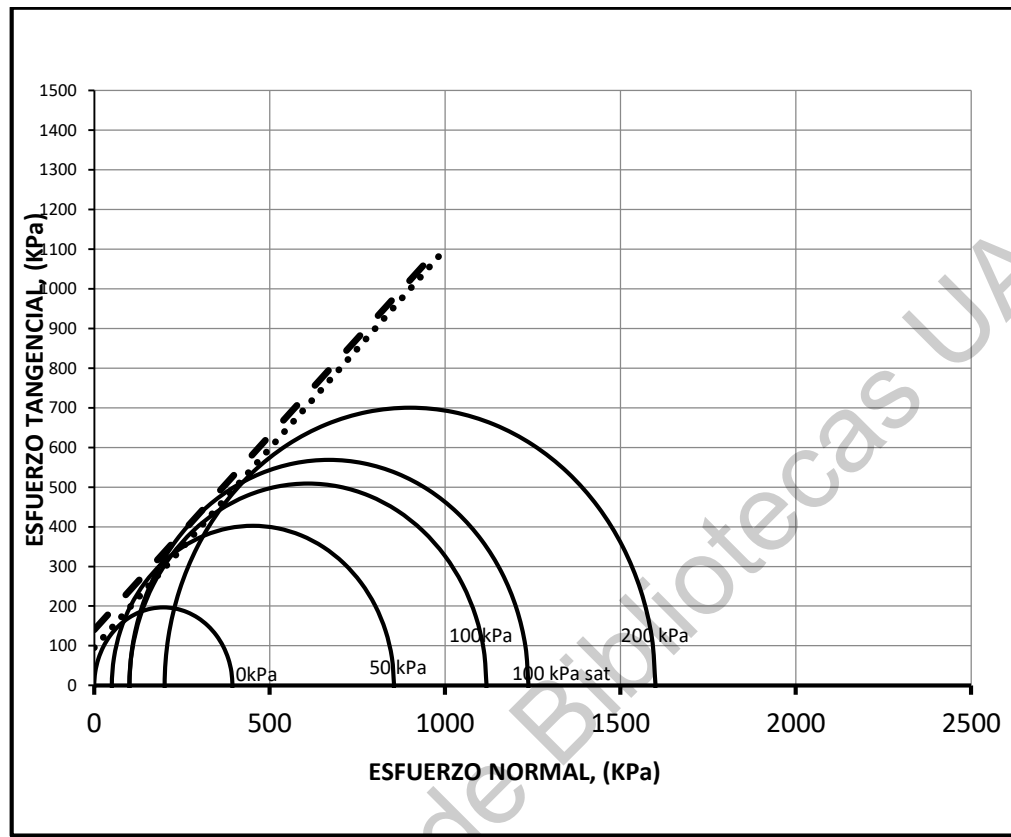


Figura 32. Envolvente de la mezcla CAL90

Para la mezcla CAL 90 se obtuvo un valor de cohesión de 95 kPa, 112.72% de cohesión retenida y un ángulo de fricción interna de 45.13°; según los datos anteriores podemos ver que el valor del ángulo de fricción obtenido es mayor a los 40°, así mismo la cohesión retenida supera el mínimo especificado en la metodología; nuevamente el valor de cohesión obtenido está muy por debajo de los 250kPa, esto se debe básicamente a la ausencia de finos en esta mezcla.

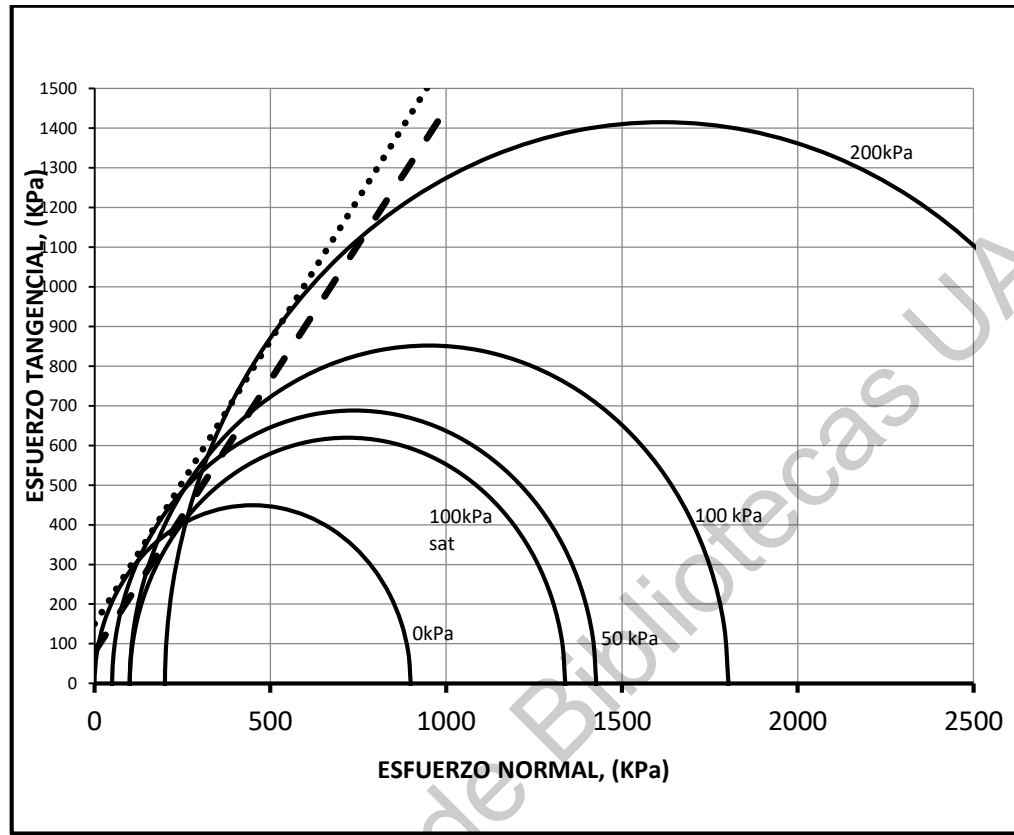


Figura 33. Envolvente de la mezcla RAG80.

Para la mezcla RAG 80 se obtuvo un valor de cohesión de 150 kPa, 71.03% de cohesión retenida y un ángulo de fricción interna de 55.03° ; revisando estos datos podemos ver que el valor del ángulo de fricción obtenido es mayor a los 40° , la cohesión retenida no supera el mínimo especificado en la metodología; el valor de cohesión obtenido está por debajo de los 250kPa, es importante mencionar que esta mezcla ya cuenta con un contenido de finos aceptable dentro de lo marcado por la granulometría.

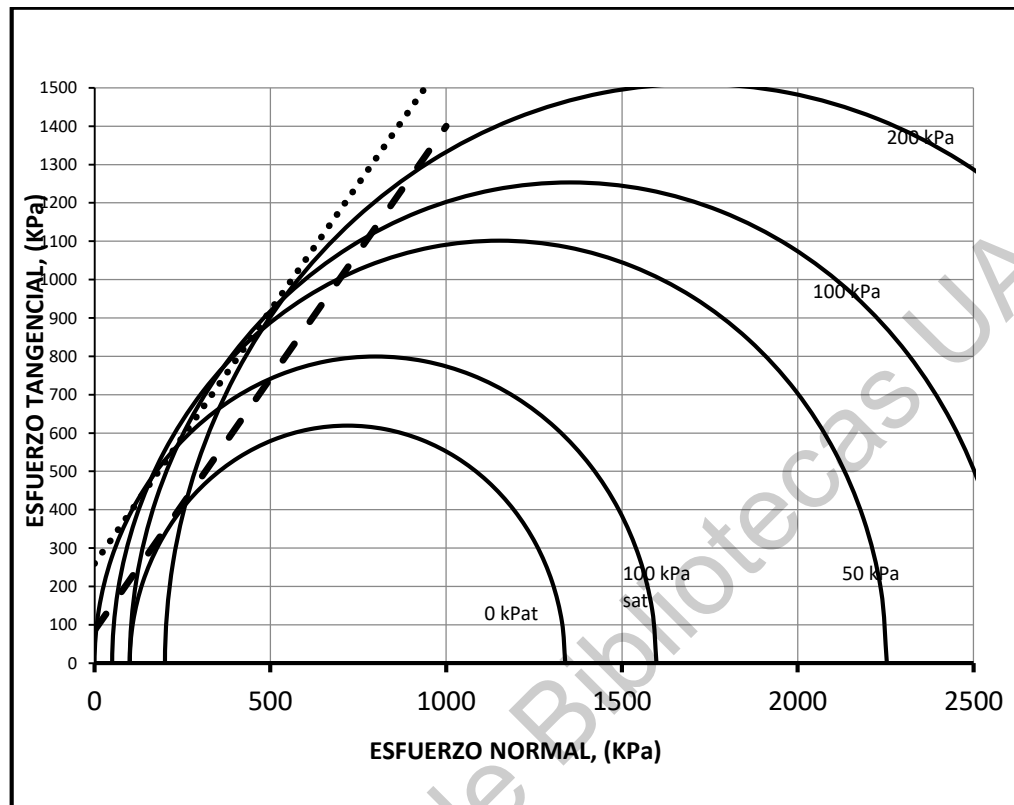


Figura 34. Envolvente de la Mezcla RAG90.

Para la mezcla RAG 90 se obtuvo un valor de cohesión de 260 kPa, 47.34% de cohesión retenida y un ángulo de fricción interna de 51.87°; revisando los datos anteriores podemos ver que el valor del ángulo de fricción obtenido es mayor a los 40°, la cohesión retenida no supera el mínimo especificado en la metodología; el valor de cohesión obtenido es mayor a los 250kPa, es importante mencionar que esta mezcla ya cuenta con un contenido de finos aceptable dentro de lo marcado por la granulometría, adicional al uso de la cal con una pureza del 90%.

6.5.3.1. Comparación de propiedades mecánicas al Nivel 3.

En este punto se hace un resumen de los resultados del ensaye Triaxial para todas las mezclas con 2.4% de asfalto espumado como contenido óptimo, esto para poder hacer una comparativa entre las mismas y ver cual tiene le mejor desempeño en este nivel de diseño, se muestran los datos y también se grafican en la figura 35 para poder visualizarlos más fácilmente.

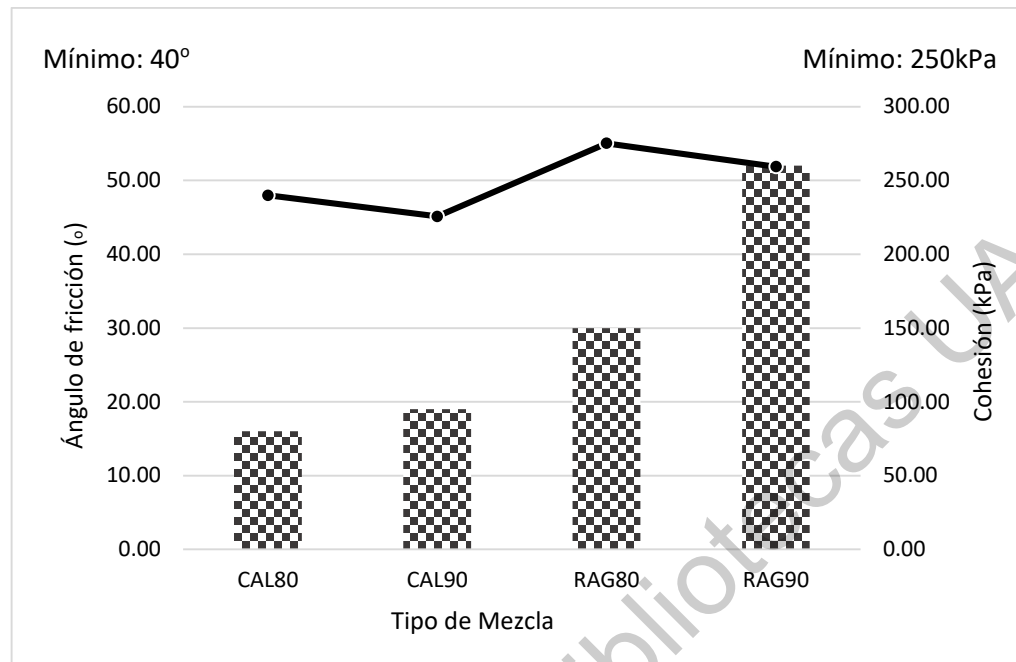


Figura 35. Resultados de ángulo de fricción y cohesión de las mezclas ensayadas.

En la gráfica se puede apreciar la evolución del valor de Cohesión el cual para la mezcla CAL 80 tiene un valor de 80 kPa, y va aumentando conforme se mejoran las características de las mezclas hasta alcanzar un valor de 260 kPa para la mezcla RAG 90, siendo este último el único que cumple con el mínimo. En cuanto al valor de Ángulo de Fricción este también va aumentando más ligeramente hasta alcanzar un valor máximo de 55.03° para la mezcla RAG 80, todos los valores de ángulo de fricción cumplen con el mínimo.

En la figura 36 se muestra en gráfica de barras el valor de Cohesión Retenida para cada mezcla.

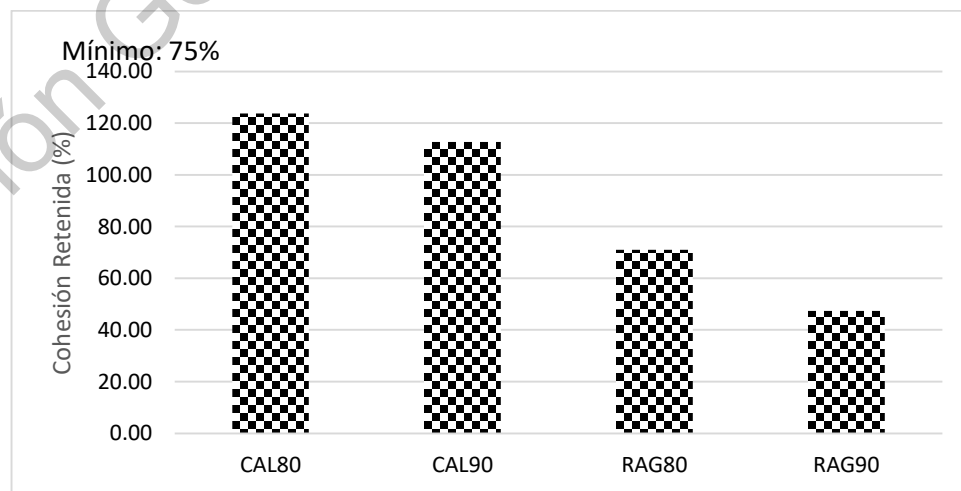


Figura 36. Valores de Cohesión Retenida para cada Mezcla.

La tendencia de este valor va en deceso conforme se mejoran las mezclas, siendo las últimas dos mezclas las que no cumplen con el porcentaje mínimo. Esto se puede deber a que las propiedades mecánicas de las mezclas mejoran considerablemente en estado seco, pero también son fuertemente afectadas por la humedad.

6.5.4. Correlación de las propiedades mecánicas

Para poder conocer el valor de M_R de la base estabilizada con AE se utiliza la metodología utilizada por Domingo (2018), donde hace el ensaye del nivel 3 de la metodología Wirtgen haciendo uso de un 2.4% de contenido de AE y un 1% cal.

Sabemos que el valor de M_R dependerá del confinamiento y la carga axial aplicada al espécimen, de esta manera Domingo (2018), presenta la figura 37 donde el valor de M_R se mide contra el esfuerzo volumétrico Θ ; se grafican los valores obtenidos de M_R para cada uno de los esfuerzos volumétricos calculados.

$$\theta = \text{Esfuerzo Volumetrico } \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \quad \text{Ecuación 6.0}$$

De esta manera es posible conocer el valor de M_R en función de Θ , y predecir así el comportamiento del material mediante cargas cíclicas. Los valores pueden analizarse con la línea de tendencia de comportamiento de M_R .

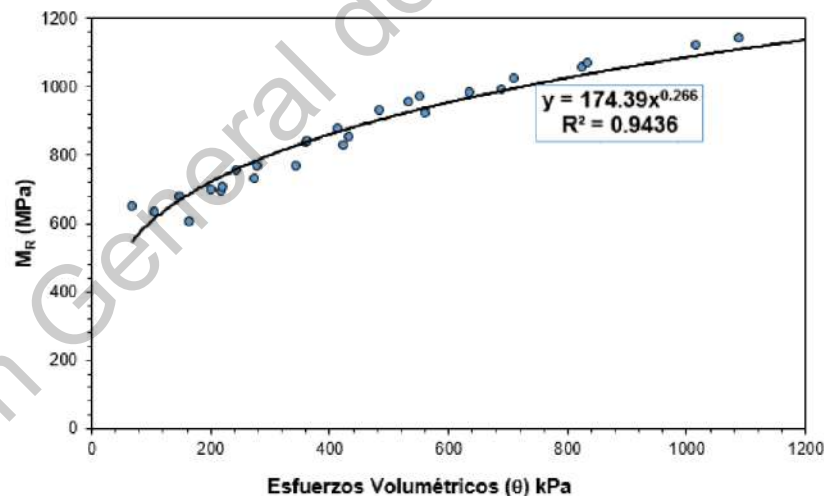


Figura 37. Módulo de resiliencia para una base estabilizada con 2.4% de A.E. y 1% de cal (Campos, 2018).

Para este caso, del nivel 3 podemos obtener los esfuerzos volumétricos que se registraron en el ensaye triaxial y mediante la ecuación 7.0, obtener el valor de M_R de las mezclas ensayadas, este valor es necesario para poder realizar el diseño de un pavimento.

$$y = 174.39x^{0.266} \quad \text{Ecuación 7.0}$$

En la siguiente tabla se muestran los valores volumétricos de cada mezcla Θ , y el valor de M_r obtenido mediante la ecuación 7.0.

Tabla 33. Valor de M_r en diferentes confinamientos para cada mezcla.

Mezcla	0MPa		50MPa		100MPa		200MPa	
	Θ (kPa)	M_r (MPa)	Θ (kPa)	M_r (MPa)	Θ (kPa)	M_r (MPa)	Θ (kPa)	M_r (MPa)
CAL80	372.00	841.95	899.00	1064.69	1344.00	1184.88	1893.00	1297.91
CAL90	394.00	854.92	905.00	1066.57	1337.74	1183.41	1800.00	1280.63
RAG80	899.03	1064.70	1476.85	1214.97	1903.44	1299.81	3230.56	1496.20
RAG90	1598.69	1240.86	2303.32	1367.44	2706.91	1427.45	3420.87	1519.15
	Promedio:	1000.61	Promedio:	1178.42	Promedio:	1273.89	Promedio:	1398.47

Como menciona Campos (2018), los valores de M_r de una mezcla estabilizada con AE oscilan entre 850 y 1150 MPa. Para nuestro caso podemos ver una media de 1000.61 MPa, cuando no hay confinamiento, siendo este valor el que utilizaremos en el procedimiento de diseño de pavimentos. Aunque Campos (2018) menciona que el valor de M_r aumenta hasta 1161 MPa al presentarse el confinamiento, para este caso podemos ver que alcanza hasta 1398.47 MPa utilizando su metodología.

6.6. Caracterización química de las matrices de asfalto espumado

En este capítulo se muestran los resultados del ensaye de fluorescencia donde se pueden conocer en masa los químicos presentes en las matrices ensayadas de manera cuantitativa y con el método utilizado también los errores de aproximación.

6.6.1. Caracterización de la mezcla CAL 80.

En la figura 38 se muestra el espectro de fluorescencia de la mezcla CAL 80, donde se puede apreciar la presencia de elementos como el azufre, potasio, calcio, titanio, cobre, entre otros. Los metales están principalmente contenidos en el agregado, mientras que los alcalinotérreos y el oxígeno forman la estructura principal del material filler y el asfalto, sumado al carbono y el hidrogeno los cuales deben de estar presente como parte del bitumen, solo que en este caso el equipo utilizado no tienen la capacidad de detectar elementos químicos con un número atómico menor a 6.

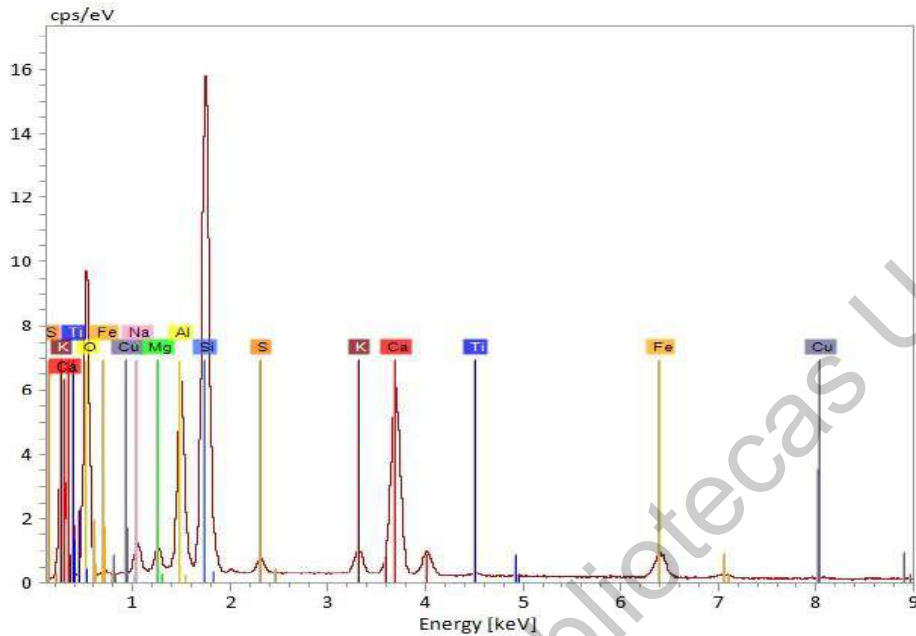


Figura 38. Espectro de fluorescencia de mezcla CAL80.

Para tener un estudio completo de fluorescencia es necesario presentar de manera cuantitativa la presencia de minerales, para esta mezcla la tabla 34 muestra en valores numéricos los minerales presentes. Minerales como el oxígeno, aluminio, silicio, calcio y hierro son los más abundantes en masa.

Tabla 34. Contenido de masa de elementos de mezcla CAL80.

Elemento	At. No.	Masa Neta	Masa [%]	Masa Ajustada [%]
Oxígeno	8	51135	39.63	50.45
Sodio	11	5808	1.85	2.36
Magnesio	12	4805	1.01	1.29
Aluminio	13	38502	6.46	8.22
Silicio	14	109096	14.59	18.58
Azufre	16	3457	0.56	0.72
Potasio	19	6987	1.08	1.37
Calcio	20	58094	10.34	13.16
Titanio	22	834	0.19	0.25
Hierro	26	9719	2.64	3.36
Cobre	29	497	0.20	0.25
		Sumatoria:	78.55	100

En la imagen 19 se puede ver que los agregados están principalmente cubiertos de Ca, Si, Al, Na, estos son algunos componentes presentes en las fases cristalinas, también hay una notoria presencia de Ti, el cual se aprecia principalmente en el agregado descubierto, lo que nos indica que la presencia de este elemento en el agregado RAP esto se puede deber por el proceso de recuperación de pavimento donde se desgastan las cuchillas del equipo de fresado y dejan restos de metales en el agregado.

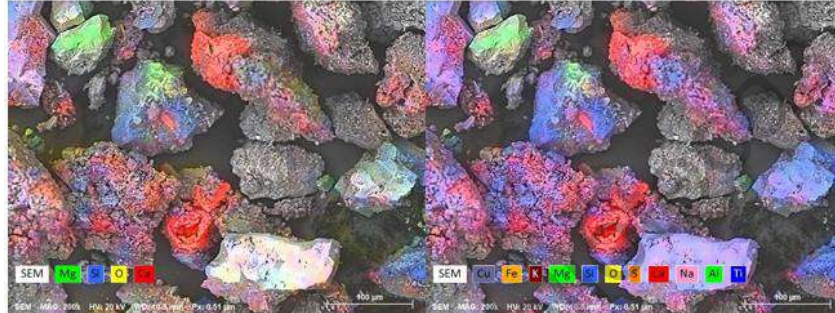


Imagen 19. Muestra de mezcla CAL80 en microscopio.

6.6.2. Caracterización de la mezcla CAL 90.

En el espectro de fluorescencia de la mezcla CAL 90 mostrado en la figura 39 se ve la presencia de los mismos elementos, esto se debe a que las variables químicas no cambian ya que pese a que se utiliza una cal más pura, la estructura de la misma se mantiene, y el agregado es el mismo.

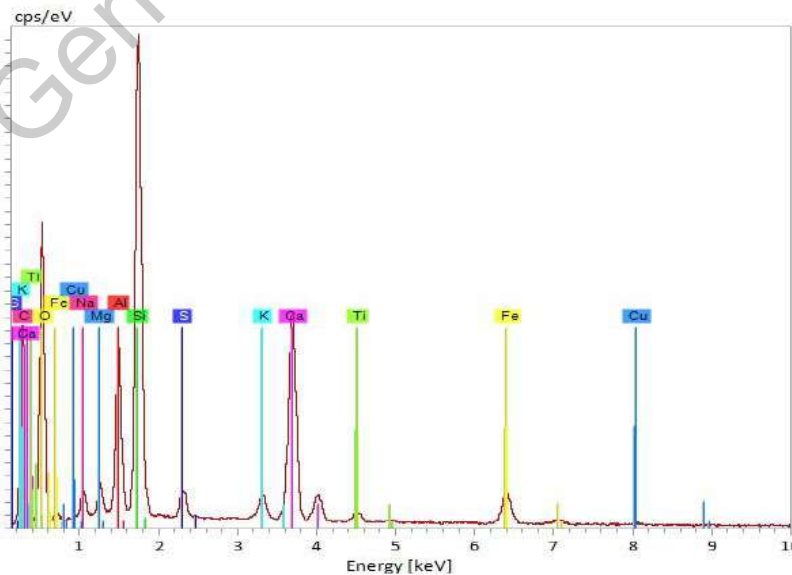


Figura 39. Espectro de fluorescencia de mezcla CAL90.

La tabla 35 muestra en valores numéricos los minerales presentes; en comparación con la mezcla anterior se puede ver un mayor contenido de Calcio esto por aumentar la pureza en la cal utilizada, complementado por la disminución en el contenido de Magnesio, este último considerado como un contaminante del procesos de fabricación, al usar una cal más pura se disminuye el contenido del mismo.

Tabla 35. Contenido de masa de elementos de mezcla CAL90.

Elemento	At. No.	Masa Neta	Masa [%]	Masa Ajustada [%]
Oxigeno	8	37170	38.90	49.40
Sodio	11	4027	1.67	2.12
Magnesio	12	4650	1.26	1.60
Aluminio	13	25948	5.63	7.16
Silicio	14	81675	13.91	17.66
Azufre	16	5257	1.08	1.37
Potasio	19	5784	1.17	1.48
Calcio	20	47896	11.18	14.20
Titanio	22	2355	0.72	0.92
Hierro	26	8633	3.03	3.85
Cobre	29	384	0.19	0.25
		Sum	78.74	100

En la imagen 20 se puede ver que los agregados están principalmente cubiertos de Ca, Si, Al, Na, algunos de estos componentes estan presentes por las fases cristalinas, al igual que en la mezcla anterior en esta se puede ver presencia de Ti nuevamente, es importante mencionar que en ambos resultados el Ti es el elemento con menor abundancia en le muestra.

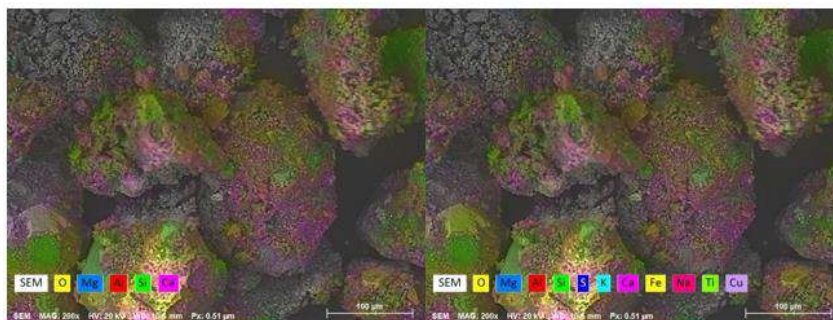


Imagen 20. Muestra de mezcla CAL90 en microscopio.

6.6.3. Caracterización de la Mezcla RAG 80.

En la siguiente figura se muestra el espectro de fluorescencia de la mezcla RAG 80, se puede ver la presencia en su mayoría de los mismos elementos, excepto por el titanio el cual ya no se aprecia, además de esto, se aprecia la presencia del Zinc como parte del agregado virgen utilizado en esta mezcla.

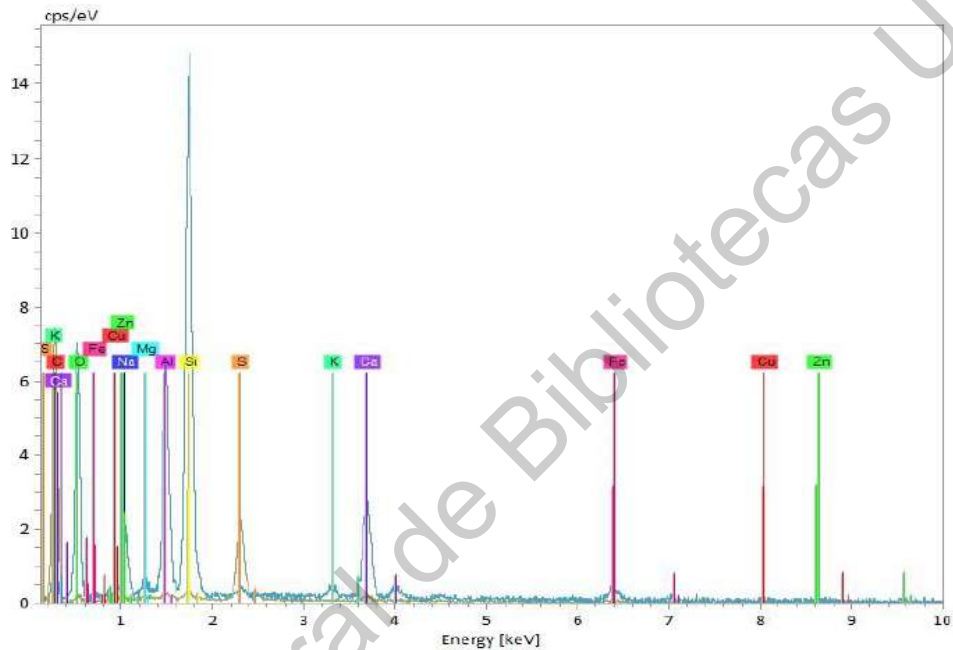


Figura 40. Espectro de fluorescencia de mezcla RAG80.

En la tabla 36 muestra en valores numéricos los minerales presentes, el Zinc se hace presente en con un contenido de masa muy pequeño, de igual manera el cobre; se puede ver que los minerales con un mayor contenido de masa siguen siendo los mismos (O, Al, Si, Ca y Fe), esto por la naturaleza de los materiales utilizados.

Tabla 36. Contenido den masa de elementos de mezcla RAG80.

Elemento	At. No.	Masa Neta	Masa [%]	Masa Ajustada [%]
Oxigeno	8	51135	39.71	50.43
Sodio	11	5808	1.70	2.16
Magnesio	12	4805	0.99	1.26
Aluminio	13	38502	6.71	8.52
Silicio	14	109096	14.85	18.91
Azufre	16	3457	0.31	0.39
Potasio	19	6987	1.13	1.43
Calcio	20	58094	9.95	12.63
Zinc	22	834	0.34	0.44
Hierro	26	9719	2.78	3.53
Cobre	29	497	0.22	0.29
		Sumatoria:	78.69	100

Debido a detalles presentes durante la utilización del equipo no fue posible identificar de manera visual los minerales, en la imagen 21, se puede apreciar la formación de las fases cristalinas por la reacción de la cal con la humedad de la mezcla; todo esto sobre el agregado fino.

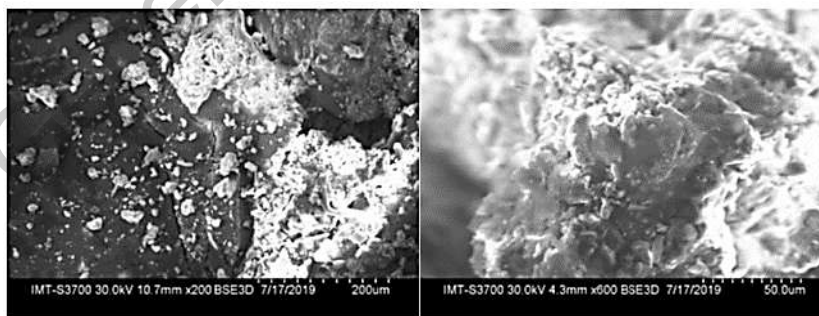


Imagen 21. Muestra de mezcla RAG80 en microscopio.

6.6.4. Caracterización de la Mezcla RAG 90.

En la siguiente figura se muestra el espectro de fluorescencia de la mezcla RAG 90, se repite la presencia de los materiales ya vistos en los espectros anteriores, excepto por el zinc y el titanio; en este espectro se puede ver la presencia de Carbono el cual lejos de ser detectado por el equipo es más bien calculado mediante un cálculo hecho con una aproximación empírica.

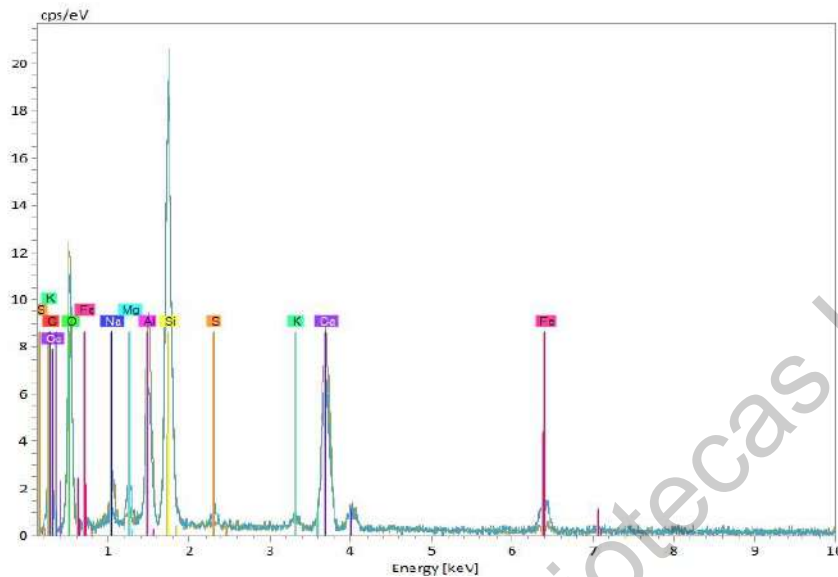


Figura 41. Espectro de fluorescencia de mezcla RAG90.

En la tabla 37 muestran en valores numéricos los minerales presentes, como ya se mencionó anteriormente el carbono como tal es calculado por el equipo siguiendo la metodología del fabricante, por lo cual no se debe tomar como un valor palpable. En comparación con la mezcla anterior podemos ver nuevamente un aumento en la masa de calcio y disminución del Magnesio, esto debido a aumentar la pureza de la cal utilizada.

Tabla 37. Contenido de masa de elementos de mezcla RAG90.

Elemento	At. No.	Masa Neta	Masa [%]	Masa Ajustada [%]
Oxígeno	8	51135	37.99	50.45
Sodio	11	5808	1.61	2.36
Magnesio	12	4805	1.05	1.29
Aluminio	13	38502	6.08	8.22
Silicio	14	109096	14.68	18.58
Azufre	16	3457	1.19	0.72
Potasio	19	6987	1.09	1.37
Calcio	20	58094	12.01	13.16
Carbono	22	834	0.85	0.25
Hierro	26	9719	2.76	3.36
Cobre	29	497	0.31	0.25
		Sumatoria:	79.62	100.00

En la imagen 22 se puede ver una muestra de agregado fino el cual está cubierto por los cristales formados por la reacción de la Cal, como se explicó en la teoría se puede ver que la unión de los agregados se da de manera discontinua.

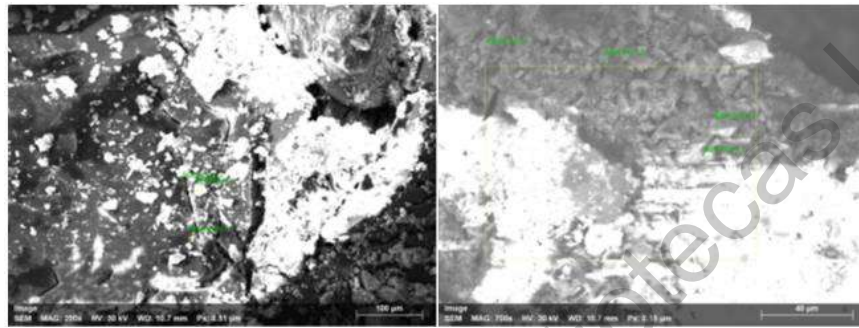


Imagen 22. Muestra de Mezcla RAG90 en Microscopio.

6.7. Análisis y comparativa de costos

6.7.1. Generador

De la propuesta de materiales mostrada en la tabla 15 se realizó un diseño de estructura de pavimento flexible para cada caso, en las siguientes figuras se muestran los resultados de espesores.

Para el caso 1, donde se propone una base granular, tenemos espesores de 15cm para la carpeta asfáltica, 30cm para la Base Granular y 30cm para la Sub Base.

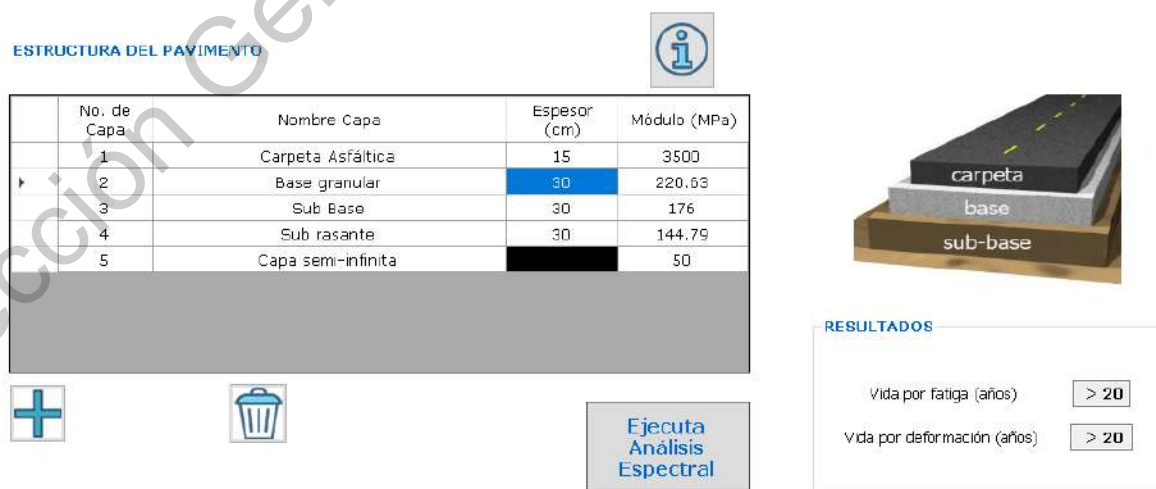


Figura 42. Espesores de pavimento para caso 1.

Para el caso 2, donde se propone una base negra, tenemos espesores de 10cm para la carpeta asfáltica, 20cm para la Base Negra y 30cm para la Sub Base.

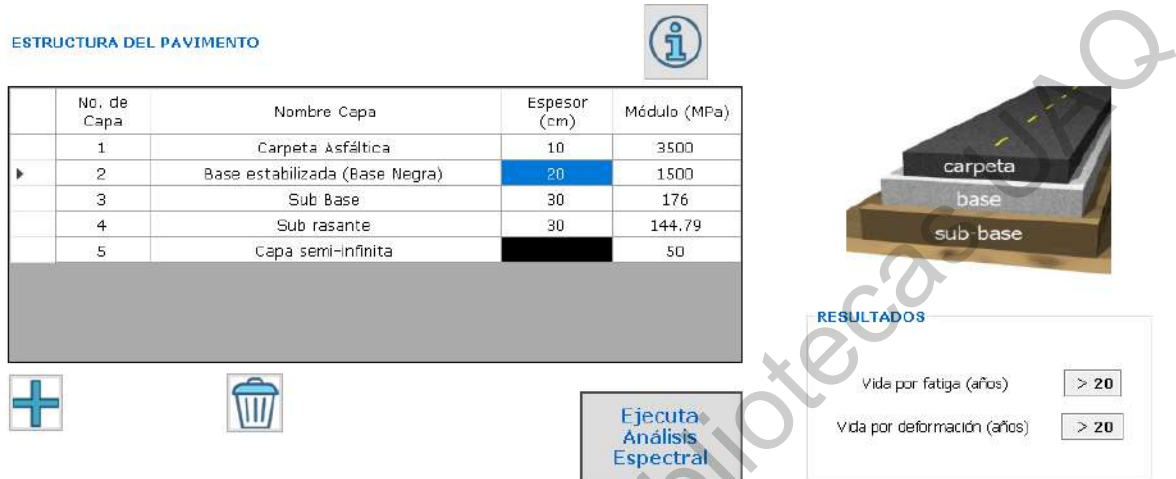


Figura 43. Espesores de pavimento para caso 2.

Para el caso 3, donde se propone una base estabilizada con Asfalto Espumado, tenemos espesores de 10cm para la carpeta asfáltica, 20cm para la Base estabilizada con AE y 30cm para la Sub Base.

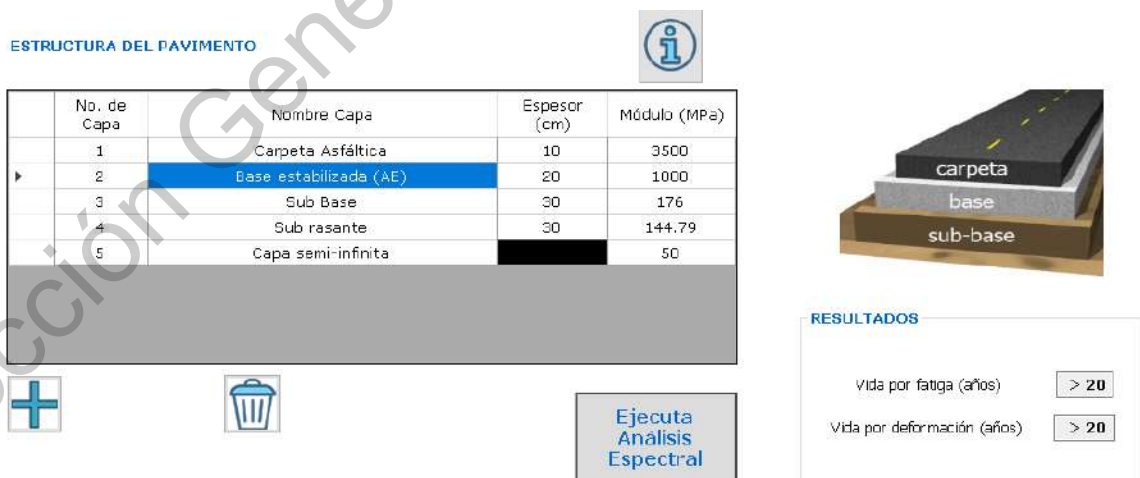


Figura 44. Espesores de pavimento para caso 3.

Los espesores son los calculados por el software para que la estructura del pavimento cumpla la vida del proyecto, para este caso 20 años.

Teniendo entonces estos espesores se cuantifican los materiales a utilizar proponiendo una sección de 0.5km de longitud y 11m de ancho; mediante una tabla generadora se conoce la cantidad en m³ de cada material a utilizar.

Tabla 38. Cuantificación de materiales.

Materiales		
Tipo de Material	Espesor (m)	Cantidad (m ³)
CARPETA:	0.15	825
RIEGO DE LIGA:	0	5500
BASE HIDRAULICA:	0.3	1650
SUB BASE:	0.3	1650

Materiales		
Tipo de Material	Espesor (m)	Cantidad (m ³)
CARPETA:	0.1	550
RIEGO DE LIGA:	0	5500
BASE NEGRA:	0.2	1100
SUB BASE:	0.3	1650

Materiales		
Tipo de Material	Espesor (m)	Cantidad (m ³)
CARPETA:	0.1	550
RIEGO DE LIGA:	0	5500
BASE AE:	0.2	1100
SUB BASE:	0.3	1650

6.7.2. Análisis de Precios Unitarios

Como ya se mencionó el APU se hace a costo directo, a continuación se muestran seis tablas, cada una de ellas muestra el costo de cada uno de los conceptos contemplados para hacer la comparativa de costos.

- Carpeta de concreto asfáltico, compactada al 95% de la prueba producto, de banco de calidad, incluye: suministro de materiales, instalación y desmantelamiento de plantas, alimentación de plantas, cribados y desperdicios, trituración parcial o total, cargas y descargas de los materiales, acarreo locales, formación de almacenamientos, secado del material pétreo y clasificación, vacación calentamientos, esclavo de los materiales pétreos y cementos asfálticos, barrido de la base, tendido y compactación, chaflanes, acabado con rodillo liso, sondeos para verificación de espesor y compactación y todo lo necesario para su correcta ejecución.

Tabla 39. APU Carpeta de concreto asfáltico.

			UNIDAD:	M3
MATERIALES	CANTIDAD	UNIDAD	COSTO	IMPORTE
MEZCLA ASFALTICA	1.25	M3	\$2,517.50	\$3,146.88
TOTAL DE MATERIALES:				\$3,146.88
MANO DE OBRA	CANTIDAD	UNIDAD	SALARIO	IMPORTE
AYUDANTE GENERAL	0.106	JOR	\$387.74	\$41.10
CABO DE OFICIOS	0.0027	JOR	\$934.84	\$2.52
HERRAMIENTA MENOR	0.03	% (M.O.)	\$43.62	\$1.31
EQUIPO DE SEGURIDAD	0.02	% (M.O.)	\$43.62	\$0.87
SUMA:				\$45.81
RENDIMIENTO:				\$45.81
TOTAL DE MANO DE OBRA:				\$45.81
EQUIPO	CANTIDAD	UNIDAD	RENTA	IMPORTE
BARREDORA 2M	0.09067	HR	\$351.48	\$31.87
EXTENDEDORA	0.08335	HR	\$577.85	\$48.16
VIBROCOMPACTADOR	0.05	HR	\$1,491.13	\$74.56
COMPACTADOR NEUMATICO	0.04	HR	\$410.49	\$16.42
EQUIPO DE TRANSFERENCIA	0.05239	HR	\$460.57	\$24.13
SUMA:				\$195.14
1.25942SUMA*CANTIDAD=IMPORTE:				\$245.76
TOTAL AUXILIARES:				\$245.76
COSTO DIRECTO:				\$3,438.44



- Emulsión catiónica de rompimiento rápido, con residuo asfáltico de 60% (ecr-60%) a razón de 0.6lt/m², empleada en riego de liga, incluye suministro de material, almacenamiento, preparación de la superficie, protección de estructuras existentes, maniobras, aplicación equipo y lo necesario para su correcta ejecución.

Tabla 40. APU riego de liga.

			UNIDAD:	M2
MATERIALES	CANTIDAD	UNIDAD	COSTO	IMPORTE
EMULSION CATIONICA DE ROMPIMIENTO RAPIDO	1.01	LITRO	\$17.75	\$17.93
TOTAL DE MATERIALES:				\$17.93
EQUIPO	CANTIDAD	UNIDAD	RENTA	IMPORTE
BARREDORA 2M	0.00162	HR	\$417.26	\$0.68
PETROLIZADORA DE 7M3	0.00075	HR	\$756.40	\$0.57
TOTAL DE EQUIPO:				\$1.24
COSTO DIRECTO:				\$19.17

- Mezclado tendido y compactación de sub-base formada con material de calidad, por unidad de obra terminada. Incluye acarreo de agua, extracción, carga, acarreo, aplicación de agua, mezclado, tendido, compactación al grado fijado, afinamiento y todo lo necesario para su correcta colocación.

Tabla 41. APU sub base.

			UNIDAD:	M3
MATERIALES	CANTIDAD	UNIDAD	COSTO	IMPORTE
MATERIAL DE BANCO	1.2	M3	\$147.19	\$176.63
AGUA POTABLE	0.135	M3	\$70.65	\$9.54
TOTAL DE MATERIALES:				\$186.17
EQUIPO	CANTIDAD	UNIDAD	RENTA	IMPORTE
MOTOCONFORMADORA	0.05237	HR	\$1,241.09	\$65.00
PIPA DE 10M3 C/MOTOBOMBA	0.01771	HR	\$621.18	\$11.00
VIBROCOMPACTADOR	0.0374	HR	\$666.14	\$24.91
SUMA:				\$100.91
1.25942SUMA*CANTIDAD=IMPORTE:				\$127.09
TOTAL AUXILIARES:				\$127.09
COSTO DIRECTO:				\$313.25



- Suministro, formación y compactación de base hidráulica, por unidad de obra terminada, compactada al 100%, de banco de calidad, con material triturado total, incluye: materiales, acarreo, cargas y descargas, mezclado, tendido, compactado, suministro e incorporación del agua, afinamiento y todo lo necesario para su correcta colocación.

Tabla 42. APU base hidráulica.

			UNIDAD:	M3
MATERIALES	CANTIDAD	UNIDAD	COSTO	IMPORTE
MATERIAL CALIDAD BASE	1.15	M3	\$247.28	\$241.50
AGUA POTABLE	0.135	M3	\$70.65	\$8.10
TOTAL DE MATERIALES:				\$249.60
EQUIPO	CANTIDAD	UNIDAD	RENTA	IMPORTE
MOTOCONFORMADORA	0.04191	HR	\$1,241.09	\$44.17
PIPA 10M3 C/MOTOBOMBA	0.01417	HR	\$621.18	\$7.48
VIBROCOMPACTADOR	0.02993	HR	\$666.14	\$16.93
TOTAL DE EQUIPO:				\$68.58
COSTO DIRECTO:				\$318.18



- Base asfáltica en caliente compactada al 95% en capas de 10 cm de espesor con pétreos triturados de 1 1/2" pulgadas estabilizada con cemento asfáltico, incluye: incluye: materiales, acarreo, cargas y descargas, mezclado, tendido, compactado, afinamiento y todo lo necesario para su correcta colocación.

Tabla 43. APU base asfáltica en caliente.

			UNIDAD:	M3
MATERIALES	CANTIDAD	UNIDAD	COSTO	IMPORTE
MATERIAL PARA BASE	1.25	M3	\$247.28	\$309.10
TOTAL DE MATERIALES:				\$309.10
MANO DE OBRA	CANTIDAD	UNIDAD	SALARIO	IMPORTE
AYUDANTE GENERAL	4	JOR	\$387.86	\$1,551.44
CABO DE OFICIOS	0.2	JOR	\$934.84	\$186.97
HERRAMIENTA MENOR	0.03	% (M.O.)	\$1,738.41	\$52.15
EQUIPO DE SEGURIDAD	0.02	% (M.O.)	\$1,738.41	\$34.77
SUMA:				\$1,825.33
RENDIMIENTO:				\$68.12
TOTAL DE MANO DE OBRA:				\$68.12
EQUIPO	CANTIDAD	UNIDAD	RENTA	IMPORTE
EXTENDEDORA	0.0371	HR	\$577.85	\$21.44
COMPACTADOR VIBRATORIO	0.0371	HR	\$1,491.13	\$55.32
COMPACTADOR NEUMATICO	0.0268	HR	\$410.49	\$11.00
TOTAL DE EQUIPO:				\$87.76
AUXILIARES	CANTIDAD	UNIDAD	RENTA	IMPORTE
ELABORACIÓN DE MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE	1.265	TN	\$68.41	\$86.54
CARGA MECÁNICA POR MATERIAL RECUPERABLE	1.28	M3	\$5.30	\$6.78
TOTAL AUXILIARES:				\$93.32
COSTO DIRECTO:				\$558.31

- Base estabilizada con asfalto espumado y cal compactada al 95% en capas de 10 cm de espesor con pétreos triturados de 1 1/2" pulgadas estabilizada con cemento asfáltico, incluye: materiales, acarreo, cargas y descargas, mezclado, tendido, compactado, afinamiento y todo lo necesario para su correcta colocación.

Tabla 44. APU base estabilizada con asfalto espumado.

			UNIDAD:	M3
MATERIALES	CANTIDAD	UNIDAD	COSTO	IMPORTE
MATERIAL PARA BASE	1	M3	\$247.28	\$247.28
TOTAL DE MATERIALES:				\$247.28
MANO DE OBRA	CANTIDAD	UNIDAD	SALARIO	IMPORTE
AYUDANTE GENERAL	4	JOR	\$387.86	\$1,551.44
CABO DE OFICIOS	0.2	JOR	\$934.84	\$186.97
HERRAMIENTA MENOR	0.03	% (M.O.)	\$1,738.41	\$52.15
EQUIPO DE SEGURIDAD	0.02	% (M.O.)	\$1,738.41	\$34.77
SUMA:				\$1,825.33
RENDIMIENTO:				\$68.12
TOTAL DE MANO DE OBRA:				\$68.12
EQUIPO	CANTIDAD	UNIDAD	RENTA	IMPORTE
EXTENDEDORA	0.0371	HR	\$577.85	\$21.44
COMPACTADOR VIBRATORIO	0.0371	HR	\$1,491.13	\$55.32
COMPACTADOR NEUMATICO	0.0268	HR	\$410.49	\$11.00
TOTAL DE EQUIPO:				\$87.76
AUXILIARES	CANTIDAD	UNIDAD	RENTA	IMPORTE
INYECCION Y MEZLCADO CON ASFALTO ESPUMADO	1.265	TN	\$41.05	\$51.92
CARGA MECÁNICA POR MATERIAL RECUPERABLE	1.8	M3	\$5.30	\$9.54
TOTAL AUXILIARES:				\$61.46
COSTO DIRECTO:				\$464.63

6.7.3. Presupuestos y comparación

Con el análisis de precios unitarios hecho anteriormente se procede a estructurar un presupuesto para cada caso, y así poder comparar los costos de cada estructura propuesta, y como afecta el diferente tipo de método de estabilización al costo final de un proyecto de pavimentación.

Tabla 45. Presupuesto caso 1.

CONCEPTO	UNIDAD	CANTIDAD	P.U.	COSTO TOTAL
CARPETA DE CONCRETO ASFALTICO , COMPACTADA AL 95% DE LA PRUEBA PRODUCTO, DE BANCO DE CALIDAD, INCLUYE: SUMINISTRO DE MATERIALES, INSTALACIÓN Y DESMANTELAMIENTO DE PLANTAS, ALIMENTACIÓN DE PLANTAS, CRIBADOS Y DESPERDICIOS, TRITURACIÓN PARCIAL O TOTAL, CARGAS Y DESCARGAS DE LOS MATERIALES, ACARREOS LOCALES, FORMACIÓN DE ALMACENAMIENTOS, SECADO DEL MATERIAL PÉTREO Y CLASIFICACIÓN, VACACIÓN CALENTAMIENTOS, ECLAVO DE LOS MATERIALES PÉTREOS Y CEMENTOS ASFÁLTICOS, BARRIDO DE LA BASE, TENDIDO Y COMPACTACIÓN, CHAFLANES, ACABADO CON RODILLO LISO, SONDEOS PARTA VERIFICACIÓN DE ESPESOR Y COMPACTACIÓN Y TODO LO NECESARIO PARA SU CORRECTA EJECUCIÓN.	M3	825	\$ 3,438.44	\$ 2,836,714.03
EMULSION CATIONICA DE ROMPIMIENTO RÁPIDO, CON RESIDUO ASFÁLTICO DE 60% (ecr-60%) A RAZON DE 0.6LT/M2, EMPLEADA EN RIEGO DE LIGA , INCLUYE SUMINISTRO DE MATERIAL, ALMACENAMIENTO, PREPARACIÓN DE LA SUPERFICIE, PROTECCIÓN DE ESTRUCTURAS EXISTENTES, MANIOBRAS, APLICACIÓN EQUIPO Y TODO LO NECESARIO PARA SU CORRECTA EJECUCIÓN.	M2	5500	\$ 19.17	\$ 105,439.18
SUMINISTRO, FORMACIÓN Y COMPACTACIÓN DE BASE HIDRAULICA , POR UNIDAD DE OBRA TERMINADA, COMPACTADA LA 100%, DE BANCO DE CALIDAD, CON MATERIAL TRITURADO TOTAL, INCLUYE: MATERIALES, ACARREO, CARGAS Y DESCARGAS, MEZCLADO, TENDIDO, COMPACTADO, SUMINISTRO E INCORPORACIÓN DEL AGUA, AFINAMIENTO Y TODO LO NECESARIO PARA SU CORRECTA COLOCACIÓN.	M3	1650	\$ 318.18	\$ 524,997.00
MEZCLADO TENDIDO Y COMPACTACIÓN DE SUB BASE FORMADA CON MATERIAL DE CALIDAD, POR UNIDAD DE OBRA TERMINADA. INCLUYE ACARREOS DE AGUA, EXTRACCIÓN, CARGA, ACARREO, APLICACIÓN DE AGUA, MEZCLADO, TENDIDO, COMPACTACIÓN AL GRADO FIJADO, AFINAMIENTO Y TODO LO NECESARIO PARA SU CORRECTA COLOCACIÓN.	M3	1650	\$ 313.25	\$ 516,866.76

Para el primer caso, se tiene un presupuesto de \$3, 984,016.96, Tres millones Novecientos Ochenta y Cuatro mil Diez y Seis pesos, 96/100. Podemos ver que para poder cumplir con la vida de proyecto en este caso fue necesario aumentar el espesor de la carpeta en 12cm, aumentando así el presupuesto.

Tabla 46. Presupuesto caso 2.

CONCEPTO	UNIDAD	CANTIDAD	P.U.	COSTO TOTAL
CARPETA DE CONCRETO ASFALTICO, COMPACTADAAL 95% DE LA PRUEBA PRODUCTO, DE BANCO DE CALIDAD, INCLUYE: SUMINISTRO DE MATERIALES, INSTALACIÓN Y DESMANTELAMIENTO DE PLANTAS, ALIMENTACIÓN DE PLANTAS, CRIBADOS Y DESPERDICIOS, TRITURACIÓN PARCIAL O TOTAL , CARGAS Y DESCARGAS DE LOS MATERIALES, ACARREOS LOCALES, FORMACION DE ALMACENAMIENTOS, SECADO DEL MATERIAL PETREO Y CLASIFICACIÓN, VACACIÓN CALENTAMIENTOS, ECLAVO DE LOS MATERIALES PÉTREOS Y CEMENTOS ASFÁLTICOS, BARRIDO DE LA BASE, TENDIDO Y COMPACTACIÓN, CHAFLANES, ACABADO CON RODILLO LISO, SONDEOS PARTA VERIFICACIÓN DE ESPESOR Y COMPACTACIÓN Y TODO LO NECESARIO PARA SU CORRECTA EJECUCIÓN.	M3	550	\$ 3,438.44	\$ 1,891,142.69
EMULSION CATIONICA DE ROMPIMIENTO RÁPIDO, CON RESIDUO ASFÁLTICO DE 60% (ecr-60%) A RAZON DE 0.6LT/M2, EMPLEADA EN RIEGO DE LIGA, INLCUYE SUMINSITRO DE MATERIAL, ALMACENAMIENTO, PREPARACIÓN DE LA SUPERFICIE, PROTECCIÓN DE ESTRUCTURAS EXISTENTES, MANIOBRAS, APLICACIÓN EQUIPO Y LONECESARIO PARA SU CORRECTA EJECUCIÓN.	M2	5500	\$ 19.17	\$ 105,439.18
BASE ASFALTICA EN CALIENTE COMPACTADA AL 95% EN CAPAS DE 10 CM DE ESPESOR CON PETREOS TRITURADOS DE 1 1/2" PULGADAS ESTABILIZADA CON CEMENTO ASFALTICO, INCLUYE: INCLUYE: MATERIALES, ACARREO, CARGAS Y DESCARGAS, MEZCLADO, TENDIDO, COMPACTADO, AFINAMIENTO Y TODO LO NECESARIO PARA SU CORRECTA COLOCACIÓN.	M3	1100	\$ 558.31	\$ 614,137.00
MEZCLADO TENDIDO Y COMPACTACIÓN DE SUB BASE FORMADA CON MATERIAL DE CALIDAD, PRO UNIDAD DE OBRA TERMINADA. INCLUYE ACARREOS DE AGUA, EXTRACCIÓN, CARGA, ACARREO, APLICACIÓN DE AGUA, MEZCLADO, TENDIDO, COMPACTACIÓN AL GRADO FIJADO, AFINAMIENTO Y TODO LO NECESARIO PARA SU CORRECTA COLOCACIÓN.	M3	1650	\$ 313.25	\$ 516,866.76

Para el caso 2, se tiene un presupuesto de \$3,127,585.63, Tres Millones Ciento Veintisiete mil Quinientos Ochenta y Cinco pesos, 63/100. Podemos ver que al hacer uso de la base negra se puede reducir el espesor de la carpeta asfáltica, teniendo así un presupuesto más económico.

Tabla 47. Presupuesto caso 3.

CONCEPTO	UNIDAD	CANTIDAD	P.U.	COSTO TOTAL
CARPETA DE CONCRETO ASFALTICO, COMPACTADA AL 95% DE LA PRUEBA PRODUCTO, DE BANCO DE CALIDAD, INCLUYE: SUMINISTRO DE MATERIALES, INSTALACIÓN Y DESMANTELAMIENTO DE PLANTAS, ALIMENTACIÓN DE PLANTAS, CRIBADOS Y DESPERDICIOS, TRITURACIÓN PARCIAL O TOTAL, CARGAS Y DESCARGAS DE LOS MATERIALES, ACARREOS LOCALES, FORMACION DE ALMACENAMIENTOS, SECADO DEL MATERIAL PETREO Y CLASIFICACIÓN, VACACIÓN CALENTAMIENTOS, ECLAVO DE LOS MATERIALES PÉTREOS Y CEMENTOS ASFÁLTICOS, BARRIDO DE LA BASE, TENDIDO Y COMPACTACIÓN, CHAFLANES, ACABADO CON RODILLO LISO, SONDEOS PARTA VERIFICACIÓN DE ESPESOR Y COMPACTACIÓN Y TODO LO NECESARIO PARA SU CORRECTA EJECUCIÓN.	M3	550	\$ 3,438.44	\$ 1,891,142.69
EMULSION CATIONICA DE ROMPIMIENTO RÁPIDO, CON RESIDUO ASFÁLTICO DE 60% (ecr-60%) A RAZON DE 0.6LT/M2, EMPLEADA EN RIEGO DE LIGA , INCLUYE SUMINISTRO DE MATERIAL, ALMACENAMIENTO, PREPARACIÓN DE LA SUPERFICIE, PROTECCIÓN DE ESTRUCTURAS EXISTENTES, MANIOBRAS, APLICACIÓN EQUIPO Y LONECESARIO PARA SU CORRECTA EJECUCIÓN.	M2	5500	\$ 19.17	\$ 105,439.18
BASE ESTABILIZADA CON ASFALTO ESPUMADO Y MATERIALE FILLER COMPACTADA AL 95% EN CAPAS DE 10 CM DE ESPESOR CON PÉTREOS TRITURADOS DE 1 1/2" PULGADAS ESTABILIZADA CON CEMENTO ASFALTICO, INCLUYE: INCLUYE: MATERIALES, ACARREO, CARGAS Y DESCARGAS, MEZCLADO, TENDIDO, COMPACTADO, AFINAMIENTO Y TODO LO NECESARIO PARA SU CORRECTA COLOCACIÓN.	M3	1100	\$ 464.63	\$ 511,089.60
MEZCLADO TENDIDO Y COMPACTACIÓN DE SUB BASE FORMADA CON MATERIAL DE CALIDAD, PRO UNIDAD DE OBRA TERMINADA. INCLUYE ACARREOS DE AGUA, EXTRACCIÓN, CARGA, ACARREO, APLICACIÓN DE AGUA, MEZCLADO, TENDIDO, COMPACTACIÓN AL GRADO FIJADO, AFINAMIENTO Y TODO LO NECESARIO PARA SU CORRECTA COLOCACIÓN.	M3	1650	\$ 313.25	\$ 516,866.76

Para el caso 3, se tiene un presupuesto de \$3,024,538.22, Tres Millones Veinticuatro mil Quinientos Treinta y Ocho pesos, 22/100. Podemos ver que se conservan los espesores de base sin que se afecte el diseño, teniendo así que en comparación con el caso 2 lo que hace una diferencia en el costo es el método de estabilización.

En la siguiente gráfica se muestra la comparación de los presupuestos de los tres casos. Podemos ver que el caso 1 es el más costoso, esto es principalmente por la cantidad de agregado a utilizar para la base hidráulica.

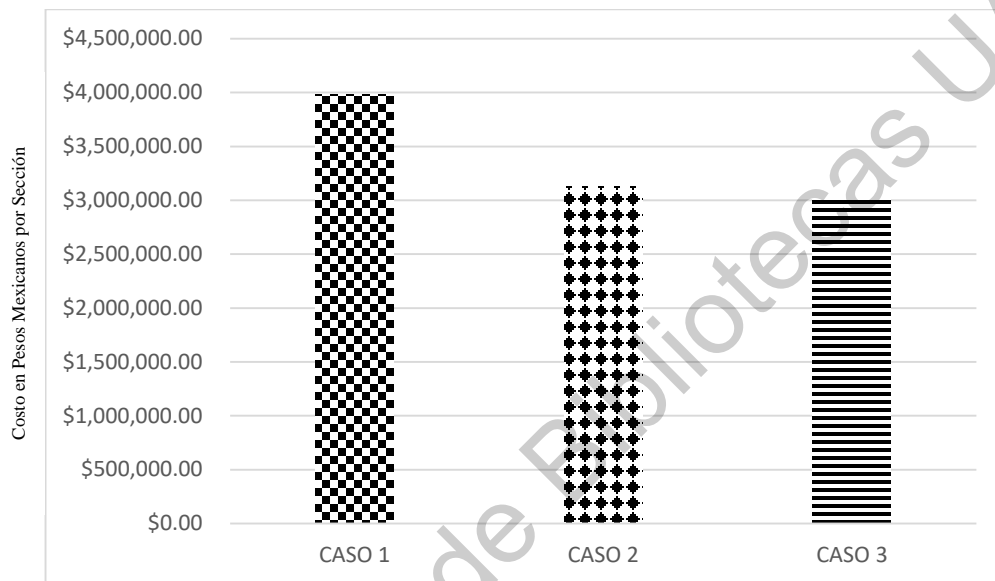


Figura 45. Comparación de presupuestos para la construcción de caminos.

La utilización de un método de estabilización permite disminuir el espesor de la capa base estructural, lo que repercute directamente en el costo de elaboración, tomando en cuenta el caso 2 y el caso 3 también se puede ver un ahorro de \$103,047.41 en este último, este ahorro está directamente relacionado con el método de estabilización siendo la estabilización con AE mas económica.

Ahora bien, tomando en cuenta que el valor de M_r llega hasta los 1240.06 MPa y realizando un nuevo diseño con este valor, podemos obtener un nuevo presupuesto. En las figura 46 se muestran los espesores obtenidos, podemos ver que al aumentar el M_r , disminuye el espesor necesario de la base.

No. de Capa	Nombre Capa	Espesor (cm)	Módulo (MPa)
1	Carpeta Asfáltica	10	3500
2	Base estabilizada	12	1240.06
3	Sub Base	30	176
4	Sub rasante	30	144.79
5	Capa semi-infinita		50

Figura 46. Estructura de pavimento para un M_r de 1240.06 MPa.

Para poder realizar el APU es necesario considerar el costo de las cal con pureza del 90% teniendo esta un valor de \$2.81 pesos por kg a la fecha, siendo ligeramente más costosa que la cal 80 la cual tiene un valor de \$2.40 pesos. Tenemos entonces que APU de la estabilización con AE aumenta de \$464.63 pesos a \$500.62 pesos. Mientras que el costo de elaboración aumenta ligeramente la cantidad de material a utilizar disminuye de 1100 m³ de agregado para caso 3 a 825 m³.

Tenemos entonces un presupuesto de \$2, 926,460.12 Dos Millones Novecientos Veintiséis mil Cuatrocientos Sesenta pesos, 12/100. Este presupuesto se desglosa en la tabla 48.

Tabla 48. Presupuesto para un valor de MR de 1240.06MPa en una Base Estabilizada con AE.

CONCEPTO	UNIDAD	CANTIDAD	P.U.	COSTO TOTAL
CARPETA DE CONCRETO ASFALTICO, COMPACTADA AL 95% DE LA PRUEBA PRODUCTO, DE BANCO DE CALIDAD, INCLUYE: SUMINISTRO DE MATERIALES, INSTALACIÓN Y DESMANTELAMIENTO DE PLANTAS, ALIMENTACIÓN DE PLANTAS, CRIBADOS Y DESPERDICIOS, TRITURACIÓN PARCIAL O TOTAL , CARGAS Y DESCARGAS DE LOS MATERIALES, ACARREOS LOCALES, FORMACION DE ALMACENAMIENTOS, SECADO DEL MATERIAL PETREO Y CLASIFICACIÓN, VACACIÓN CALENTAMIENTOS, ECLAVO DE LOS MATERIALES PÉTREOS Y CEMENTOS ASFÁLTICOS, BARRIDO DE LA BASE, TENDIDO Y COMPACTACIÓN, CHAFLANES, ACABADO CON RODILLO LISO, SONDEOS PARTA VERIFICACIÓN DE ESPESOR Y COMPACTACIÓN Y TODO LO NECESARIO PARA SU CORRECTA EJECUCIÓN.	M3	550	\$3,438.44	\$1,891,142.69
EMULSION CATIONICA DE ROMPIMIENTO RÁPIDO, CON RESIDUO ASFÁLTICO DE 60% (ecf-60%) A RAZON DE 0.6LT/M2, EMPLEADA EN RIEGO DE LIGA , INCLUYE SUMINISTRO DE MATERIAL, ALMACENAMIENTO, PREPARACIÓN DE LA SUPERFICIE, PROTECCIÓN DE ESTRUCTURAS EXISTENTES, MANIOBRAS, APLICACIÓN EQUIPO Y LONECESARIO PARA SU CORRECTA EJECUCIÓN.	M2	5500	\$19.17	\$105,439.18
BASE ESTABILIZADA CON ASFALTO ESPUMADO Y MATERIALE FILLER COMPACTADA AL 95% EN CAPAS DE 10 CM DE ESPESOR CON PÉTREOS TRITURADOS DE 1 1/2" PULGADAS ESTABILIZADA CON CEMENTO ASFALTICO, INCLUYE: INCLUYE: MATERIALES, ACARREO, CARGAS Y DESCARGAS, MEZCLADO, TENDIDO, COMPACTADO, AFINAMIENTO Y TODO LO NECESARIO PARA SU CORRECTA COLOCACIÓN.	M3	825	\$500.62	\$413,011.50
MEZCLADO TENDIDO Y COMPACTACIÓN DE SUB BASE FORMADA CON MATERIAL DE CALIDAD, PRO UNIDAD DE OBRA TERMINADA. INCLUYE ACARREOS DE AGUA, EXTRACCIÓN, CARGA, ACARREO, APLICACIÓN DE AGUA, MEZCLADO, TENDIDO, COMPACTACIÓN AL GRADO FIJADO, AFINAMIENTO Y TODO LO NECESARIO PARA SU CORRECTA COLOCACIÓN.	M3	1650	\$313.25	\$516,866.76



En este punto podemos decir que al usar una cal con una pureza del 90% y procurando el contenido de finos es posible economizar aún más el proceso de elaboración de pavimentos.

7. Conclusiones

La mayoría de los ensayos realizados a los materiales son con el fin de obtener valores para su caracterización y poder dar una interpretación para el uso de los mismos; en el caso del ensayo de granulometría los resultados obtenidos indican también si el material cumple con la calidad necesaria, para poder cumplir con este parámetro se hizo la mezcla de agrado virgen con RAP (RAP+MV), aun así la granulometría no está 100% dentro de los límites indicados por la norma referenciada, lo que puede ser un factor que afecta directamente en la cohesión de las mezclas como se ve en los resultados del ensayo Triaxial, aquí podemos mencionar que el porcentaje de RAP a utilizar dependerá de la calidad del mismo.

Del nivel 1 y 2 se puede resumir que los valores más adecuados de las variables estudiadas dentro de lo posible de esta experimentación es de 2.4% de espuma de asfalto y un 1% de filler, en este caso cal; es importante mencionar que en el nivel 1 se ensayaron los especímenes sin ningún tipo de filler y no se presentó un valor de susceptibilidad a la humedad significativo.

El principal detalle y que puede ser el más significativo se presenta en el nivel 3, donde solo la mezcla RAG 90 cumple con los valores mínimos de cohesión y ángulo de fricción, teniendo así valores muy pequeños en las otras mezclas, como la mezcla CAL 80 la cual solo alcanza un valor de 80 kPa, solo un 32% del mínimo especificado por la metodología. La Mezcla RAG 90 es la que tiene según este proyecto las mejores propiedades de calidad en los materiales utilizados para su elaboración, ya que se usó la granulometría mejorada y la cal con mayor pureza. Como ya se mencionó antes la estabilización con AE se logra por la presencia de uniones discontinuas para las cuales es necesaria la presencia de material fino, en la Mezcla RAG 90 se procura este material sumado al uso de la cal 90 la cual actúa como filler promoviendo la presencia de uniones discontinuas.

Como menciona Campos (2018), los valores de M_r de una mezcla estabilizada con AE oscilan entre 850 y 1150 MPa, para este proyecto y utilizando su metodología se pudo obtener un valor de hasta 1240 MPa para la mezcla RAG 90, esto se puede ver en la figura 47, donde se aprecia un aumento en este valor conforme se mejora la calidad de los materiales utilizados.

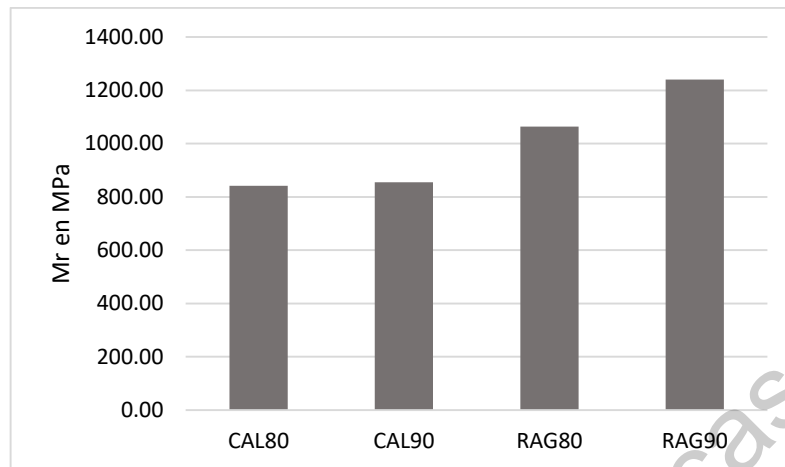


Figura 47. Comparación del valor de Mr para cada variable propuesta.

Como muestra la tabla 33, el valor de Mr alcanza hasta 1519.15 MPa para la mezcla RAG 90 cuando se tiene un confinamiento de 200 MPa. En todos los confinamientos se puede observar un aumento del valor de Mr conforme se mejora la calidad de los materiales (agregado y cal).

Como tal, los resultados obtenidos del ensaye de fluorescencia de rayos X brindan información la cual debe ser interpretada para poder explicar lo que sucede en la matriz del agregado, en este caso de las fotos hechas con el microscopio se puede apreciar como el agregado fino y el filler están adheridos a los agregados con mayor tamaño, sin que estos estén completamente cubiertos por el asfalto, esto ya que se puede ver la presencia de calcio, magnesio, aluminio, etc., dando así por hecho la presencia de uniones discontinuas siendo este tipo de recubrimiento de los agregados posible por la estabilización con AE.

Se puede ver la presencia de sílice, aluminio, calcio, entre otros elementos químicos los cuales son precursores de reacciones cristalinas, lo que nos indica una posible reacción de la cal con la humedad presente en las mezclas. Para estudiar este fenómeno más a fondo es imperativo realizar el ensaye de Difracción de Rayos X, en el cual es posible apreciar la presencia de cualquier reacción cristalina que se pudiese dar.

Es importante mencionar que las propuestas de estructura de pavimentos en el Capítulo 6.7., son solo algunas de las muchas alternativas con las que se cuenta en campo, siendo así, no hablamos de costos de otros tipos de método de estabilización ni su comportamiento mecánico. Al usar una base estabilizada con AE como parte de la estructura de un pavimento se redujo el costo de la estructura en un total de \$103,047.41 en comparación con la base negra; al usar el valor de Mr de 1240 MPa se pudo reducir el espesor de la base y también el costo en un monto de \$201,125.51. Tenemos entonces que la mezcla más recomendable para su aplicación en la Mezcla RAG90, tanto por costo como por sus propiedades mecánicas.



Es importante mencionar el futuro uso de diferentes tipos de materiales de suplencia debe de estar justificado antes de realizar cualquier investigación, en este caso el costo comercial de la cal 80 es de \$2.40 pesos mexicanos por kilogramo, mientras que el valor de la cal 90 es de \$2.81 pesos mexicanos por kilogramo; esto no representa un aumento del presupuesto ya que como se vio fue posible reducir espesor. Teniendo en cuenta esto, el costo de la cal con pureza del 95% (cal 95) tiene un costo de \$6.00 por kilogramo, en este punto es necesario conocer qué tanto va a beneficiar este tipo de cal a la matriz de la base para dar una justificación.

En cuanto a otros tipos de materiales de suplencia como el sílice, ceniza, metacaolín, etc., se debe hacer una profunda investigación del estado del arte para proponer alguno de estos materiales como filler.

Es imperativo definir el valor de módulo resiliente que debe de tener una base como la estudiada en este proyecto, esto para su uso en cualquier metodología de diseño de pavimentos; así mismo definir una metodología de diseño en base al M_r y a las especificaciones dictadas por la normativa de la zona.



8. Referencias

- A. Kvasnak, A. T. (2010). Evaluation of Gencor Green Machine Ultrafoam GX NCAT Report. *National Center for Asphalt Technology*.
- Ali, A., Abbas, A., Nazzal, M., Alhasan, A., & Powers, D. (2013). Effect of temperature reduction, foaming water content, and aggregate moisture content on performance of foamed warm mix asphalt. *Construction and Building Materials*.
- ARGOS. (2021). *360 en Concreto*. Obtenido de Materiales Cementantes Suplementarios y Sus Efectos en el Concreto: <https://www.360enconcreto.com/blog/detalle/categoryid/180/categoryname/aditivos-adiciones-y-fibras/efectos-de-cementantes-suplementarios>
- ASTEC Inc. (2021). <https://es.astecinc.com/>. Obtenido de <https://es.astecinc.com/>
- ASTM C136 / C136M - 19. (2019). Método de prueba estándar para análisis granulométrico del material pétreo Finos y Gruesos.
- ASTM C702/C702M - 18. (2018). Práctica estándar para reducir muestras de agregado a tamaño para pruebas.
- B. Middleton, R. F. (2009). An evaluation of warm mix asphalt produced with the double barrel green process. *Transportation Research Board 88th Annual Meeting*.
- Beemt, C. v. (2007). Low Temperature Asphalt Production using Foamed Bitumen Technologies. *European Asphalt Pavement Association, Presentation to WMA Scan Team*.
- Bustamante, O. (2009). *Estructuración de Vías Terrestres*. México: Patria.
- CALHIDRA. (marzo de 2020). Hidróxido de Calcio, Ca(OH)₂.
- CALIDRA. (Marzo de 2020). Cal hidratada, Alto calcio, Hidrato de Calcio.
- Cao, W., Wang, A., Yu, D., Liu, S., & Hou, W. (2019). Establishment and implementation of an asphalt pavement recycling decision system based on the analytic hierarchy process. *Resources, Conservation & Recycling*.
- Chomicz-Kowalska, A., Gardziejczyk, W., & Iwan' ski, M. (2016). Moisture resistance and compactibility of asphalt concrete produced in half-warm mix asphalt technology with foamed bitumen. *Construction and Building Materials*.
- Chomicz-Kowalska, A., Gardziejczyk, W., & Iwański, M. (2017). Analysis of IT-CY stiffness modulus of foamed bitumen asphalt concrete compacted at 95°C. *Procedia Engineering*.



- D'Angelo, J., Harm, E., Bartoszek, J., Baumgardner, G., Corrigan, M., Cowsert, J., . . . Yeaton, B. (2008). Warm Mix Asphalt: European Practice. *Office of International Programs, Office of Policy, Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, American Association of State Highway and Transportation Officials, National Cooperative Highway Research Program.*
- Damián, S., Martínez, A., & Aguirre, J. (2000). Impacto ambiental de Proyectos Carreteros. Efectos por la explotación de bancos de materiales y construcción de cortes y terraplenes. *Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Instituto Mexicano del Transporte.*
- Delgado Alamilla, H., Garnica Anguas, P., & Aguerrebere Salido, R. (2019 de Agosto de 2019). Diseño de la base estabilizada con asfalto espumado en los trabajos de conservación y mantenimiento del km 0+000 al 40+000 en el cuerpo "B" de la autopista Acayucan - Cosoleacaque. *Instituto Mexicano del Transporte.*
- Donald R., A., & Wendelin J., W. (2017). *Ciencia e ingeniería de materiales*. México, D.F.: Cengage Learning Editores, S.A. de C.V.
- F. Olard, B. H. (2008). *International Symposium on Asphalt Pavement and Environment 2008.*
- Federal, G. (2019). *Plan Nacional de Desarrollo 2019-2024*. CDMX: Gobierno Federal.
- García, F., Delgado, H., & Campos, E. (2017). Diseño de bases estabilizadas con asfalto espumado. *Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Instituto Mexicano del Transporte.*
- H.J., S., & M.C., V. (2006). *X Ray Spectrom.*
- Han, S., Dong, S., Yin, Y., Liu, M., & Liu, Y. (2020). Study on the effect of hydrated lime content and fineness on asphalt properties. *Construction and Building Materials.*
- Han, S., Dong, S., Yin, Y., Liu, M., & Liu, Y. (2020). Study on the effect of hydrated lime content and fineness on asphalt properties. *Construction and Building Materials.*
- Hassan, M. (2009). Life-cycle assessment of warm-mix asphalt: environmental and economic perspectives. *Proceedings of 88th transportation research board.*
- Hopmann, C., Lemke, F., Nguyen, Q., & Binh. (2016). Foaming of EPDM with water as blowing agent in injection molding. *J. Appl. Polym. Sci. 133.*
- Jenkins, K. (2000). *Mix design considerations for cold and half-warm bituminous mixes with emphasis on foamed bitumen*. Stellenbosch.
- Jiménez, M. (2011). ¿Qué es el Asfalto espumado, se puede usar en costa rica? *LanammeUCR.*



- Khosravifar, S., & Goulias, D. (2013). Foamed Asphalt Stabilized Base: A Case Study. *Research Gate*.
- Mallick, R., & Hendrix Jr, G. (2004). Use of foamed asphalt in recycling incinerator ash for construction of stabilized base course. *Resources Conservation and Recycling*.
- MAXAM Inc. (2021). *Aquablack Warm Mix Asphalt*. Obtenido de <https://maxamequipment.com/>
- Mijic, Z., Y. Dayioglu, A., Hatipoglu, M., & H. Aydilek, A. (2019). Hydraulic and environmental impacts of using recycled asphalt pavement on highway shoulders. *Construction and Building Materials*.
- M-MMP-1-07/07. (2007). Límites de Consistencia.
- M-MMP-1-09/06. (2006). Compactación AASHTO.
- Mohd Hasan, M., & You, Z. (2016). Ethanol based foamed asphalt as potential alternative for low emission asphalt technology. *Journal of traffic and Transportation Engineering*.
- Mohd Hasan, M., You, Z., & Yang, X. (2017). A comprehensive review of theory, development, and implementation of warm mix asphalt using foaming techniques. *Construction and Building Materials*.
- N·CMT·4·02·003/19. (s.f.). Materiales para Bases Tratadas.
- N·CMT·4·05·004/18. (s.f.). Calidad de Cementos Asfálticos según su Grado de Desempeño (PG).
- N-CMT-4-05-001/06. (s.f.). Calidad de Materiales Asfálticos.
- N-CMT-4-05-002/06. (2006). Calidad de Materiales Asfálticos Modificados.
- N-CSV-CAR-4-02-001/03. (s.f.). Recuperación en Frío de Pavimentos Asfálticos.
- SCT. (2018). Tabulador de precios referenciales a costo directo para construcción, modernización y conservación de obras de infraestructura carretera.
- Stanstee. (2021). *Accu-Shear*. Obtenido de <https://stansteel.com/>
- Stepien, J., & Chomicz Kowalska, A. (2016). Cost and eco-effective cold in-place recycled mixtures with foamed bitumen during the reconstruction of a road section under variable load bearing capacity of the subgrade. *Procedia engineering*.
- Taherkhani, H., & Tajdini, M. (2019). Comparing the effects of nano-silica and hydrated lime on the properties of asphalt concrete. *Construction and Building Materials*.



- Taherkhani, H., & Tajdini, M. (2019). Comparing the effects of nano-silica and hydrated lime on the properties of asphalt concrete. *Construction and Building Materials*.
- Turk, J., Mauko Pranjic, A., Mladenovic, A., Cotič, Z., & Jurjavčič, P. (2016). Environmental comparison of two alternative road pavement rehabilitation techniques: cold-in-place-recycling versus traditional reconstruction. *Journal of Cleaner Production*.
- Varela Alonso, L. (2009). *Costos de Construcción Pesada*. México, D.F.: INTERCOST.
- Wen, Y., Guo, N., You, Z., Wang, L., & Tan, Y. (2018). Comparative evaluation of rheological properties and micromechanics of non-foamed and foamed asphalt mastic. *Construction and Building Materials*, 654-664.
- Wirtgen GmbH. (2012). Wirtgen Cold Recycling Technology. *Wirtgen*.
- Y. Brosseaud. (2007). Warm Asphalt – Overview in France. *LCPC*.