



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

División de Estudios de Posgrado

“Evaluación y caracterización de una espuma de asfalto para la
producción de una base estabilizada para incrementar la vida útil de
pavimentos de bajo costo”

Tesis que para obtener el grado de:

**MAESTRO EN INFRAESTRUCTURA DEL TRANSPORTE EN LA RAMA
DE LAS VÍAS TERRESTRES**

Presenta:

ING. MARCOS ARIEL VILLANUEVA GUZMÁN

Director:

DRA. ELIA MERCEDES ALONSO GUZMÁN, FIC-UMSNH

Co-Director:

DR. HORACIO DELGADO ALAMILLA, IMT-SCT



Morelia, Michoacán. octubre de 2019.



Dedicatorias

Principalmente, agradezco a Dios por permitirme la consecución de otro grado académico, lo cual para mí ha representado un reto, satisfacción y poder cumplir un logro más en mi vida.

A mis padres y hermanos, que han estado en todo momento para apoyarme, cuidarme, guiarme, demostrarme su amor y enseñado en lo que ha sido mi vida hasta el día de hoy, y estoy seguro que seguirá siendo siempre de esta manera.

Quiero agradecer a la Dra. Elia Mercedes Alonso Guzmán que siempre me ha apoyado, dado consejos, consultas técnicas, ha aclarado mis dudas, y especialmente por la empatía que muestra hacia los demás. Ya que ha sido parte fundamental de mi formación académica desde el primer semestre de mi vida como estudiante de licenciatura.

A mis co-asesores, Dr. Wilfrido Martínez Molina, Dr. Hugo Luis Chávez García, Dr. Horacio Delgado Alamilla, Dra. Angélica del Valle y Dr. José Roberto Pérez Cruz, por haberme atendido ante las dudas y consultas que me surgieron a lo largo de estos 2 años.

A mis profesores de la Maestría, gracias porque de todos ustedes he aprendido un poco de lo mucho que tienen de conocimientos, y no sólo eso, por darme la oportunidad de tener ese trato de cordialidad de sus personas ya afuera de un salón de clases.

A mis compañeros de Maestría; Josué, Armando, Alfredo, Ezequiel y Juan Carlos, porque sin ustedes no hubiesen sido igual de amenos todos los momentos de trabajo y presión que tuvimos en este camino.

Al cuerpo de docentes, técnicos, tesis, servicio social, alumnos de estancia y todas las personas involucradas en el Laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Ruelas”, especialmente a las secciones de “Análisis de Materiales”, “Mecánica de suelos” y “Resistencia”.

Una mención especial a la MAestra Elizabeth Contreras Marín y “Manu” ya que fue de gran ayuda para todo mi proceso de estancia de investigación en la Universidad de Sevilla.

Al Dr. Antonio Jaramillo Morilla por la posibilidad de haberme aceptado como su alumno invitado para realizar mi estancia de investigación en la Universidad de Sevilla.

A todas las personas que tuve la oportunidad de conocer en mi periodo de estancia en la Universidad de Sevilla; Dr. Manolo, Don Manu, Señora Conchita, Marcelino, Jaime, Emilio, María Victoria, María Anguita, Bea y María Luisa. Ya que no sólo tuve enseñanzas académicas, también un gran intercambio cultural, que entre muchas cosas que compartimos, lograron que yo, un “recalcitrante” madrídista lograra tenerle un poco de cariño al Betis.

A mis demás familiares y amigos que siempre me han escuchado, me comparten un poco de sus vidas y han sido parte fundamental de mi perenne estado de buen ánimo. Todas las conversaciones que tengo con ustedes, siempre las he disfrutado.

A la Ing. Maura Arroyo Olvera del IMT, por la ayuda brindada en las pruebas de microscopía, parece poco, pero fue muchísimo lo que auxilió para esta investigación.



A todo el cuerpo del Laboratorio de “Mezclas asfálticas” del IMT; Aldo, Wilbert, Víctor, Juan Manuel, Emma, M. I. Mayra, M. I. José Antonio, Yelitza, Don José, Don Alfonso, Paty, Adriana, Óscar, Valentín, y Esbeidy; ya que su ayuda, consejos y amistad fueron fundamentales en el tiempo que estuve realizando todos los ensayos que son parte de esta investigación.

Y como lo he dicho, soy muy afortunado por todas las personas que se han cruzado en mi vida, ya que de todas he aprendido aunque sea una cosa insignificante, pero de todos me llevo algo, y gracias a ello soy lo que soy hoy en día.



Resumen

La construcción adecuada de un pavimento implica estándares de calidad que deben cumplir los materiales empleados, así como de un diseño apropiado. Se requiere de una gran cantidad de recursos naturales y económicos para la construcción y conservación de nuevos caminos. Tan sólo para el año 2017 en el estado de Michoacán se realizó la conservación periódica de 24.11 km y rutinaria de 1282.98 km, para un total de 1307.09 km de la red federal. Los pavimentos se ven rebasados en su capacidad estructural (vida útil) mucho tiempo antes para lo cual fueron diseñados: módulos de las capas, vida útil, procedimientos constructivos, daño esperado. El asfalto espumado incrementa las propiedades de la capa de base, aumentando el número de ejes equivalentes permisibles, esto da por resultado un pavimento durable. Para lograr esto, el diseño de una base estabilizada debe contar con un porcentaje de “filler”, para incrementar las propiedades del agregado pétreo, este trabajo consta de dos tipos de cemento y cal como materiales de filler, en dosificación del 1% de la masa del agregado pétreo. Existen metodologías de análisis microestructural como la Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) que nos permiten visualizar las formaciones de cristales de hidratación y afinidad que tienen los materiales de una mezcla, esto repercute directamente en el desempeño de las mismas, y a la vez permite comprender estos fenómenos en la diferencia de la resistencia mecánica de las mezclas, que se ve reflejado en una mayor vida útil del pavimento. Al mejorar las propiedades de la capa de base, lo que significa aproximadamente un 30% adicional de inversión en la construcción de un pavimento, pero incrementando su vida útil al menos 3 veces comparado con una estructura convencional de un pavimento.

Palabras Clave

Asfalto espumado, conservación, vida útil, sustentabilidad, economía.



Abstract

Proper construction of a pavement implies quality standards that must be met by the materials used, as well as an appropriate design. Pavement construction requires a large amount of natural and monetary resources for the construction of new roads, in the state Michoacán only for the year 2017 was carried out 24.11 km of periodic conservation and 1282.98 km of routine conservation, for a total of 1307.09 km of federal network roads. Most of pavements are exceeded in their structural capacity (useful life) long time before they were designed for: layers moduli, useful life, construction procedures, expected damage. Properties of base layer can be improve with foamed asphalt (bitumen), increasing permissible number of equivalent axes (ESALs), and this results in a durable pavement. To achieve this, the design of a stabilized base must have a percentage of stone aggregate of “filler”, to increase properties of the stone aggregate, this research consists of two types of cement and lime, in dosage of 1% of mass amount if the stone aggregate. There are some methodologies of microstructural analysis such as Scanning Electron Microscopy (SEM) this allows to visualize the reactions and affinity of the mixture materials, which directly affects their performance, which lets understand the phenomena in the difference of the mixtures mechanical strength. The improving base layer properties, which means approximately an additional 30% of investment in construction of a pavement, but increasing its useful life at least 3 times compared to a conventional pavement structure.

Key words

Foam asphalt, conservation, useful life, sustainability, economy.



Contenido

Dedicatorias	ii
Resumen.....	iv
Abstract	v
Índice de ilustraciones.....	viii
Índice de tablas	xi
Notación	xiii
Capítulo 1. Antecedentes	1
Introducción	1
1.1 Motivación	2
1.2 Planteamiento y delimitación del problema	3
1.3 Descripción de la propuesta de solución	4
1.4 Objetivos	5
1.4.1 Objetivo general.....	5
1.4.2 Objetivos particulares	5
1.5 Metodología	5
1.5.1 Caracterización del material.....	6
1.6 Resultados y aportaciones	22
1.7 Organización del documento	23
Capítulo 2. Fundamentos Teóricos.....	24
Capítulo 3. Revisión del estado del arte.....	28
3.1 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.....	31
3.2 Development of a tool to asses in-situ curing of Foamed Bitumen Mixtures	32
3.3 Estimation of cumulative energy demand and Green house gas emissions of etanol foamed WMA using life cycle assesment analysis	33
Capítulo 4. Solución propuesta	34
4.1 Resultados	34
4.1.1 Clasificación del asfalto	34
4.1.2 Agregado pétreo	35
4.1.3 Nivel I.....	38
4.1.4 Microscopía Electrónica de Barrido	66
4.1.5 Vida útil de las secciones.....	72



4.1.6	Comparación económica de alternativas de estabilización	73
4.1.7	Consumo energético y emisiones al medio ambiente	74
Conclusiones y trabajo futuro		77
Conclusiones		77
Trabajo futuro		78
Referencias		79



Índice de ilustraciones

Ilustración 1. Distribución de cargas en las capas de los pavimentos (Vera Callao, 2018).....	1
Ilustración 2. Procedimiento de caracterización del asfalto.....	6
Ilustración 3. Procedimiento de caracterización de los agregados pétreos.....	6
Ilustración 4. Proceso de cuarteo del agregado de Base.....	7
Ilustración 5. Proceso de cuarteo de arena.....	7
Ilustración 6. Proceso de granulometría del agregado de base.....	8
Ilustración 7. Proceso de granulometría de arena.....	8
Ilustración 8. Granulometría para bases estabilizadas.....	9
Ilustración 9. Prueba de compactación “Proctor modificada”.....	10
Ilustración 10. Diseño de bases estabilizadas con asfalto espumado.....	10
Ilustración 11. Especímenes cilíndricos para ensaye triaxial (150 mm de diámetro y 303 mm de altura).....	13
Ilustración 12. Compactador neumático para elaboración de especímenes de ensaye triaxial.....	13
Ilustración 13. Acondicionamiento de especímenes en horno a 40°C para ensaye triaxial.....	14
Ilustración 14. Ensaye triaxial a espécimen sin confinamiento.....	14
Ilustración 15. Ensaye triaxial a espécimen con confinamiento.....	14
Ilustración 16. Muestra en celda para prueba de microscopía del IMT-SCT, en microscopio Hitachi, modelo S3700N.....	15
Ilustración 17. Comparación de costo por tonelada de las alternativas de estabilización (Saleh, 2007).....	16
Ilustración 18. Comparación de costo por kilómetro de las alternativas de estabilización (Saleh, 2007).....	17
Ilustración 19. Consumo energético para Construcción y Rehabilitación de pavimentos flexibles (Chehovits & Galehouse, 2010).....	22
Ilustración 20. Emisiones de gases del efecto invernadero para Construcción y Rehabilitación de pavimentos flexibles (Chehovits & Galehouse, 2010).....	22
Ilustración 21. Diagrama del proceso de espumado del asfalto (Mohd Hasan, You, & Yang, A comprehensive review of theory, development, and implementation of warm mix asphalt using foaming techniques, 2016).....	24
Ilustración 22. Clasificación de las mezclas asfálticas por su temperatura (Porot, 2008).....	25
Ilustración 23. Distribución de esfuerzos en las capas de un pavimento con asfalto espumado (García, 2018).....	26
Ilustración 24. Proceso de dispersión de las partículas de asfalto espumado en el agregado pétreo (Ulloa C., 2011).....	27
Ilustración 25. Cambios de la composición estructural relacionado con la expansión del asfalto (Mohd Hasan, You, & Yang, A comprehensive review of theory, development, and implementation of warm mix asphalt using foaming techniques, 2016).....	28
Ilustración 26. Reducción de emisiones de gases a la atmósfera, WMA contra HMA (Xiao, Yao, Wang, Li, & Amirhanian, 2018).....	30
Ilustración 27. Granulometrías de las mezclas utilizadas.....	35
Ilustración 28. Peso volumétrico seco máximo para la mezcla I.....	36
Ilustración 29. Peso volumétrico seco máximo para la mezcla II.....	37
Ilustración 30. Comparación de peso volumétrico seco máximo para las dos mezclas de trabajo..	37



Ilustración 31. Resultados de mezcla I de prueba ITS a 3 días en condición seca.	38
Ilustración 32. Resultados de mezcla I de prueba ITS a 3 días en condición húmeda.	39
Ilustración 33. Resultados de mezcla I de prueba ITS a 7 días en condición seca.	40
Ilustración 34. Resultados de mezcla I de prueba ITS a 7 días en condición húmeda.	41
Ilustración 35. Resultados de mezcla I de prueba ITS a 28 días en condición seca.	42
Ilustración 36. Resultados de mezcla I de prueba ITS a 28 días en condición húmeda.	43
Ilustración 37. Resultados de mezcla I de prueba ITS a 90 días en condición seca.	44
Ilustración 38. Resultados de mezcla I de prueba ITS a 90 días en condición húmeda.	45
Ilustración 39. Resultados de mezcla II de prueba ITS a 3 días en condición seca.	46
Ilustración 40. Resultados de mezcla II de prueba ITS a 3 días en condición húmeda.	47
Ilustración 41. Resultados de mezcla II de prueba ITS a 7 días en condición seca.	48
Ilustración 42. Resultados de mezcla II de prueba ITS a 7 días en condición húmeda.	49
Ilustración 43. Resultados de mezcla II de prueba ITS a 28 días en condición seca.	50
Ilustración 44. Resultados de mezcla II de prueba ITS a 28 días en condición húmeda.	51
Ilustración 45. Resultados de mezcla II de prueba ITS a 90 días en condición seca.	52
Ilustración 46. Resultados de mezcla II de prueba ITS a 90 días en condición húmeda.	53
Ilustración 47. Evolución con el tiempo del comportamiento del esfuerzo en estado en seco.	54
Ilustración 48. Evolución con el tiempo del comportamiento del esfuerzo en estado en húmedo.	54
Ilustración 49. Resultados de mezcla I de TSR a 3 días.	55
Ilustración 50. Resultados de mezcla I de TSR a 7 días.	56
Ilustración 51. Resultados de mezcla I de TSR a 28 días.	56
Ilustración 52. Resultados de mezcla I de TSR a 90 días.	57
Ilustración 53. Resultados de mezcla II de TSR a 3 días.	58
Ilustración 54. Resultados de mezcla II de TSR a 7 días.	59
Ilustración 55. Resultados de mezcla II de TSR a 28 días.	59
Ilustración 56. Resultados de mezcla II de TSR a 90 días.	60
Ilustración 57. Evolución con el tiempo del TSR.	61
Ilustración 58. Resultados de prueba triaxial de la mezcla I con cal como filler.	62
Ilustración 59. Resultados de prueba triaxial de la mezcla I con CPC-30 como filler.	63
Ilustración 60. Resultados de prueba triaxial de la mezcla II con cal como filler.	64
Ilustración 61. Resultados de prueba triaxial de la mezcla II con CPC 30 como filler.	65
Ilustración 62. Mezcla I con cal, filler y geles de hidratación formados.	66
Ilustración 63. Mezcla I con CPC 30, filler y geles de hidratación formados.	66
Ilustración 64. Mezcla II con cal, filler y geles de hidratación formados.	67
Ilustración 65. Mezcla II con CPC 30, filler y geles de hidratación formados.	67
Ilustración 66. Zona seleccionada para el análisis químico de mezcla I con cal.	68
Ilustración 67. Resultados del análisis químico de mezcla I con cal.	68
Ilustración 68. Zona seleccionada para el análisis químico de mezcla I con CPC 30I.	69
Ilustración 69. Resultados del análisis químico de mezcla I con CPC 30.	69
Ilustración 70. Zona seleccionada para el análisis químico de mezcla II con cal.	70
Ilustración 71. Resultados del análisis químico de mezcla II con cal.	70
Ilustración 72. Zona seleccionada para el análisis químico de mezcla II con CPC 30.	71
Ilustración 73. Resultados del análisis químico de mezcla II con CPC 30.	71
Ilustración 74. Vida útil de sección de pavimento con base hidráulica.	72



Ilustración 75. Vida útil de sección de pavimento con base estabilizada con asfalto espumado.....	72
Ilustración 76 Análisis costo-beneficio de las alternativas de estabilización.	73
Ilustración 77. Análisis costo-beneficio de las alternativas de estabilización, con línea de tendencia para determinar la mejor alternativa.....	74
Ilustración 78. Análisis costo-emisiones de GHG a la atmósfera de las alternativas de estabilización, con línea de tendencia para determinar la mejor alternativa.	75
Ilustración 79. Análisis costo-consumo energético de las alternativas de estabilización, con línea de tendencia para determinar la mejor alternativa.....	75
Ilustración 80. Análisis consumo energético-emisiones de GHG a la atmósfera de las alternativas de estabilización, con línea de tendencia para determinar la mejor alternativa.	76



Índice de tablas

Tabla 1. Notación empleada en el documento. -----	viii
Tabla 2. Granulometría para bases estabilizadas. -----	8
Tabla 3. Determinación de pretratamiento con Filler. -----	9
Tabla 4. Condiciones de curado para la prueba de ITS, Nivel I. -----	11
Tabla 5. Parámetros mínimos de diseño del Nivel I. -----	11
Tabla 6. Contenidos preliminares de asfalto espumados para tipos de materiales (Delgado Alamilla, García Hernández, & Campos Hernández, Diseño de bases estabilizadas con asfalto espumado, 2017).-----	12
Tabla 7. Parámetros mínimos de diseño del Nivel III. -----	12
Tabla 8. Comparación de módulos resilientes de las alternativas de estabilización (Chehovits & Galehouse, 2010). -----	18
Tabla 9. Consumo energético y emisiones de gases del efecto invernadero para materiales de construcción de pavimentos (Chappat & Bilal, 2005).-----	20
Tabla 10. Emisiones de gases del efecto invernadero para materiales de construcción de pavimentos (Chappat & Bilal, 2005). -----	20
Tabla 11. Consumo energético y emisiones de gases del efecto invernadero para Construcción y Rehabilitación de pavimentos flexibles (Chehovits & Galehouse, 2010). -----	21
Tabla 12. Consumo de energía para diferentes tipos de mezclas asfálticas (Xiao, Yao, Wang, Li, & Amirkhanian, 2018). -----	30
Tabla 13. Grado PG del asfalto utilizado. -----	34
Tabla 14. Granulometrías de las mezclas utilizadas. -----	35
Tabla 15. Resultados de humedad actual en el agregado pétreo.-----	36
Tabla 16. Resultados de mezcla I de prueba ITS a 3 días en condición seca. -----	38
Tabla 17. Resultados de mezcla I de prueba ITS a 3 días en condición húmeda. -----	39
Tabla 18. Resultados de mezcla I de prueba ITS a 7 días en condición seca. -----	39
Tabla 19. Resultados de mezcla I de prueba ITS a 7 días en condición húmeda. -----	40
Tabla 20. Resultados de mezcla I de prueba ITS a 28 días en condición seca.-----	41
Tabla 21. Resultados de mezcla I de prueba ITS a 28 días en condición húmeda. -----	42
Tabla 22. Resultados de mezcla I de prueba ITS a 90 días en condición seca.-----	43
Tabla 23. Resultados de mezcla I de prueba ITS a 90 días en condición húmeda. -----	44
Tabla 24. Resultados de mezcla II de prueba ITS a 3 días en condición seca. -----	45
Tabla 25. Resultados de mezcla II de prueba ITS a 3 días en condición húmeda. -----	46
Tabla 26. Resultados de mezcla II de prueba ITS a 7 días en condición seca. -----	47
Tabla 27. Resultados de mezcla II de prueba ITS a 7 días en condición húmeda. -----	48
Tabla 28. Resultados de mezcla II de prueba ITS a 28 días en condición seca. -----	49
Tabla 29. Resultados de mezcla II de prueba ITS a 28 días en condición húmeda. -----	50
Tabla 30. Resultados de mezcla II de prueba ITS a 90 días en condición seca. -----	51
Tabla 31. Resultados de mezcla II de prueba ITS a 90 días en condición húmeda. -----	52
Tabla 32. Resultados de mezcla I de TSR a 3 días. -----	55
Tabla 33. Resultados de mezcla I de TSR a 7 días. -----	55
Tabla 34. Resultados de mezcla I de TSR a 28 días. -----	56
Tabla 35. Resultados de mezcla I de TSR a 90 días. -----	57
Tabla 36. Resultados de mezcla II de TSR a 3 días. -----	58



Tabla 37. Resultados de mezcla II de TSR a 7 días. -----	58
Tabla 38. Resultados de mezcla I de TSR a 28 días. -----	59
Tabla 39. Resultados de mezcla II de TSR a 90 días. -----	60
Tabla 40. Resumen de resultados de cohesión y ángulo de fricción de las mezclas. -----	65
Tabla 41. Resumen de resultados de consumo energético y emisiones de gases del efecto invernadero para alternativas de Construcción y Rehabilitación de pavimentos.-----	74



Notación

La notación empleada en este documento se resume en la Tabla 1.

Tabla 1. Notación empleada en el documento.

Símbolo	Significado
HMA	Hot Mix Asphalt (Mezclas asfálticas en caliente)
WMA	Warm Mix Asphalt (Mezclas asfálticas templadas)
HWMA	Half-Warm Mix Asphalt (Mezclas asfálticas semi-templadas)
CMA	Cold Mix Asphalt (Mezclas asfálticas en frío)
RAP	Reclaimed Asphalt Pavement/Recycled Asphalt Pavement
BSM	Bitumen Stabilized Mix
SEM	Scanning Electron Microscope
SO_x	Óxidos de Azufre
NO_x	Óxidos de Nitrógeno
CO₂	Dióxido de Carbono
GHG	Green House Gasees (Gases del efecto invernadero)
CPC-20	Cemento Portland Compuesto de 20 MPa de resistencia a 28 días
CPC-30R	Cemento Portland Compuesto de 20 MPa de resistencia rápida a 14 días
PG	Performance Grade (Grado de desempeño)
ITS	Indirect Tensile Strength (Esfuerzo a la tensión indirecta)
TSR	Tensile Strength Ratio (Relación de esfuerzo a la tensión)
Mr	Módulo resiliente
\$NZ	Dólar Neozelandés
\$MX	Peso Mexicano

Capítulo 1. Antecedentes

Introducción

Para construir nuevos pavimentos, se necesita de consumir de muchos recursos económicos y naturales, en especial los materiales que comprenden las capas de la estructura de un pavimento, que desde el punto de vista de sustentabilidad y sostenibilidad, son considerados como materiales no renovables (Delgado Alamilla, García Hernández, & Campos Hernández, Diseño de bases estabilizadas con asfalto espumado, 2017).

La construcción adecuada de un pavimento implica estándares de calidad que deben cumplir los materiales empleados, así como de un diseño apropiado. Por más raro que parezca, los pavimentos se ven rebasados en su capacidad estructural (vida útil) mucho tiempo antes para el cual fueron diseñados, esto ocurre por considerar erróneamente algunos parámetros, que son los de mayor influencia: módulos de las capas, vida útil, procedimientos constructivos y daño esperado (ejes equivalentes, a partir del TDPA).

El módulo de resiliencia y calidad de los materiales van incrementando conforme la capa se encuentre más cercana a las cargas vehiculares. 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 de 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 las sufre menores deformaciones por el efecto de la variación del contenido de agua (Delgado Alamilla, García Hernández, & Campos Hernández, Diseño de bases estabilizadas con asfalto espumado, 2017).

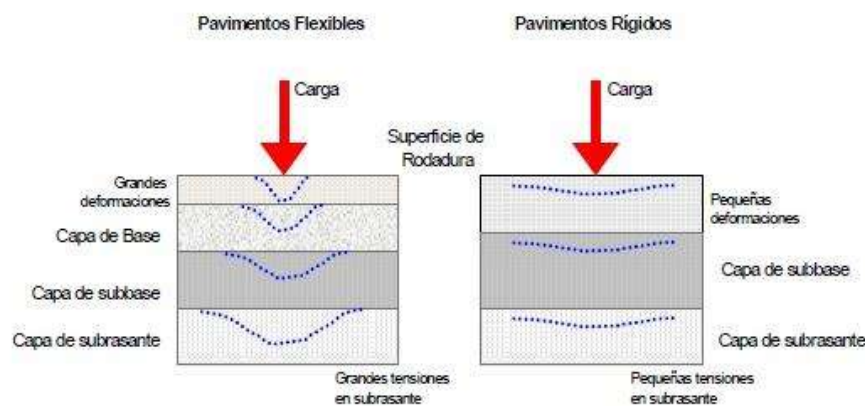


Ilustración 1. Distribución de cargas en las capas de los pavimentos (Vera Callao, 2018).



Para realizar un diseño de una estabilización con asfalto espumado se cuentan con varios factores que cumplir, para el asfalto, se debe de contar con el análisis y aceptación del tipo de asfalto a utilizar, aceptación de la espuma de asfalto obtenida. Para el agregado pétreo se debe de contar con una estructura granulométrica adecuada (esqueleto), la cual brinda la mayor parte de la resistencia mecánica de la mezcla, que esto se debe de probar por último mediante ensayos mecánicos y poder conocer el aporte que le otorga el asfalto espumado a la base estabilizada.

Debido a que la técnica de estabilización con asfalto espumado ha tomado gran impacto en México, principalmente a los resultados preliminares que se han obtenido en otros países, en donde el desempeño de las capas de base mejora al estabilizarlas con esta técnica, es por lo que se ha optado como solución en obras de gran importancia. El vacío que tiene esta técnica es la carencia de registros en la actualidad de resultados de las propiedades mecánicas resultantes, y que los procedimientos de diseño están basados a un “Manual de Diseño de Wirtgen” de la empresa que desarrolla la tecnología del equipo.

1.1 Motivación

En México en el año 2015 existía una “Red Nacional de Caminos” comprendida de 328,437.79 km (INEGI, 2015). Para el año 2018 la Red Nacional de Caminos se amplió a 528,175 km, lo que implica un crecimiento del 158,990 km (2,272 km pavimentados y 138,475 km son caminos rurales), respecto al año 2017 y de 199,737.21 km al año 2015. Desde Diciembre de 2018 se cuenta con 528,175 km existentes, de los cuales 171,347 km son pavimentados. De esta red de pavimentos, la mayor longitud de carreteras y caminos, por estado, el que corresponde en orden decreciente: Veracruz, Michoacán, Jalisco, Guerrero, Oaxaca, Chiapas, Tamaulipas, Chihuahua, Estado de México y Sonora (IMT, 2019). Es decir, el estado de Michoacán es el segundo estado con mayor longitud de caminos en el país. Lo que indica una gran cobertura de caminos en Michoacán (respecto a la media del país). 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 (Gobierno Federal, 2019).

Por lo que los caminos que se construyan deben contar con mejores especificaciones, que a su vez se plantea la reducción de conservaciones periódicas o que la conservación sea más eficiente, alargando la vida de servicio de los pavimentos a menor costo

Día a día encontramos la evolución de todos los productos, esto lo ocasiona la globalización, en el ámbito ingenieril, especialmente en las vías terrestres, no es la excepción, las tecnologías que brinden soluciones y comodidades también han llegado a las vías terrestres, es de esta manera como existe la necesidad de mejorar los pavimentos, o los elementos que los comprenden. Las primeras soluciones de esta innovación de los materiales para pavimentos fueron los diferentes tipos de mezclas asfálticas, clasificadas por el medio de aplicación, por temperatura o solubilidad/inmersión en otros medios continuos (solventes o agua). Después de esto, se vio la necesidad de modificar los materiales, para incrementar sus propiedades mecánicas a las que se encuentran sometidos (deformaciones, esfuerzos, etc.), en especial, en las capas superiores del pavimento (subbase, base y capa de rodadura), las cuales tienen una mayor ponderación en cuanto a durabilidad de los



mismos. En la capa de base, los primeros métodos de mejoramiento fueron los “materiales modificados” y “materiales estabilizados” (cal o cemento), después surgieron los procedimientos de tratamiento con asfalto (base negra) y concreto hidráulico magro (de baja resistencia), todo esto se encuentra normado (N-CMT-4-02-003/16) (SCT, 2016).

La técnica de asfalto espumado está siendo utilizada, por su aplicación, trabajabilidad, y especialmente en el empleo de tasas altas de material reciclado como agregado (hasta 99%), aunado a los resultados que se han obtenido en cuanto al incremento de ejes equivalentes permisibles (capaz de soportar esfuerzos mayores). En México es una tecnología en donde se tienen pocos documentos técnicos, de los cuales, el primero es del año 2017. Es de esta manera que surge el interés sobre el tema, utilizando los ensayos existentes y poder ampliarlos con un estudio que permita conocer la razón de los diferentes comportamientos desde la “**Ciencia de los Materiales**”.

1.2 Planteamiento y delimitación del problema

La construcción de pavimentos requiere de una gran cantidad de elementos para poderse llevar a cabo, siendo recursos no renovables y económicos los que priorizan la ejecución de estos. En primera instancia se está haciendo un consumo desmedido de los materiales no renovables y la economía de países “en vías de desarrollo”, como lo es el nuestro, no cuentan con una solvencia para poder canalizarla en este rubro tan amplio, construcción, conservación y mantenimiento de caminos.

El asfalto espumado es una mezcla sustentable para los caminos en los cuales los agregados son mezclados hasta a temperatura ambiente, en donde el material bituminoso es creado en forma de espuma. El efecto de las propiedades de la espuma en cuanto a la resistencia y deformación permanente de un material de asfalto espumado es menos importante que el efecto que sufren las características de compactación (densidad o energía necesaria) o algunos otros parámetros (Sunarjono, 2013).

Debido a que es un tema que se encuentra en pleno desarrollo, no se cuentan con parámetros mecánicos con materiales de México, de los parámetros que se ven modificados (para beneficio) con una base estabilizada con espuma de asfalto son la cohesión y valor de módulo resiliente, lo cual indica que la metodología es pertinentes para los tipos de bases estabilizadas de nuestro país; los valores de módulo de resiliente han presentado un aumento (Delgado Alamilla, García Hernández, & Campos Hernández, Diseño y evaluación del desempeño mecánico de una base hidráulica reciclada con asfalto espumado, 2017).

Dentro de las propiedades que se pueden obtener al producir el asfalto espumado son la reducción de la viscosidad y el incremento de la capacidad de adhesión con el agregado pétreo, esto último es de gran utilidad debido a que permite elaborar mezclas con material pétreo húmedo o frío (Delgado Alamilla, García Hernández, & Campos Hernández, Diseño y evaluación del desempeño mecánico de una base hidráulica reciclada con asfalto espumado, 2017).

Para poder realizar una HMA es necesario el consumo de energía elevado, para poder alcanzar temperaturas mayores a 140°C en el asfalto, lo que permite que su viscosidad disminuya y se comporte de mejor manera, en su parte líquida, pero al elevar el asfalto a estas temperaturas ocurre



un efecto de emisión de SO_x, NO_x, CO₂ y componentes orgánicos volátiles, los cuales se consideran como sustancias tóxicas, al elaborar una WMA se reducen las emisiones de estos de un 15% y hasta un 70% (Dong, Yu, Xu, & Wang, 2017).

1.3 Descripción de la propuesta de solución

El asfalto espumado es una alternativa de estabilización de bases, este tipo de estabilización incrementa el módulo resiliente de la capa de base aproximadamente 4 veces comparado con una capa de base hidráulica.

Al poder incrementar el módulo resiliente, la vida útil de la sección estructural se ve afectada de manera directa. Los trabajos de mantenimiento y conservación se ven disminuidos, por lo que con una inversión inicial mayor se reditúa en menores costos de mantenimiento, conservación y operación. Los usuarios son los que notan principalmente este ahorro, porque al transitar sobre un pavimento que ofrezca buenas condiciones durante un mayor tiempo, el desgaste de los vehículos es menor.

Otro de los temas en los que interviene el método de estabilización con asfalto espumado es la disminución de residuos de pavimentos. En México es posible utilizar hasta en un 80% de material reciclado, como lo es el RAP para la construcción de capas estabilizadas, especialmente para bases. Reciclando material de construcción se detiene de cierta manera la explotación de los recursos naturales, especialmente de los bancos de materiales. Además, se cuenta con temperaturas de elaboración de la mezcla menores, las cuales se han logrado disminuir de 20 a 30°C, comparado con las HMA. El consumo energético y la emisión de gases del efecto invernadero se disminuye, evitando uno de los procesos que más impacta en estos factores ambientales, el acarreo de materiales. Esto convierte a las WMA en mezclas sustentables (Delgado Alamilla, García Hernández, & Campos Hernández, Diseño de bases estabilizadas con asfalto espumado, 2017).

Para poner en prueba las características de las mezclas estabilizadas con asfalto espumado, se decidió realizar dos grupos de mezclas: mezclas con agregado virgen y mezclas con 25% RAP.

Se eligieron estas mezclas porque son las que cumplían con la mayor semejanza en la principal característica física para poder realizar una comparación, la curva de granulometría es prácticamente igual. A su vez, de estos dos grupos de mezclas se eligieron 4 alternativas de materiales de análisis: sin filler de aportación, 1% de cal, 1% de CPC 20 y 1% de CPC 30 como filler de aportación.

Las pruebas que se realizaron en esta investigación fuer: al asfalto, clasificación por grado PG del asfalto a utilizar; del agregado pétreo, granulometría, humedad actual, peso volumétrico seco máximo (para determinar el contenido óptimo de humedad de compactación); a las mezclas de bases estabilizadas, ITS seco, ITS húmedo y triaxial (para obtener cohesión y ángulo de fricción interno).

Las pruebas de ITS se realizaron con el empleo de una prensa tipo Marshall y mordazas Lottman. Los hornos de secado cuentan con control automático de temperatura, para lograr los 40°C. Paara la condición húmeda se utilizó una tina de baño con temperatura del agua regulable.



1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Evaluar y analizar la diferencia del desempeño de las propiedades mecánicas necesarias para el diseño de mezclas de base estabilizada con asfalto espumado con diferentes tipos de filler de aportación y dos diferentes tipos de agregado pétreo, virgen y con agregado reciclado, para poder determinar la influencia con la que cuenta la interacción y afinidad entre la interfaz de asfalto-filler. Comparar la viabilidad de la implementación de la técnica mediante un análisis de vida útil de las secciones estructurales del pavimento, por medio del comparativo costo-beneficio.

1.4.2 Objetivos particulares

- Evaluar las propiedades mecánicas (ITS, TSR, cohesión y ángulo de fricción interno) de bases estabilizadas con asfalto espumado con diferentes tipos de filler de aportación
- Analizar la diferencia de desempeño mecánico de mezclas con agregado virgen y agregado reciclado, con las mismas propiedades granulométricas y contenido de asfalto
- Determinar la influencia y afinidad del asfalto con el filler de aportación, mediante imágenes de microscopía
- Comparar la vida útil de una sección de pavimento tipo con base hidráulica contra una sección con base estabilizada con asfalto espumado
- Dictaminar la comparación de costo-beneficio de la aplicación de la tecnología

1.5 Metodología

La Normativa Mexicana de Materiales de Subbases y Bases para Pavimentos N-CMT-4-02-003/16, “Materiales para Bases Tratadas”, detalla los requisitos de calidad necesarios para el tratamiento de bases de pavimentos flexibles o rígidos; en esta norma se cuenta con la posibilidad de utilizar materiales que no cumplieron los parámetros establecidos en la N-CMT-4-02-002/04, esto es posible con la incorporación de algún producto adicional que modifique alguna de sus características físicas, por lo general se busca que el material para la capa subbase o base adquiera una mayor resistencia y sea más rígido. En esta norma (N-CMT-4-02-003/16) se encuentra la especificación con la que cumple una base estabilizada con asfalto espumado: “**Apéndice F: Requisitos de calidad de materiales para una base de mezclas asfálticas (Base Negra) provenientes de un banco**”. En este apéndice se describen los requerimientos que debe cumplir una mezcla estabilizada con ligante asfáltico.

La principal utilización del desarrollo de la tecnología de asfalto espumado en nuestro país, es para la rehabilitación de caminos con materiales reutilizados para poder construir una “**Base estabilizada**” y así poder incrementar la vida estructural en un pavimento. Los parámetros que se ven beneficiados, o al menos se ven modificados, son la cohesión y la susceptibilidad a la humedad, manteniendo el ángulo de fricción interna, debido a que esa es una característica del agregado pétreo, es de esta manera en la que trabajan las bases granulares con “**uniones discontinuas**” (Delgado Alamilla, García Hernández, & Campos Hernández, Diseño de bases estabilizadas con asfalto espumado, 2017).

Existen dos metodologías que se han utilizado en el país, las cuales indican el procedimiento para el diseño de una base estabilizada con asfalto espumado, por parte de la TG2 (Asphalt Academy, 2009)



y el Manual de reciclaje de Wirtgen (Wirtgen, 2012), 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 y de los agregados pétreos, siguiendo el procedimiento que se describe a continuación.

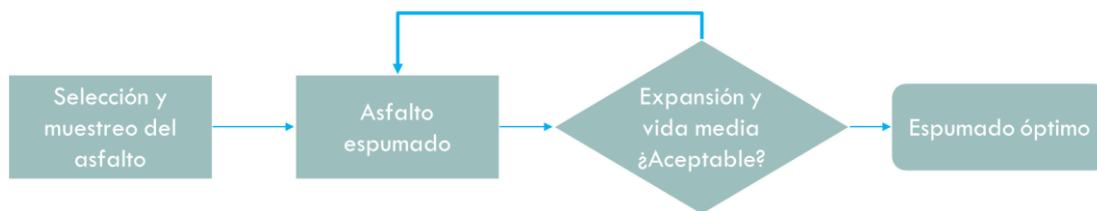


Ilustración 2. Procedimiento de caracterización del asfalto.

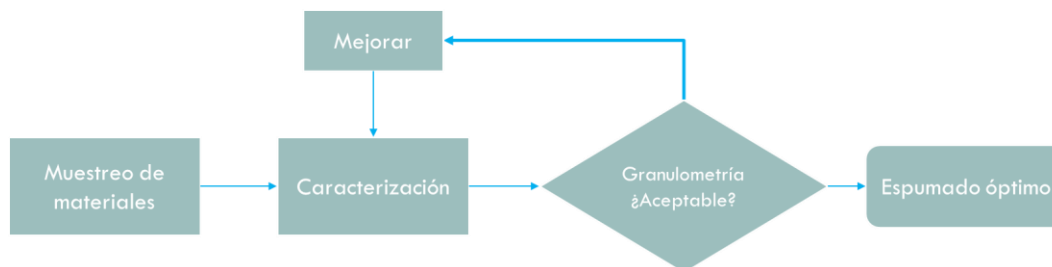


Ilustración 3. Procedimiento de caracterización de los agregados pétreos.

1.5.1 Caracterización del material

A continuación se definen las pruebas que se deben de realizar para la caracterización de los materiales que se emplearán en el diseño de las mezclas para bases estabilizadas con asfalto espumado.

1.5.1.1 Material asfáltico

La clasificación del asfalto puede ser mediante las normas N-CMT-4-001/06 (clasificación por viscosidad) y N-CMT-4-05-003/18 (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), esto es porque la creación de espuma se ve afectada por los asfalto modificados, los cuales obstruyen las líneas de conducción (tubería), boquillas y aspensor en la máquina de espumado, además de que se requiere aumentar más la temperatura (> 180°C) para poder conducir de manera fluida y poder crear espuma con estos asfaltos (modificados).



1.5.1.2 Agregado pétreo

Una vez realizado el muestreo del material que se utilizará, se requiere determinar dos características físicas fundamentales para mezcla de la capa estabilizada: **granulometría** y **plasticidad**. La siguiente ilustración presenta el diagrama de flujo del procedimiento a seguir en esta etapa de diseño.

1.5.1.2.1 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 -11), el cual se muestra en las siguientes imágenes.



Ilustración 4. Proceso de cuarteo del agregado de Base.



Ilustración 5. Proceso de cuarteo de arena.

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-14). A continuación se muestran imágenes de su procedimiento para fracción gruesa (agregado de Base y RAP) y para la fracción fina (arena).



Ilustración 6. Proceso de granulometría del agregado de base.



Ilustración 7. Proceso de granulometría de arena.

La normativa mexicana N-CMT-04-003-02/16 establece límites de aceptación para los agregados pétreos a emplear como material para “Bases estabilizadas”, los cuales se muestran en la siguiente tabla e ilustración.

Tabla 2. Granulometría para bases estabilizadas.

Abertura de la malla		% Que pasa	
in	mm	Límite superior	Límite inferior
2	50	100	100
1 1/2	37.5	100	87
1	25	100	76
3/4	19	100	65
1/2	12.5	90	55
3/8	9.5	80	48
1/4	6.3	70	41
No. 4	4.75	62	35
No. 8	2.360	47	25
No. 16	1.180	36	18
No. 30	0.600	28	13
No. 40	0.425	25	11
No. 50	0.300	22	9
No. 100	0.150	17	6
No. 200	0.075	12	4

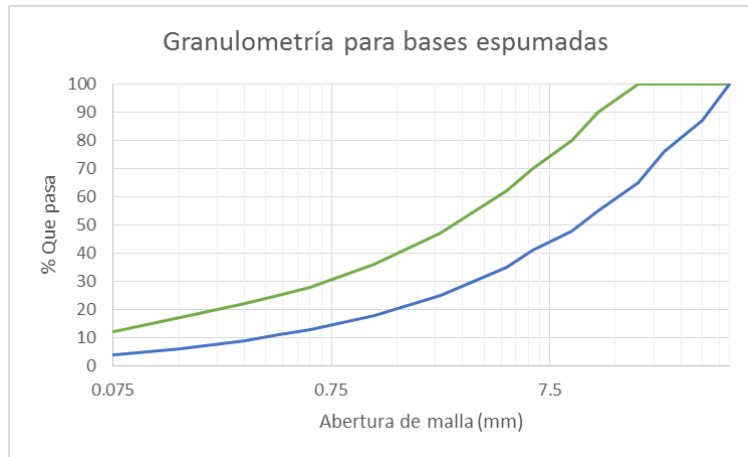


Ilustración 8. Granulometría para bases estabilizadas.

Es importante señalar que al menos 2/3 de la curva granulométrica del material debe de quedar dentro de estos límites, este es el criterio de aceptación del material, pero si en dado caso el material no cumple con esto, la normativa da la oportunidad de utilizar el material como diseño siempre y cuando se especifiquen todos sus parámetros.

1.5.1.2.2 Plasticidad

La determinación de la plasticidad de los materiales se realiza mediante a lo establecido en la norma “Límites de consistencia” (M-MMP-1-07/07). El objetivo de la prueba, además de conocer la plasticidad de los materiales, es conocer mediante el valor del índice plástico (IP), la necesidad de realizar un pretratamiento al material pétreo, es importante señalar que este ensayo únicamente aplica para material pétreo.

Tabla 3. Determinación de pretratamiento con Filler.

Índice plástico <10	Índice plástico >10
Llevar a cabo pruebas con especímenes de 100 mm de diámetro para determinar la necesidad de añadir cemento o cal hidratada	Pre-tratamiento del material con cal hidratada CIC (consumo inicial de cal) se debe determinar primero mediante la prueba de pH apropiada

1.5.1.2.3 Densidad del agregado

Se define la dosificación de materiales para obtener las mezclas de diseño (granulométricamente), para esto se debe de evaluar el grado de compactación de referencia del suelo (mezcla) por medio del ensayo de “Peso volumétrico seco máximo” (Proctor modificada), con esto se puede encontrar el “**contenido óptimo de humedad**”, mediante el procedimiento que dicta la norma ASTM D1557.



Ilustración 9. Prueba de compactación “Proctor modificada”.

1.5.1.3 Propiedades espumantes del asfalto

La elaboración de la mezcla depende de las condiciones de tránsito a las cuales estará sometido el pavimento, el cual está clasificado por niveles y de esto depende el nivel de diseño, como se aprecia en la siguiente ilustración.

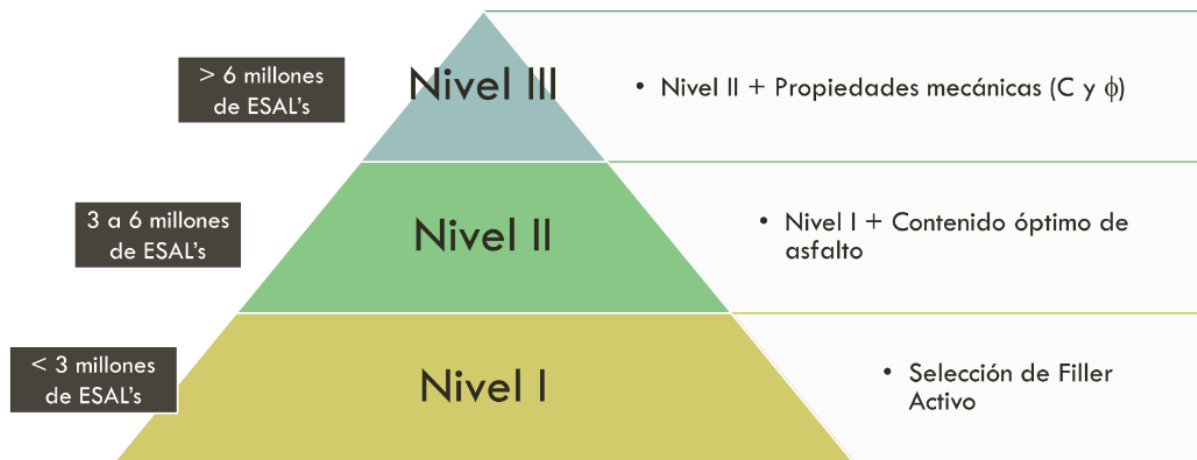


Ilustración 10. Diseño de bases estabilizadas con asfalto espumado.

1.5.1.3.1 Nivel I: Filler activo

El objetivo que tiene este nivel del procedimiento de diseño de la base estabilizada con asfalto espumado, es establecer si la mezcla de materiales (base hidráulica – RAP) necesita la inclusión de un “**filler activo**”. Para poder determinar esto se debe de realizar el ensayo de susceptibilidad a la humedad, esto con el ensayo de resistencia a la tensión o TSR (Tensile Strength Ratio) (Delgado Alamilla, García Hernández, & Campos Hernández, Diseño de bases estabilizadas con asfalto espumado, 2017). Los filler activos para este tipo de material son cal y cemento Portland compuesto



de diferentes resistencias y tiempo de resistencia (20 y 30 R), en porcentajes de 1%, para esto se realiza una evaluación con cada una de las variables:

- Sin filler
- 1% de Cal
- 1% de CPC-20
- 1% de CPC-30R

Además, para el caso de esta investigación se agrega una variable más, el tiempo de reacción (acondicionamiento) de los especímenes con cemento, para los cuales se desea analizar si el tiempo de reacción para el desarrollo de la resistencia influye, las edades de prueba son:

- 3 días (condición normal como dicta el procedimiento convencional)
- 7 días
- 28 días
- 90 días

Tabla 4. Condiciones de curado para la prueba de ITS, Nivel I.

Terminología	Diámetro de espécimen	Régimen de curado	Contenido de humedad	Diseño
ITS _{Seco}	100 mm	72 h no selladas (40°C)	< 1%	Nivel I
ITS _{Saturado}		Seco + 40 h sumergidas (25°C)	Saturadas	

Tabla 5. Parámetros mínimos de diseño del Nivel I.

Terminología	Esfuerzo mínimo (KPa)	TSR mínimo %
ITS _{Seco}	225.0	75.0
ITS _{Saturado}	100.0	

1.5.1.3.2 Nivel II: 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 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. Para poder determinar la mezcla de trabajo (fórmula de trabajo), se necesita realizar esta evaluación



(Delgado Alamilla, García Hernández, & Campos Hernández, Diseño de bases estabilizadas con asfalto espumado, 2017).

Es importante señalar que el nivel de diseño II no se realizó para esta investigación, debido a que las condiciones de prueba son muy similares a las del nivel I, porque para mezclas que contienen mezclas de grava-arena y grava-arena-RAP como agregado, el contenido preliminar de asfalto espumado para realizar la mezcla es de 2.4% en relación en cuanto a la masa del agregado pétreo (Delgado Alamilla, García Hernández, & Campos Hernández, Diseño de bases estabilizadas con asfalto espumado, 2017); además, no formaban parte del objetivo de investigación.

Tabla 6. Contenidos preliminares de asfalto espumados para tipos de materiales (Delgado Alamilla, García Hernández, & Campos Hernández, Diseño de bases estabilizadas con asfalto espumado, 2017).

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

1.5.1.3.3 Nivel III: Determinación de propiedades mecánicas

El objetivo de este nivel, como su nombre lo dice, es evaluar las propiedades mecánicas de la mezcla de materiales previamente definidos en los niveles anteriores, evaluar que lo anterior funcione a solicitaciones mecánicas. Se debe de realizar el ensayo triaxial “**no consolidado, no drenado**” para así obtener los parámetros, cohesión y ángulo de fricción interna (Delgado Alamilla, García Hernández, & Campos Hernández, Diseño de bases estabilizadas con asfalto espumado, 2017).

Tabla 7. Parámetros mínimos de diseño del Nivel III.

Parámetro	Valor
Cohesión	> 250 kPa (2.55 kg/cm ²)
Ángulo de fricción (ϕ)	> 40°



Ilustración 11. Especímenes cilíndricos para ensaye triaxial (150 mm de diámetro y 303 mm de altura).

Los especímenes que se elaboran para este ensaye, son cilindros de 150 mm de diámetro y 303 mm de altura, los cuales se llenan y compacta por 9 capas en un compactador neumático.



Ilustración 12. Compactador neumático para elaboración de especímenes de ensaye triaxial.

El acondicionamiento de los especímenes es en un horno a 40°C por 24 horas, para que pierdan el 0% de humedad (aproximadamente), después de transcurrir esta primera fase, se sellan con plástico (bolsas o membranas) por 48 horas a 40°C, en total son 72 horas de acondicionamiento. La manera de probar los especímenes es hasta que alcancen 25°C.



Ilustración 13. Acondicionamiento de especímenes en horno a 40°C para ensaye triaxial.

Es importante que para el caso de la construcción de los círculos de Möhr para este ensaye, se necesitan 3 variaciones de confinamiento, para este caso las presiones de confinamiento fueron 0, 0.1 y 0.2 MPa. Para este ensayo, sólo se realiza en las mezclas que tengan el mejor desempeño en las pruebas de tensión indirecta.



Ilustración 14. Ensaye triaxial a espécimen sin confinamiento.



Ilustración 15. Ensaye triaxial a espécimen con confinamiento.



1.5.1.4 Microscopio Electrónico de Barrido

La microscopía es una técnica utilizada para poder observar y analizar zonas de importancia con un aumento (acercamiento) del tamaño de las mismas, en donde se puede encontrar partículas de los diferentes materiales. Fundamentalmente se utiliza para conocer las propiedades morfológicas, topográficas y composición química de los cristales (partículas) de materia, así como poder identificar formas y aristas de los cristales. En palabras simples, la microscopía es la obtención de una “**radiografía**” con un gran aumento de los materiales en análisis.

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, Guo, You, Wang, & Tan, 2018).

Se analiza la relación que existen entre el desempeño mecánico de la mezcla y su microscopía, para contar con certidumbre sobre los resultados obtenidos a sollicitaciones mecánicas con esta imagen de microscopía, es decir, tener una respuesta al desarrollo de los esfuerzos permisibles de las probetas con los diferentes fillers empleados en la elaboración de las mezclas, en términos prácticos, en los cuales se desarrolla una “**mayor afinidad**”.

Además es posible determinar la composición química por un análisis complementario del microscopio, el cual es llamado “**Espectrometría de dispersión de energía de rayos x**” (EDS). Con este análisis se descubre la composición química de la mezcla. En esta prueba el operador selecciona la zona de interés en el microscopio para realizar el análisis químico de los elementos presentes, existen dos maneras focalizadas de realizar el análisis, puntual o por zona. Los especímenes analizados son unas celdas circulares de 6.25 mm de diámetro, las cuales contienen aproximadamente un gramo de material, como se muestra en la siguiente ilustración.



Ilustración 16. Muestra en celda para prueba de microscopía del IMT-SCT, en microscopio Hitachi, modelo S3700N.



Cabe mencionar que para poder lograr con éxito esta prueba, depende de la habilidad y experiencia del usuario, ya que es necesario buscar los cristales que sean del interés del personal, una ambigüedad.

1.5.1.5 Comparación económica de alternativas de estabilización

Existen diferentes alternativas de estabilización para capas de base, algunas han sido utilizadas desde la década de 1960 (en Nueva Zelanda). La utilización de materiales como limo y cemento han dado resultados aceptables, debido a la disminución del índice de plasticidad del material a emplear, sin embargo cuentan con una desventaja, estos no pueden ser transitables una vez que se han terminado las labores del método constructivo, es decir, una vez que ha finalizado la compactación, y es de esta manera como las mezclas asfálticas han tomado importancia y han ganado terreno en el campo (Saleh, 2007).

El análisis que desarrolló **Mofreh F. Saleh** en Nueva Zelanda, cuenta con una ponderación importante que impacta en el precio de las alternativas de estabilización, especialmente en el método de estabilización con asfalto espumado, las cantidades de material son más elevadas a las que se utilizan en esta investigación (3.5% de asfalto en masa y 2% de cemento en masa), y el agregado pétreo utilizado para la estabilización por asfalto espumado, no es un material reciclado, lo que indica que el costo de las mezclas que se desarrollan en esta investigación son aun menores, pero para poder realizar un ejemplo ilustrativo, esto es idóneo.

A considerar, los datos de costos se encuentran en “**Dólar Neozelandés**” (\$NZ), el tipo de cambio con el **Peso Mexicano** (\$MX) es: 1 (\$NZ) = \$13.29 (\$MX).

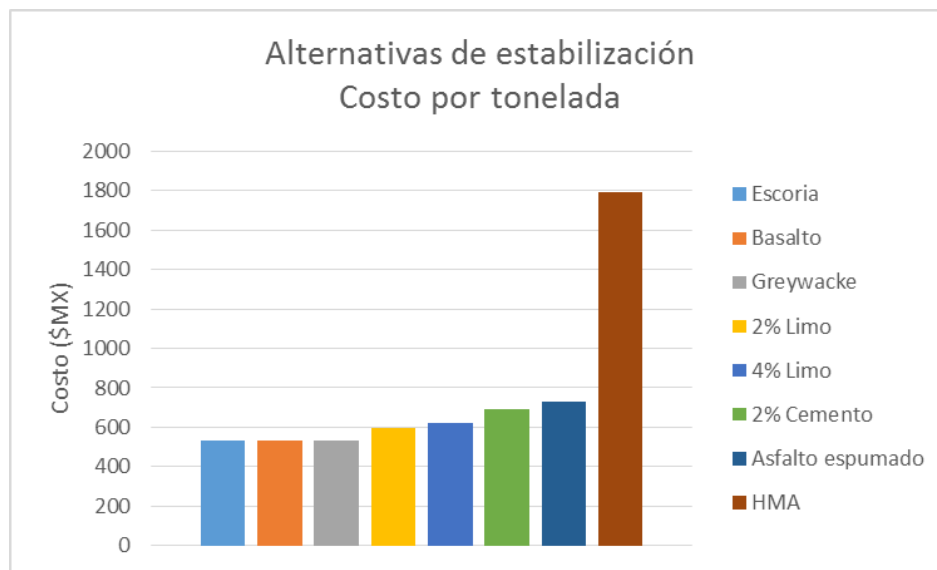


Ilustración 17. Comparación de costo por tonelada de las alternativas de estabilización (Saleh, 2007).

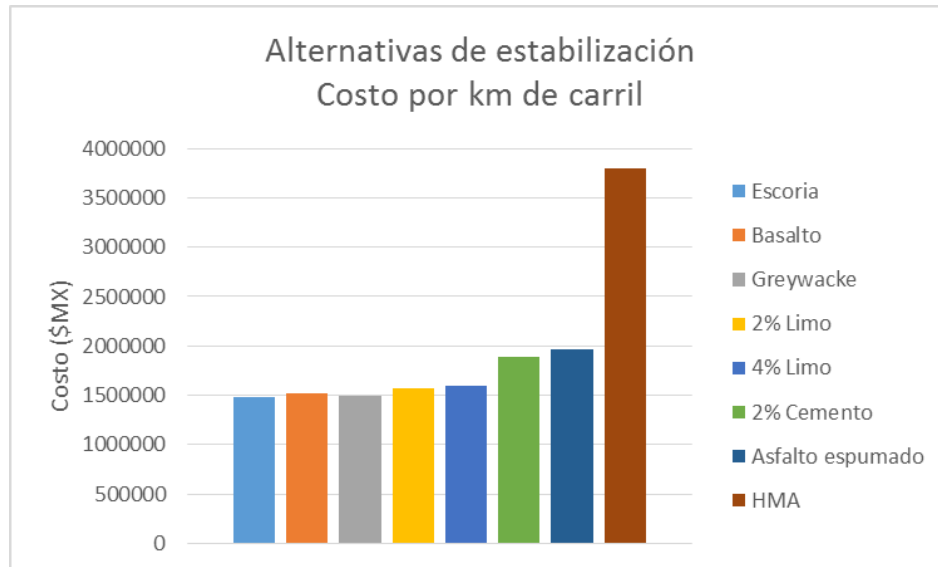


Ilustración 18. Comparación de costo por kilómetro de las alternativas de estabilización (Saleh, 2007).

Además de poder comparar los costos, es importante comparar su desempeño, por lo que también se cuenta con la siguiente tabla de comparación de módulo resiliente (M_r) de cada una de las mezclas, en donde se nota la importancia que tiene el método de la estabilización con asfalto espumado, que tanto en Nueva Zelanda como en México, los valores de M_r son casi iguales, se encuentran en el mismo intervalo, por lo que es admisible y cercana la comparación.



Tabla 8. Comparación de módulos resilientes de las alternativas de estabilización (Chehovits & Galehouse, 2010).

Mezcla	Mr promedio (MPa)
Escoria	420
Basalto	340
Greywacke	380
Greywacke + 1.5 emulsión	337
Greywacke + 2% Limo	484
Greywacke + 4% Limo	600
Greywacke + 2% Cemento	900
Greywacke + 3.5% Asfalto Espumado + 2% Cemento	1000
HMA	3000

***Greywacke** es un tipo de arenisca de Nueva Zelanda, con sílice y feldespatos

El costo de una estabilización con asfalto espumado, según los datos, es de aproximadamente un 32% mayor al de la base que cuenta solamente con el agregado (Greywacke), pero su módulo se ve incrementado en un 163% del valor normal, excede módulo resiliente original en 1.63 veces.

1.5.1.6 Evaluación de vida útil de una estructura de pavimento con base estabilizada

Para realizar este análisis se propondrá una estructura tipo de pavimento, con valores conocidos de módulos para cada capa, en donde se propone la estructura que está comprendida de las siguientes capas y espesores:

- Subrasante 20 cm
- Subbase 30 cm
- Base 30 cm
- Capa de rodadura 10 cm

Se llevará el análisis en dos tipos de secciones, en donde la diferencia se va a encontrar en la capa de base, en esta, se va a comparar una base hidráulica contra capas de base estabilizadas con asfalto espumado. El análisis de la vida útil de la sección de pavimento se llevará mediante el software "IMT-PAVE 3.0", con su alternativa de "Análisis Espectral", la cual es una herramienta de revisión de la vida útil de los pavimentos.

Debido a la complejidad que es contar con el equipo para realizar la prueba cíclica de resiliencia, se elaboraron varios estudios de casos prácticos específicos que arrojaron como resultados diversos resultados de ecuaciones para calcular el módulo de resiliencia.

- **Powell** y su equipo propuso la siguiente correlación, la cual fue utilizada para este trabajo (AASHTO, 1993)

$$M_R (MPa) = 17.6 CBR^{0.64}$$

De la misma manera, para las capas necesarias en este análisis, se tienen datos preliminares de los módulos (Chomicz-Kowalska & Stepien, 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, 2016).



- Subrasante 50 – 80 MPa
- Subbase 400 MPa
- Base hidráulica 400 MPa
- Mezcla asfáltica como capa de rodadura 10 500 MPa

La capa base estabilizada con 2.4% de asfalto espumado y cal, en México tiene un módulo de 850 - 1150 MPa (Delgado Alamilla, García Hernández, & Campos Hernández, Diseño de bases estabilizadas con asfalto espumado, 2017). Los valores utilizados para la revisión fueron, los propone el “IMT-PAVE 3.0” para cada tipo de suelo (Garnica Anguas, Hernández Domínguez, & Castellanos, 2016). Los datos de revisión son los siguientes:

- Subrasante 176 MPa
- Subbase 193 MPa
- Base hidráulica 238 MPa
- Mezcla asfáltica como capa de rodadura 3500 MPa
- Base estabilizada con asfalto espumado 1000 MPa

1.5.1.7 Consumo energético y emisiones al medio ambiente

La mayoría de los materiales utilizados en la construcción, rehabilitación y mantenimiento de pavimentos, consisten en agregados de diferentes tipos, mezclas asfálticas de diferente grado de desempeño. La determinación del consumo energético debe de realizarse desde que inicia la extracción de las materias primas y considerando los procesos de transporte y refinamiento. Algunos análisis han sido reportados por no considerar todas las partes de los procesos, como lo es el proceso de fabricación o colocación del producto terminado, en este caso, los pavimentos (Chehovits & Galehouse, 2010).

Para un resultado más apegado a la realidad de la medición del consumo energético y las emisiones de gases del efecto invernadero en específico de cada uno de los trabajos realizados en la construcción de un pavimento: extracción de materiales, transportación, refinamiento, elaboración, mezclado y tendido.

En la producción de agregados pétreos el consumo de energía incluye: extracción, acarreo, trituración y cribado. En todos estos procesos hay un consumo de 30 a 40 MJ/ton y una emisión de gases del efecto invernadero de 2.5 a 10 kg CO₂/ton (Chehovits & Galehouse, 2010).

Para el caso del asfalto, el consumo energético y emisión de gases se incluye los procesos de: extracción del petróleo crudo, transportación y refinación. El consumo energético del asfalto es de 4900 MJ/ton y la emisión de gases del efecto invernadero es de 285 kg CO₂/ton (Chehovits & Galehouse, 2010).

El proceso de fabricación de la mezcla incluye todos los pasos como: manejo, almacenamiento, secado, mezclado y preparación de los materiales para la instalación. El consumo energético depende del tipo de mezcla asfáltica.

Los materiales del proceso de construcción deben ser transportados al sitio de trabajo. El consumo de energía y emisiones de gases de efecto invernadero que corresponde para el transporte del material varía con la distancia y cantidad de material transportado. Los valores típicos son de 0.9 MJ/ton de consumo energético y 0.06 kg CO₂/km-ton de emisiones de GEI.



En la siguiente tabla se muestran los consumos energéticos y emisiones de gases del efecto invernadero para varios procesos y productos de construcción (Chehovits & Galehouse, 2010).

Tabla 9. Consumo energético y emisiones de gases del efecto invernadero para materiales de construcción de pavimentos (Chappat & Bilal, 2005).

Producto	Consumo energético (MJ/ton)	Emisiones de CO2 (kg/ton)
Asfalto	4900	285
Emulsión asfáltica 60%	3490	221
Cemento	4976	980
Base hidráulica	1244	245
Trituración de agregado pétreo	40	10
Agua	10	0.3
Combustible	35	4
Producción de HMA	275	22
Producción de WMA	234	20
Productos asfálticos de alto módulo	289	23
Producción de mezclas frías en planta	14	1
Molienda de superficie de asfalto para RAP	12	0.8
Termo-reciclado in-situ	456	34
Estabilización con reciclado en frío in-situ	15	1.13
Estabilización de suelo con cemento in-situ	12	0.8
Encarpetado de HMA	9	0.6
Encarpetado de Materiales de Mezcla en frío	6	0.4
Pavimentación de camino de concreto (cemento)	2.2	0.2
Transporte en tortón (km/ton)	0.9	0.6

Se puede resumir los resultados de emisiones de GEI total para cada uno de los procesos y el total de diferentes productos de pavimentación. A continuación se encuentran los datos en una tabla.

Tabla 10. Emisiones de gases del efecto invernadero para materiales de construcción de pavimentos (Chappat & Bilal, 2005).

Producto	Carpetas	Agregados	Elaboración	Transporte	Encarpetado	Total (MJ/ton)
Concreto asfáltico	279	38	275	79	9	680
Base de concreto asfáltico	196	36	275	75	9	591
Capa asfáltica de alto módulo	284	38	289	79	9	699
Concreto de WMA	294	38	234	80	9	655
Emulsión de agregado ligado	227	37	14	81	6	365
CMA	314	36	14	86	6	456
Material granular sin tratar	0	40		68	6	114



Suelo tratado in-situ con cal + cemento	63	0		7	12	82
Capa de base con concreto asfáltico y 20% RAP	157	33	275	64	9	538
Capa de base con concreto asfáltico y 30% RAP	137	39	275	58	9	518
Capa de base con concreto asfáltico y 25% RAP*	147	36	275	61	9	528

*Los datos de la mezcla de capa de base con concreto asfáltico y 25% RAP se realizaron con una interpolación entre los datos de 20 y 30%, debido a que el 25% es el contenido de RAP de una de las mezclas de diseño.

Al igual que para las emisiones de GHG, los resultados de consumo energético total para cada uno de los procesos y el total de diferentes alternativas de rehabilitación de pavimentos, se resume en la siguiente tabla.

Tabla 11. Consumo energético y emisiones de gases del efecto invernadero para Construcción y Rehabilitación de pavimentos flexibles (Chehovits & Galehouse, 2010).

Tratamiento	Detalles	Consumo energético (MJ/m ²)	Emisiones de GHG (kg/m ²)
Construcción nueva	100 mm de sobre carpeta de HMA 150 mm de Agregado para base	198.5	13.1
Rehabilitación mayor con HMA	100 mm de sobre carpeta de HMA	142.8	11.3
	75 mm de sobre carpeta de HMA	107.1	8.5
Rehabilitación mayor con WMA	100 mm de sobre carpeta de WMA	137.3	11.1
	75 mm de sobre carpeta de WMA	103	8.3

Estos mismos valores se presentan en las siguientes ilustraciones, para que sean más fáciles de observar las diferencias que existen.

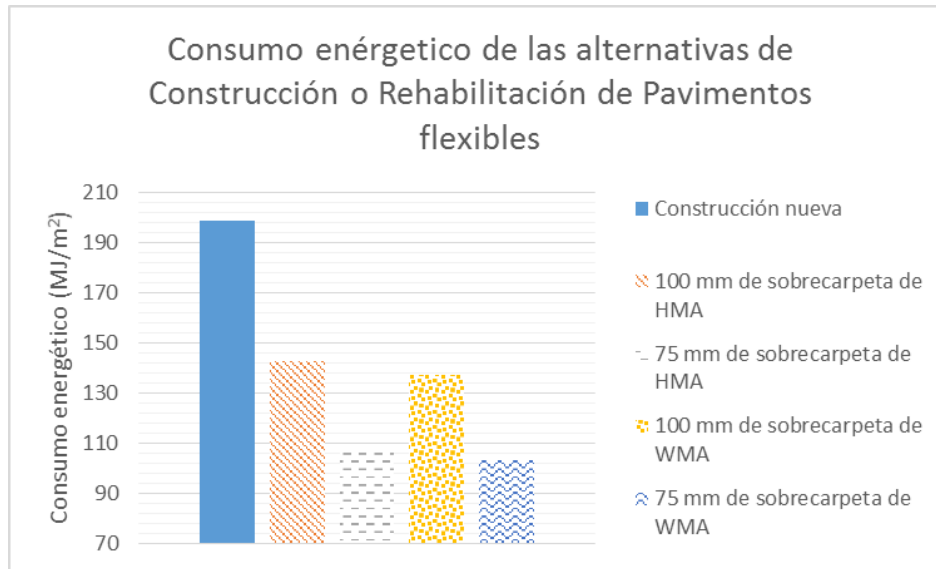


Ilustración 19. Consumo energético para Construcción y Rehabilitación de pavimentos flexibles (Chehovits & Galehouse, 2010).

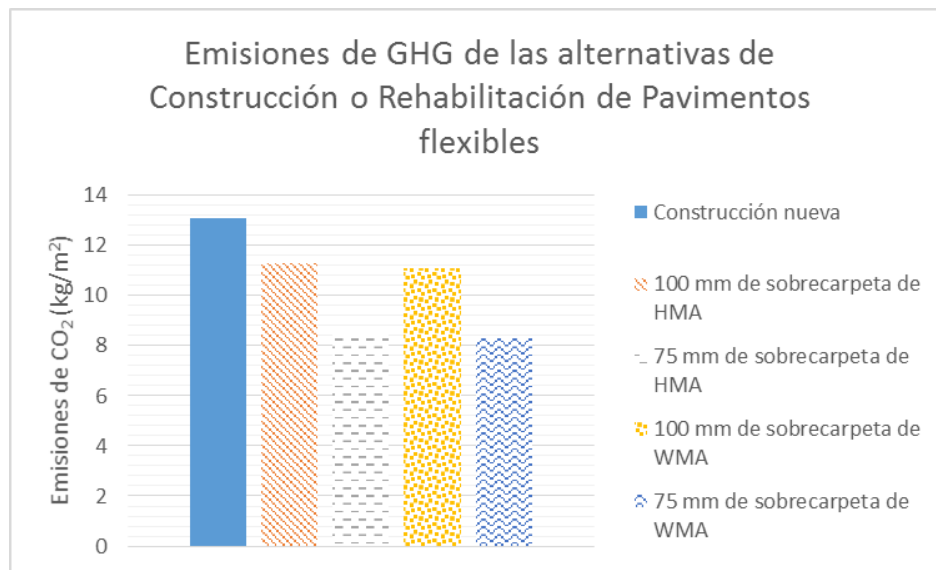


Ilustración 20. Emisiones de gases del efecto invernadero para Construcción y Rehabilitación de pavimentos flexibles (Chehovits & Galehouse, 2010).

1.6 Resultados y aportaciones

Las probetas ensayadas a Nivel I de diseño, mediante el ensayo de ITS, muestran una tendencia de incremento de los esfuerzos permisibles de las mezclas, siendo la mezcla II la que arroja las resistencias mayores, debido a la aportación del RAP. Las adiciones de filler que en general muestran un mejor desempeño son el CPC 30 y cal. Existe una caída de los esfuerzos permisibles a la edad de 28 días de curado, lo que indica que a esta edad se perdió un gran contenido de humedad, lo que probablemente se dio antes de tiempo y no permitió el desarrollo de manera adecuada de los geles de hidratación de los materiales filler.



Aunque la especificación recomienda resistencia de 250 kPa en estado seco, 100 kPa en estado húmedo y 75% de resistencia a la susceptibilidad por humedad, no se lograron en la mayoría de los casos las 3 condiciones, pero al menos las resistencias mínimas en seco y húmedo sí se lograron.

1.7 Organización del documento

En el capítulo 2 se describe la metodología a seguir para el desarrollo de una mezcla con asfalto espumado, y su clasificación por temperatura de elaboración dentro de las mezclas asfálticas. De igual manera se describe la importancia estructural de la capa de base de un pavimento, por la disipación y transmisión de esfuerzos.

Para el capítulo se realiza un análisis y comparación del estado del arte, los trabajos de investigación recientes que tienen relevancia intrínseca con esta investigación, y la diferencia de la aportación de dichos trabajos con esta investigación. Algunos de estos trabajos aportan datos importantes a la investigación que en este documento se desarrolla.

Los resultados de todos los ensayos que se realizaron se muestran en el capítulo 4. Desde la clasificación del asfalto, caracterización del agregado pétreo, hasta las pruebas de resistencia a la tensión indirecta y triaxial de las mezclas, y los análisis de vida útil y costo beneficio de las alternativas de estabilización de bases.

En el capítulo 5 se encuentran las conclusiones sobre este trabajo de investigación, las aportaciones que tiene a la sociedad y las posibilidades de líneas de investigación a desarrollar como trabajo futuro.

Capítulo 2. Fundamentos Teóricos

El proceso de espumado está basado en la inyección de agua en asfalto líquido a una temperatura alta (mayor a 100°C) durante el transcurso del mezclado, lo que da por resultado que el asfalto líquido se espume y expanda (incrementa su volumen), de esta manera es como se reduce la temperatura durante el proceso de mezclado (Yu, Leng, Wang, & Lin, 2013) A (Yu, Liu, & Dong, Comparative assessment of rheological property characteristics for unfoamed and foamed asphalt binder, 2015).

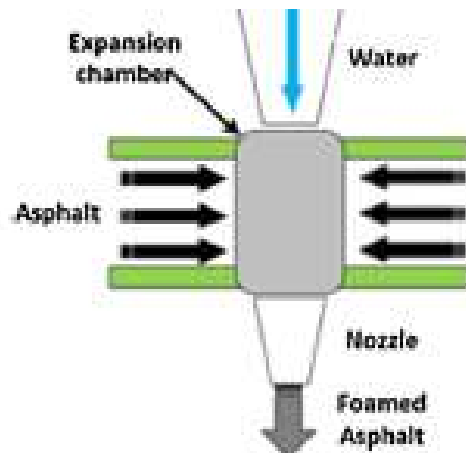


Ilustración 21. Diagrama del proceso de espumado del asfalto (Mohd Hasan, You, & Yang, A comprehensive review of theory, development, and implementation of warm mix asphalt using foaming techniques, 2016).

Las mezclas calientes de asfalto (HMA) son mezcladas a temperaturas que van de 140°C a 160°C para mejorar su trabajabilidad y un mejor desempeño a largo plazo. El asfalto espumado es utilizado en la estabilización de bases como mezclas templadas de asfalto (WMA) demostrando un gran potencial en el desarrollo sustentable (Mohd Hasan, You, & Yang, 2016).

En los países de Europa y Australia se centraron en la implementación de las 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 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, 2016). 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, & Iwanski, 2017).

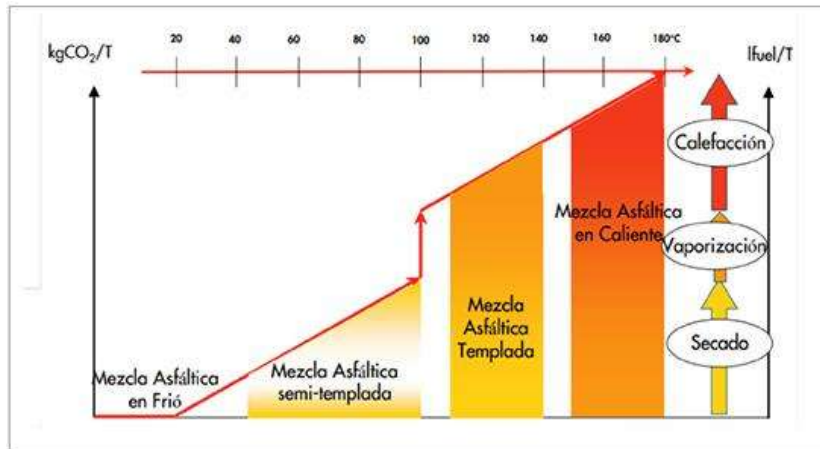


Ilustración 22. Clasificación de las mezclas asfálticas por su temperatura (Porot, 2008).

La nomenclatura internacional para las bases estabilizadas con mezclas de asfalto espumado está definida como “**BSM**”, Bitumen Stabilized Mix, que su significa es “Mezclas asfálticas/bituminosas estabilizadas”, esto es común de encontrar en las referencias.

En 1996 se liberó la patente de 40 años (1956) obtenida por el profesor **Ladis Cysani**, lo cual debido a su bajo costo y al poco desarrollo tecnológico se comenzó a estudiar, utilizar y perfeccionar en Sudáfrica y Oriente, teniendo algunos factores una gran relevancia en esto, como lo fueron: mala calidad del asfalto y en costo elevado del asfalto.

La tecnología de espumado tuvo un gran impacto en la sociedad para la creación de una “**Base asfáltica**” con contenidos de 2 a 3% de asfalto. Al caer la patente en 1996, se comenzaron investigaciones importantes, las cuales buscaban un beneficio a bajo costo. Buscar una base granular con asfalto para evitar la reflexión de las grietas hacia la superficie de rodadura, evitando fisuras en las cuales el agua pudiese ingresar a la estructura granular del pavimento y esto prolongaría la vida útil de los pavimentos.

Con la metodología in-situ Dinamarca rehabilitó y construyó en su red nacional aproximadamente 400 km de base estabilizada con asfalto espumado, agregando un plus al trabajo, ellos fomentaron la compactación a mayor grado de la capa de subbase.

Una equivalencia que se tiene como un parámetro empírico, pero la cual es útil para dar una noción de la importancia de las capas de acuerdo a sus espesores, es que **1 cm de mezcla densa equivale a 10 cm de base**. El asfalto espumado mejora la calidad de la estructura para disminuir las cargas que se transmiten a las capas inferiores.

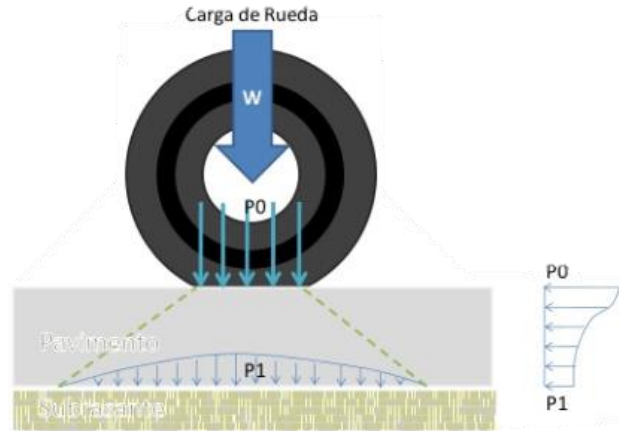


Ilustración 23. Distribución de esfuerzos en las capas de un pavimento con asfalto espumado (García, 2018).

Los materiales granulares tienen como características importantes: nula termo-susceptibilidad, partículas entrelazadas y dependencia a los esfuerzos. Cuando ingresa el agua al material se ve afectado por una disminución de resistencia a la carga del material, por los esfuerzos internos que genera la presión de poro.

La metodología de diseño a nivel mundial es para reconstruir los pavimentos cada 20 años, por lo cual las mezclas con bases estabilizadas con asfalto espumado representan una ventaja aún mayor, ya que los pavimentos que cuentan con estas bases estabilizadas requieren acciones de mantenimiento rutinarias en la capa de mezcla densa o capa de rodadura (cada 4 o 5 años). El asfalto funciona como una liga discontinua y se evita el efecto de daño de "grieta térmica", el cual se genera por la concentración de esfuerzos.

La base granular ya no es una capa suficiente para el tipo y las condiciones actuales de tránsito, por lo que se está optando por emplear mezclas estabilizadas en la capa de base, en donde el asfalto espumado tiene un gran panorama de oportunidades y aprovechamiento.

Según los indicios de empleo de la tecnología de bases estabilizadas con asfalto espumado, el contenido que brinda un mejor desempeño se encuentra entre 1.7 a 2.5% de asfalto con 1% de filler, ya sea el polvo del filler agregado pétreo, cal o cemento. La parte líquida (espuma) de la mezcla debe de estar constituida por un 98% de asfalto y 2% de agua, aproximadamente. El comportamiento de un asfalto espumado común para la elaboración de mezclas se encuentra para un rango de temperaturas de 160°C a 180°C, para que este pueda ser esparcido debe de ser sometido a presiones de 3 Bar, es necesario que se cuente con esta presión para que se atomice de manera adecuada.

Algunos efectos negativos que se presentan en las mezclas en caliente se ven reducidos y son despreciados en el asfalto, como los son: la oxidación por temperatura y por partículas de agua se desprecia, y el aire dentro de los conductos necesario para evitar que estos se atasquen y que el asfalto se pueda mover y salir de los aspersores.

La técnica surte efecto a partir de los 100°C, debido a que a esta temperatura se encuentra el punto de ebullición del agua. La técnica de asfalto espumado da una reacción de pulverizado del asfalto y al darse el efecto de la espuma, el asfalto pierde viscosidad con un comportamiento trabajable (Gutiérrez, 2018).

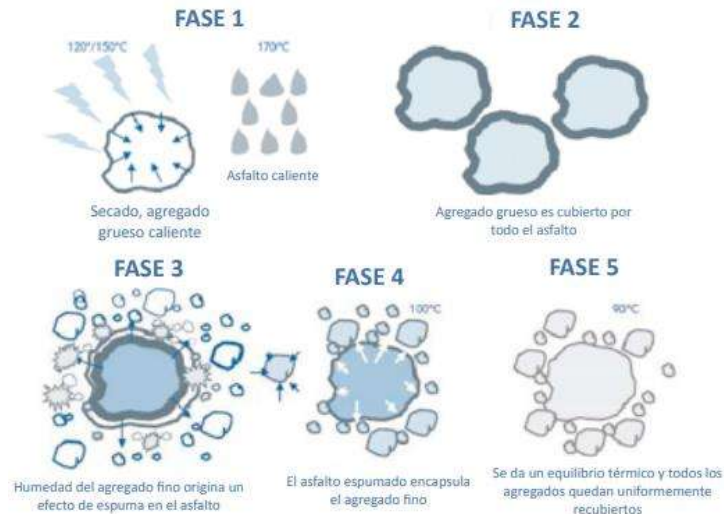


Ilustración 24. Proceso de dispersión de las partículas de asfalto espumado en el agregado pétreo (Ulloa C., 2011).

Es importante tener muy en cuenta la siguiente premisa: “**El asfalto espumado no es un asfalto**”, esto hace referencia al comportamiento de la mezcla, su comportamiento no es como el de una mezcla asfáltica, sino el comportamiento del asfalto espumado se asemeja al de un suelo granular, nada más que con un módulo de resiliencia mayor.

El comportamiento de un asfalto común para la elaboración de mezclas se encuentra para un rango de temperaturas de 160°C a 180°C, para que este pueda ser esparcido debe de ser sometido a presiones de 3 Bar, es necesario que se cuente con esta presión para que se atomice de manera adecuada (Delgado Alamilla, García Hernández, & Campos Hernández, Diseño y evaluación del desempeño mecánico de una base hidráulica reciclada con asfalto espumado, 2017).

Las mezclas calientes de asfalto (HMA) son mezcladas a temperaturas que van de 140°C a 160°C para mejorar su trabajabilidad y un mejor desempeño a largo plazo. El asfalto espumado es utilizado en la estabilización de bases como mezclas templadas de asfalto (WMA) demostrando un gran potencial en el desarrollo sustentable (Mohd Hasan, You, & Yang, 2016).

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 y de producción de 20°C a 40°C respecto a las HMA. Se cuida el aspecto de que las temperaturas de producción sean mayores al punto de ebullición del agua (100° C aproximadamente) (Mohd Hasan, You, & Yang, 2016). La temperatura de producción de las WMA está en el rango de 100°C a 140°C.

Capítulo 3. Revisión del estado del arte

Las WMA se han desarrollado para disminuir las temperaturas de producción, lo que influye en un ahorro de energía para poder manipular la mezcla asfáltica (trabajabilidad), de lo cual el proceso de espumado es el único que no necesita de aditivos o sustancias costosas (emulsificantes, etc.), en donde se ha comprobado que se puede realizar la compactación de la mezcla a 76°C (Yu, Leng, Wang, & Lin, 2013).

En la producción de WMA, en donde las temperaturas de elaboración de las mezclas han sido reducidas de 20°C a 30°C en climas fríos (Polonia), al espumar el asfalto el régimen debería de ser modificado su efecto, debido a que lograr este tipo de mezclas no es nada sencillo (Iwanski, Mrugala, & Chomicz-Kowalska, 2017).

Las técnicas de espumado han sido utilizadas en diversos campos para modificar las propiedades de los materiales o para mejorar el desempeño, en la industria del asfalto las WMA espumadas pueden ser clasificadas por dos técnicas, “*water-based*” y “*water bearing additives*”, las “*water bearing additives*” se basan en un sistema que utiliza el contenido de humedad en el sólido para generar burbujas cuando el agua entra en contacto con el asfalto caliente; esto da como resultado la reducción de la viscosidad de la mezcla asfáltica al incrementar el volumen original de 5 a 15 veces y el área superficial de la mezcla asfáltica, lo que permite cubrir el agregado de manera apropiada y tener una mejor compactación a bajas temperaturas. La mezcla de asfalto espumado es producida a través de la inyección de agua, aproximadamente de 1% a 6% (con respecto a la masa del asfalto) en el asfalto caliente. El mecanismo de la expansión del volumen del asfalto puede ser comprendida con la siguiente figura (Mohd Hasan, You, & Yang, A comprehensive review of theory, development, and implementation of warm mix asphalt using foaming techniques, 2016).

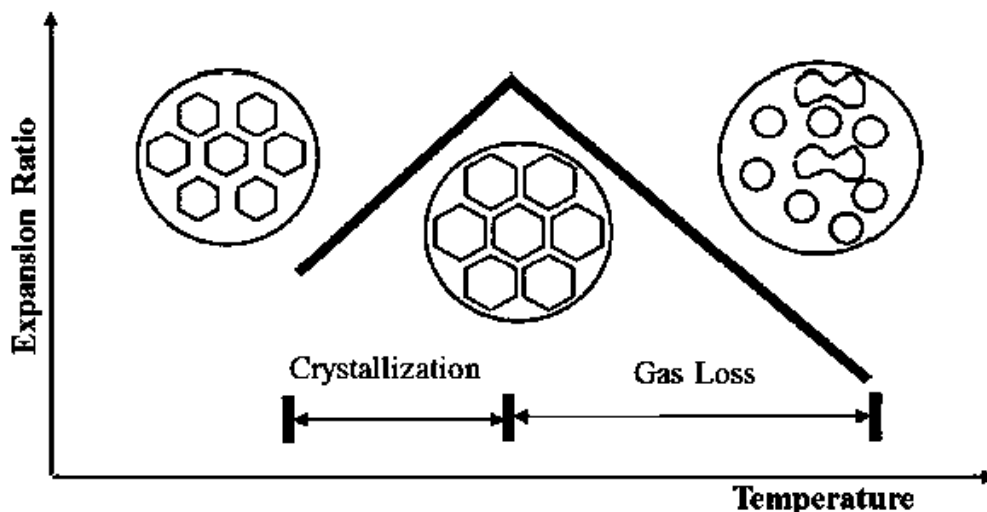


Ilustración 25. Cambios de la composición estructural relacionado con la expansión del asfalto (Mohd Hasan, You, & Yang, A comprehensive review of theory, development, and implementation of warm mix asphalt using foaming techniques, 2016).



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, esas mezclas asfálticas con mejores propiedades (mayor relación de expansión y vida media más larga), las mezclas tienden a tener mejores rendimientos con mayores valores de esfuerzos. Producto de una investigación fue sugerido el uso de un aglutinante con mejores propiedades espumantes puede reducir potencialmente el contenido de mezcla asfáltica, mientras que se logra el mismo efecto de estabilización (Ali, Abbas, Nazzal, Alhasan, & Powers, 2013)

Las curvas de viscosidad-temperatura son utilizadas para determinar las características reológicas del aglutinante, lo que puede arrojar como resultado las temperaturas de mezclado y compactación de las mezclas. Se ve disminuida la viscosidad de los asfaltos espumados elaborados como WMA en diferentes etapas y edades con el incremento de temperaturas, y como se muestra en las normas y publicaciones de parte de la SCT, con el tiempo el asfalto incrementa su viscosidad, debido al fenómeno conocido como envejecimiento (Dong, Yu, Liang, Ding, & Wei, 2017).

Asimismo una evaluación desarrollada en Alabama sobre la susceptibilidad a la humedad de WMA producidas en campo y en laboratorio indicó que la WMA producida en laboratorio se encuentra más propensa a la susceptibilidad por humedad que la WMA producida en campo (Ali, Abbas, Nazzal, Alhasan, & Powers, 2013).

En nuestro país (México) no es posible utilizar la tecnología de asfalto espumado como una capa de rodadura, debido a que no se cuentan con los equipos y maquinaria para realizar dichos trabajos.

En los trabajos revisados en esta sección, se encontraron los siguientes resultados: reducción de emisiones de gases del efecto invernadero, incremento de la vida útil de un pavimento de una estructura con capa de base estabilizada con asfalto espumado y la influencia del tiempo de curado en la resistencia a esfuerzos mecánicos.

El empleo de espuma de asfalto ha sido ampliamente utilizado para diferentes propósitos. Una evidencia de estos desarrollos es el estudio realizado por *Xiao et, al.* en donde analizan el impacto en la reducción de las emisiones de gases del efecto invernadero hacia la atmósfera con la técnica de asfalto espumado. Se reduce la huella de carbono de manera directa en varios procesos que son necesarios para la construcción de un pavimento comparado con una HMA.

La concentración de datos de emisiones de gases de efecto invernadero, NOx y SOx, los cuales se tienen datos que se reducen 52%, 61% y 54%, comparando una HMA con una mezcla asfáltica en caliente (HMA). En la siguiente ilustración y tabla se muestran las cantidades en las que disminuyen cada una de las actividades:

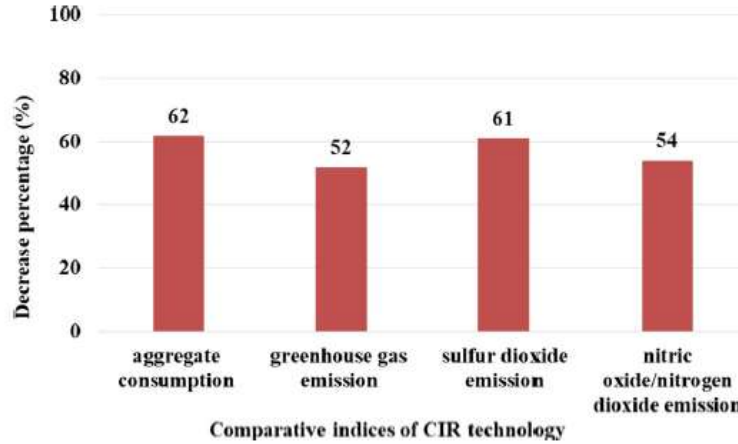


Ilustración 26. Reducción de emisiones de gases a la atmósfera, WMA contra HMA (Xiao, Yao, Wang, Li, & Amir Khanian, 2018).

Así como una descripción de los consumos de energía de cada uno de los procesos necesarios para la elaboración de mezclas.

Tabla 12. Consumo de energía para diferentes tipos de mezclas asfálticas (Xiao, Yao, Wang, Li, & Amir Khanian, 2018).

Technologies	Energy Consumption in Critical Processes (MJ/t)					Total
	Paving	Transport	Blending	Aggregate	Binder	
Hot-Mix Asphalt	15	75	275	45	270	680
Emulsion-Based Cold-Mix	6	95	15	42	308	456
Hot In-place Recycling	460	10	0	5	95	570
Hot Central Plant Recycling with 20% RAP	6	62	278	24	168	538
Cold In-place Recycling with Emulsion	20	15	0	2	102	179

En el mismo trabajo que desarrolla *Xiao et, al.* es la utilización de la técnica de microscopia para el análisis del comportamiento del asfalto espumado para conocer la relación del relieve y topografía de las partículas granulares. Se describe el fenómeno de la adhesión y cubrimiento (coating) del filler con el asfalto espumado, no se detalla las propiedades mecánicas con las que intervienen este fenómeno. Las imágenes de la técnica de escaneo de SEM, son complejas de analizar. La microscopia (SEM) de esta investigación se lleva a cabo en zona con asfalto espumado pero de una mezcla elaborada y compactada, probetas que se sometieron a ensayo mecánico.



3.1 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

Se realiza una comparación de 3 tipos de estructuras de rehabilitación de una sección de pavimento, de las cuales, los espesores de las capas sean lo más parecidas entre ellas. Las alternativas son: una reconstrucción total de la estructura (Propuesta A), reciclado de pavimento para elaboración de una capa de base (Propuesta B), reciclado de pavimento para elaboración de capa de base y subbase (Propuesta C). En este trabajo se proponen tres tipos de secciones de pavimento, etiquetadas como A, B y C. A continuación se describe cada una de las secciones propuestas:

- Propuesta A: 15 cm de subbase hidráulica ($E= 400$ MPa), 20 cm de capa de subbase con agregado triturado ($E= 400$ MPa), 10 cm de base con concreto asfáltico ($E= 9800$ MPa), 6 cm de capa de mezcla asfáltica ($E= 10300$ MPa) y 4 cm de capa de rodadura de mezcla asfáltica densa ($E= 9300$ MPa)
- Propuesta B: 15 cm de subbase hidráulica ($E= 400$ MPa), 20 cm de subbase con RAP con asfalto espumado y cemento como filler ($E= 1500$ MPa), 7 cm de base con concreto asfáltico ($E= 9800$ MPa), 5 cm de capa de mezcla asfáltica ($E= 10300$ MPa) y 4 cm de capa de rodadura de mezcla asfáltica densa ($E= 9300$ MPa)
- Propuesta C: 20 cm de subbase con RAP con asfalto espumado ($E= 750$ MPa), 20 cm de subbase con RAP con asfalto espumado y cemento como filler ($E= 1500$ MPa), 10 cm de base con concreto asfáltico ($E= 9800$ MPa), 6 cm de capa de mezcla asfáltica ($E= 10300$ MPa) y 4 cm de capa de rodadura de mezcla asfáltica densa ($E= 9300$ MPa)

El diseño de la estructura es para una sección en campo con un periodo de vida útil de 10 años, para el cual se proyectó y como resultado se obtuvo que el número de ejes equivalentes es de 3.2 millones. A continuación se presentan los resultados de falla (vida útil) en ejes equivalentes (ESALs) y el tipo de falla de cada una de las secciones propuestas, utilizando el método "**Guía de Diseño de Pavimentos con método Empírico-mecanicista**" de la AASHTO (2004):

- Propuesta A: 7 949 116 ESALs falla por agrietamiento debido a la fatiga y 22 541 044 ESALs falla por deformación permanente
- Propuesta B: 8 894 547 ESALs falla por agrietamiento debido a la fatiga y 20 184 737 ESALs falla por deformación permanente
- Propuesta C: 11 821 239 ESALs falla por agrietamiento debido a la fatiga y 54 853 263 ESALs falla por deformación permanente

Esto con valores supuestos y conocidos de módulos de elasticidad para cada una de las capas mencionadas, no se hicieron análisis detallados de ellos, pero esto es válido de acuerdo a la guía AASHTO.

Se descubrieron resultados llamativos, con la propuesta C se incrementa notablemente la vida del pavimento (ESALs); pero lo de mayor impacto es el ahorro de 5300 toneladas/km de agregado contra la propuesta A, y la propuesta B representa aproximadamente la misma vida útil del pavimento que la propuesta A, pero con un ahorro de 2800 toneladas de agregado pétreo respecto a la propuesta A.



3.2 Development of a tool to asses in-situ curing of Foamed Bitumen Mixtures

Se desarrolló el efecto que tiene la edad de curado, de acuerdo al filler y pérdida de humedad, con la resistencia adquirida, este fenómeno tiene relevancia en el ámbito “materialista” (ciencia de materiales). En este caso solamente se utiliza un tipo de filler, cemento, el cual queda demostrado que sus reacciones de resistencia (dependiendo del tipo y contenidos), en donde de 14 a 28 días tarda en hacer la reacción para lograr la “resistencia máxima” o “de especificación”. En esta publicación hacen alusión a la variables de temperatura de curado (5°C, 20°C, 30°C y 40°C), los especímenes que se elaboran son para ensayarlos únicamente en el ITS (Prueba de Tensión Indirecta) en una “Prensa Marshall”, dejando afuera las pruebas de módulo resiliente y triaxial, estas necesarias para conocer las propiedades mecánicas (de trabajo) de la mezcla, necesarias en un suelo granular. Las mezclas realizadas con asfalto espumado fueron las siguientes:

- 50% RAP + 50% Agregado virgen
- 50% RAP + 50% Agregado virgen + 1% Filler (Cemento)
- 100% Agregado virgen
- 100% Agregado virgen + 1% Filler (Cemento)

Las mezclas que contienen RAP, tienen un contenido de 3.25% (en masa respecto al agregado pétreo) de asfalto espumado y 3.8% (en masa respecto al agregado pétreo) de contenido de agua de mezclado, las mezclas con 100% agregado virgen, cuentan con 4% de asfalto espumado y 5.2% de agua de mezclado (Kuna, Airey, & Thom, 2016).

En investigaciones previas en el campo de los materiales, se demuestra la relevancia del tiempo de curado para el desarrollo de resistencia a esfuerzos mecánicos, la cual se incrementa con la edad de curado, esto en cal y cemento.

Asimismo, en este documento no existe una explicación de las posibilidades a las que se debe el incremento de resistencia (solamente por la edad de curado, pero no existe una prueba contundente), la microscopía es la posible solución ante esta incertidumbre, ya que brinda imágenes de formación de geles de hidratación del filler en cuestión. Solamente se utiliza el cemento (CPC 30) como filler (1% de adición en masa respecto al agregado pétreo), pero también se encuentran permitidos otros materiales, como cal y cemento de baja especificación (CPC 20), los cuales tienen un costo más bajo si se compara con el CPC 30.



3.3 Estimation of cumulative energy demand and Green house gas emissions of ethanol foamed WMA using life cycle assesment analysis

En este documento de investigación se analizó el efecto que tienen 3 tipos de mezclas asfálticas con la emanación de gases del efecto invernadero hacia la atmósfera (principalmente el CO₂) y la energía de consumo que requieren al final de los procedimientos de preparación y puesta en servicio de las mezclas, todo esto en un tramo carretero de 656.3 km en los Estados Unidos de América. Principalmente se enfocan a la cantidad de emisiones de dióxido de carbono (CO₂) hacia la atmósfera.

Como se menciona, se realizaron y analizaron 3 diferentes tipos de mezclas, una mezcla asfáltica en caliente (HMA) y dos mezclas asfálticas templadas (WMA), dos mezclas con asfalto espumado, una con agua (WWMA) como medio de espumado y otra con etanol (EWMA). Cabe mencionar que las cantidades de materiales de la mezcla fueron similares, esto para que la comparativa sea directa, las que cuentan con contenidos de líquido para espumado (agua o etanol) de 1, 3 y 5%, y un contenido de filler (cemento) de 1.5% (respecto a la masa total de la mezcla).

La primera diferencia importante de consumo de energía, que a su vez impacta directamente en las emisiones de CO₂ a la atmósfera, es la temperatura que necesitan cada una de las 3 variantes para el proceso de mezclado, para alcanzar la viscosidad las HMA deben de estar de 140°C a 180°C, mientras que el agua para la WWMA va de 110°C a 130°C y el etanol de 80°C a 100°C.

En los procesos de “Transporte” y “Mantenimiento”, las 3 mezclas consumen la misma energía (energía para los vehículos), por lo que se emana CO₂ y gases de efecto invernadero es la misma, en donde existe la variación es en el proceso de “Manufactura o Construcción”.

No se especifica el tipo de secciones de pavimentos (estructura, ancho y profundidad de capas), para hacer una comparación por metro cuadrado (m²) de sección y sea más sencillo de comprender.

Los resultados obtenidos para el proceso de “Manufactura o Construcción” son los siguientes:

- HMA emite 1.36×10^5 Kg de CO₂, es decir 136 toneladas de CO₂
- WWMA emite 1.2×10^5 Kg de CO₂, es decir 120 toneladas de CO₂
- EWMA emite 1.16×10^5 Kg de CO₂, es decir 116 toneladas de CO₂

Por último, el análisis al final de la vida útil (10 años) de cada una de las mezclas, sus emisiones de CO₂ hacia la atmósfera son las siguientes:

- HMA emite 2.06×10^5 Kg de CO₂, es decir 206 toneladas de CO₂
- WWMA emite 1.93×10^5 Kg de CO₂, es decir 193 toneladas de CO₂
- EWMA emite 1.85×10^5 Kg de CO₂, es decir 185 toneladas de CO₂

Se aprecia que elaborar las mezclas con etanol brinda mejores resultados (emisiones de CO₂ y consumo de energía más bajos al resto), pero existen otras aristas de la problemática, en Estados Unidos de América el etanol no tiene un costo de mercado, debido a que lo consideran como un subproducto del maíz, en nuestro país no es así.



Capítulo 4. Solución propuesta

4.1 Resultados

4.1.1 Clasificación del asfalto

Tabla 13. Grado PG del asfalto utilizado.

Ensayos básicos						
Ensayo	Norma	Temperatura de prueba	Parámetro	Resultado	Especificación	
Condición original						
Recuperación elástica por torsión	M-MMP-4-05-024-02	25 °C	Re	8.25 %	N/A	
Punto de reblandecimiento	ASTM D36-14	N/A	Pr	50.75 °C	N/A	
Densidad relativa	ASTM D70-09	25 °C	G _b	1.03	N/A	

Clasificación por Grado PG						
Ensayo	Norma	Temperatura de prueba	Parámetro	Resultado	Especificación	
Condición original						
Viscosidad	ASTM D4402-15	135 °C	η	0.457 Pa·s	≤ 3 Pa·s	
Reómetro de Corte Dinámico (DSR)	ASTM D7175-15	64 °C	G*/senδ	1.92 KPa	≥ 1 kPa	
Envejecimiento en Horno Rotatorio de Película Delgada (RTFO), ASTM D2878-12						
Cambio de masa	ASTM D2872-12	163 °C	CM	0.365 %	≤ 1.0%	
Reómetro de Corte Dinámico (DSR)	ASTM D7175-15	64 °C	G*/senδ	3.52 kPa	≥ 2.2 kPa	
Envejecimiento en Vasija de Presión y Temperatura (PAV), ASTM D6521-13						
Envejecimiento PAV	ASTM D6521-13	100 °C		N/A		
Reómetro de Corte Dinámico (DSR)	ASTM D7175-15	28 °C	G*(senδ)	4217 kPa	≤ 5,000 kPa	
Reómetro de Viga a Flexión (BBR)	ASTM D6648-08	-6 °C	S	131 MPa	≤ 300 MPa	
			m	0.293	≥ 0.300	

Esta muestra de ligante asfáltico se clasifica como un:			
PG	64	-	16



4.1.2 Agregado pétreo

4.1.2.1 Granulometría

Tabla 14. Granulometrías de las mezclas utilizadas.

Abertura de la malla		Límites		Base 50% + Arena 50%	Base 37.5% + Arena 37.5% + RAP 25%
in	mm	Superior	Inferior		
1 1/2	37.5	100	87	100	100
1	25	100	76	92	94
3/4	19	100	65	85	87
1/2	12.5	90	55	75	76
3/8	9.5	80	48	70	70
No. 4	4.75	62	35	57	54
No. 8	2.360	47	25	34	32
No. 16	1.180	36	18	20	19
No. 30	0.600	28	13	12	11
No. 50	0.300	22	9	8	8
No. 100	0.150	17	6	5	5
No. 200	0.075	12	4	4	4

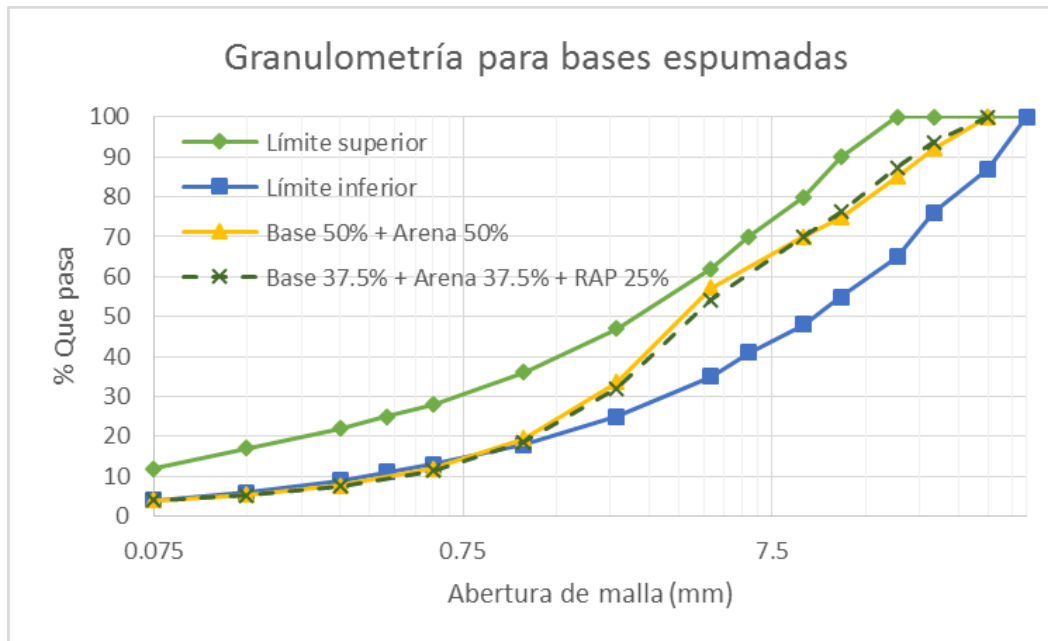


Ilustración 27. Granulometrías de las mezclas utilizadas.



4.1.2.2 Humedad actual del agregado pétreo

Tabla 15. Resultados de humedad actual en el agregado pétreo.

Mezcla	Masa i (g)	Masa f (g)	Humedad actual (%)
Base 50% + Arena 50%	1070	1056.7	1.26
Base 37.5% + Arena 37.5% + RAP 25%	1000	988	1.21

4.1.2.3 Humedad óptima del agregado pétreo (Proctor modificada)

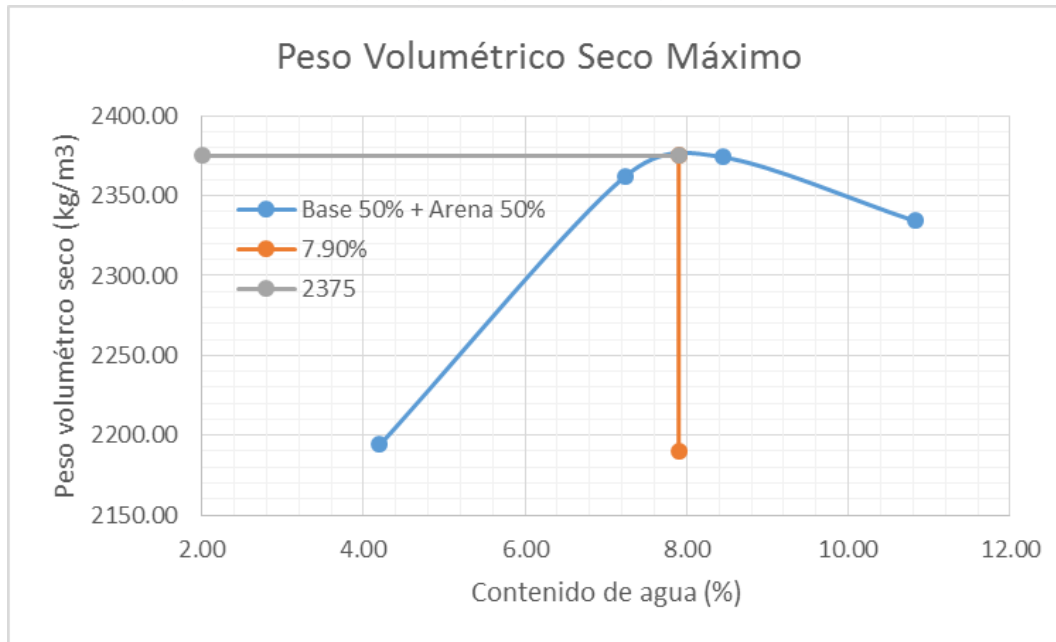


Ilustración 28. Peso volumétrico seco máximo para la mezcla I.

De acuerdo con el procedimiento de la prueba Proctor, se determina que el peso volumétrico seco máximo es de 2375 kg/m³ para la mezcla I, con un contenido óptimo de humedad de 7.9%.

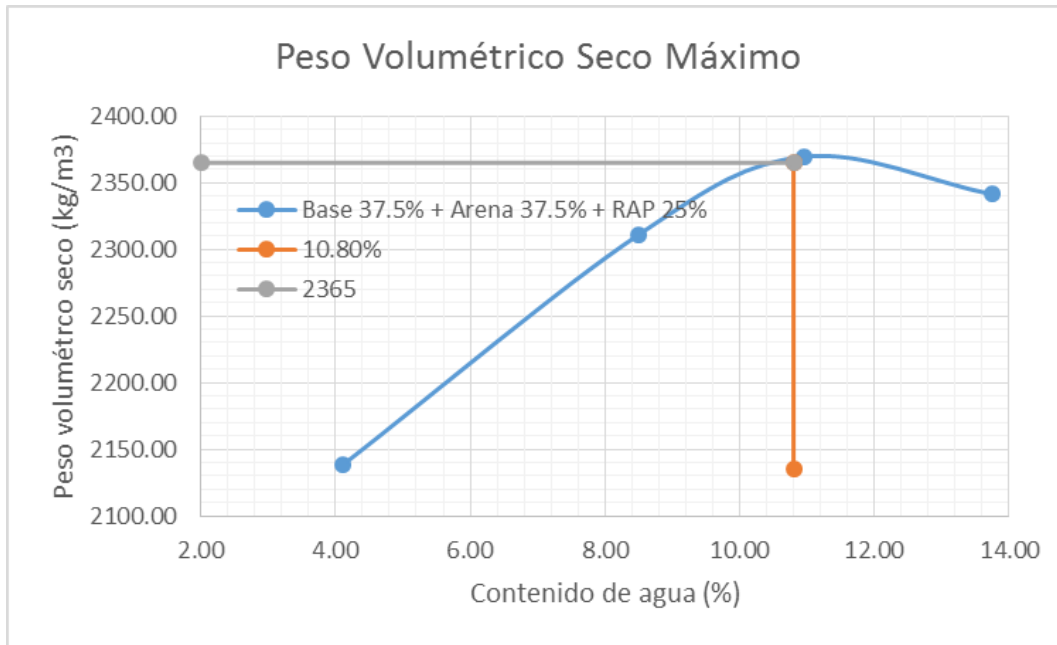


Ilustración 29. Peso volumétrico seco máximo para la mezcla II.

Para el caso de la mezcla II en la prueba Proctor, el peso volumétrico seco máximo es de 2365 kg/m³ para la mezcla I, con un contenido óptimo de humedad de 7.9%.

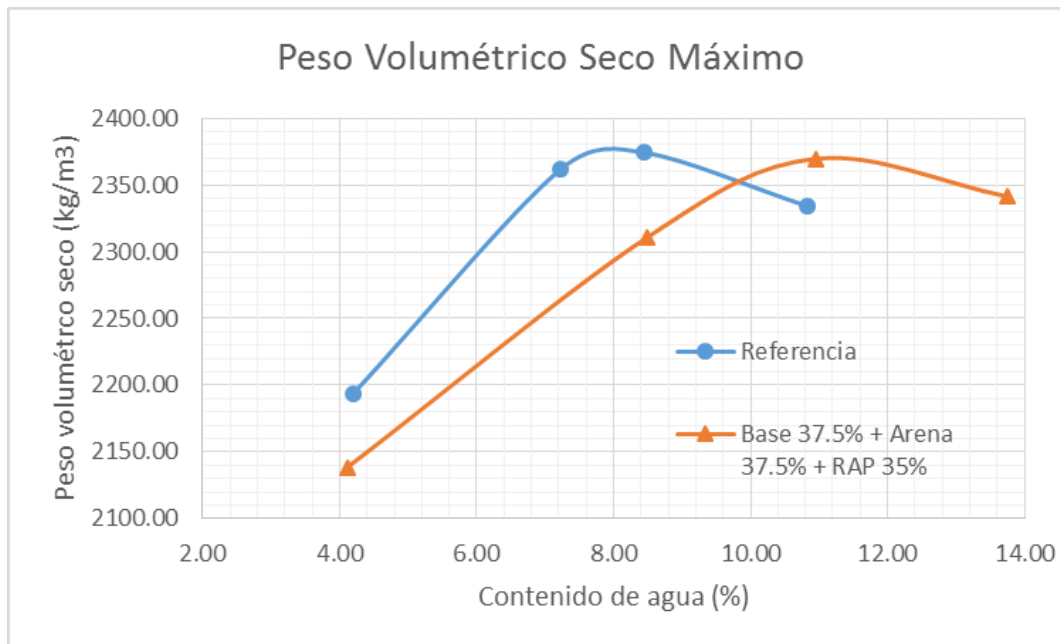


Ilustración 30. Comparación de peso volumétrico seco máximo para las dos mezclas de trabajo.

En la ilustración 24 se muestra una comparación de las curvas de peso volumétrico sexo máximo – contenido de agua de los dos grupos de mezclas de trabajo.



4.1.3 Nivel I

4.1.3.1 Resultados de prueba de Tensión Indirecta (ITS)

4.1.3.1.1 Mezcla I

La edad de 3 días es la condición normal a la que somete a prueba las mezclas, la cual consiste en 72 horas de seca en horno a 40°C, condición que fue posible cumplir debido a que los hornos son automáticos y regulan la temperatura.

En esta edad la mezcla debe de alcanzar el esfuerzo de 225 kPa, la única mezcla que se acercó de manera considerable fue la mezcla de referencia (sin filler de aportación), esto se muestra en la siguiente tabla e ilustración.

Tabla 16. Resultados de mezcla I de prueba ITS a 3 días en condición seca.

Especímen	Resistencia (kPa)			
	Referencia	Cal	CPC 20	CPC 30
1	201.53	177.69	149.07	187.23
2	187.23	172.92	163.38	149.07
3	230.13	189.14	117.58	181.51
Promedio	206.3	179.9	143.3	172.6

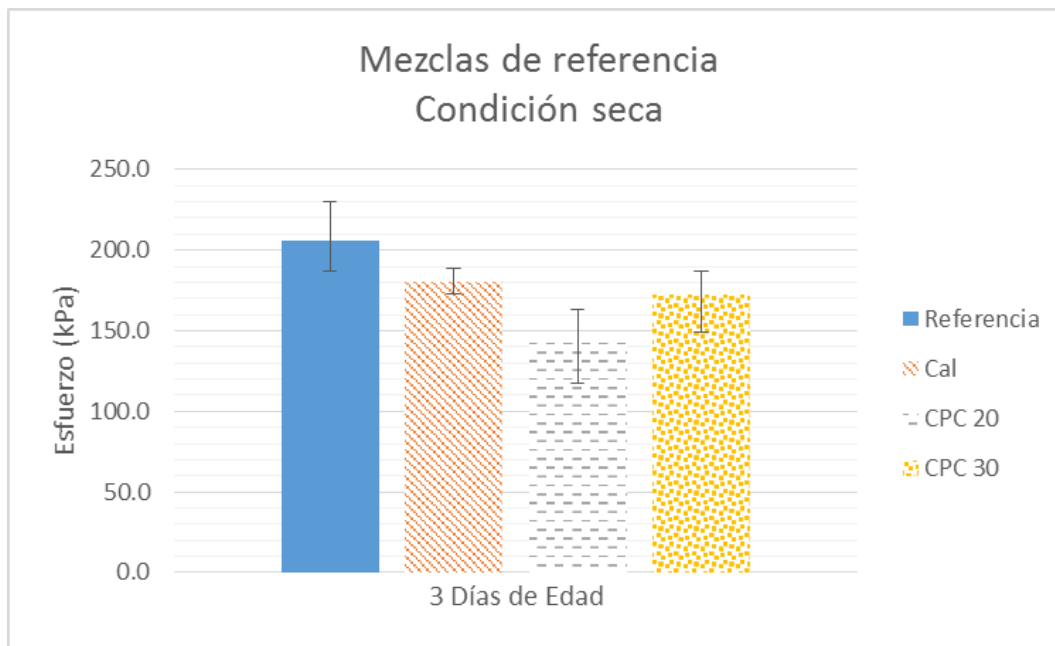


Ilustración 31. Resultados de mezcla I de prueba ITS a 3 días en condición seca.

También se analizó la condición húmeda de las probetas, las cuales deben de alcanzar al menos 100 kPa de resistencia. En este caso, a la edad de 3 días de curado, ninguna de las alternativas logró el resultado, pero las mezclas que cuentan con Cal y CPC 30 estuvieron cercanas al valor y su desempeño fue ampliamente superior al de las otras dos, a continuación se puede observar esto en la tabla e ilustración.



Tabla 17. Resultados de mezcla I de prueba ITS a 3 días en condición húmeda.

Espécimen	Resistencia (kPa)			
	Referencia	Cal	CPC 20	CPC 30
1	15.36	72.70	22.05	91.80
2	12.50	70.79	20.14	63.15
3	15.36	104.21	20.14	75.56
Promedio	14.4	82.6	20.8	76.8

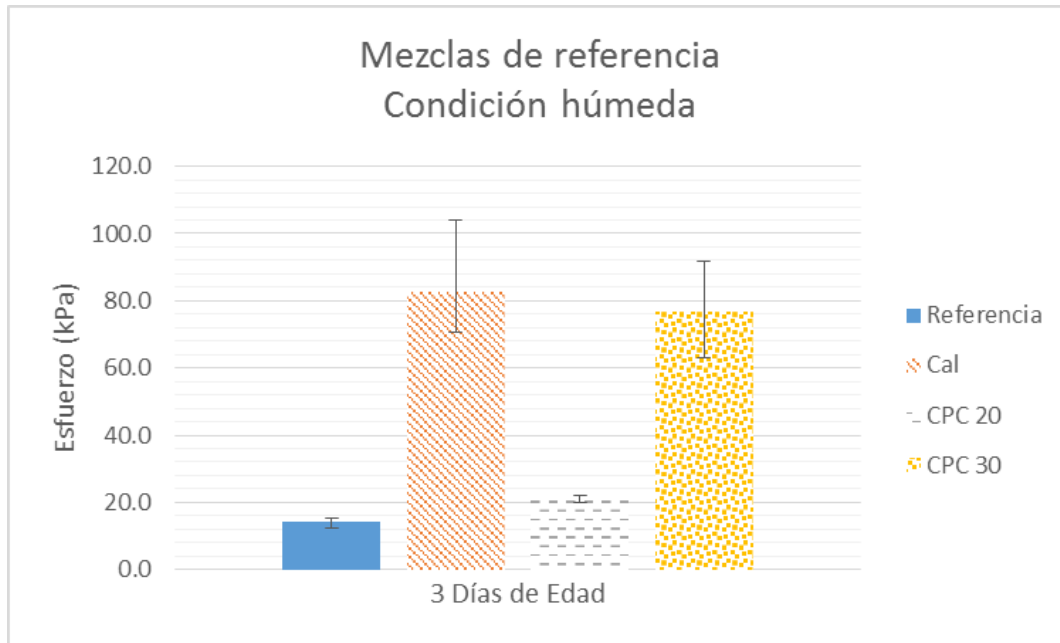


Ilustración 32. Resultados de mezcla I de prueba ITS a 3 días en condición húmeda.

Para la edad de 7 días se esperaba un incremento en las resistencias de las mezclas que cuentan con filler de aportación, esto porque la edad de curado se incrementó y las reacciones de estos compuestos (cal y cemento) podrían realizarse de mejor manera. Se muestra que casi todas las mezclas lograron la resistencia mínima de 225 kPa. Existieron algunas probetas que tuvieron una dispersión muy grande respecto a sus mezclas, como lo fue la tercera probeta de la mezcla de CPC 30, la cual hizo que no se cumpliera el parámetro de resistencia. Todos los resultados se muestran en la tabla y figura que se encuentran abajo.

Tabla 18. Resultados de mezcla I de prueba ITS a 7 días en condición seca.

Espécimen	Resistencia (kPa)			
	Referencia	Cal	CPC 20	CPC 30
1	353.92	273.01	277.77	234.90
2	317.76	263.48	263.48	211.07
3		186.28	253.00	125.21
Promedio	335.8	240.9	264.8	190.4

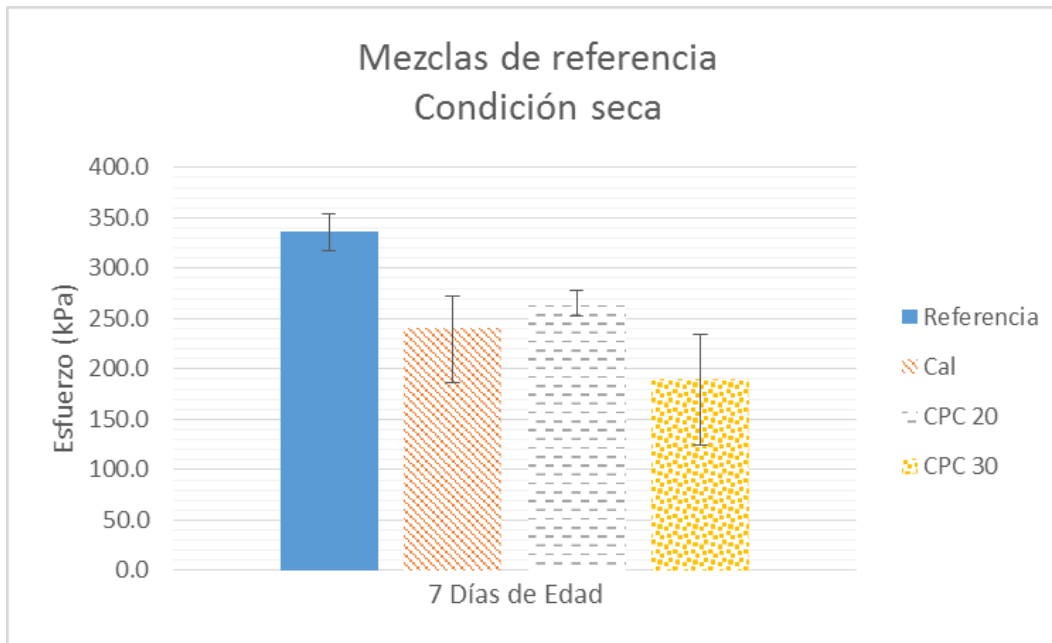


Ilustración 33. Resultados de mezcla I de prueba ITS a 7 días en condición seca.

En la condición húmeda de 7 días, se logró lo que se esperaba de esta investigación, ver que las mezclas con Cal y CPC 30 lograban la resistencia mínima de 100 kPa. Infiuye el tiempo que necesitan los materiales para que ocurra la reacción. Además, en la gráfica y tabla que se muestran a continuación, se observa que las mezclas con CPC 30 y referencia, su variación fue poca.

Tabla 19. Resultados de mezcla I de prueba ITS a 7 días en condición húmeda.

Especímen	Resistencia (kPa)			
	Referencia	Cal	CPC 20	CPC 30
1	29.70	125.21	39.26	148.12
2	25.88	120.44	49.77	134.76
3	33.52	171.02	63.15	158.61
Promedio	29.7	138.9	50.7	147.2

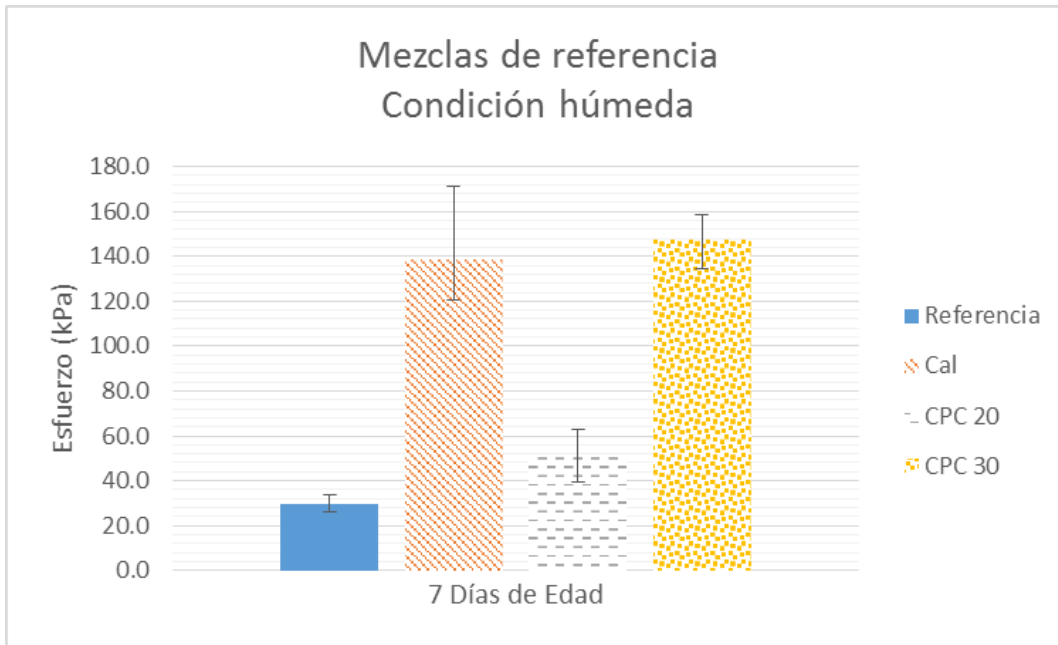


Ilustración 34. Resultados de mezcla I de prueba ITS a 7 días en condición húmeda.

A 28 días de edad, teóricamente se espera que las mezclas de CPC 20, CPC 30 y cal, alcancen su madurez de diseño, es decir, después de esta edad si existen incrementos, pero se dice que no son muy significativos. En las figuras que aquí se muestran, se observa que no se desempeñó de la manera esperada, las probetas con filler tuvieron una menor resistencia respecto a la mezcla de referencia, incluso menor que las resistencias logradas a 7 días de la misma mezcla.

Tabla 20. Resultados de mezcla I de prueba ITS a 28 días en condición seca.

Espécimen	Resistencia (kPa)			
	Referencia	Cal	CPC 20	CPC 30
1	339.65	139.53	161.48	203.44
2	235.85	140.48	155.75	159.57
3	342.51	215.83	192.95	192.95
Promedio	306.0	165.3	170.1	185.3

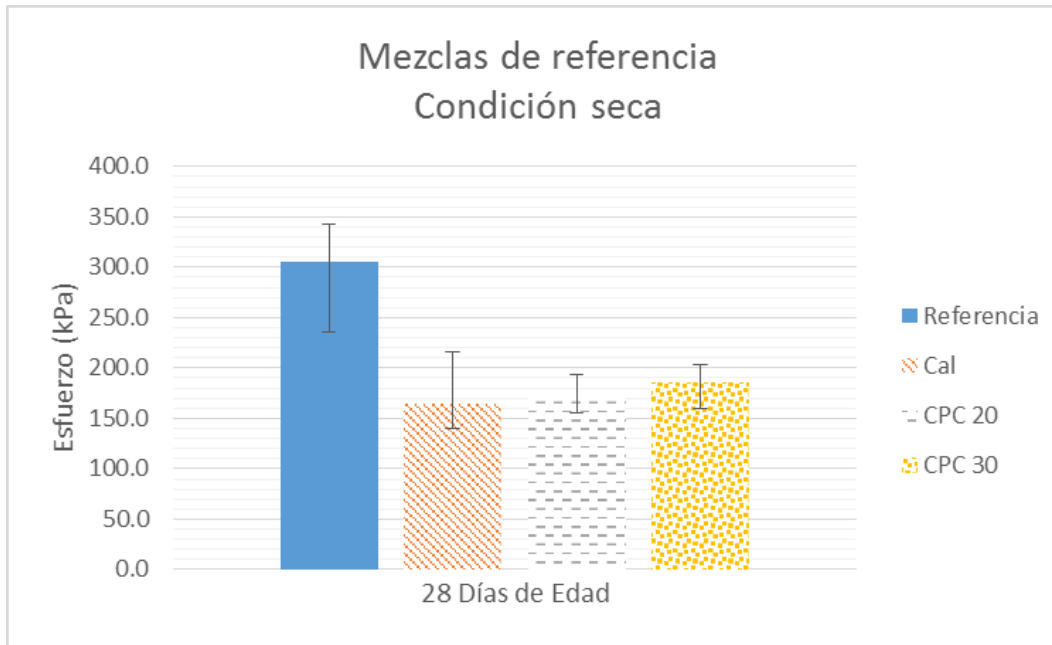


Ilustración 35. Resultados de mezcla I de prueba ITS a 28 días en condición seca.

Como en la condición seca las probetas no habían alcanzado la resistencia mínima (225 kPa) y el desempeño fue menor al de la edad de 7 días, en la condición húmeda no se esperaban resultados alentadores. En la tabla e imagen se observa que las resistencias fueron muy pobres, únicamente la resistencia de la mezcla con cal estuvo cerca de cumplir con la resistencia.

Tabla 21. Resultados de mezcla I de prueba ITS a 28 días en condición húmeda.

Espécimen	Resistencia (kPa)			
	Referencia	Cal	CPC 20	CPC 30
1	4.85	81.29	12.50	41.17
2	5.80	95.62	7.72	56.46
3	7.72	79.38	10.58	25.88
Promedio	6.1	85.4	10.3	41.2

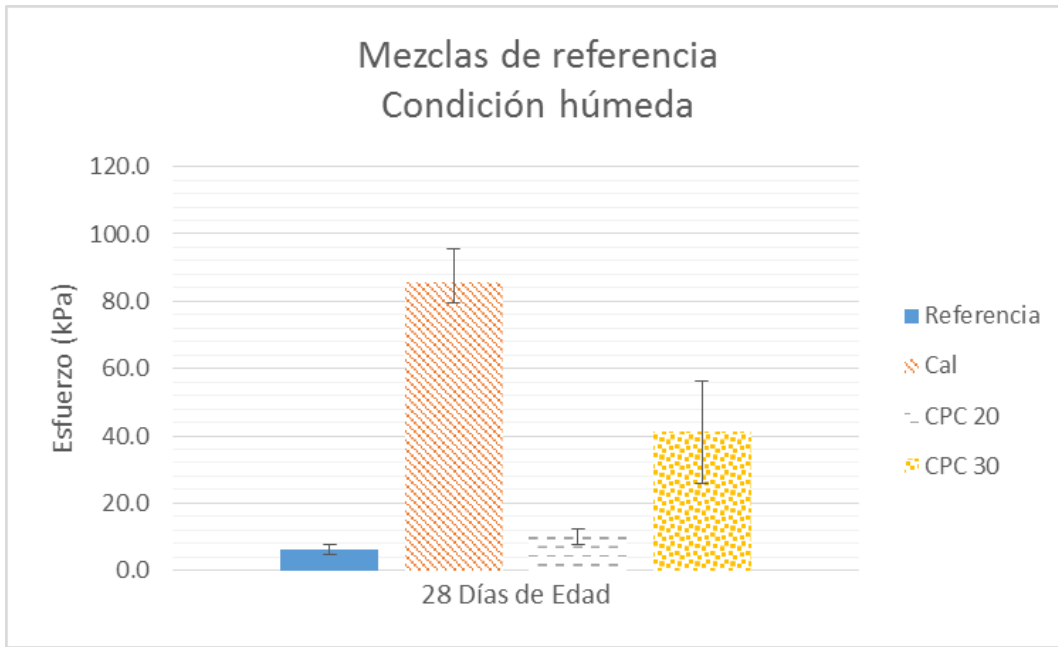


Ilustración 36. Resultados de mezcla I de prueba ITS a 28 días en condición húmeda.

En el caso de los especímenes en condición seca a 90 días de edad, únicamente la mezcla de referencia sin filler y la de cal, cumplieron con la resistencia mínima requerida de los especímenes de la mezcla I, aunque la de cal se encuentra al límite de la resistencia. La mezcla de referencia sin filler, se desempeñó de manera adecuada, aproximadamente 100 kPa de resistencia mayor al mínimo.

Tabla 22. Resultados de mezcla I de prueba ITS a 90 días en condición seca.

Especímen	Resistencia (kPa)			
	Referencia	Cal	CPC 20	CPC 30
1	298.72	213.93	144.30	233.94
2	319.66	230.13	146.21	171.02
3	334.89	245.38	190.09	211.07
Promedio	317.8	229.8	160.2	205.3

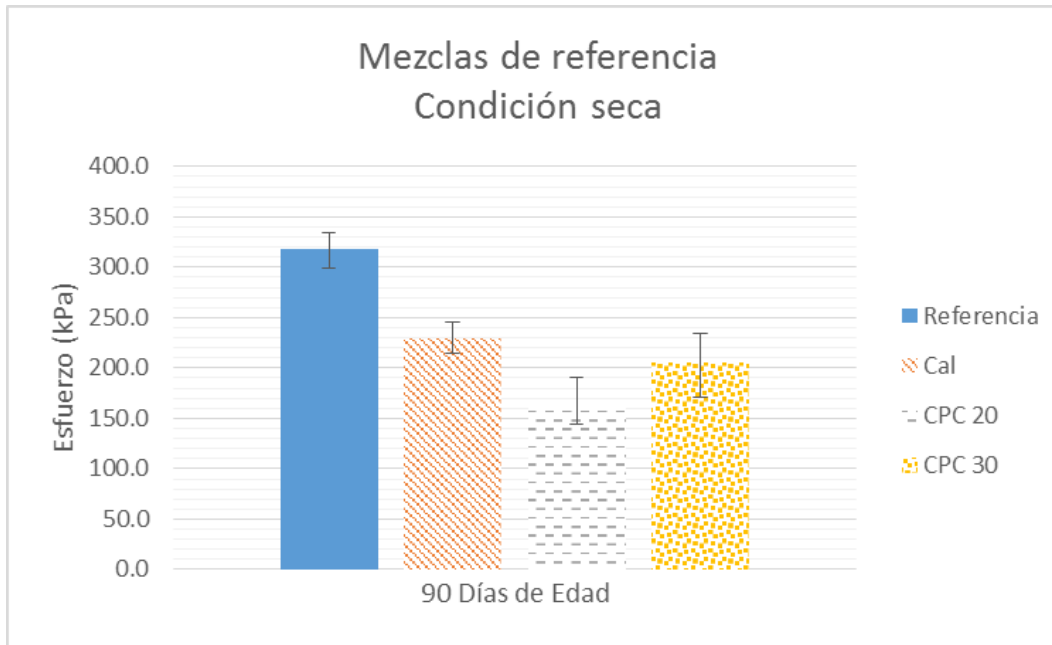


Ilustración 37. Resultados de mezcla I de prueba ITS a 90 días en condición seca.

Para la condición húmeda a 90 días de edad, ninguno de los especímenes cumplió con el requerimiento mínimo de 100 kPa de resistencia, los más cercanos de cumplir la resistencia, se tuvo en los especímenes con cal (78.7kPa).

Tabla 23. Resultados de mezcla I de prueba ITS a 90 días en condición húmeda.

Especímen	Resistencia (kPa)			
	Referencia	Cal	CPC 20	CPC 30
1	3.89	90.84	5.80	66.97
2	3.89	77.47	8.67	63.15
3	2.93	67.92	4.85	54.55
Promedio	3.6	78.7	6.4	61.6

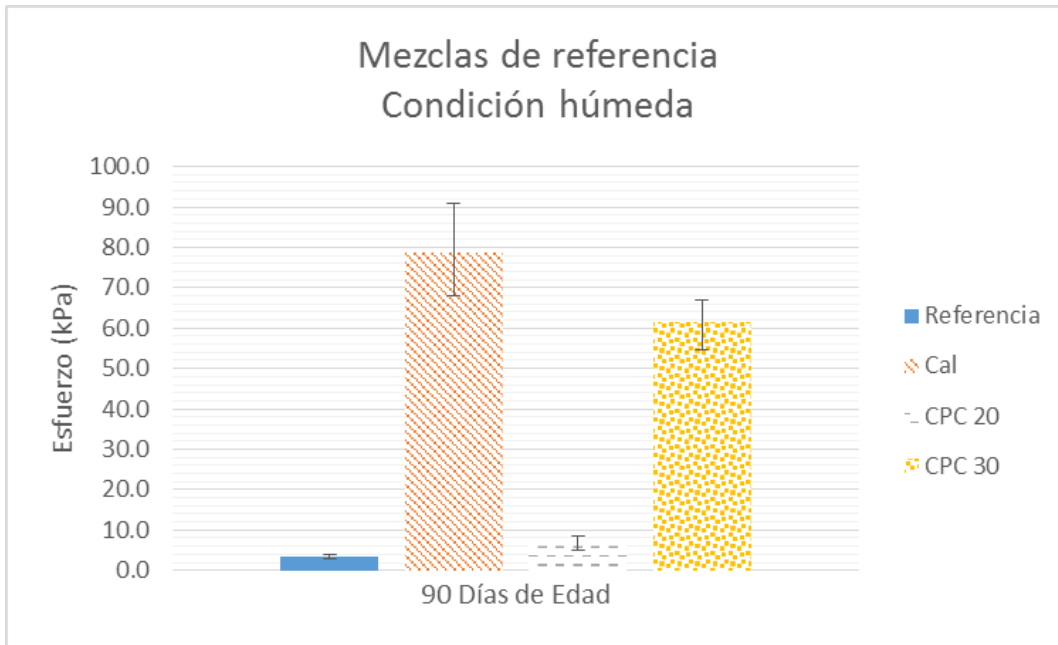


Ilustración 38. Resultados de mezcla I de prueba ITS a 90 días en condición húmeda.

4.1.3.1.2 Mezcla II

En esta investigación se deseaba conocer las diferencias entre el comportamiento de una mezcla de diseño con material virgen contra una mezcla con material reciclado, con las mismas condiciones físicas (granulometría) para poder realizar la comparación. Esta mezcla contiene agregado reciclado.

Para la edad de 3 días en condición seca, las mezclas de referencia y CPC 30 cumplieron con el requerimiento de 225 kPa de resistencia. La mezcla con CPC 30 tuvo un gran desempeño, superando con 50 kPa la resistencia mínima. Además la variación de los resultados de resistencia de la mezcla con CPC 30 tuvo una variación pequeña, esto se puede observar en los siguientes elementos gráficos.

Tabla 24. Resultados de mezcla II de prueba ITS a 3 días en condición seca.

Espécimen	Resistencia (kPa)			
	Referencia	Cal	CPC 20	CPC 30
1	237.76	211.07	152.89	268.24
2	220.60	139.53	167.20	277.77
3	240.61	172.92	192.00	282.53
Promedio	233.0	174.5	170.7	276.2

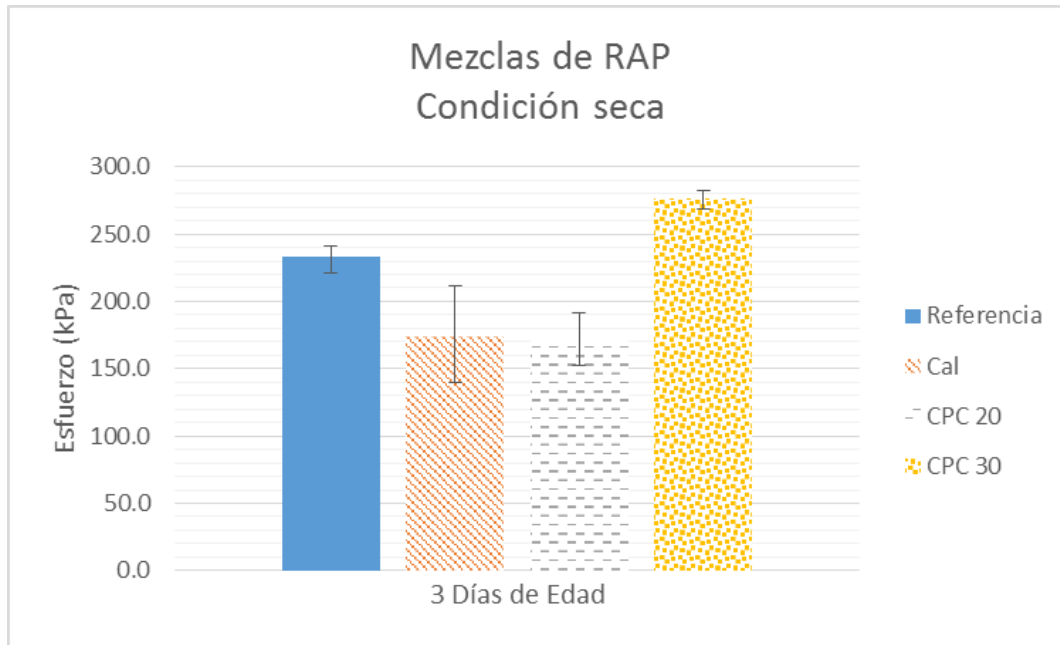


Ilustración 39. Resultados de mezcla II de prueba ITS a 3 días en condición seca.

En la condición húmeda, las mezclas al contar con RAP (asfalto en las partículas), se esperaba que las resistencias se incrementaran por la impermeabilidad que brinda el asfalto. Las resistencias se incrementaron y las variaciones fueron muy bajas, de todas las alternativas en general, y las mezclas de cal y CPC 30 cumplieron con la expectativa, su resistencia fue mayor a la mínima (100 kPa). A continuación se presentan los datos en una tabla y figura.

Tabla 25. Resultados de mezcla II de prueba ITS a 3 días en condición húmeda.

Espécimen	Resistencia (kPa)			
	Referencia	Cal	CPC 20	CPC 30
1	18.23	120.44	42.13	163.38
2	18.23	108.03	37.35	177.69
3	23.97	106.12	41.17	187.23
Promedio	20.1	111.5	40.2	176.1

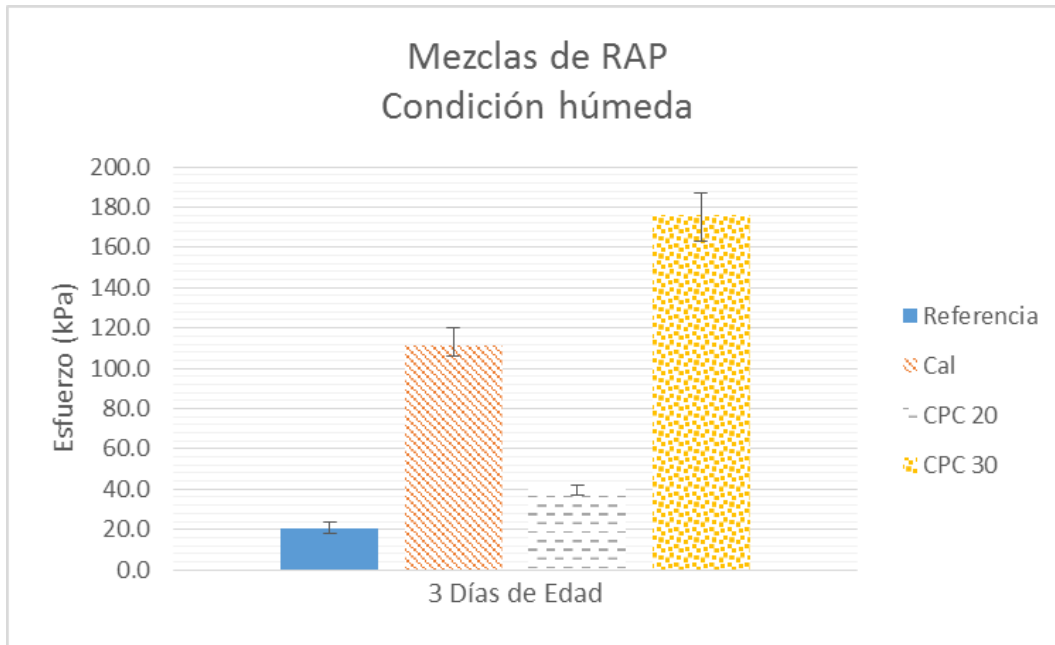


Ilustración 40. Resultados de mezcla II de prueba ITS a 3 días en condición húmeda.

Como se dieron los resultados a 3 días en la condición seca, los resultados de la edad de 7 días se esperaban que cumplieran con las resistencias mínimas, 225 kPa y 100 kPa, para condición seca y húmeda respectivamente.

En la condición seca, a excepción de la gran variación que existió en una probeta de CPC 20 con filler, las resistencias alcanzadas de con cal y CPC 30 cumplieron, las probetas de referencia quedaron muy cerca de la resistencia. Los resultados se muestran a continuación.

Tabla 26. Resultados de mezcla II de prueba ITS a 7 días en condición seca.

Espécimen	Resistencia (kPa)			
	Referencia	Cal	CPC 20	CPC 30
1	222.51	307.29	234.90	232.99
2	191.04	237.76	233.94	272.05
3	206.30	212.97	115.67	249.19
Promedio	206.6	252.7	194.8	251.4

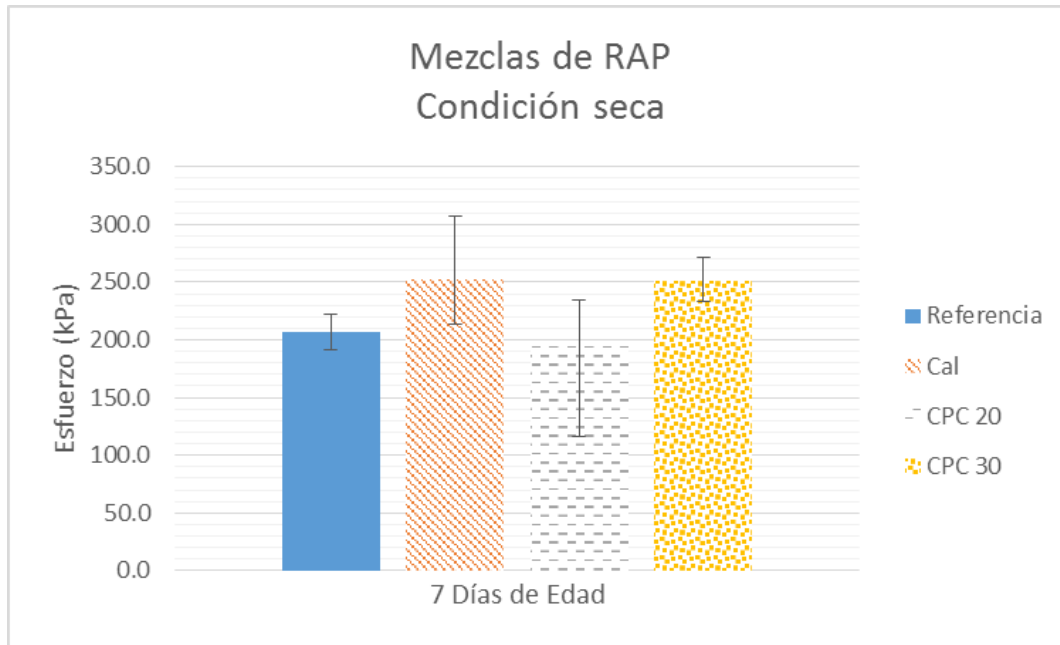


Ilustración 41. Resultados de mezcla II de prueba ITS a 7 días en condición seca.

El comportamiento se cumplió en las mezclas con cal y CPC 30 para la condición húmeda a 7 días de curado.

La mezcla de referencia no es posible que logre este resultado, debido a la falta de cohesión (Delgado Alamilla, García Hernández, & Campos Hernández, Diseño de bases estabilizadas con asfalto espumado, 2017). Enseguida se pueden observar los resultados obtenidos en la tabla e ilustración.

Tabla 27. Resultados de mezcla II de prueba ITS a 7 días en condición húmeda.

Espécimen	Resistencia (kPa)			
	Referencia	Cal	CPC 20	CPC 30
1	29.70	125.21	45.95	105.17
2	33.52	149.07	43.08	95.62
3	15.36	153.84	48.81	110.90
Promedio	26.2	142.7	45.9	103.9

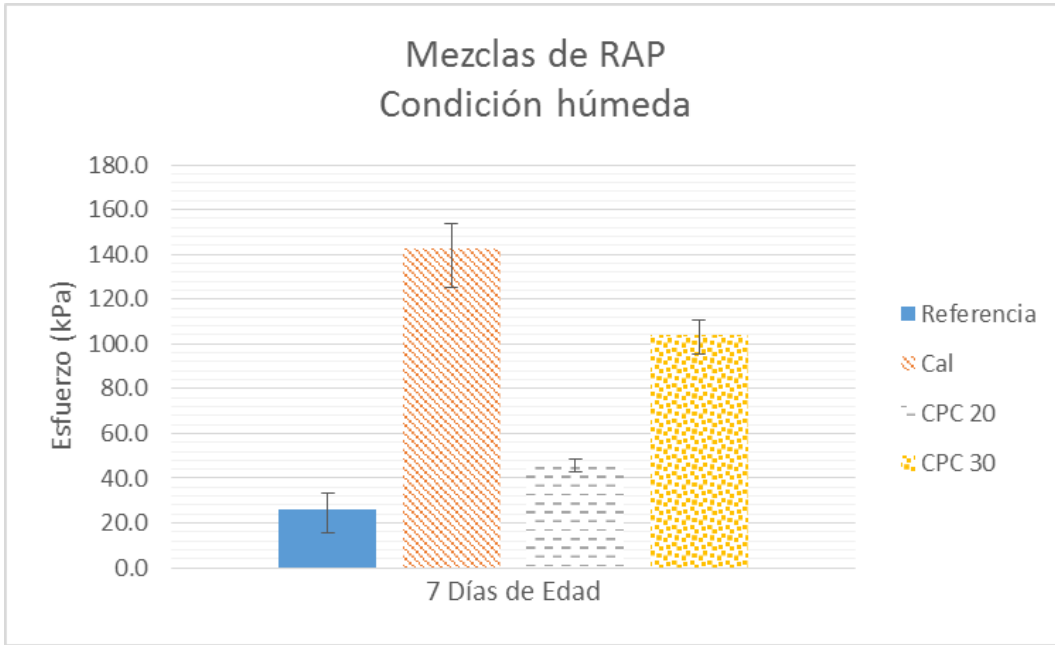


Ilustración 42. Resultados de mezcla II de prueba ITS a 7 días en condición húmeda.

Para la edad de 28 días en condición seca, todas las mezclas y todas las probetas cumplieron con la resistencia mínima, esto se observa en la siguiente tabla y gráfica. La mezcla de referencia tuvo un resultado de resistencia de casi el doble de la resistencia requerida.

Tabla 28. Resultados de mezcla II de prueba ITS a 28 días en condición seca.

Espécimen	Resistencia (kPa)			
	Referencia	Cal	CPC 20	CPC 30
1	368.19	290.15	266.34	273.01
2	434.75	244.43	227.27	287.29
3	347.26	353.92	253.95	245.38
Promedio	383.4	296.2	249.2	268.6

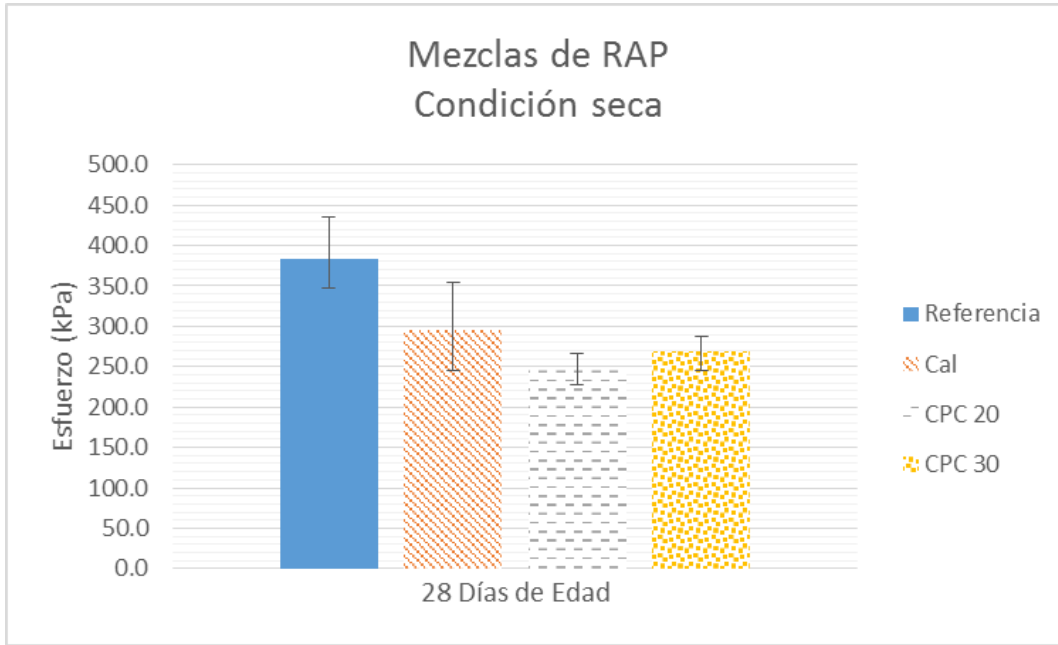


Ilustración 43. Resultados de mezcla II de prueba ITS a 28 días en condición seca.

Aunque para la condición seca a esta edad de 28 días la resistencia mínima se logró en todas las probetas, para la condición húmeda solamente los especímenes con cal lograron la resistencia mínima. La variación en las probetas con cal es poca, todo esto se muestra en los siguientes apoyos visuales.

Tabla 29. Resultados de mezcla II de prueba ITS a 28 días en condición húmeda.

Especímen	Resistencia (kPa)			
	Referencia	Cal	CPC 20	CPC 30
1	10.58	158.61	27.79	50.73
2	20.14	144.30	29.70	64.10
3	12.50	143.35	34.48	81.29
Promedio	14.4	148.8	30.7	65.4

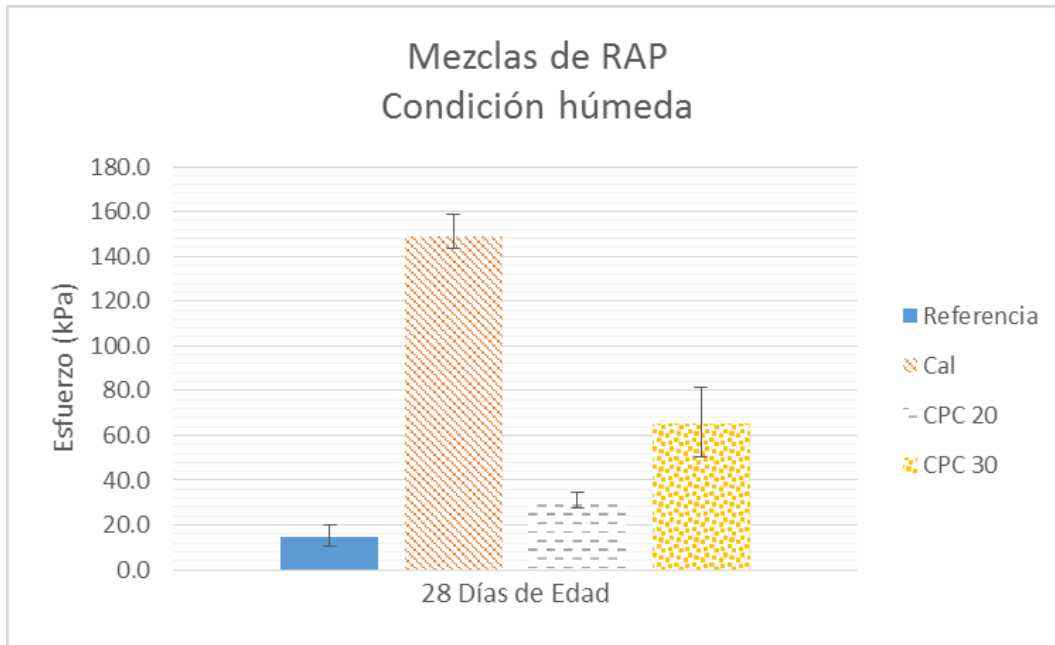


Ilustración 44. Resultados de mezcla II de prueba ITS a 28 días en condición húmeda.

A 90 días de edad en la condición seca, la mezcla de referencia sin filler de aportación fue la única que logró la resistencia mínima 225 kPa, se alcanzó 290.1 kPa de resistencia. Las mezclas de cal y CPC 30 tuvieron un desempeño muy cercano al aceptable, con 202.2 kPa y 222.8 kPa, respectivamente.

Tabla 30. Resultados de mezcla II de prueba ITS a 90 días en condición seca.

Espécimen	Resistencia (kPa)			
	Referencia	Cal	CPC 20	CPC 30
1	308.24	260.62	150.98	220.60
2	266.34	177.69	165.29	234.90
3	295.86	168.15	188.18	212.97
Promedio	290.1	202.2	168.2	222.8

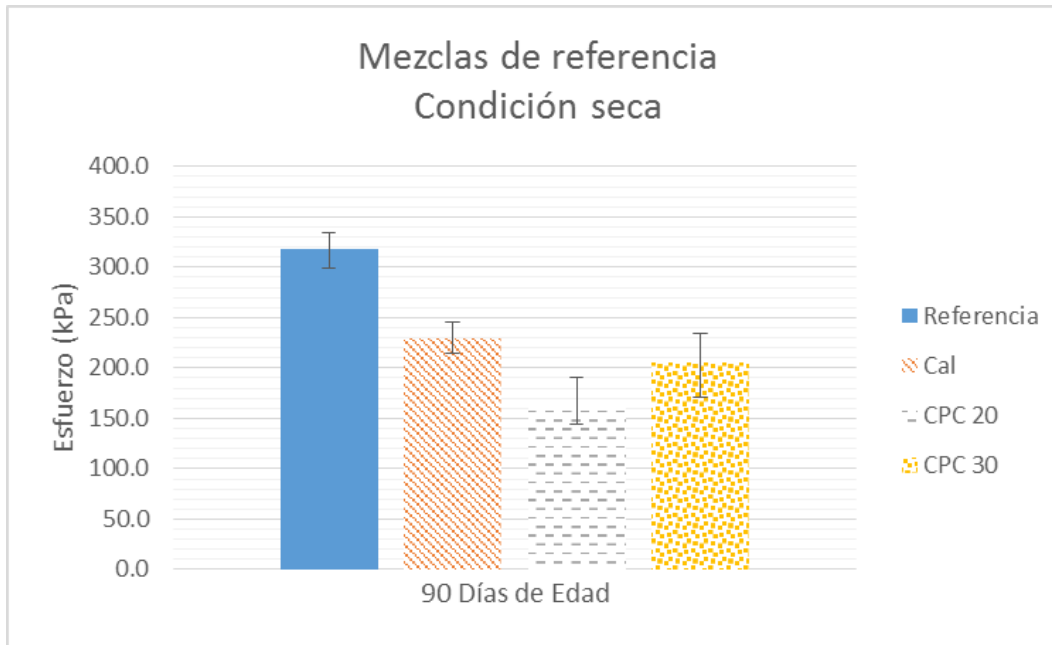


Ilustración 45. Resultados de mezcla II de prueba ITS a 90 días en condición seca.

Por otra parte, a la misma de edad de 90 días, pero en condición húmeda, lo únicamente la mezcla con CPC 30 se comporta con una resistencia aceptable, con 111.8 kPa, mayor a los 100 kPa de la especificación. La mezcla con cal, se encuentra muy cerca del valor requerido, con 97.8 kPa.

Tabla 31. Resultados de mezcla II de prueba ITS a 90 días en condición húmeda.

Espécimen	Resistencia (kPa)			
	Referencia	Cal	CPC 20	CPC 30
1	8.67	108.03	19.19	101.35
2	9.63	96.57	14.41	120.44
3	8.67	88.93	34.48	113.76
Promedio	9.0	97.8	22.7	111.8

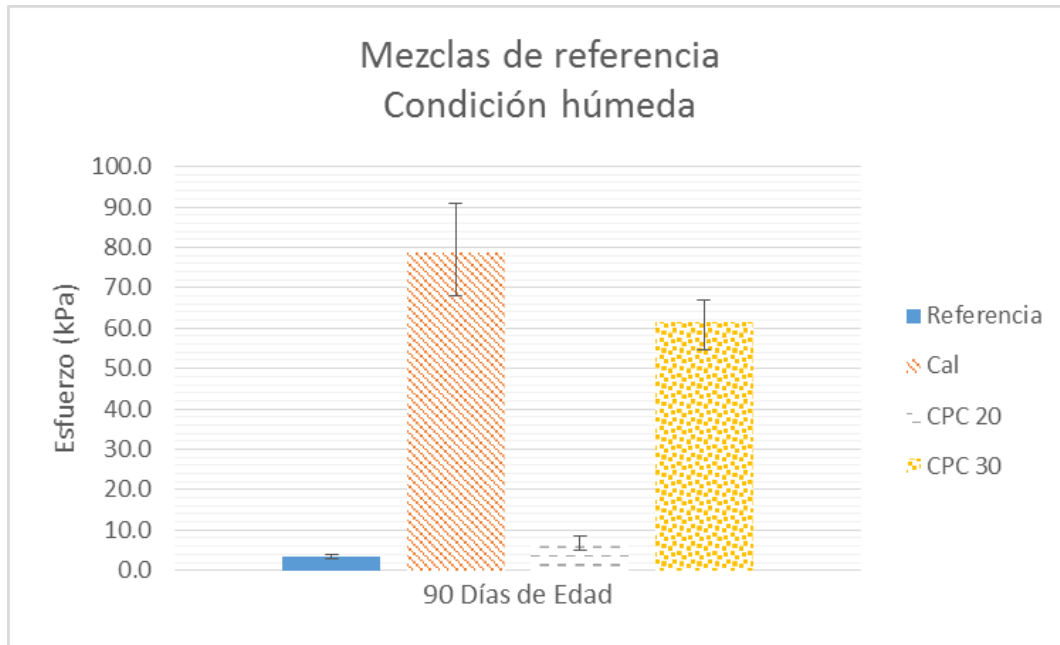


Ilustración 46. Resultados de mezcla II de prueba ITS a 90 días en condición húmeda.

4.1.3.1.3 Evolución de los esfuerzos con el tiempo

Una manera más fácil de asimilar el desarrollo de los datos, es mostrándolos en una gráfica que contrasta las resistencias alcanzadas y en las edades.

En el ensayo en seco, se observa que la tendencia de 3 a 7 días, a excepción de la mezcla de RAP con CPC 30, las resistencias incrementaron conforme la edad. Existió un decrecimiento de la resistencia de las mezclas sin RAP entre los lapsos de 7 a 28 días y 28 a 90 días, pero contrario a esto, se presentó un incremento en la resistencia de las mezclas con RAP para los mismos lapsos.

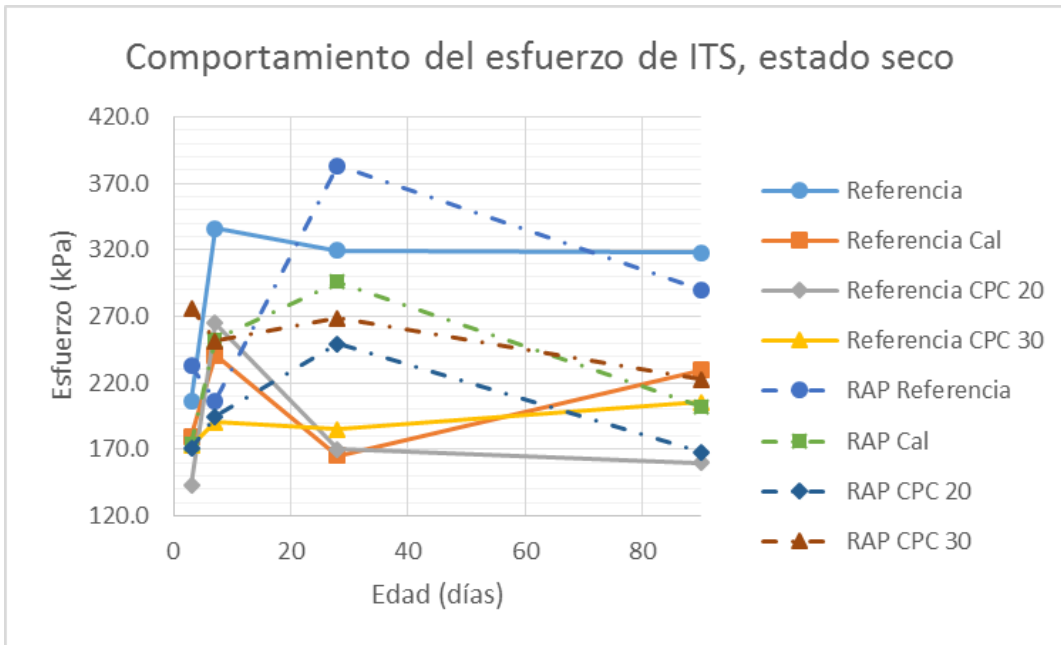


Ilustración 47. Evolución con el tiempo del comportamiento del esfuerzo en estado en seco.

En el caso del estado húmedo, las resistencias de 3 a 7 días de edad incrementaron, solamente para la mezcla de RAP con CPC 30 no fue de esta manera. La tendencia fue la disminución de la resistencia de las mezclas de 7 a 28 días, exclusive la mezcla de RAP con cal. A excepción de las mezclas con CPC 30 (referencia y con RAP), para la edad de 90 días, las mezclas disminuyeron su resistencia.

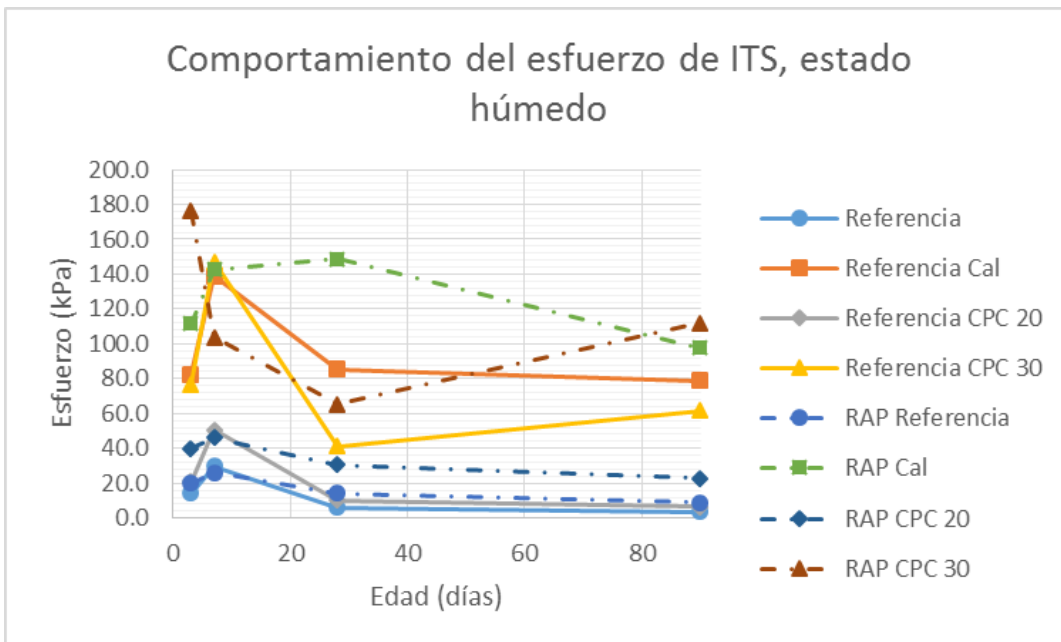


Ilustración 48. Evolución con el tiempo del comportamiento del esfuerzo en estado en húmedo.



4.1.3.2 Susceptibilidad a la humedad (TSR)

Para que las mezclas tengan un buen desempeño ante los daños causados por la humedad, los resultados del ensayo en húmedo deben de contar con un 75% de la resistencia en seco.

4.1.3.2.1 Mezcla I

Para el caso de la edad de 3 días, ninguna de las mezclas cumplió con esto, ni siquiera estuvieron cerca de cumplirlo. A continuación se muestran los datos en la tabla e ilustración.

Tabla 32. Resultados de mezcla I de TSR a 3 días.

TSR	Referencia	Cal	CPC 20	CPC 30
	7.0%	45.9%	14.5%	44.5%

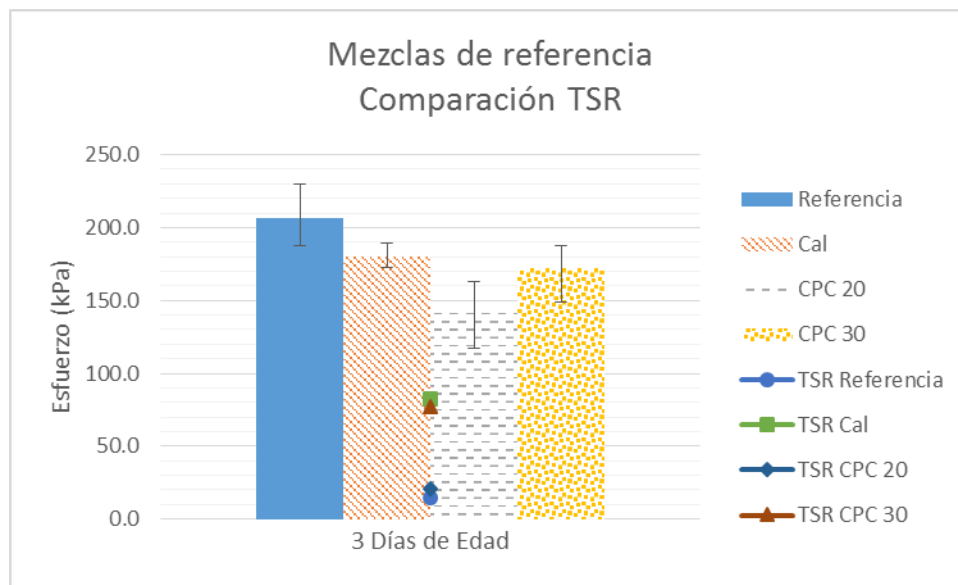


Ilustración 49. Resultados de mezcla I de TSR a 3 días.

En la edad de 7 días, una mezcla logró cumplir con el criterio, la mezcla de CPC 30 alcanzó 77.3% de la resistencia en seco. Se pueden observar los resultados en la siguiente tabla y gráfica.

Tabla 33. Resultados de mezcla I de TSR a 7 días.

TSR	Referencia	Cal	CPC 20	CPC 30
	8.8%	57.6%	19.2%	77.3%

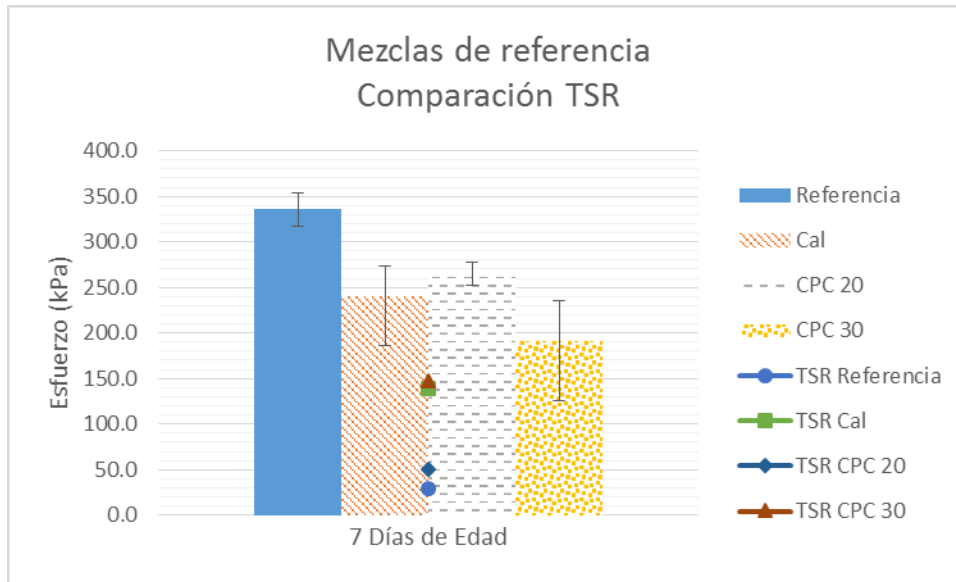


Ilustración 50. Resultados de mezcla I de TSR a 7 días.

A 28 días de edad, ninguna de las mezclas logró alcanzar la relación de resistencia necesaria. Este análisis se debe de tomar con cautela, esto porque la mezcla con cal estuvo cerca de los 100 kPa de resistencia en condición húmeda (85.4 kPa), pero su desempeño en seco (165.3 kPa) fue menor al esperado. Esto se puede apreciar en la tabla e ilustración que se muestran a continuación.

Tabla 34. Resultados de mezcla I de TSR a 28 días.

TSR	Referencia	Cal	CPC 20	CPC 30
	2.0%	51.7%	6.0%	22.2%

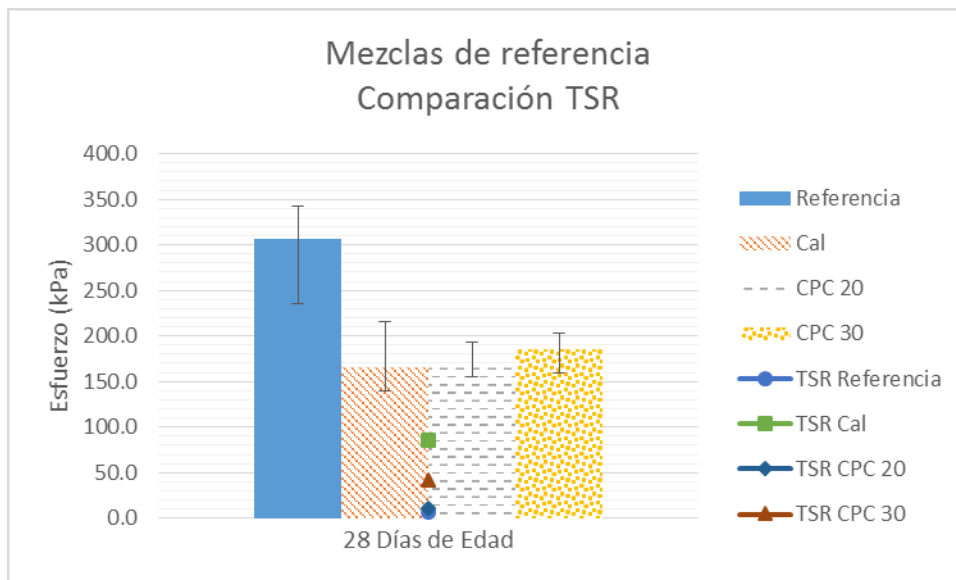


Ilustración 51. Resultados de mezcla I de TSR a 28 días.



Para la última edad (90 días), ninguna de las mezclas estuvo cerca de cumplir con el 75%, ni siquiera a la mitad de este valor. La mezcla con cal, es la que tuvo un mejor desempeño en el TSR, con 34.5%, siendo un valor muy bajo.

Tabla 35. Resultados de mezcla I de TSR a 90 días.

TSR	Referencia	Cal	CPC 20	CPC 30
	1.1%	34.3%	4.0%	30.0%

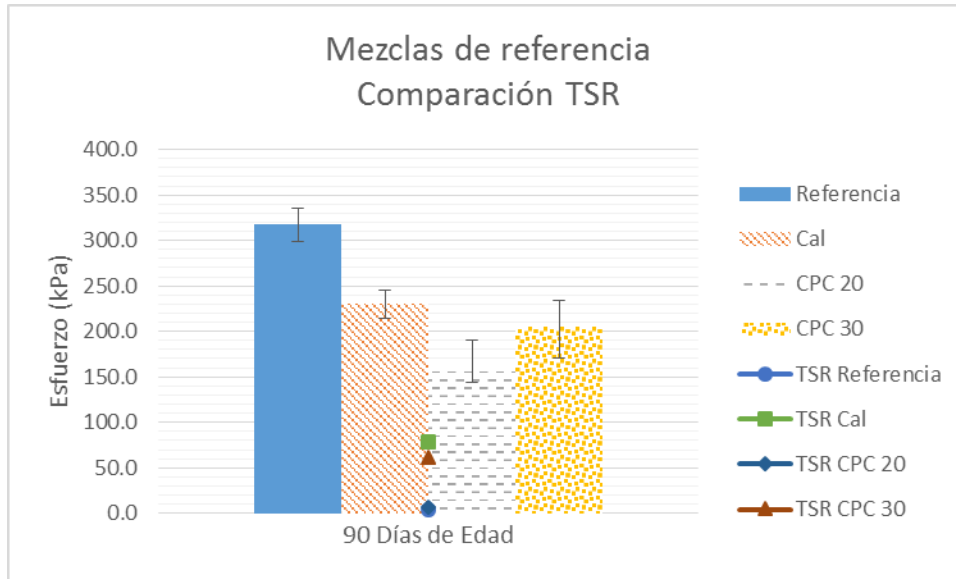


Ilustración 52. Resultados de mezcla I de TSR a 90 días.



4.1.3.2.2 Mezcla II

Las resistencias retenidas a 3 días no se lograron por parte de todas las mezclas, pero las mezclas de cal y CPC 30 sí lograron una resistencia mayor a 100 kPa en húmedo. Influye de manera importante la resistencia lograda en estado seco, la cual fue muy elevada en el caso de la mezcla de CPC 30. A continuación se muestran unos apoyos (tabla e ilustración) para análisis de los resultados.

Tabla 36. Resultados de mezcla II de TSR a 3 días.

TSR	Referencia	Cal	CPC 20	CPC 30
	8.6%	63.9%	23.6%	63.8%

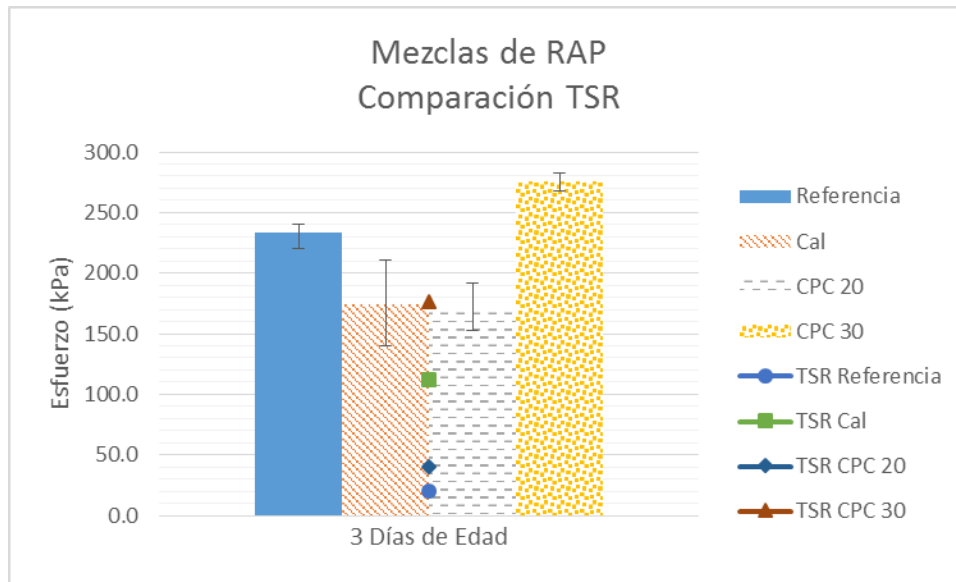


Ilustración 53. Resultados de mezcla II de TSR a 3 días.

Debido a que a los 3 días de edad, los resultados estuvieron cercanos, para los 7 días se esperaba lo mismo, pero este no fue el caso. Ninguna de las mezclas estuvo cercano al comportamiento esperado de TSR (75%), siendo la alternativa con cal como filler la que obtuvo el mejor resultado con un 56.5%. De nueva cuenta las mezclas con cal y CPC 30 lograron una resistencia mayor a 100 kPa en condición húmeda. La tabla y gráfica de los resultados alcanzados se muestran debajo de este párrafo.

Tabla 37. Resultados de mezcla II de TSR a 7 días.

TSR	Referencia	Cal	CPC 20	CPC 30
	12.7%	56.5%	23.6%	41.3%

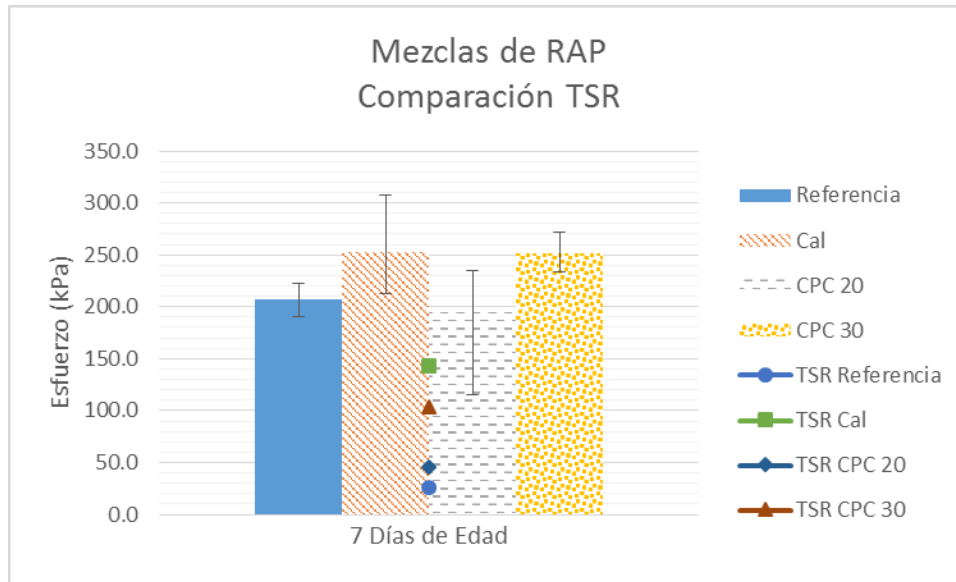


Ilustración 54. Resultados de mezcla II de TSR a 7 días.

En la edad de 28 días tampoco se logró alcanzar el índice de tensión retenida, siendo la mezcla con cal como filler la que estuvo más cerca con un 50.2%. Solamente la alternativa que cuenta con cal alcanzó los 100 kPa de resistencia en condición húmeda (148.8 kPa). Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla e ilustración.

Tabla 38. Resultados de mezcla I de TSR a 28 días.

TSR	Referencia	Cal	CPC 20	CPC 30
	3.8%	50.2%	12.3%	24.3%

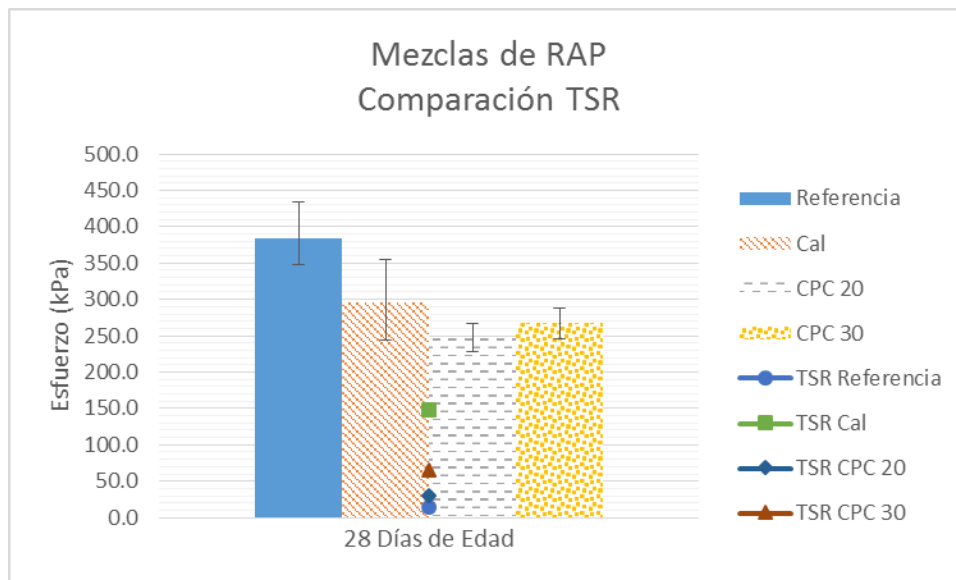


Ilustración 55. Resultados de mezcla II de TSR a 28 días.



Para el caso de la mezcla II, a la edad de 90 días de TSR, ninguna de las mezclas alcanzó el valor de aceptación, siendo las mezclas con CPC 30 y Cal las que contaron con el mejor desempeño, con un 50.2% y 48.4% respectivamente. Se destaca la baja variación de resultados en la mezcla de CPC 30.

Tabla 39. Resultados de mezcla II de TSR a 90 días.

TSR	Referencia	Cal	CPC 20	CPC 30
	3.1%	48.4%	13.5%	50.2%

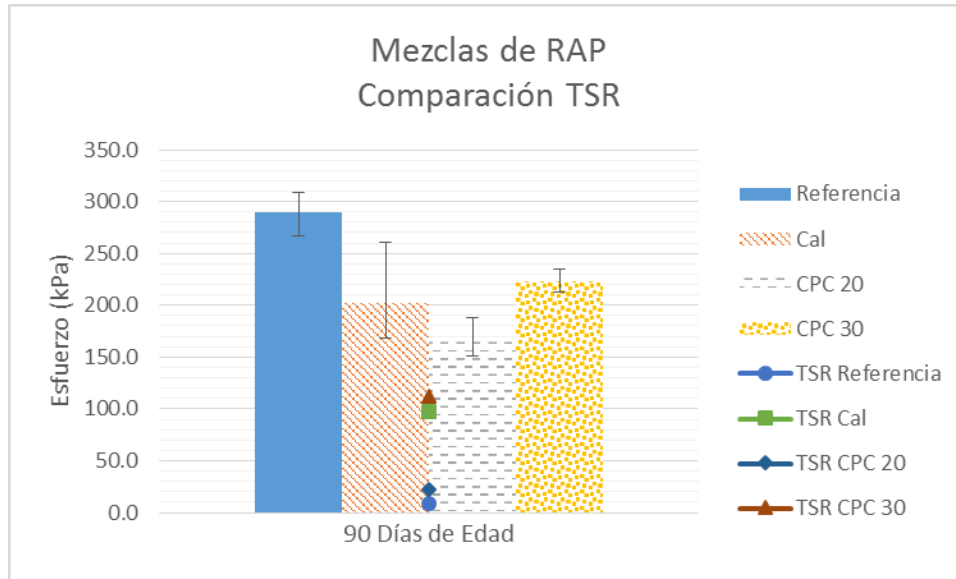


Ilustración 56. Resultados de mezcla II de TSR a 90 días.

4.1.3.2.3 Evolución del TSR con el tiempo

Al analizar los resultados obtenidos de esta manera, es posible encontrar que el desempeño de la tensión retenida fue disminuyendo con el paso de la edad, excluyendo las mezclas de agregado virgen con CPC 20 y con CPC 30, estas incrementaron su índice de 3 a 7 días. De todas las edades y mezclas, solamente en un caso se logró el valor de resistencia retenida, a los 7 días con agregado virgen y CPC 30 como filler. Los resultados se pueden observar en la siguiente gráfica.

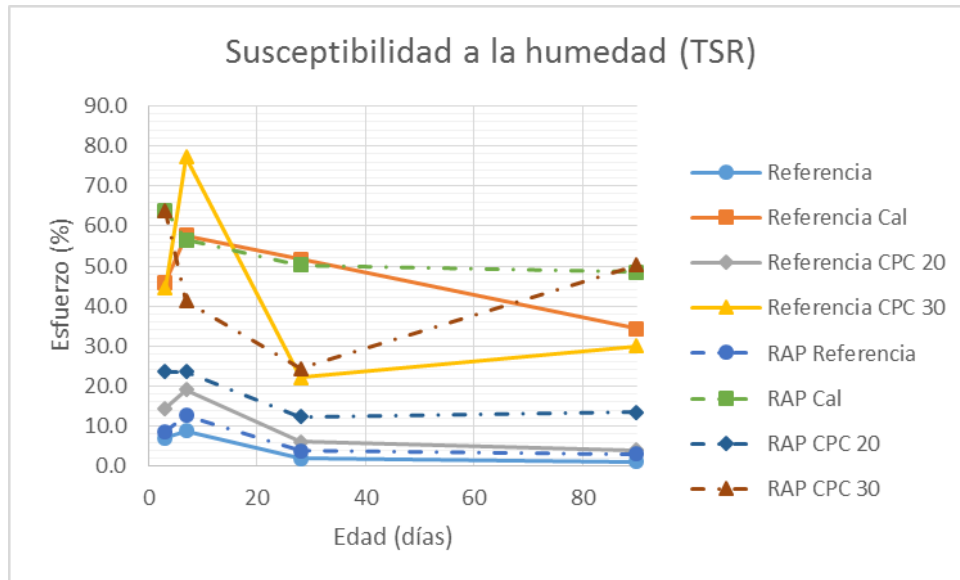


Ilustración 57. Evolución con el tiempo del TSR.

La prueba triaxial se realizó a las 4 mezclas que tuvieron mejor desempeño en el nivel I de diseño, debido a que estas tienen un mayor impacto e interés en las propiedades específicas de un suelo, como lo son la cohesión (c) y el ángulo de fricción (ϕ), parámetros obtenidos del ensayo triaxial.



4.1.3.2.4 Determinación de propiedades mecánicas: Pruebas Triaxiales

Las 4 mezclas que tuvieron el mejor resultado en la prueba de tensión indirecta, son las que se elaboraron para este prueba, siendo las siguientes mezclas: **Base 50% + Arena 50% con cal**, **Base 50% + Arena 50% con CPC 30**, **Base 37.5% + Arena 37.5% + RAP 25% con cal** y **Base 37.5% + Arena 37.5% + RAP 25% con CPC 30**. En las ilustraciones que se muestran debajo, observan los resultados obtenidos.

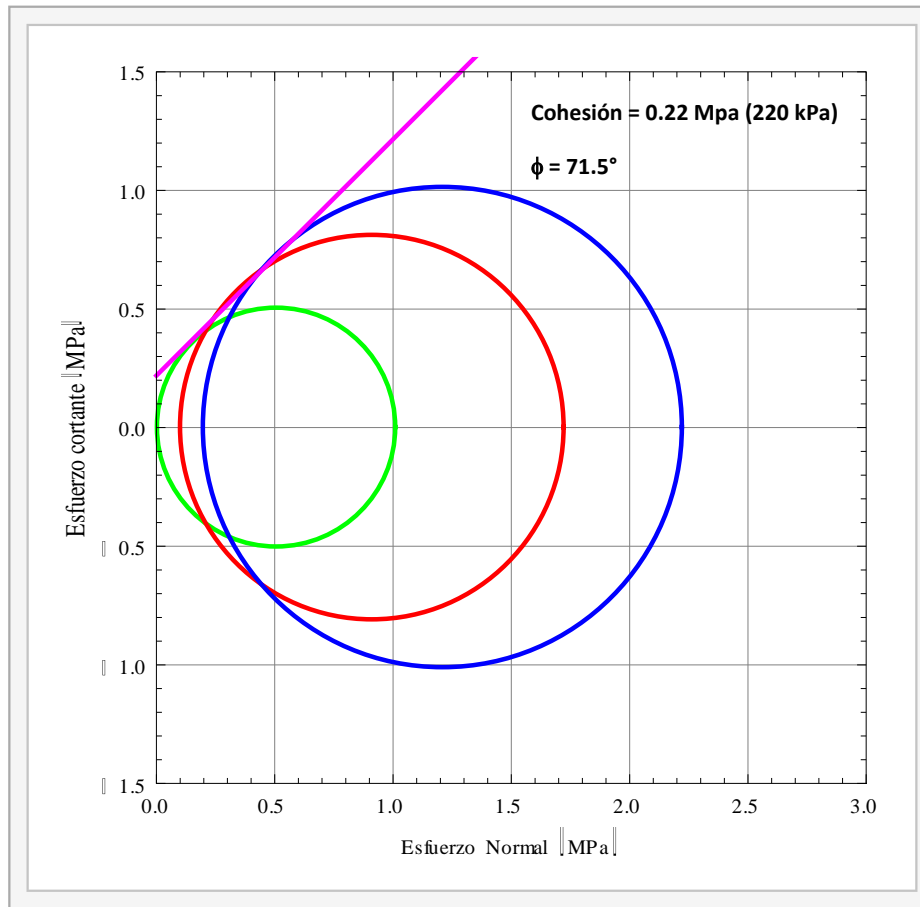


Ilustración 58. Resultados de prueba triaxial de la mezcla I con cal como filler.

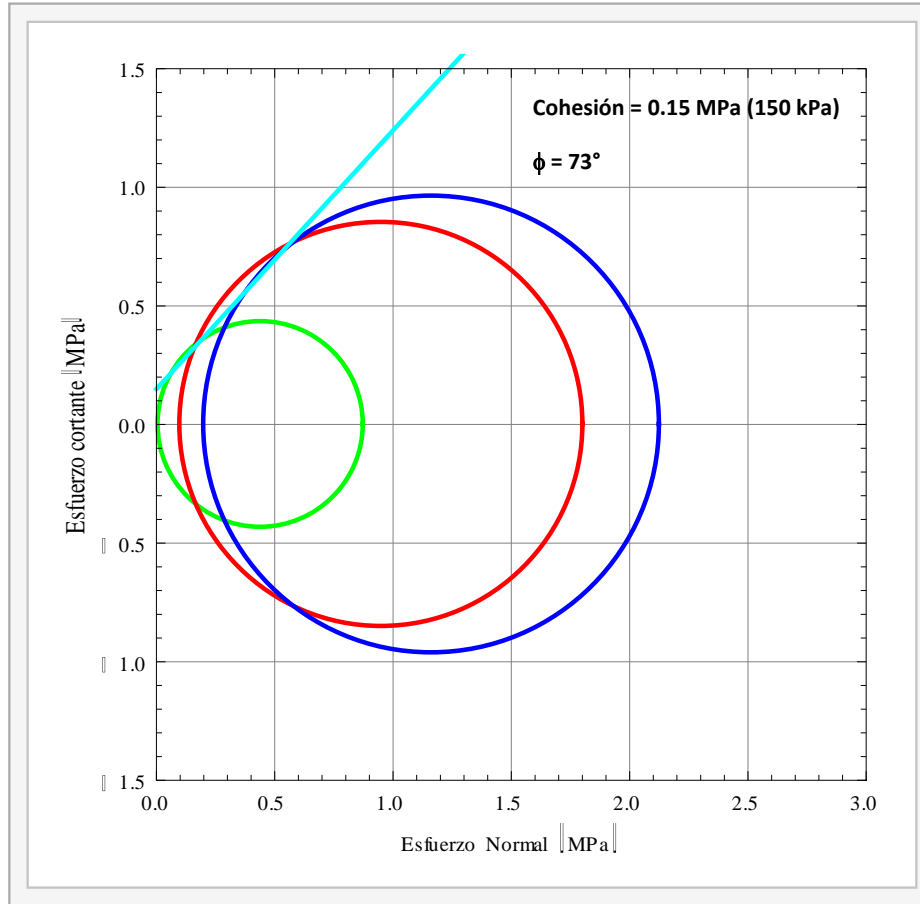


Ilustración 59. Resultados de prueba triaxial de la mezcla I con CPC-30 como filler.

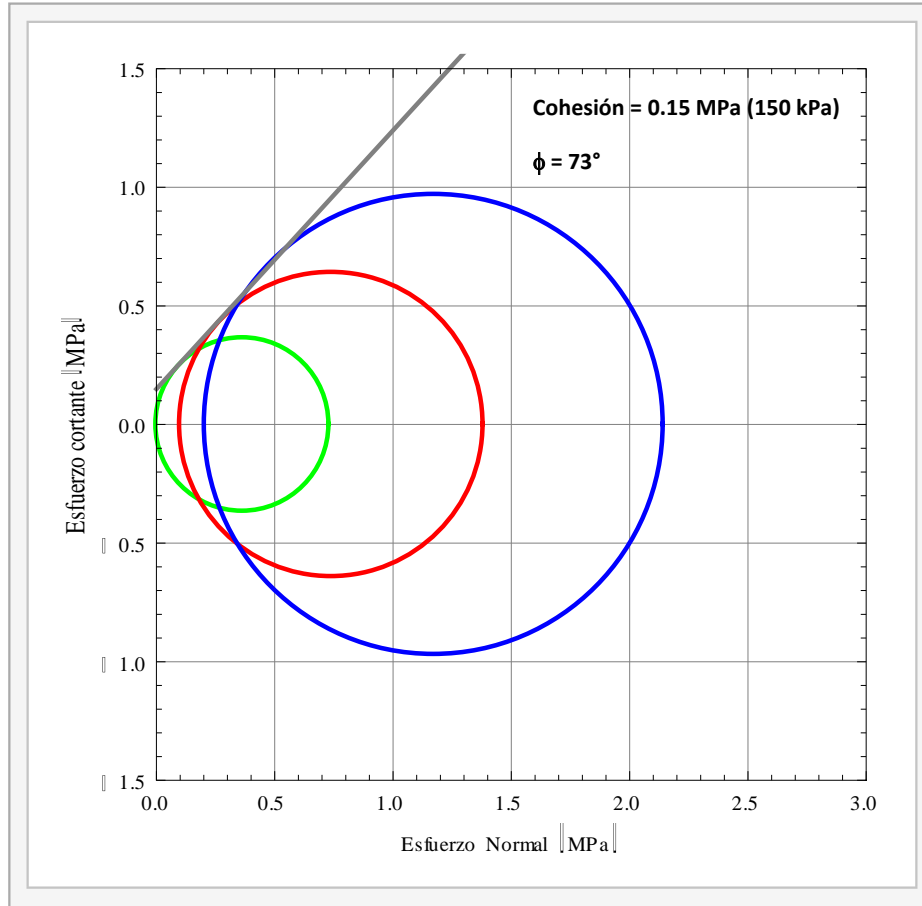


Ilustración 60. Resultados de prueba triaxial de la mezcla II con cal como filler.

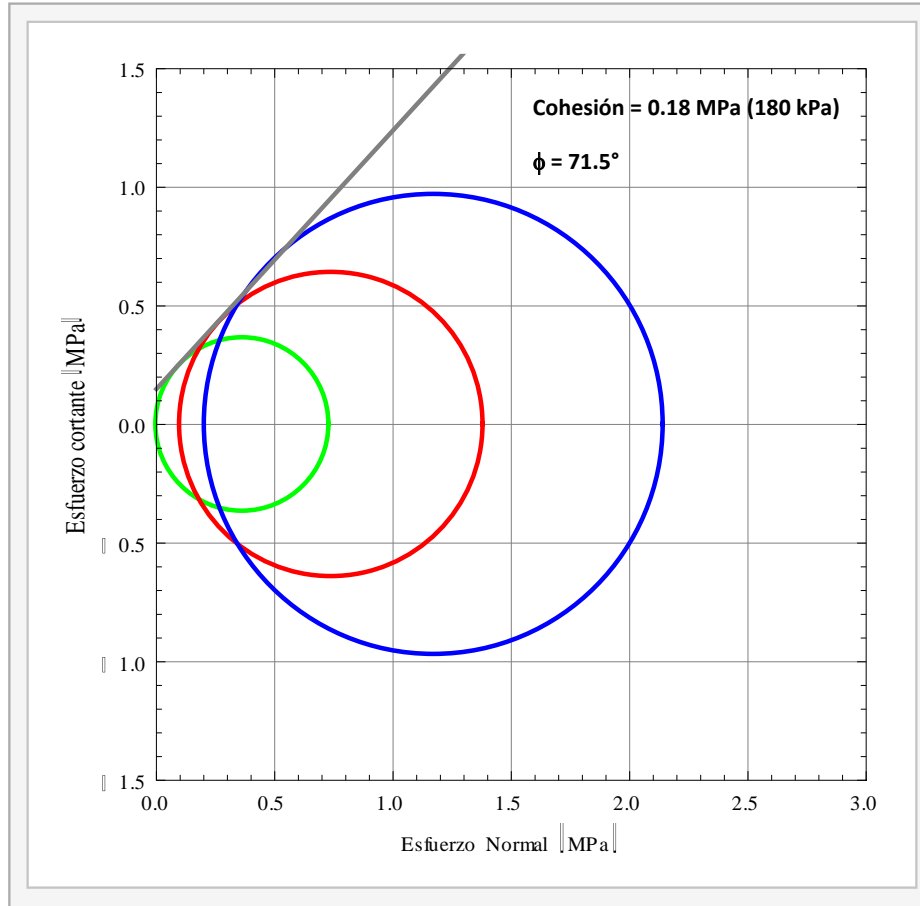


Ilustración 61. Resultados de prueba triaxial de la mezcla II con CPC 30 como filler.

A continuación se presenta una tabla resumen con los resultados de cohesión y ángulo de fricción de las 4 mezclas analizadas.

Tabla 40. Resumen de resultados de cohesión y ángulo de fricción de las mezclas.

Mezcla	Cohesión (kPa)		ϕ (°)	
	Obtenido	Límite	Obtenido	Límite
Base 50% + Arena 50% con Cal	220	>250	71.5	>40
Base 50% + Arena 50% con CPC 30	150		73	
Base 37.5% + Arena 37.5% + RAP 25% con Cal	150		73	
Base 37.5% + Arena 37.5% + RAP 25% con CPC 30	180		71.5	

Aunque ninguna de las mezclas cumplió con el límite de aceptación en la cohesión, se debe de tener en cuenta que es un “**parámetro deseable**”, ya que los materiales granulares, su cohesión es nula. La cohesión en estas mezclas es aporte del asfalto y filler empleado, en dado caso de querer cumplir con el parámetro, se puede incrementar el contenido de asfalto. Para los resultados de ángulo de fricción se aprecia que no existe ningún problema, e incluso se encuentra muy sobrado.

4.1.4 Microscopía Electrónica de Barrido

4.1.4.1 Imágenes de microscopía

4.1.4.2

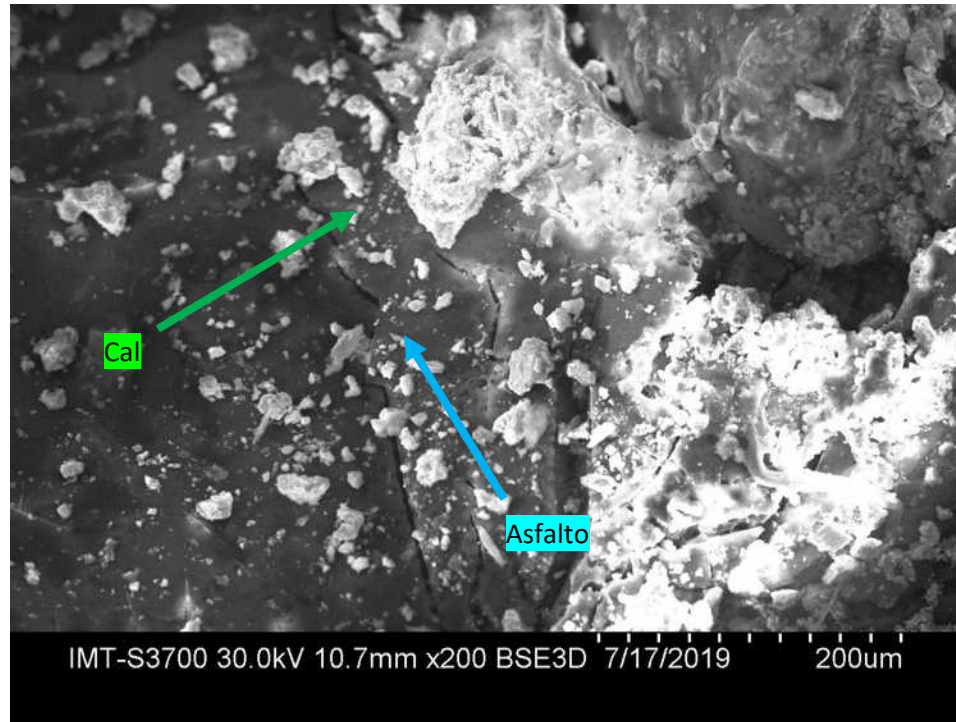


Ilustración 62. Mezcla I con cal, filler y geles de hidratación formados.

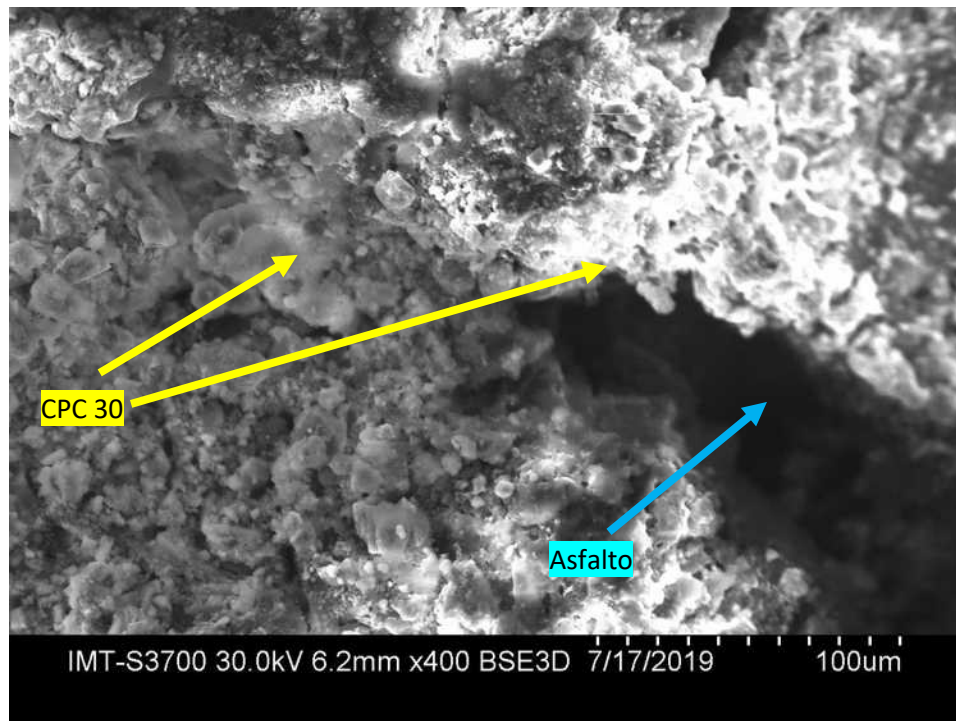


Ilustración 63. Mezcla I con CPC 30, filler y geles de hidratación formados.

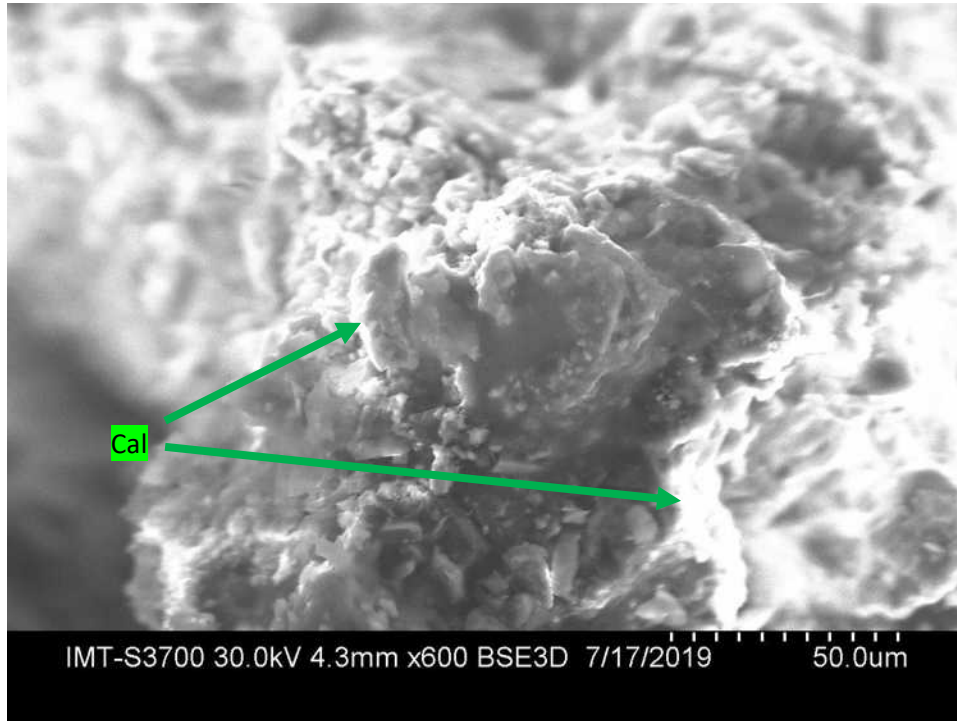


Ilustración 64. Mezcla II con cal, filler y geles de hidratación formados.

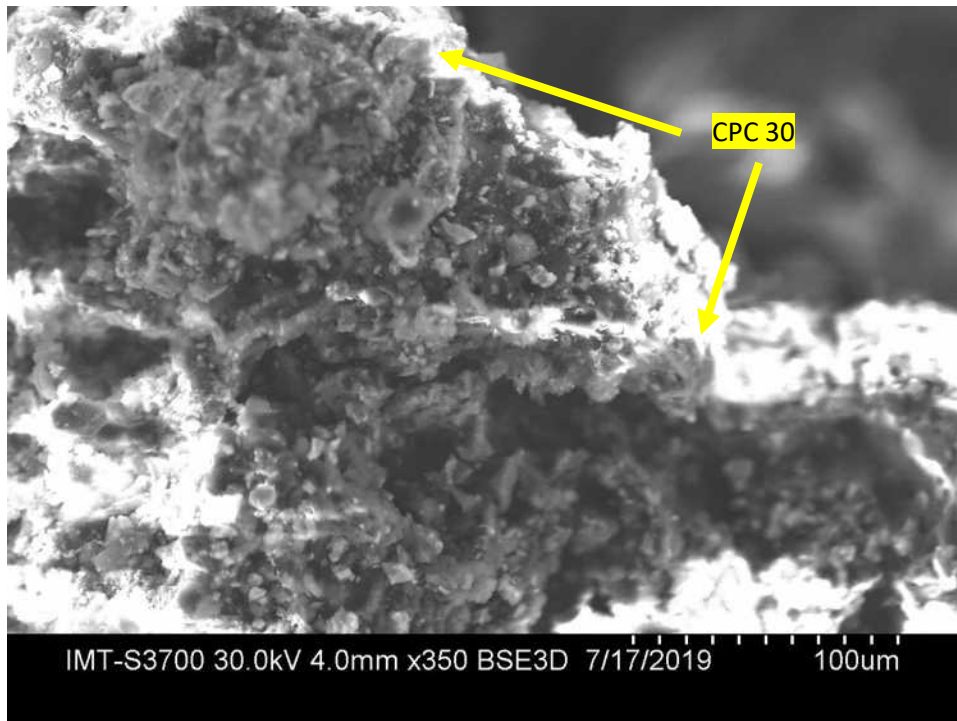


Ilustración 65. Mezcla II con CPC 30, filler y geles de hidratación formados.

4.1.4.3 Espectrometría de dispersión de energía de rayos x

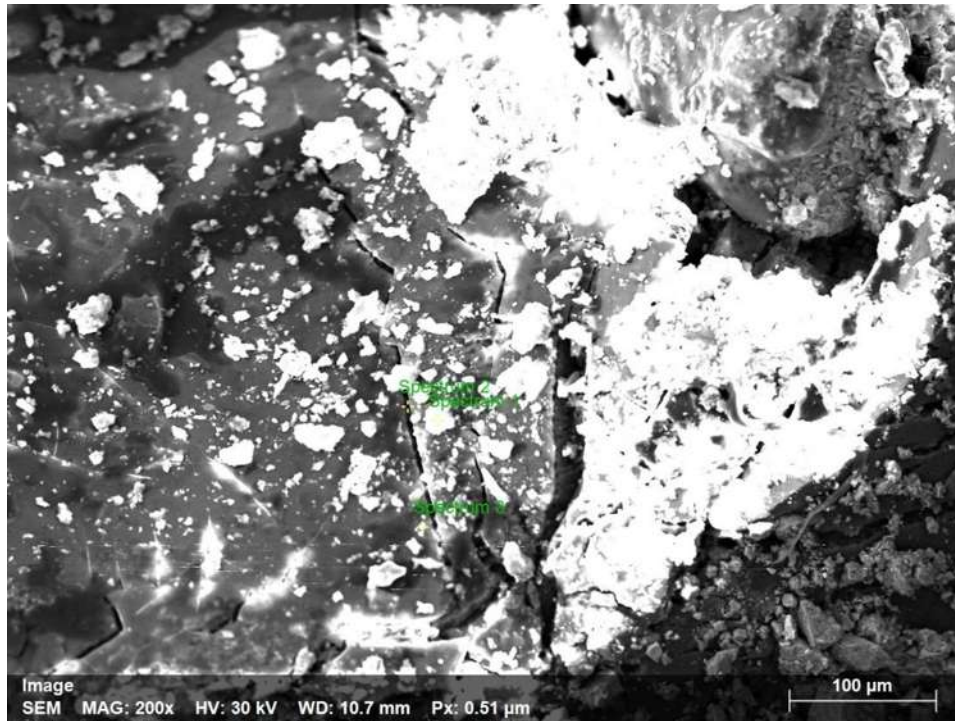


Ilustración 66. Zona seleccionada para el análisis químico de mezcla I con cal.

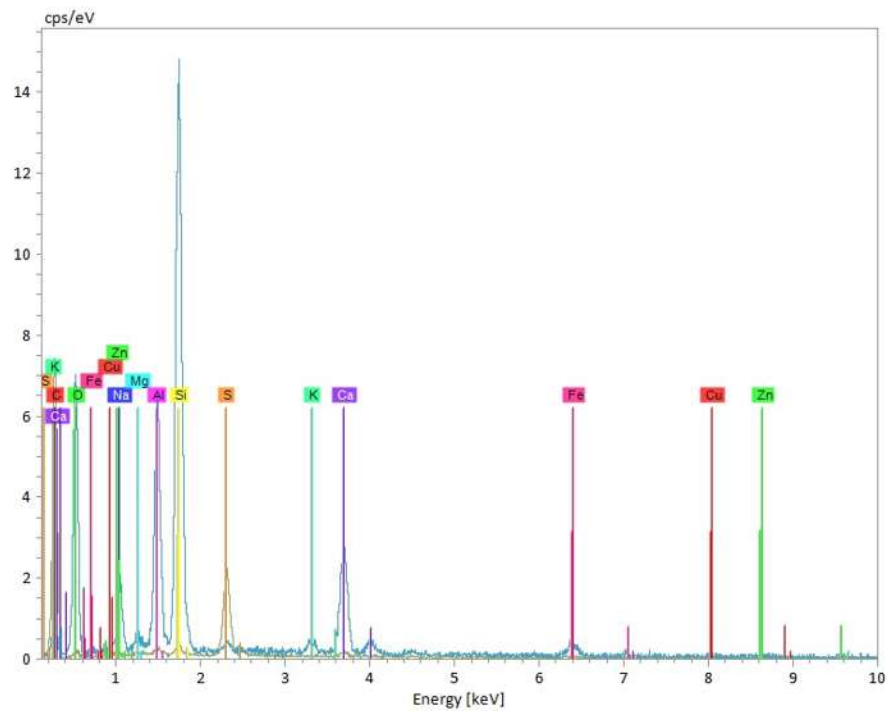


Ilustración 67. Resultados del análisis químico de mezcla I con cal.

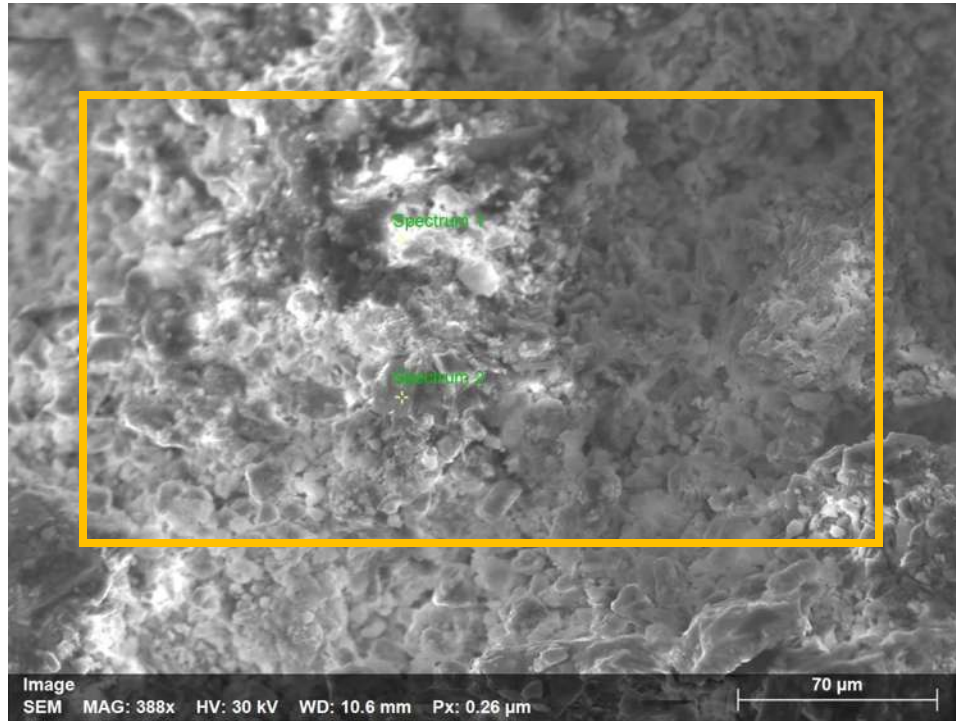


Ilustración 68. Zona seleccionada para el análisis químico de mezcla I con CPC 30I.

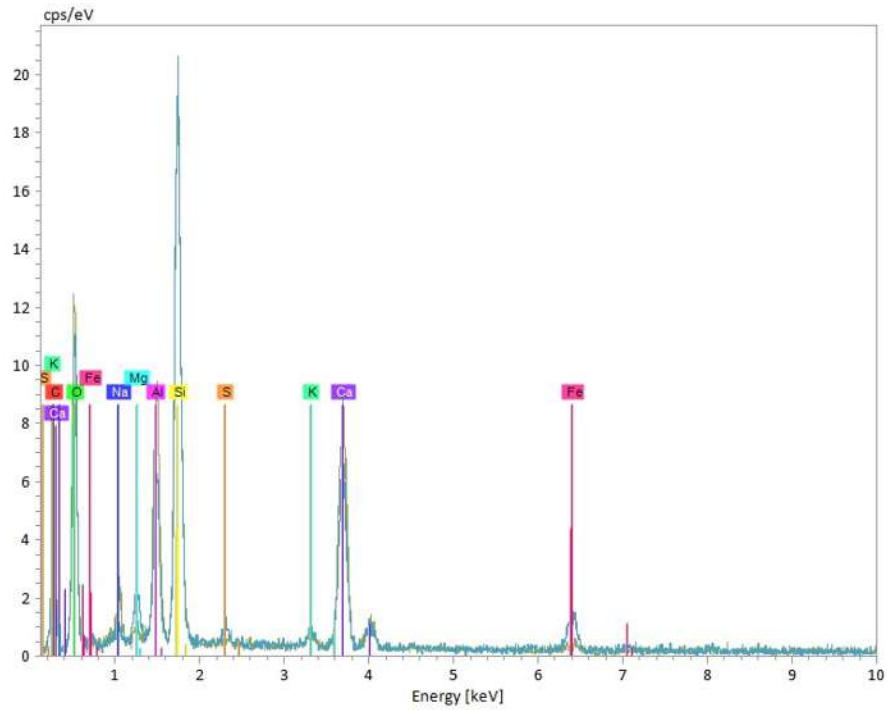


Ilustración 69. Resultados del análisis químico de mezcla I con CPC 30.



Ilustración 70. Zona seleccionada para el análisis químico de mezcla II con cal.

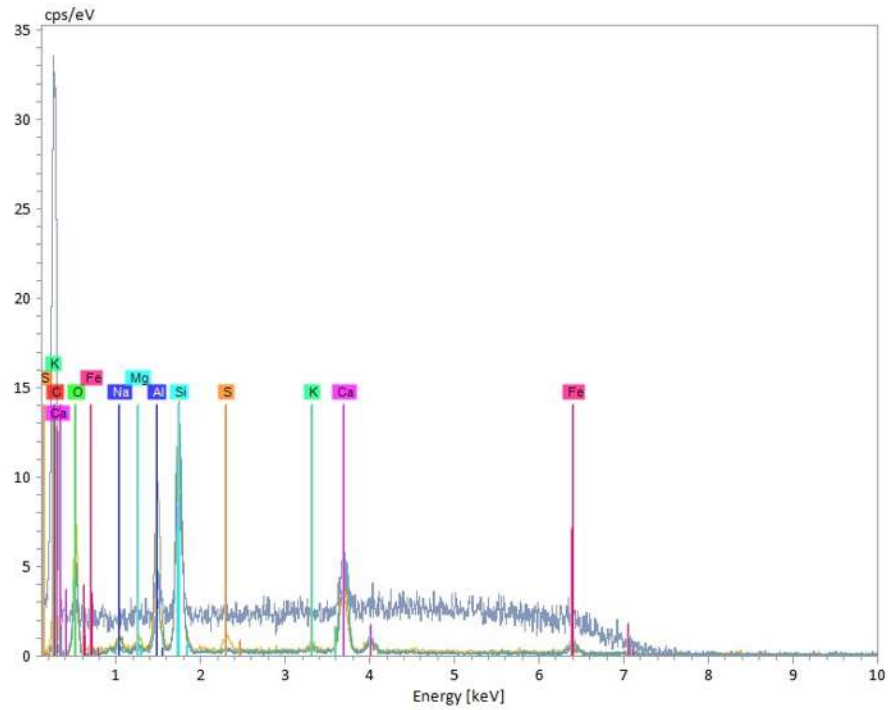


Ilustración 71. Resultados del análisis químico de mezcla II con cal.

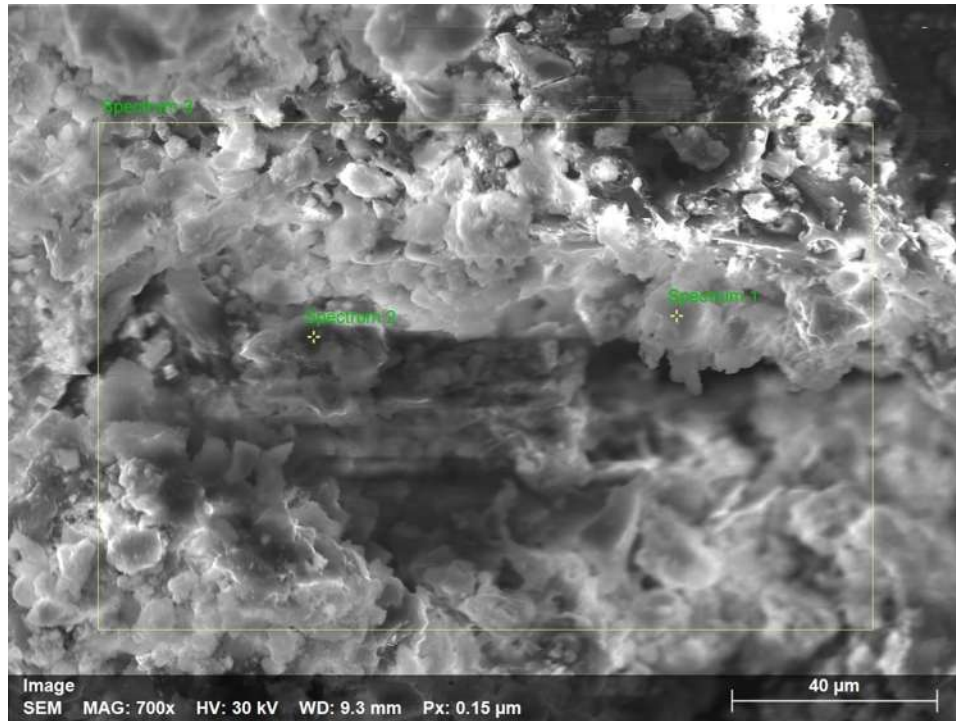


Ilustración 72. Zona seleccionada para el análisis químico de mezcla II con CPC 30.

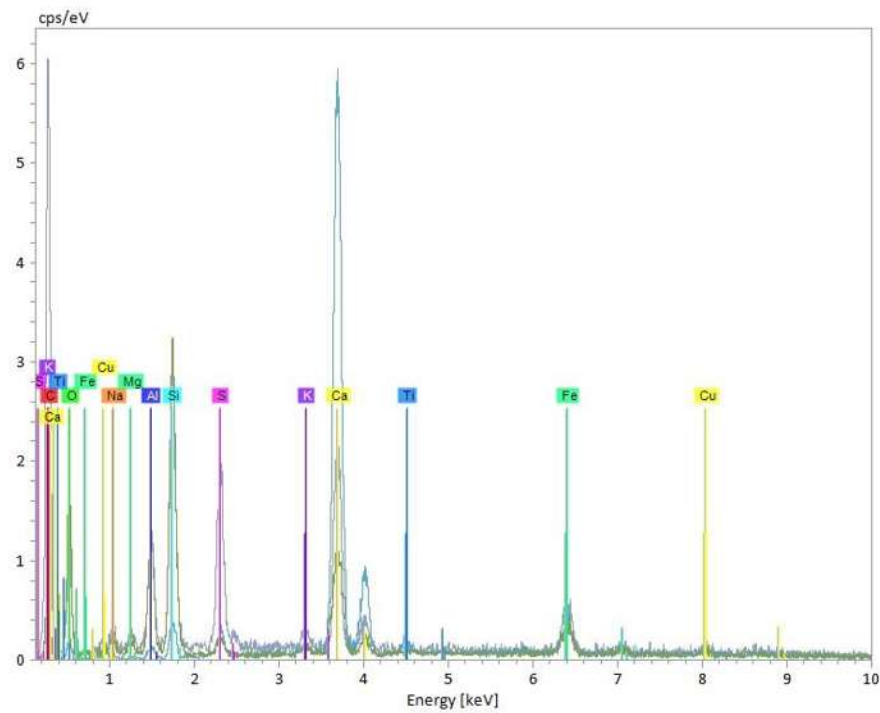


Ilustración 73. Resultados del análisis químico de mezcla II con CPC 30.

Para todas las mezclas se esperaba la presencia de elementos como: carbono, calcio, sílice y para el caso de las mezclas con cemento también se esperaba la presencia aluminio.

4.1.5 Vida útil de las secciones

4.1.5.1 Sección con base hidráulica

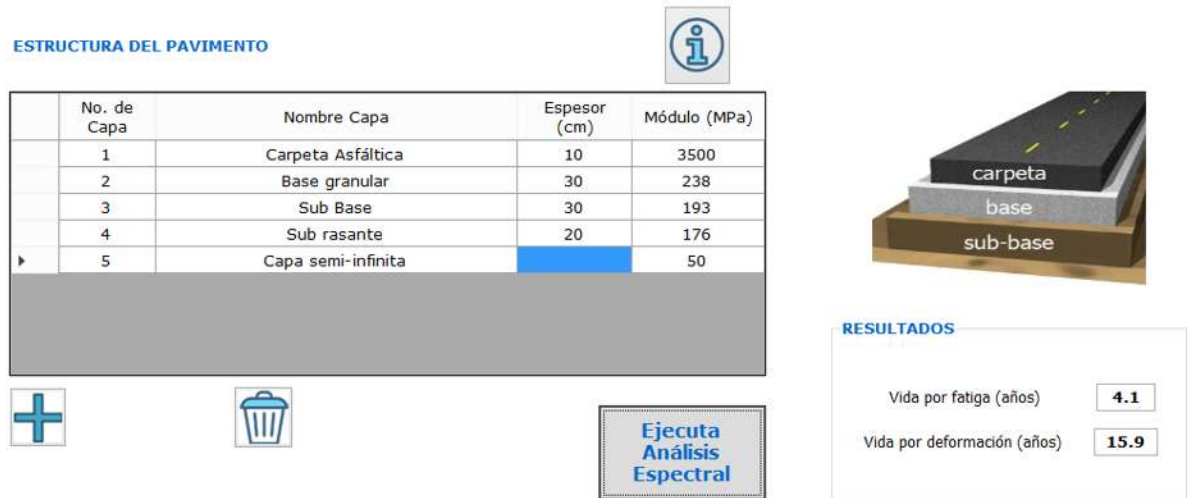


Ilustración 74. Vida útil de sección de pavimento con base hidráulica.

La vida útil a la deformación permanente es de 15.9 millones de ejes equivalentes y 4.1 millones de ejes equivalentes al agrietamiento por fatiga. Es decir, su vida crítica es de 4.1 millones de ejes equivalentes.

4.1.5.2 Sección con base estabilizada con asfalto espumado

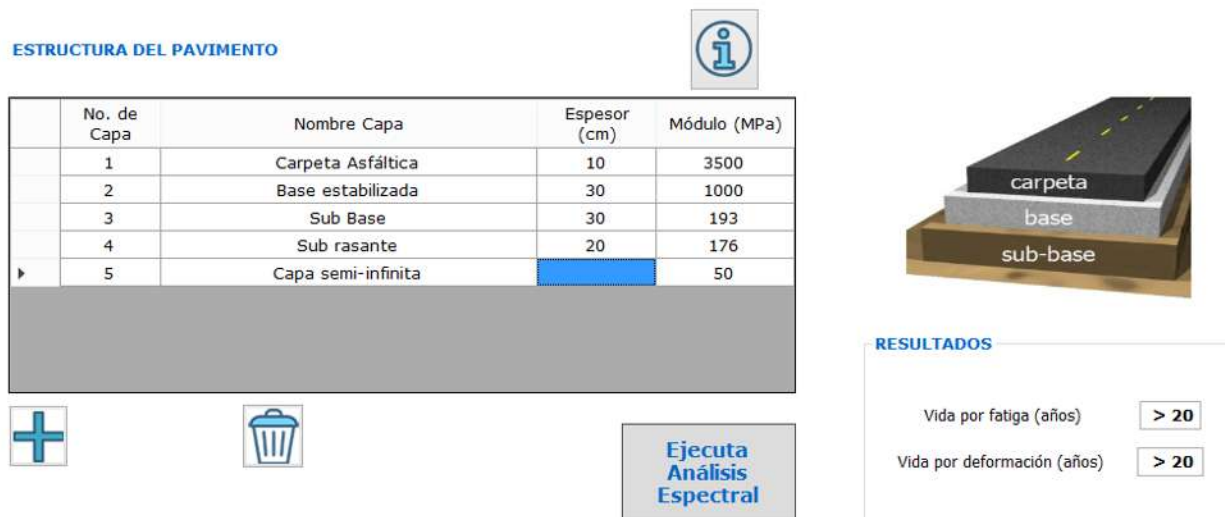


Ilustración 75. Vida útil de sección de pavimento con base estabilizada con asfalto espumado.

La vida útil a la deformación permanente y al agrietamiento por fatiga es > 20 millones de ejes equivalentes. Es decir, su vida crítica es > 20 millones de ejes equivalentes.



4.1.6 Comparación económica de alternativas de estabilización

Según los datos obtenidos en el análisis de **Saleh**, se tienen los siguientes resultados en un análisis costo-beneficio.

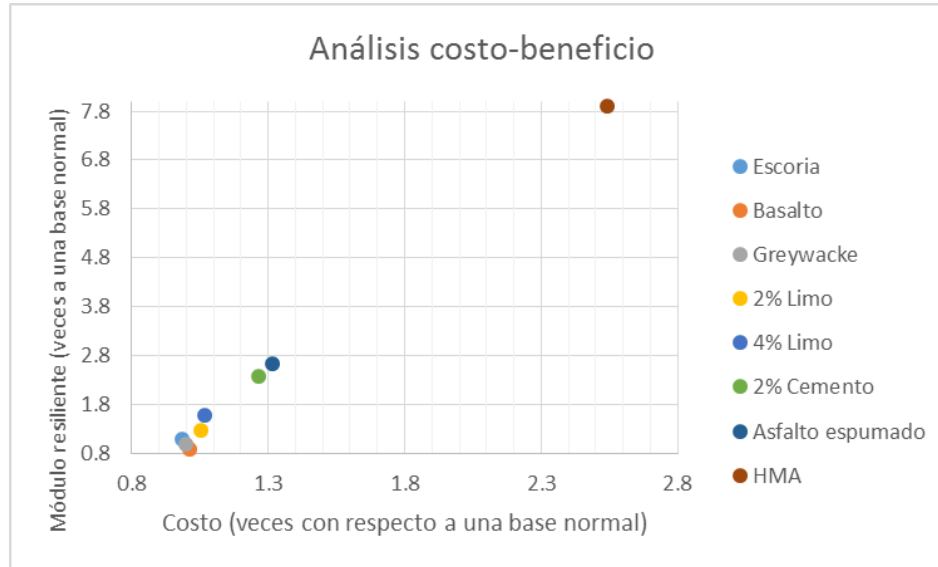


Ilustración 76 Análisis costo-beneficio de las alternativas de estabilización.

El concepto de este tipo de análisis es que según la línea de tendencia de mayor ajuste, que para el caso de este modelo fue una línea de tendencia exponencial, mientras la alternativa se encuentre del lado de menor costo (izquierda de la línea) y mayor módulo resiliente (por arriba de la línea), el comportamiento es mejor, caso contrario, estar del lado de mayor costo (la derecha de la línea de tendencia) y menor módulo resiliente (por debajo de la línea de tendencia), el comportamiento no es el adecuado. A continuación se muestran los resultados.

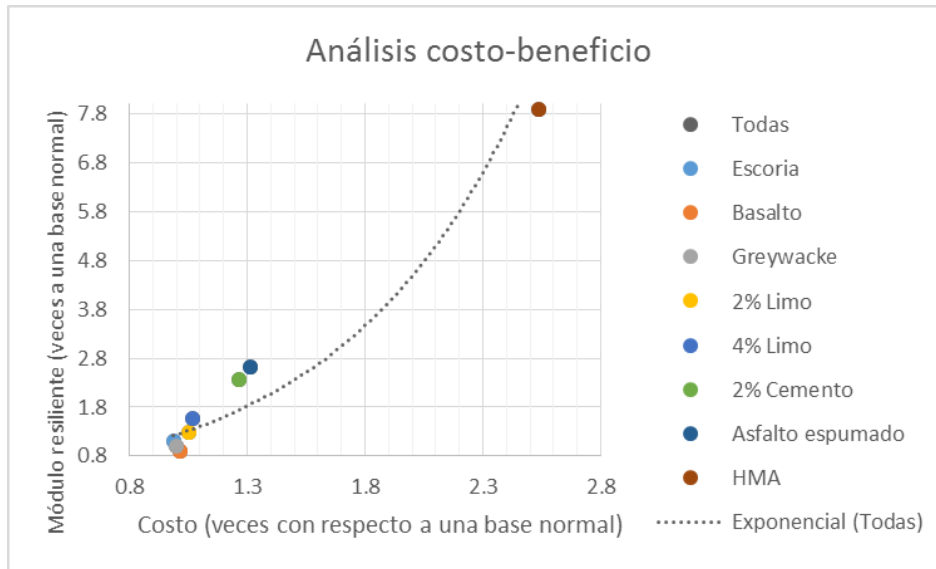


Ilustración 77. Análisis costo-beneficio de las alternativas de estabilización, con línea de tendencia para determinar la mejor alternativa.

4.1.7 Consumo energético y emisiones al medio ambiente

Partiendo del análisis de **Chehovits, Jim & Galehouse, Larry**, así como con la ayuda de los datos que obtuvieron de consumo energético y emisiones de gases del efecto invernadero por las alternativas de rehabilitación y reconstrucción. Se realizó un análisis de afectación al ambiente por cada una de las alternativas.

Los resultados mostrados están sustentados con base en los valores de las tablas de **Chappat & Bill**.

Para la base hidráulica existe un resultado final.

Para la estabilización del suelo con cemento incluye: base hidráulica y estabilización con cemento.

Para la estabilización asfalto espumado se incluye: 75% de base hidráulica y la estabilización de suelo con WMA + 25% RAP.

La alternativa de reconstrucción Base + HMA incluye: base hidráulica, producción de HMA y encarpeta de HMA.

A continuación se muestran los datos en una tabla de resumen.

Tabla 41. Resumen de resultados de consumo energético y emisiones de gases del efecto invernadero para alternativas de Construcción y Rehabilitación de pavimentos.

Mezcla	Consumo energético (MJ/ton)	Emisiones de CO ₂ (kg/ton)
Base hidráulica	1244	245
Estabilización de suelo con cemento* (100% Base + estabilización)	1256	245.8
Estabilización de suelo WMA 75% Base + 25% RAP (agregado, elaboración y encarpeta)	1253	183.75
Reconstrucción Base + HMA	1528	267.6



En la ilustración que se muestra a continuación se realiza la comparación del consumo de energía de algunas de las alternativas de rehabilitación y construcción de pavimentos. La línea de tendencia que mejor resultado dio fue la de forma exponencial, pero esta comparación se observa que es deficiente. Se decidió priorizar el impacto de las emisiones de gases del efecto invernadero sobre el costo por alternativa.

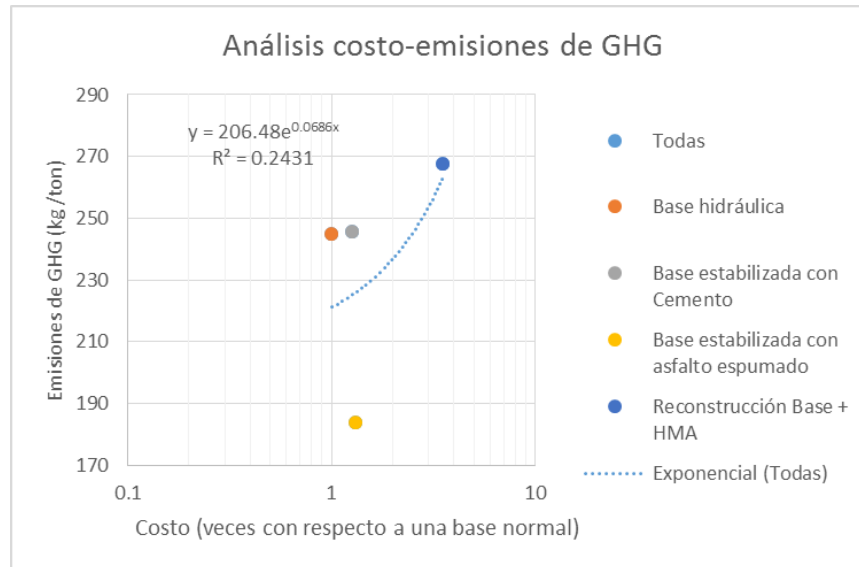


Ilustración 78. Análisis costo-emisiones de GHG a la atmósfera de las alternativas de estabilización, con línea de tendencia para determinar la mejor alternativa.

En el consumo energético la alternativa de estabilización con asfalto espumado resulta tener comportamiento aceptable. Debido al costo de la base estabilizada con asfalto espumado, su consumo energético es menor al que marca la línea de tendencia. Todo esto se muestra en la siguiente ilustración.

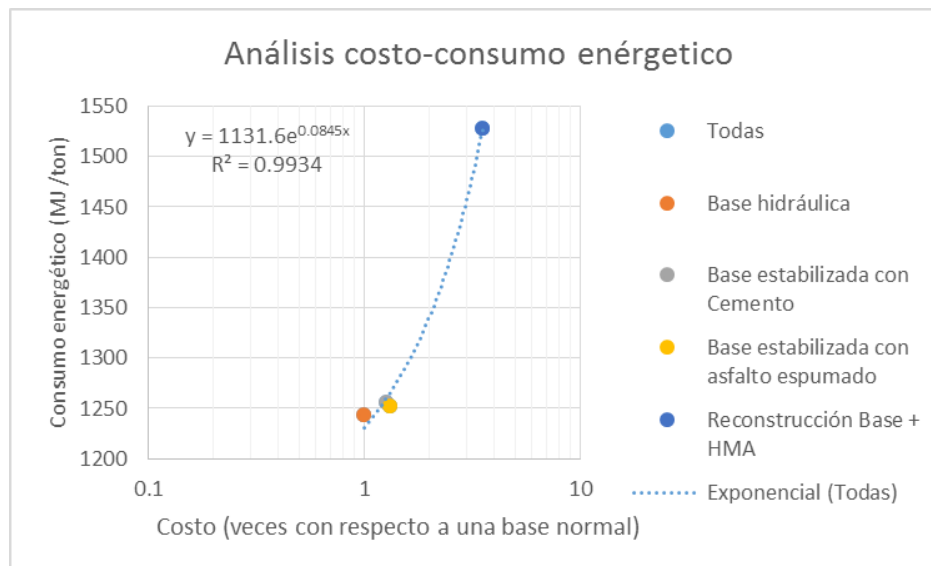


Ilustración 79. Análisis costo-consumo energético de las alternativas de estabilización, con línea de tendencia para determinar la mejor alternativa.



Por último, se decide hacer una comparación del consumo energético respecto a las emisiones de gases del efecto invernadero de cada una de las alternativas. La línea de tendencia que mayor correlación tiene con la comparación es la línea logarítmica. En la ilustración que se observa debajo, se aprecia que la alternativa de estabilización con asfalto espumado tiene un mejor comportamiento de emisiones de CO₂ menores contrastándose con su consumo energético.

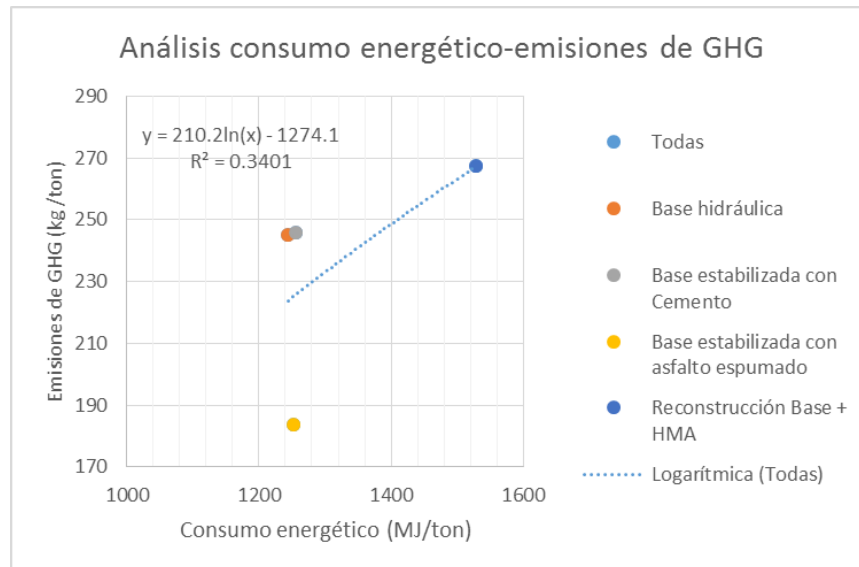


Ilustración 80. Análisis consumo energético-emisiones de GHG a la atmósfera de las alternativas de estabilización, con línea de tendencia para determinar la mejor alternativa.



Conclusiones y trabajo futuro

Conclusiones

Es visible el papel fundamental que desempeñan los materiales utilizados como **filler de aportación**, resultando como un mayor beneficio estructural de una capa de base estabilizada, tanto con la cal y el cemento. La elección entre ellas, debe basarse en los beneficios deseables a mejorar, ya que los resultados a desempeños mecánicos son bastante parecidos, pero con un ligero comportamiento de mejoría en las alternativas con CPC 30.

Asimismo, la diferencia entre la utilización de RAP en las mezclas, que además de mitigar el impacto ambiental al reciclar materiales que son considerados como material de desperdicio, incrementa las propiedades ante sollicitaciones mecánicas. Todo esto considerando el mismo esqueleto mineral, lo más cercano que se pudo obtener.

La presencia del RAP y el filler incrementa de manera notable la resistencia ante los daños que puede ocasionar la humedad en las mezclas.

Las variaciones de las mezclas de trabajo que contienen cal y CPC 30 son muy pequeñas, lo que indica una mayor certeza de los resultados obtenidos.

Se debe considerar que en el ensayo triaxial que sirve para conocer las propiedades mecánicas de cohesión y ángulo de fricción, los parámetros son considerados como "**deseables**", ya que en los materiales granulares la cohesión es despreciables. La cohesión la aportan el asfalto y el filler.

Queda demostrado que el material se estabiliza de manera adecuada con los resultados de ángulo de fricción, ya que estos son superlativos al parámetro deseable, en el caso de las 4 mezclas analizadas, el ángulo de fricción fue mayor a los 70°.

Hipótesis acertada de cubrimiento del asfalto a las partículas de filler (contenidos y área superficial), esto se demuestra con los ensayos de microscopía, ya que solamente fueron analizadas zonas con asfalto. Asimismo, las imágenes obtenidas en las pruebas de microscopía demuestran la formación adecuada de cristales (geles de hidratación) de los materiales utilizados como filler.

Las muestras con RAP que se analizaron en espectrometría desde el inicio fueron complicadas de focalizar las zonas con presencia de cristales. No solo existió ese problema, también en la mezcla con cal como filler, apareció bastante **ruido** en el resultado del análisis químico.

Se esperaban la presencia de algunos elementos como el carbono, calcio, sílice, azufre, magnesio, oxido y aluminio; esto por la composición química de los materiales utilizados (agregado pétreo, asfalto, y el filler). Sorprende la aparición de elementos como el titanio y cobre en la mezcla con RAP y CPC 30 como filler, ya que no aparecen en ninguna otra mezcla, y los materiales empleados son los mismos. Estos elementos tienen influencia en la formación de geles de hidratación del cemento, que a su vez generan un beneficio en el comportamiento de la mezcla.

Con el diseño de sección de pavimento realizado a través del software del IMT, y con los datos de módulo resilientes sugeridos por el mismo Instituto, queda demostrado que la vida útil incrementa de manera notable. Los diseños son con los mismos espesores y módulos de capas, únicamente la capa de base es la que cambia, la base estabilizada con asfalto espumado comparada con una base hidráulica tradicional.



En cuanto a las diversas alternativas existentes de construcción o estabilización de bases, la relación de costo – desempeño, la base estabilizada con asfalto espumado es la que resulta como la alternativa más redituable.

Bajas emisiones a la atmósfera de gases del efecto invernadero, esto debido al bajo consumo energético para la elaboración de este tipo de mezclas.

Viabilidad plena para la construcción de capas de base estabilizadas con asfalto espumado, debido a las comparaciones costo – beneficio, consumo energético y emisiones de gases de efecto invernadero hacia la atmósfera.

Una gran ventaja desde todos los puntos de vista, es la posibilidad de reciclar los materiales de las capas de rodadura de mezcla asfáltica, que ya han cumplido con su vida útil. Esto tiene un gran impacto ambiental y económico, ya que puede desarrollarse un plan futuro de gestión de pavimentos para la reutilización de estas capas. En otras palabras, ***“existe vida después de su ciclo de haber cumplido su utilidad”***.

Trabajo futuro

El fundamento de la estabilización de bases con asfalto espumado es mejorar propiedades mecánicas del suelo, y el índice de plasticidad en suelos considerados como marginales. El material de filler reacciona con el asfalto debido a una mayor área superficial. Existen otros materiales que pueden ser utilizados para este fin, los cuales se presentan enseguida:

Diseño de bases estabilizadas con cenizas de alto contenido de carbón mineral como de filler

Diseño de bases estabilizadas con desechos de industria como material de filler

Diseño de bases estabilizadas con zeolitas como material de filler

Evaluación del desempeño de mezclas de asfalto espumado con tiempo de curado mayor a 90 días, para comparar la influencia tiempo de curado – resistencia

Estabilización de suelos para capas de pavimento con hule molido de neumáticos*

*En mi estancia de investigación descubrí que en España se encuentra en investigación este material para la estabilización de suelos marginales, precisamente en dos tesis Doctorales dirigidas por el Dr. Antonio Jaramillo Morilla.



Referencias

- AASHTO. (1993). *Pavimentos de concreto asfáltico*. AASHTO.
- Abdullah, G. M., & Al-Abdul Wahhb, H. i. (2015). *Evaluation of foamed sulfur asphalt stabilized soils for road application*. Najran, Arabia Saudita: Elsevier.
- Al-Abdul Wahhab, H. I., Baig, M. G., Mahmoud, I. A., & Kattan, H. M. (24 de Junio de 2011). Study of road bases construction in Saudi Arabia using foam asphalt. *Construction and Building Materials*, 113-121. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.05.010
- 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*, 1058-1066. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.07.081
- ASTM. (2012). *Standar Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort*. ASTM.
- Chappat, M., & Bilal, J. (2005). *Road Rehabilitation Energy Reduction Guide for Canadian Road Builders*. Obtenido de Canadian Construction Association: https://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/oeo/pdf/industrial/technical-info/benchmarking/roadrehab/Roadhab_eng_web.pdf
- Chehovits, J., & Galehouse, L. (2010). Energy Usage and Greenhouse Gas Emissions of Pavement Persevation Process for Asphalt Concrete Pavements. *Compendium of Papers from the First International Conference on Pavement Perservation*, 27-42.
- Chomicz-Kowalska, A., & Stepien, J. (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*, 980-989. doi:10.1016/j.proeng.2016.08.837
- Chomicz-Kowalska, A., Gardziejczyk, W., & Iwanski, M. M. (2017). *Analysis of IT-CY stiffness modulus of foamed bitumen asphalt concrete compacted at 95°C*. Kielce, Polonia: Elsevier. doi:10.1016/j.proeng.2017.02.065
- Chomicz-Kowalska, A., Gardziejczyk, W., & Iwansky, M. M. (14 de Septiembre de 2016). Moisture resistance and compactibility of asphalt concrete produced in half-warm mix asphalt technology with foamed bitumen. *Construction and Building Materials*, 108-118. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.004
- Delgado Alamilla, H., García Hernández, F., & Campos Hernández, D. E. (2017). *Diseño de bases estabilizadas con asfalto espumado*. Sanfandilla, Querétaro, México: Instituto Mexicano del Transporte.
- Delgado Alamilla, H., García Hernández, F., & Campos Hernández, D. E. (2017). *Diseño y evaluación del desempeño mecánico de una base hidráulica reciclada con asfalto espumado*. Medellín, Colombia: XIX Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto.



- Dong, F., Yu, X., Liang, X., Ding, G., & Wei, J. (2017). Influence of foaming water and aging process on the properties of foamed asphalt. *Construction and Building Materials*, 866-874. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.07.161
- Dong, F., Yu, X., Xu, B., & Wang, T. (2017). Comparison of high temperature performance and microstructure for foamed WMA and HMA with RAP binder. *Construction and Building Materials*, 595-601. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.12.106
- El País. (24 de Noviembre de 2015). *El País*. Obtenido de El País: https://elpais.com/internacional/2015/11/23/actualidad/1448279779_808577.html
- ES Horizonte 2020*. (19 de Marzo de 2019). Obtenido de Portal español del Programa Marco de Investigación e Innovación de la Unión Europea: <https://eshorizonte2020.es/que-es-horizonte-2020>
- Fu, P., Jones, D., & Harvey, J. T. (10 de Julio de 2010). The effects of asphalt binder and granular material characteristics on foamed asphalt mix strength. *Construction and Building Materials*, 1093-1101. doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.06.067
- García, A. (15 de Julio de 2018). *Esfuerzos y deformaciones en pavimentos flexibles*. Obtenido de SlideShare: <https://www.slideshare.net/RibBrian/0400-esfuerzos-y-deformaciones-en-pavimentos-flexibles>
- Garnica Anguas, P., Hernández Domínguez, R., & Castellanos, A. (2016). *IMT-PAVE 3.0*. Instituto Mexicano del Transporte. Sanfandila: IMT.
- Gobierno Federal. (2019). *Plan Nacional de Desarrollo 2019-2024*. CDMX: Gobierno Federal. Obtenido de <https://www.gob.mx/sct/articulos/programa-nacional-de-infraestructura-carretera-2018-2024-185945?idiom=es>
- Gutiérrez, S. (2018). *Experiencias prácticas de Asfalto Espumado*. CAPUFE. Cuernavaca: CAPUFE.
- Hailasilassie, B. W., Hugener, M., & Partl, M. N. (31 de Marzo de 2015). Influence of foaming water content on foam asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 65-77. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.071
- IMT. (8 de Marzo de 2019). *Gobierno de México*. Obtenido de Instituto Mexicano del Transporte: <https://www.gob.mx/imt/acciones-y-programas/red-nacional-de-caminos>
- INEGI. (2015). *Red Nacional de Caminos*. Aguascaliente: INEGI.
- Iwanski, M., Mrugala, J., & Chomicz-Kowalska, A. (2017). Optimization of composition of asphalt concrete with synthetic wax modified foamed bitumen in scope of resistance to climatic conditions. *Procedia Engineering*, 409-416.
- Kuna, K., Airey, G., & Thom, N. (2016). Development of a tool to assess in-situ curing of Foamed Bitumen Mixtures. *Construction and Building Materials*, 55-68.
- Li, Z., Hao, P., Liu, H., Xu, J., & Chen, Z. (12 de Octubre de 2016). Investigation of early-stage strength for cold recycled asphalt mixture using foamed asphalt. *Construction and Building Materials*, 410-417. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.126



- Liu, S., Yu, X., & Dong, F. (2017). *Evaluation of moisture susceptibility of foamed warm asphalt produced by water injection using surface free energy-method*. Nanjing, China: Elsevier. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.072>
- Ming, H., Xuejun, W., & Linbing, W. (4 de Julio de 2017). Influence of foaming effect, operation time and health preserving properties of foam epoxy asphalt mixtures. *Elsevier*, 931-938. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.083>
- Mohd Hasan, M. R., & You, Z. (2016). *Ethanol based foamed asphalt as potential alternative for low emission asphalt technology*. Houghton, Michigan: ScienceDirect. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.jtte.2016.03.001>
- Mohd Hasan, M. R., You, Z., & Yang, X. (2016). *A comprehensive review of theory, development, and implementation of warm mix asphalt using foaming techniques*. Penang, Malasia: Elsevier.
- Mohd Hasan, M. R., You, Z., Yang, X., & Heiden, P. A. (23 de Julio de 2017). Quantification of physicochemical properties, activation energy, and temperature susceptibility of foamed asphalt binders. *Construction and Building Materials*, 557-568. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.123>
- P.F., A. L., Oliveira, J. R., Silva, H. M., Palha, D., & Fonseca, P. V. (18 de Marzo de 2017). Suitability of different foamed bitumens for warm mix asphalts with increasing recycling rates. *Construction and Building Materials*, 342-353. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.085>
- Porot, L. (2008). *Mezclas asfálticas a más bajas temperaturas*. Rosario, Argentina: XXXV Reunión del Asfalto.
- Puigdueta Bartolomé, I., & Sanz Corbeña, A. (16 de Febrero de 2017). *Universidad Politécnica de Madrid*. Obtenido de Universidad Politécnica de Madrid: http://www.upm.es/?id=cdee4f93bf54a510VgnVCM10000009c7648a____&prefmt=articulo&fmt=detail
- Saleh, M. F. (2007). Cost evaluation of foam bitumen and other stabilisation alternatives. *International Journal of Pavement Engineering*, 157-161. doi:10.1080/10298430601149585
- SCT. (2016). *N-CMT-4-0-003/16 "Características de los Materiales; Materiales para pavimentos; Materiales para Subbases y Bases; Materiales para Bases Tratadas"*. CDMX: SCT.
- SCT. (2018). *Programa Nacional de Conservación de Carreteras, Michoacán 2018*. CDMX: Gobierno de la República. Recuperado el 4 de Diciembre de 2018, de www.sct.gob.mx/carreteras/direccion-general-de-conservacion-de-carreteras/avance-del-programa-de-obra-2018/michoacan/
- Sunarjono, S. (2013). Performance of Foamed Asphalt under Repeated Load Axial Test. *Procedia Engineering*, 698-710.
- Ulloa C., A. (2011). *Mezclas Asfálticas Tibias*. San José, Costa Rica: Programa de Infraestructura del Transporte.



- Vera Callao, R. P. (7 de Agosto de 2018). *Pavimentos*. Obtenido de <http://libro-pavimentos.blogspot.com/2013/02/elementos-de-la-estructura-de-pavimento.html>
- Villanueva Guzman, M. A. (2016). *Cerámicos base cemento Pórtland con substituciones parciales de materiales orgánicos para incremento de la durabilidad*. Morelia: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- 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. (2012). *Wirtgen Cold Recycling Technology*. Windhagen, Alemania: Wirtgen GmbH.
- Xiao, F., Yao, S., Wang, J., Li, X., & Amirkhanian, S. (2018). A literature review on cold recycling technology of asphalt pavement. *Construction and Building Materials*, 579-604.
- Yu, X., Leng, Z., Wang, Y., & Lin, S. (2013). *Characterization of the effect of foaming water content on the performance of foamed crumb rubber modified asphalt*. Nanjing, Jiangsu, China: Elsevier.
- Yu, X., Liu, S., & Dong, F. (2015). *Comparative assessment of rheological property characteristics for unfoamed and foamed asphalt binder*. Nanjing, Jiangsu, China: Elsevier.
doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.06.090