

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
RECINTO UNIVERSITARIO SIMÓN BOLÍVAR
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**



TRABAJO DE DIPLOMA

**DISEÑO DE UNA PASTA BITUMINOSA DE SLURRY
SEAL APLICANDO EL MÉTODO DE SUPERFICIE DE
RESPUESTA**

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO QUÍMICO

PRESENTADO POR:

Br. Jassir Rasec Barahona Colindres

TUTOR:

Ing. José Francisco Vílchez M.

01 de diciembre 2021
Managua, Nicaragua

Opinión del Catedrático Guía

Honorables miembros del Jurado Calificador

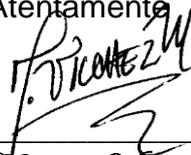
Sus manos

La red vial de Nicaragua contaba con 2,466 km, aproximadamente, de carreteras pavimentadas con asfalto, lo que representa el 10.06% de la red vial (MTI, 2017). Por otro lado, estas son constantemente ampliadas y necesitan mantenimiento periódico, en ocasiones se debe aplicar un tratamiento inmediato. Debido a esto, una de las mejores soluciones en la actualidad es la utilización de tratamientos asfálticos, como la mezcla asfáltica slurry seal.

El mortero asfáltico, Slurry Seal fija a la superficie una capa asfáltica altamente resistente a la abrasión o desgaste, siendo muy útil en el mantenimiento preventivo de los pavimentos. Además, proporciona una estructura impermeable de color negro que no permite el paso del agua, brinda una superficie antideslizante que se traduce en seguridad para el conductor y elimina el problema de las gravas sueltas que son causa de accidentes. Su utilización como capa protectora en el mantenimiento de vías genera ahorros al evitar el deterioro progresivo del pavimento. Con este objetivo en mente, el **Br. Jassir Rasec Barahona Colindres** hace una propuesta innovadora de utilizar una herramienta que permite optimizar las mezclas a fin de lograr un producto consistente y en especial aprovechar la materia prima local para elaborar dicho producto.

A pesar de la pandemia, y las diferentes obligaciones personales, se puede apreciar el gran esfuerzo realizado, la calidad del trabajo presentado por el Br. **Barahona Colindres** afín de entregar una propuesta muy aterrizada y viable, que sirva a la empresa para seguir explorando el potencial de productos que se pueden desarrollar y ofertar por la industria nacional. Por tanto, a través de la presente se solicita la aplicación de su experiencia y habilidades para calificar este trabajo monográfico con la mayor nota posible para el tiempo, esfuerzo y sacrificio personal del Br. **Barahona Colindres**, en la elaboración de este trabajo. Sin más que agregar y agradeciendo su fina atención, me despido, deseándole mayores éxitos en sus funciones.

Atentamente



José Francisco Viquez M.
Profesor Titular
FSQ/UCN

Agradecimientos

A Dios que es el pilar del conocimiento y la existencia, quien me ha dado fortaleza para culminar mis estudios

A mi alma máter, Universidad Nacional de Ingeniería, particularmente a la Facultad de Ingeniería Química, cuna de nuestros conocimientos teóricos y científicos.

A mi tutor, Ing. José Francisco Vílchez Manzanares, por su paciencia, por su trabajo, comprensión y su acertada conducción para culminar este trabajo de diploma.

A la empresa SOLTECSA por brindarme los recursos para la realización de los ensayos experimentales y al equipo del laboratorio de calidad Ing. Eveling Vanegas y Ing. Eisner Tellería por su apoyo en la realización de las pruebas de calidad, así como sus consejos, paciencia y amistad.

A mis familiares, amigos y colegas por brindarme sus consejos, observaciones y disposición para ayudarme a terminar este trabajo de diploma.

Dedicatoria

A mi madre, Georgina Colindres Marín, y a mi padre, Augusto Barahona Colindres, por su amor incondicional y sabios consejos.

Resumen

El mortero asfáltico, Slurry Seal fija a la superficie una capa asfáltica altamente resistente a la abrasión o desgaste, siendo muy útil en el mantenimiento preventivo de los pavimentos. Además, proporciona una estructura impermeable de color negro que no permite el paso del agua, brinda una superficie antideslizante que se traduce en seguridad para el conductor y elimina el problema de las gravas sueltas que son causa de accidentes. Su utilización como capa protectora en el mantenimiento de vías genera ahorros al evitar el deterioro progresivo del pavimento.

Este estudio presenta el diseño de una pasta de slurry seal; esta es una mezcla de agregado con granulometría cerrada, emulsión asfáltica, aditivo y agua. La mezcla es utilizada como un tratamiento de superficial de carpetas asfálticas. Integrando a la pasta de slurry seal un nuevo parámetro tecnológico de calidad, el tiempo de anaquel; ya que los productos asfálticos no son diseñados para poderse almacenar, los componentes son mezclados y utilizados inmediatamente.

El objetivo del estudio es diseñar una pasta asfáltica con los requerimientos tecnológicos óptimos basados en su desempeño funcional con respecto a las normas de calidad recomendadas por la ISSA A105.

Los componentes de la pasta asfáltica se evaluaron conforme a los requerimientos físicos, químicos y tecnológicos con respecto a las normas de calidad recomendadas, la evaluación determino la compatibilidad de los componentes en las mezclas formuladas, donde no se encontró ninguna incidencia negativa en ellos.

Igualmente, utilizando la metodología de superficie de respuesta con un diseño central compuesto ajustando las mezclas a una región experimental se obtuvieron 40 puntos de diseño, por lo cual, se determinó la calidad de las mezclas con respecto a su desempeño funcional conforme a los requerimientos de la norma ISSA A105.

Conforme a los requerimientos evaluados se optimizó los parámetros de las mezclas encontrando un punto óptimo de 23% emulsión asfáltica, 34% agua, 1.3 % relleno mineral y 4% de aditivo, obteniendo una pasta de slurry seal de alta calidad acorde a los requerimientos tecnológicos.

Contenido

Opinión del Catedrático Guía.....	i
Agradecimientos	ii
Dedicatoria.....	iii
Resumen	iv
Índice de Tablas	viii
Índice de Figuras.....	x
Nomenclatura	xii
I. Introducción	1
II. Objetivos.....	3
2.1. Objetivo General	3
2.2. Objetivos Específicos.....	3
III. Marco teórico.....	4
3.1. Bitumen.....	4
3.2. Pasta Bituminosa.....	4
3.3. Slurry Seal	4
3.4. Componentes del Slurry Seal	5
3.4.1. Emulsión Asfáltica	5
3.4.2. Agregado Pétreo.....	5
3.4.3. Relleno mineral.....	6
3.4.4. Agua	7
3.4.5. Aditivos	7
3.5. Aplicación del slurry seal.....	7
3.6. International Slurry Surfacing Association	8
3.6.1. ISSA A105	8
3.7. American Association of State Highway and Transportation Officials	8
3.8. American Society for Testing and Materials.....	9
3.9. Pruebas de Evaluación para las propiedades físicas, químicas y tecnológicas de los materiales para el slurry seal	9
3.9.1. Agregado Pétreo y Relleno Mineral	9
3.9.2. Emulsión asfáltica	12
3.9.3. Agua	13
3.9.4. Slurry Seal.....	14
3.10. Diseño de Mezclas.....	15

3.11. Metodología de Superficie de Respuesta	16
IV. Metodología	17
4.1. Tipo de Investigación	17
4.2. Diseño de la Investigación	17
4.3. Determinación del Universo	18
4.4. Métodos y procedimientos para la evaluación de la compatibilidad de las propiedades físicas, químicas y tecnologías de los materiales según los requerimientos de las normas ASSHTO y ASTM para la formulación de las mezclas del slurry seal	18
4.4.1. Agregado pétreo	18
4.4.2. Relleno Mineral	23
4.4.3. Aditivo	23
4.4.4. Agua	23
4.4.5. Emulsión Asfáltica	24
4.5. Métodos y procedimientos para la formulación de mezclas de slurry seal de diversas composiciones aplicando diseños experimentales ajustados a los requerimientos tecnológicos de su desempeño funcional	26
4.5.1. Factores y Nivel de Factores	27
4.5.2. Determinación de rangos experimentales	27
4.6. Variables de Respuestas	28
4.6.1. Diseño experimental ajustado	29
4.7. Métodos y procedimientos para la determinación de la calidad de cada mezcla de slurry seal formulada, conforme a los requerimientos tecnológicos de las normas ISSA A105	31
4.7.1. Consistencia de la pasta de slurry seal	31
4.7.2. Tiempo de mezclado	32
4.7.3. Adhesión de arena de la mezcla de slurry seal	32
4.7.4. Compactación vertical y desplazamiento lateral de la mezcla de slurry seal	33
4.7.5. Desgaste por abrasión húmeda	34
4.7.6. Tiempo de anaquel	35
4.8. Métodos y procedimientos para la optimización de la composición de las mezclas de las pastas de slurry seal con relación a los requerimientos tecnológicos de su desempeño funcional	35
4.8.1. Cohesión de la mezcla optima	36
4.8.2. Desnudamiento por humedad de la mezcla optima	37
V. Análisis y discusión de resultados	38

5.1. Componentes del slurry seal	38
5.1.1. Agregado pétreo.....	38
5.1.2. Emulsión Asfáltica	42
5.1.3. Agua	45
5.1.4. Relleno Mineral y Aditivo	45
5.1.5. Mezclas de pastas de Slurry Seal	46
5.2. Optimización de la composición de las mezclas de la pasta de slurry seal con relación a los requerimientos tecnológicos de su desempeño funcional.....	60
5.2.1. Consistencia optima	60
5.2.2. Tiempo de Mezclado optimo.....	61
5.2.3. Desgaste por abrasión Húmeda optima	61
5.2.4. Adhesión de Arena optima	62
5.2.5. Compactación vertical y Desplazamiento lateral optima	62
5.2.6. Cohesión optima	63
5.2.7. Desnudamiento por Humedad optima.....	63
5.2.8. Análisis de predicción y datos reales de la pasta asfáltica optima	64
VI. Conclusiones.....	65
VII. Recomendaciones.....	67
VIII. Referencias	68
IX. Anexos	70
A. Ensayos para evaluación y determinación de los requerimientos tecnológicos de calidad de los materiales y la pastas de slurry seal....	70
B. Resultados de los requerimientos tecnológicos de calidad de las muestras de las pastas de slurry seal	72
C. Figuras de muestras y equipos utilizados	80

Índice de Tablas

Tabla 3.1. Clasificación para agregados utilizados en slurry seal (ISSA A105, 2010) .	6
Tabla 4.1. Composiciones para las mezclas del slurry seal	30
Tabla 5.1. Resultados de equivalente de arena del agregado pétreo.....	39
Tabla 5.2. Resultados del valor de azul de metileno del agregado pétreo.....	39
Tabla 5.3. Resultados del porcentaje de humedad del agregado pétreo.....	40
Tabla 5.4. Resultados de absorción, gravedad específica, gravedad aparente, densidad y densidad relativa del agregado pétreo	40
Tabla 5.5. Datos obtenidos por solución de sulfato de magnesio.....	41
Tabla 5.6. Datos obtenidos por sulfato de sodio	41
Tabla 5.7. Resultados de % Cemento Asfáltico de la emulsión.....	42
Tabla 5.8. Resultados de porcentaje de Partículas sólidas de asfalto contenidas en la emulsión.....	43
Tabla 5.9. Resultados de Viscosidad a 25 °C de la emulsión CSS-1H.....	43
Tabla 5.10. Resultado de penetración del cemento asfáltico de la emulsión.....	44
Tabla 5.11. Resultados de estabilidad para la muestra de la parte superior	44
Tabla 5.12. Resultados de estabilidad para la muestra de la parte inferior	44
Tabla 5.13. Resultados de porcentaje de asentamiento de la emulsión asfáltica	44
Tabla 5.14. Tiempo de anaquel para las mezclas diseñadas	59
Tabla 5.15. Punto óptimo de diseño propuesto y predicciones de resultados de las variables.....	60
Tabla 5.16. Consistencia de la pasta optima.....	61
Tabla 5.17. Desgaste por abrasión húmeda de la pasta optima.....	61
Tabla 5.18. Adhesión de arena de la pasta optima	62
Tabla 5.19. Compactación vertical y Desplazamiento lateral de la pasta optima.....	62
Tabla 5.20. Cohesión ($T>30$ oC) de la mezcla del punto optimo	63
Tabla 5.21. Desnudamiento por humedad de la pasta optima	63
Tabla 5.22. Comparación de los resultados reales y la predicción para la pasta optima	64
Tabla A.9.1. Ensayos para el análisis de la mezcla del slurry seal recomendada por la ISSA A105	70
Tabla A.9.2. Normas para evaluar los componentes del slurry seal.....	70
Tabla A.9.3. Evaluación físico-química del agua.....	71
Tabla B.9.4. Consistencia de las mezclas diseñadas.....	71
Tabla B.9.5. Tiempo de mezclado de las mezclas diseñadas	71
Tabla B.9.6. Adhesión de arena de las mezclas diseñadas	71

Tabla B.9.7. Desplazamiento y Compactacion de las mezclas diseñadas	71
Tabla B.9.8. Desgaste por abrasión húmeda de las mezclas diseñadas.....	71
Tabla B.9.9. Granulometria promedio del agregado pétreo por tamizado	71
Tabla B.9.10. Optimización del diseño de mezclas con respecto a las variables de respuesta	71

Índice de Figuras

Figura 5.1. Curva Granulométrica del agregado pétreo	38
Figura 5.2. Distribución de las consistencias de las mezclas diseñadas.....	46
Figura 5.3. Superficie de respuesta de interacción de Consistencia; a) Consistencia vs. Agua, Emulsión asfáltica; b) Consistencia vs. Emulsión Asfáltica, Relleno mineral; c) Consistencia vs. Agua, Relleno Mineral	47
Figura 5.4. Gráfico de distribución para el tiempo de mezclado de las mezclas diseñadas.....	48
Figura 5.5. Superficie de respuesta de interacción de tiempo de mezclado; a) Tiempo de mezclado vs. Agua, Emulsión asfáltica; b) Tiempo de mezclado vs. Emulsión Asfáltica, Relleno mineral; c) Tiempo de mezclado vs. Agua, Relleno Mineral	49
Figura 5.6. Distribución de datos de adhesión de arena para las mezclas diseñadas.	50
Figura 5.7. Superficie de respuesta de interacción de Adhesión de arena; a) Adhesión de arena vs. Agua, Emulsión asfáltica; b) Adhesión de arena vs. Emulsión Asfáltica, Relleno mineral; c) Adhesión de arena vs. Agua, Relleno Mineral.....	51
Figura 5.8. Distribución de datos de compactación vertical y compactación vertical de las mezclas diseñadas	52
Figura 5.9. Superficie de respuesta de interacción de Desplazamiento lateral; a) Desplazamiento lateral vs. Agua, Emulsión asfáltica; b) Desplazamiento lateral vs. Emulsión Asfáltica, Relleno mineral; c) Desplazamiento lateral vs. Agua, Relleno Mineral	53
Figura 5.10. Superficie de respuesta de interacción de Compactación vertical; a) Compactación vertical vs. Agua, Emulsión asfáltica; b) Compactación vertical vs. Emulsión Asfáltica, Relleno mineral; c) Compactación vertical vs. Agua, Relleno Mineral	54
Figura 5.11. Distribución de datos de degasta por abrasión húmeda de las mezclas diseñadas.....	55
Figura 5.12. Superficie de respuesta de interacción de Desgaste por abrasión húmeda; a) Desgaste vs. Agua, Emulsión asfáltica; b) Desgaste vs. Emulsión Asfáltica, Relleno mineral; c) Desgaste vs. Agua, Relleno Mineral	56
Figura 5.13. Superficie de respuesta de interacción de Tiempo de anaquel; a) Almacenamiento vs. Agua, Emulsión asfáltica; b) Almacenamiento vs. Emulsión Asfáltica, Relleno mineral; c) Almacenamiento vs. Agua, Relleno Mineral.....	58
Figura C.9.1. Muestra de agregado pétreo cuarteado.	80
Figura C.9.2. Agregado pétreo en condición saturada superficialmente seca.....	80
Figura C.9.3. Máquina de Los Ángeles.....	80

Figura C.9.4. Partícula de agregado húmedo en la que se muestra la distribución de agua interior y exterior.....	81
Figura C.9.5. Ensayo de valor de azul de metileno para la evaluación del agregado pétreo.....	81
Figura C.9.6. Muestra de cemento asfáltico obtenido del ensayo de residuo por evaporación.....	81
Figura C.9.7. Muestras post ensayo de rueda cargada y adhesión de arena.....	82
Figura C.9.8. Muestras post ensayo de desgaste por abrasión húmeda.....	82
Figura C.9.9. Muestra de Ensayo de Cohesión a Temperatura <30 °C.....	82
Figura C.9.10. Muestra post Cohesión 4:30 h a Temperatura >30 °C.....	83

Nomenclatura

cemento asfáltico: bitumen asfáltico que contiene la emulsión asfáltica.

tensio-activo o surfactante: sustancia que influye por medio de la tensión superficial en la superficie de contacto de las emulsiones.

Rotura: rompimiento de la estabilidad de la emulsión donde se separa el agua evaporándose de la emulsión asfáltica.

Curado: Etapa donde la mezcla asfáltica a liberado toda el agua contenida en su composición y el cemento asfáltico se une totalmente al agregado.

Micropavimento: tratamiento asfáltico para espesores de mayor tamaño, rápida apertura de tráfico y rotura de emulsión contralada.

chip seal: tratamiento asfáltico con Aplicación directa de la emulsión asfáltica mediante rociado.

Viscosidad Saybolt furol: es el tiempo corregido de flujo, en segundos, de 60 mL de muestra, a través de un orificio Furol, calibrado a condiciones normalizadas. Además, Furol, es una sigla de "Fuel and road oils" (combustibles y aceites para carretera).

Cohesión: Unión entre el agredo Petro y el cemento asfáltico.

Emulsión CSS-1H: emulsión catiónica de rompimiento lento (Cationic slow setting, CSS); el numero indica el grado de viscosidad y la H indica que el asfalto posee cierto grado de dureza.

Esmecita: minerales de arcilla que tienen una estructura cristalina de tres capas (una capa de alúmina y dos capas de sílice).

I. Introducción

Una pasta bituminosa de slurry seal se considera como una mezcla de emulsión asfáltica, agua, agregado pétreo y relleno mineral, la cual es de consistencia blanda. Esta mezcla asfáltica es ampliamente utilizada en los tratamientos superficiales de los pavimentos, debido a su fácil manejo y aplicación. Una mezcla de slurry seal debe cumplir los estándares necesarios, por ello, los ensayos de calidad de la ISSA A105 son específicamente recomendados como punto de diseño.

La red vial de Nicaragua contaba con 2,466 km, aproximadamente, de carreteras pavimentadas con asfalto, lo que representa el 10.06% de la red vial (MTI, 2017). Por otro lado, estas son constantemente ampliadas y necesitan mantenimiento periódico, en ocasiones se debe aplicar un tratamiento inmediato. Debido a esto, una de las mejores soluciones en la actualidad es la utilización de tratamientos asfálticos, como la mezcla slurry seal.

Por lo tanto, el slurry seal funciona como una alternativa más eficiente y eficaz que un tratamiento de asfalto común; además, su aplicación en las superficies no necesita equipos sofisticados o costosos, basta con colocar la mezcla y agregar agua para realizar su trabajo; así mismo, una pasta de slurry seal es un producto portable y multifuncional para ser utilizado en el tratamiento de los pavimentos.

Por otro lado, los componentes de la mezcla deben de cumplir ciertos requerimientos tecnológicos correspondientes a su diseño funcional, los cuales determinan la compatibilidad para el diseño de la mezcla. Para un diseño adecuado se debe llevar a cabo una serie de experimentos con combinaciones de los componentes del slurry seal, para ello, se utilizan softwares estadísticos, los cual funcionan como herramientas para el diseño de mezclas y combinaciones posibles dentro del experimento ajustado.

Así mismo, el método de superficie de respuesta determina los efectos de las formulaciones con respecto a su desempeño funcional proporcionando así un método de optimización de estos requerimientos.

Actualmente no se encuentran productos asfálticos que tengan la característica de poder preservarse en anaquel y aplicarse posteriormente, sin embargo, estudios donde se utiliza la superficie de respuesta como método de diseño y optimización de un producto asfáltico como el de *Narváz (2020)*, donde presenta el “Diseño de un Micropavimento tipo III, que cumpla con los estándares de calidad establecidos por la norma internacional ISSA A143, aplicando el método de Superficie de Respuesta” obteniendo un tratamiento asfáltico con un punto óptimo de 12% emulsión asfáltica, 8% agua, 1% de cemento, cumpliendo con los estándares de calidad requeridos por las normas ISSA.

Por otro lado, *Setyawan, Sarwono & Adnan (2015)* en su estudio “The development of slurry seal design with ordinary portland cement Replacement by low calcium fly ash” y *Mejía (2018)* plantea el estudio de “Diseño de un mortero asfáltico con emulsión, modificada con caucho molido de neumáticos”. Estudios que utilizan diseño de experimentos ajustados a requerimientos tecnológicos conforme al desempeño funcional del slurry seal con nuevas formulaciones, los cuales resultan en diseños de productos asfálticos que se adaptan al entorno de aplicación y cumpliendo los requerimientos de alta calidad, así como las optimizaciones de las variables que afectan su desempeño.

El presente estudio diseña una pasta de slurry seal evaluando la compatibilidad de las propiedades física, química y tecnológica del agregado pétreo, emulsión asfáltica, agua y relleno mineral conforme a los requerimientos de las normas de calidad, para la formulación de una mezcla de pasta asfáltica óptima que cumpla con los requisitos de calidad establecidos por la norma ISSA A105.

Utilizando la metodología de superficie de respuesta con un diseño central compuesto se obtuvo 20 puntos de mezclas y una réplica por cada mezcla, determinando la calidad de cada mezcla conforme a los requerimientos tecnológicos de la norma de calidad ISSA A105, así mismo, optimizando los parámetros que afectan el desempeño funcional de las mezclas obteniendo una predicción del punto óptimo de diseño el cual se formuló para establecer el punto óptimo real.

II. Objetivos

2.1. Objetivo General

Diseñar una pasta bituminosa de slurry seal aplicando el método de Superficie de Respuesta.

2.2. Objetivos Específicos

- ❖ Evaluar la compatibilidad de las propiedades físicas, químicas y tecnológicas de los componentes del slurry seal conforme los requerimientos de las normas ASSHTO y ASTM para la formulación de las mezclas.
- ❖ Formular mezclas del slurry seal de diversas composiciones aplicando diseños experimentales ajustados a los requerimientos tecnológicos de su desempeño funcional.
- ❖ Determinar la calidad conforme los requerimientos tecnológicos de las normas ISSA A105 de cada una de las mezclas de slurry seal formuladas.
- ❖ Optimizar la composición de las mezclas de slurry seal con relación a los requerimientos tecnológicos de su desempeño funcional.

III. Marco teórico

3.1. Bitumen

El betún o bitumen es una mezcla de sustancias orgánicas altamente viscosa, negra, de alta densidad completamente soluble en disulfuro de carbono y compuesta principalmente por hidrocarburos aromáticos policíclicos. (La comunidad petrolera, 2016).

3.2. Pasta Bituminosa

A partir de lo anterior, se puede definir una pasta bituminosa como una preparación semisólida, de consistencia blanda y compuesta por bitumen asfáltico, relleno mineral y agua. De manera similar, una pasta bituminosa de slurry seal está compuesta por una emulsión asfáltica catiónica de rompimiento lento, relleno mineral, agua, agregado pétreo y aditivo; la cual es usada en tratamientos superficiales, principalmente sobre pavimentos.

3.3. Slurry Seal

“El slurry Seal o lechada asfáltica es una mezcla de agregados de granulometría cerrada, emulsión asfáltica, aditivos y agua. La mezcla se aplica como un tratamiento de superficie. Las lechadas asfálticas pueden ser tanto una técnica de mantenimiento preventivo como correctiva” (Asphalt Institute & Asphalt Emulsion Manufactures Association, 2001).

Este tipo de mezcla se aplicaron por primera vez a principios de la década de los años 30 en Alemania. Sin embargo, su mayor desarrollo se produjo principalmente en la década de los años 60, gracias a la aparición de equipos de flujo continuo y a los avances en la tecnología de emulsiones asfálticas.

3.4. Componentes del Slurry Seal

3.4.1. Emulsión Asfáltica

La emulsión asfáltica consiste en tres ingredientes básicos (Asphalt Institute & Asphalt Emulsion Manufacturers Association, 2001)

- ✓ El cemento Asfáltico es el elemento básico de la emulsión asfáltica y, en la mayoría de los casos constituye entre un 50 y un 70% de la emulsión.
- ✓ El segundo componente de las emulsiones asfálticas es el agua. Su contribución a las propiedades deseadas en el producto final no puede ser minimizada.
- ✓ Los agentes emulsivos son un agente tensio-activo o surfactante, los cuales mantienen las partículas de asfalto en suspensión estable y controlan el tiempo de rotura. Igualmente es un factor que determina la clasificación de las emulsiones.

En algunas ocasiones, la emulsión puede contener otros aditivos, como estabilizantes, mejoradores de recubrimiento, mejoradores de adherencias, o agentes de control de rotura. También, se clasifican en tres categorías: aniónica, catiónica y no iónica. En la práctica, las dos primeras son las más ampliamente utilizadas en la construcción y mantenimiento.

3.4.2. Agregado Pétreo

“La denominación técnica agregados pétreos en pavimentos se refiere a un conglomerado de partículas inertes de gravas, arenas, finos y/o fillers (naturales o triturados), utilizados ya sea para la fabricación de mezclas asfálticas, concretos hidráulicos y materiales estabilizados o para la construcción de capas de terraplén.” (Rondón & Reyes, 2015)

El agregado utilizado, en el caso del slurry seal será de piedra molida, como, por ejemplo: granito, escoria, caliza, basalto, sílex u otro agregado de alta calidad o una combinación de estos. El agregado debe asegurarse de que esté 100 por ciento molido. (ISSA, 2010).

Granulometría

Cuando las pruebas están en concordancia con la ASSHTO T27 (ASTM C136) y ASSHTO T11 (ASTM C117), el diseño de mezcla de agregado debe ser con uno las especificaciones siguientes:

Tabla 3.1. Clasificación para agregados utilizados en slurry seal (ISSA A105, 2010)

Tamaño de Tamiz		Tipo I Porcentaje de Paso	Tipo II Porcentaje de Paso	Tipo III Porcentaje de Paso	Valores de Tolerancia
3/8	9.5 mm	100	100	100	
# 4	4.75 mm	100	90 – 100	70 – 90	± 5%
# 8	2.36 mm	90 – 100	65 – 90	45 – 70	± 5%
# 16	1.18 mm	65 – 90	45 – 70	28 – 50	± 5%
# 30	600 um	40 – 65	30 – 50	19 – 34	± 5%
# 50	330 um	25 – 42	18 – 30	12 – 25	± 4%
# 100	150 um	15 – 30	10 – 21	7 – 18	± 3%
# 200	75 um	10 – 20	5 – 15	5 – 15	± 2%

Tipo I: Esta gradación de agregado es usada para rellenar huecos en la superficie, tratar problemas superficiales moderados y proporcionar protección contra otros elementos. La finura de esta mezcla proporciona la capacidad de penetrar alguna grieta.

Tipo II: Esta gradación de agregado se utiliza para rellenar huecos de la superficie, tratar problemas superficiales más severos, sellado, y proporciona una superficie duradera.

Tipo III: Esta gradación de agregado proporciona máxima seguridad al deslice y superficie duradera mejorada.

3.4.3. Relleno mineral

Puede utilizarse relleno mineral para mejorar la consistencia de la mezcla y ajustar las propiedades de rotura y curado de la mezcla. Puede utilizarse cemento Portland, hidróxido de calcio, polvo de caliza, cenizas volantes u otros rellenos que cumplan los requisitos de ASTM D242, si así lo requiere el diseño de la mezcla. Los niveles típicos de uso son de entre un 0,0 y un 3,0 por ciento y pueden considerarse parte de la gradación del agregado. (ISSA, 2010)

3.4.4. Agua

El agua debe estar libre de sales perjudiciales y contaminantes. Si la calidad del agua está en duda, se la debe entregar al laboratorio para su análisis.

3.4.5. Aditivos

Pueden utilizarse aditivos para acelerar o retardar la fractura/fraguado del slurry seal. Los aditivos adecuados y su campo de uso aplicable deben ser seleccionados de manera experimental según los requerimientos y aprobados por el laboratorio como parte del diseño de la mezcla; por ejemplo el cemento portland es el aditivo más utilizado, este acelera la fractura/fraguado del slurry seal; de esta manera dividiéndose los aditivos como catalizadores o inhibidores de rotura.

3.5. Aplicación del slurry seal

El slurry seal proporciona una estructura impermeable de color negro que no permite el paso del agua, brinda una superficie antideslizante que se traduce en seguridad para el conductor y elimina el problema de las gravas sueltas que son causa de accidentes. Su utilización como capa protectora en el mantenimiento de vías genera ahorros al evitar el deterioro progresivo del pavimento. Además, funciona como un sello asfáltico sobre pavimentos flexibles y tiene la capacidad para corregir irregularidades superficiales menores. También, es un excelente pretratamiento para una capa de mezcla asfáltica en caliente o para un tratamiento superficial. (Asphalt Institute & Asphalt Emulsion Manufacturers Association, 2001)

Por ello, el momento oportuno en que se aplica, es primordial, para reducir los costos de inversión con respecto a rehabilitaciones y reconstrucciones, de manera que el efecto sobre los pavimentos sea efectivo.

3.6. International Slurry Surfacing Association

La International Slurry Surfacing Association o ISSA es una asociación sin fines de lucro dedicada a la estandarización internacional, educación, y éxito de profesionales y corporaciones de tratamientos de las Lechadas Asfálticas (Slurry seal), Micropavimento (Microsurfacing), tratamiento superficial simple (Chip seal) y grietas. También, provee asistencia técnica e información trascendental a todos sus miembros.

3.6.1. ISSA A105

La ISSA A105 es la guía internacional de rendimiento recomendada para el slurry seal; Esta guía tiene como fin los diseños, pruebas, el control de calidad, medición y métodos de pago para la aplicación del slurry seal.

3.7. American Association of State Highway and Transportation Officials

La Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transportes o por sus siglas en inglés AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials), es un órgano que establece normas, publica especificaciones y hace pruebas de protocolos y guías usadas en el diseño y construcción de autopistas en todo los Estados Unidos. A pesar de su nombre, la asociación representa no solo a las carreteras, sino también al transporte por aire, ferrocarril, agua y transporte público.

La AASHTO está compuesta por miembros del Departamento de Transporte de cada estado en los Estados Unidos, así como de Puerto Rico y del Distrito de Columbia. El Departamento de Transporte de los Estados Unidos, algunos condados y ciudades estadounidenses, operadores de peajes, la mayoría de las provincias canadienses al igual que los departamentos de carreteras de Hong Kong, el Ministro de Obras Públicas y Asentamientos de Turquía.

3.8. American Society for Testing and Materials

Sociedad Americana para Pruebas y Materiales, por sus siglas en inglés ASTM (American Society for Testing and Materials), es una organización de normas internacionales que desarrolla y publica acuerdos voluntarios de normas técnicas para una amplia gama de materiales, productos, sistemas y servicios. Existen alrededor de 12,575 acuerdos voluntarios de normas de aplicación mundial. Las oficinas principales de la organización ASTM international están ubicadas en West Conshohocken, Pensilvania, Estados Unidos, al noroeste de la ciudad de Filadelfia.

3.9. Pruebas de Evaluación para las propiedades físicas, químicas y tecnológicas de los materiales para el slurry seal

3.9.1. Agregado Pétreo y Relleno Mineral

Valor equivalente de arena y agregados finos que posee el agregado pétreo

El propósito de este método de prueba es indicar, bajo condiciones estándar, las proporciones relativas de finos y polvo de arcilla o plásticos en suelos granulares y agregados finos que pasan el tamiz de 4.75 mm (No. 4). El término "equivalente de arena" expresa el concepto de que la mayoría de los suelos granulares y algunos agregados finos son mezclas de partículas gruesas deseables, partículas del tamaño de la arena y, en general, finos y polvo de arcilla o plástico no deseables.

Azul de Metileno

Identifica la presencia de arcillas nocivas del grupo de las esmectitas (material pobre menos 75 μm) y proporciona una indicación de la actividad superficial del agregado. Por ello, se puede utilizar para estimar la cantidad de arcillas perjudiciales y materia orgánica presentes en un agregado. Un valor alto para el azul de metileno indica una gran cantidad de arcilla o material orgánico presente en la muestra.

Solidos de los agregados mediante el uso de sulfato de sodio o sulfato de magnesio

Determina la resistencia a la desintegración por soluciones saturadas de sulfato de sodio o sulfato de magnesio. Esto se logra mediante inmersión repetida en soluciones saturadas de sulfato de sodio o magnesio seguido de secado en horno para deshidratar parcial o completamente la sal precipitada en los espacios porosos permeables.

Los valores para el porcentaje de pérdida permitida por este método de prueba son generalmente diferentes para agregados finos y gruesos. Igualmente, llama la atención sobre el hecho de que los resultados de la prueba mediante el uso de las dos sales difieren considerablemente donde los límites considerados son 15% máximo de W/Na₂SO₄ y 25% máximo de W/MgSO₄; la prueba suele ser más severa cuando se usa sulfato de magnesio.

Resistencia a la degradación de agregados gruesos de tamaño pequeño por abrasión e impacto en la máquina de Los Ángeles

La resistencia a la abrasión, desgaste, o dureza de un agregado, es una propiedad que depende principalmente de las características de la roca madre, este factor cobra importancia cuando las partículas van a ser sometidas a un roce continuo como es el caso de pisos y pavimentos, para lo cual los agregados que se utilizan deben ser duros.

Por tanto, esta prueba ha sido ampliamente utilizada como indicador de la calidad relativa o competencia de varias fuentes de agregados que tienen composiciones minerales similares. El porcentaje de pérdida determinado por este método de prueba no tiene una relación consistente conocida con el porcentaje de pérdida para el mismo material cuando se prueba con el Método de prueba ASTM C535; Este método de prueba cubre un procedimiento para probar agregados gruesos con un tamaño máximo menor de 37.5 mm. Para resistencia a la degradación usando la máquina de prueba de Los Ángeles.

Método Estándar de pruebas por tamizado de agregados finos y gruesos

Este método de prueba se utiliza principalmente para determinar la clasificación de los materiales propuestos para su uso como agregados. Con ello, los resultados se utilizan para determinar el cumplimiento de la distribución del tamaño de partículas con los requisitos de especificación aplicables y para proporcionar los datos necesarios para el control de la producción de diversos productos y mezclas que contienen agregados. Los datos también pueden ser útiles para desarrollar relaciones con la porosidad y el empaquetamiento.

La determinación precisa de material más fino que el tamiz de 75 μm (No. 200) no se puede lograr mediante el uso de este método de prueba solo. Por consiguiente, se debe utilizar el método de prueba ASSHTO T11/ ASTM C117 para determinar el material más fino.

Método de prueba estándar para materiales más finos que un tamiz de 75 μm (N.º 200) en los agregados minerales mediante lavado

El material más fino que el tamiz de 75 μm (No. 200) se puede separar de las partículas más grandes de manera mucho más eficiente y completa mediante un tamizado húmedo que mediante el uso de un tamizado seco. Por lo tanto, cuando se desean determinaciones precisas de material más fino que 75 μm en agregado fino o grueso, este método de prueba se usa en la muestra antes del tamizado en seco de acuerdo con el método de prueba de las ASSHTO T27 / ASTM C136.

Método de ensayo normalizado para determinar la densidad, la densidad relativa (gravedad específica), y la absorción de agregados finos

Este método de ensayo cubre la determinación de la densidad promedio de una cantidad de partículas de agregado fino (no incluye el volumen de los vacíos entre las partículas), la densidad relativa (gravedad específica), y la absorción de agregados finos; Se utiliza para determinar la densidad o la porción esencialmente sólida de un gran número de partículas de agregado y da un valor promedio que representa la muestra.

3.9.2. Emulsión asfáltica

Residuo por Evaporación

La prueba se puede utilizar para indicar las características de composición del asfalto emulsionado. Los residuos de evaporación también pueden someterse a otras pruebas de evaluación. Sin embargo, las propiedades del residuo del procedimiento de evaporación pueden diferir de las del residuo de destilación.

Viscosidad

Este método de prueba utiliza el viscosímetro Saybolt Furol para medir la consistencia de una emulsión asfáltica. Es aplicable a todas las emulsiones especificadas en las normas ASTM D 977 y D 2397.

La viscosidad tiene importancia en el uso de emulsiones asfálticas porque es una propiedad que afecta su desempeño. Cuando se aplica en construcción, el material debe ser lo suficientemente delgado como para ser aplicado uniformemente a través de la barra de rociado del distribuidor, pero lo suficientemente grueso para que no fluya desde la corona o el nivel de la carretera. Para las emulsiones de grado de mezcla, la viscosidad puede afectar el espesor resultante de la película en el agregado. La viscosidad de muchas emulsiones se ve afectada por el cizallamiento.

Examinación de Residuo

Pruebas de gravedad específica, contenido de cenizas, solubilidad en tricloroetileno, penetración, ductilidad y flotación, son sugeridas para examinar el residuo de la emulsión obtenido por destilación o evaporación; Estas pruebas se utilizan para caracterizar y evaluar las propiedades de los residuos de emulsión.

Asentamiento

Este método de prueba mide el asentamiento de un asfalto emulsionado que ocurre en un recipiente cilíndrico. Por ello, es una medida de la uniformidad de una dispersión de asfalto emulsionado almacenada durante un período de tiempo.

Tamizado

Este método de prueba mide el grado en el que un asfalto emulsionado puede contener partículas de asfalto u otros sólidos discretos retenidos en un tamiz de malla de 850 µm. La retención de una cantidad excesiva de partículas en el tamiz indica que pueden ocurrir problemas en el manejo y aplicación del material. Las partículas de asfalto retenidas en el tamiz a menudo se deben a la aglomeración de la fase dispersa. El almacenamiento, el bombeo, la manipulación y la temperatura pueden contribuir a la formación de partículas. La contaminación del tanque, el transporte o la manguera son otros factores que afectan la formación de partículas.

Estabilidad de Almacenamiento

Este método de prueba se relaciona con la capacidad de una emulsión asfáltica de permanecer como una dispersión uniforme durante el almacenamiento. Es aplicable a emulsiones asfálticas compuestas principalmente por una base asfáltica líquida o semisólida, agua y un agente emulsionante.

Este método de prueba determina la diferencia en porcentaje de residuo de muestras tomadas de la parte superior e inferior del material colocado en un almacenamiento simulado sin perturbaciones durante 24 h. El resultado se expresa como el promedio de los dos valores individuales obtenidos al determinar la diferencia entre el porcentaje de residuo de las muestras, superior e inferior para cada cilindro de almacenamiento.

3.9.3. Agua

Las características físico-químicas del agua, como los sólidos disueltos y pH pueden afectar la interacción de los componentes de la mezcla asfáltica, por ello, se evalúa la composición y se verifica que no tenga efectos adversos en la mezcla final.

Sólidos Disueltos Totales

“Estos comprenden las sales inorgánicas (principalmente de calcio, magnesio, potasio y sodio, bicarbonatos, cloruros y sulfatos) y pequeñas cantidades de materia orgánica que están disueltas en el agua” (OMS, 2013).

pH

En el agua, este factor es necesario. El valor del pH varía de 0 a 14. Bajo 7 el agua es considerada ácida y sobre 7, alcalina. Agua con pH 7 es neutra.

3.9.4. Slurry Seal

Tiempo de Mezclado

Este método de prueba mide el tiempo de mezcla de una combinación específica de materiales para un sistema de revestimiento de lechada. Las pautas de rendimiento recomendadas para el sellado de lechada de asfalto emulsionado y micro superficies; Esto proporciona valores objetivo específicos para los resultados del tiempo de mezcla a 25 ° C.

Además, esta prueba verifica la compatibilidad de la materia prima y establece las proporciones adecuadas de los componentes necesarios para asegurar suficiente tiempo de mezcla para la aplicación del producto.

Consistencia

Esta prueba proporciona un valor numérico para la consistencia del sello de la lechada. La guía de rendimiento recomendada para el sello de lechada de asfalto emulsionado, ISSA A105, proporciona valores objetivo específicos para obtener resultados de consistencia. Igualmente, Esta prueba mide las características de flujo de los componentes del sistema de sello de lechada para evaluaciones de laboratorio.

Cohesión

Este método de prueba se utiliza para determinar el fraguado inicial y el desarrollo del curado de los sistemas de revestimiento de lechada en función del par a lo largo del tiempo. Las pautas de rendimiento recomendadas para el sellado de lechada de asfalto emulsionado, ISSA A105, proporciona valores objetivo específicos para los resultados de cohesión. Esta prueba cuantifica el tiempo necesario antes de que un sistema de pavimentación con lechada pueda ser sometido a tráfico directo.

Desnudamiento por Humedad

Este método de prueba identifica la capacidad de la mezcla de lechada curada de superficie de permanecer recubierta en las condiciones de prueba. Las pautas de rendimiento recomendadas para el sellado de lechada de asfalto emulsionado, ISSA A105, proporciona valores objetivo específicos para los resultados de decapado en húmedo. Esta prueba se utiliza para indicar la posibilidad de que se desprenda lo que puede provocar un deshilachado prematuro.

Desgaste por Abrasión Húmeda

Las cualidades de desgaste de los sistemas de revestimiento de lechada en condiciones de abrasión húmeda. Las pautas de rendimiento recomendadas ISSA A105, proporciona valores objetivo específicos para los resultados de las pruebas de abrasión en vías húmedas. La prueba establece el contenido mínimo de asfalto emulsionado de un sistema de revestimiento de lechada dado.

Método de rueda cargada con adhesión de arena

La prueba de la rueda cargada está destinada a compactar mezclas bituminosas de agregados finos, como el sello de lechada, por medio de una rueda alternativa cargada con neumáticos de caucho.

También se pueden realizar varias mediciones accesorias durante esta prueba para estudiar las velocidades de compactación y la deformación plástica de muestras de mezclas bituminosas mono y múltiples capas.

3.10. Diseño de Mezclas

Los experimentos con mezclas son diseños en los que factores son los componentes o ingredientes y las variables de respuesta dependen de las proporciones con las que participan los ingredientes en la mezcla.

“En general, se supone que las características de calidad de la mezcla dependen de las proporciones con las que participan los ingredientes y no de la cantidad absoluta de ellos.” (Gutiérrez Pulido & Salazar, 2008).

3.11. Metodología de Superficie de Respuesta

Esta metodología experimental y de análisis permite resolver el problema de encontrar las condiciones de operación óptimas de un proceso, es decir, aquellas que dan por resultado “valores óptimos” de una o varias características de calidad del producto. Donde, es importante tener presente la visión de la región experimental y de operabilidad, ya que, en principio, el punto óptimo que interesa encontrar pudiera localizarse en cualquier lugar de la región de operabilidad, dentro o afuera de la región experimental inicial.

En procesos ya establecidos y muy estudiados, es de esperarse que dicho punto óptimo se encuentre “no muy lejos” de las condiciones de operación usuales, posiblemente dentro de la región experimental inicial. Por ello, implica tres aspectos: diseño, modelo y técnica de optimización. El diseño y el modelo se piensan al mismo tiempo, y dependen del tipo de comportamiento que se espera en la respuesta y el método de optimización se clasifican, según sea el caso, como de primero o segundo orden.

IV. Metodología

En el presente estudio se realizó el *Diseño de una pasta bituminosa de slurry seal aplicando el método de superficie de respuesta*. Donde, se evaluó las propiedades de los componentes del slurry seal y se formuló las mezclas aplicando diseños experimentales ajustados a los requerimientos, también, se determinó la calidad conforme a los requerimientos tecnológicos, de ahí, se optimizó la composición para obtener un producto de alta calidad conforme a las normas de calidad ISSA A105.

4.1. Tipo de Investigación

El tipo de investigación utilizada se considera experimental cuantitativa, orientada a la medición de los resultados del diseño con los comportamientos de las variables en el contexto de estudio.

4.2. Diseño de la Investigación

En lo que respecta al tema planteado, la estrategia general de recolección y desarrollo de información en función de los objetivos propuestos se dirigió a un diseño experimental, donde, se manipuló las variables determinando las causas y efectos en el producto final.

La recolección de datos está constituida por un conjunto de ensayos, análisis y procedimientos propuestos por la agencia ISSA y normativas vigentes de la ASSHTO y ASTM, presentadas en la **Tabla A.9.1**; la cuales, muestran las normas que determinan la calidad conforme a los requerimientos tecnológicos buscados para el slurry seal.

En el marco de este estudio, los datos utilizados para el análisis de las variables que describieron el comportamiento y control del proceso para el diseño, se tomaron directamente en los sitios de prueba para los sujetos de estudio; así mismo, el ordenamiento y análisis de los datos resultantes se analizaron mediante un software estadístico.

Por otro lado, los materiales fueron proporcionados por el laboratorio de calidad de SOLTECSA, como la emulsión asfáltica (CSS-1H), polvo de caliza (relleno mineral), sulfato de aluminio (aditivo retardante), agregado pétreo de roca basáltica proveniente de la empresa PROINCO, y agua del pozo local.

4.3. Determinación del Universo

El universo de estudio lo conforma el diseño de una pasta bituminosa de slurry seal, así como los componentes y variables que influyen en sus características, la tecnología aplicada para su análisis, el modelo de diseño, también, las normas recomendadas por la ISSA A105, como lo son la ASSHTO y ASTM descritas para los ensayos de los materiales y la mezcla del slurry seal.

4.4. Métodos y procedimientos para la evaluación de la compatibilidad de las propiedades físicas, químicas y tecnologías de los materiales según los requerimientos de las normas ASSHTO y ASTM para la formulación de las mezclas del slurry seal

4.4.1. Agregado pétreo

Selección de agregado

El agregado seleccionado se clasifica como material cero, el cual de las clases de gravas que dispone la empresa PROINCO cumple con las características para la utilización en slurry seal.

Muestreo (ASTM C702)

Realizando el muestreo del agregado de manera manual, el agregado fue lavado y secado a 110 °C hasta que alcanzo peso constante; de ahí, la muestra inicial se mezcló para homogenizarse y se depositó en una superficie plana apilándose de manera cónica, donde se procedió a aplanar con una pala de mano, y seguidamente fue cuarteado en cuatro partes iguales (**Figura C.9.1**), esto se realizó hasta obtener la cantidad de muestras reducidas necesarias para las pruebas de evaluación del material pétreo.

Granulometría (AASHTO T27, AASHTO T11, ASTM C136, ASTM C117)

Tomando una muestra de 1010 g que fue lavada mediante el tamiz No.200 para remover los materiales más finos; y secándose a temperatura de 110 °C hasta peso constante; de ahí, se dejó reposar para su enfriamiento, y finalmente tamizándose para determinar la granulometría.

Valor equivalente de arena (AASHTO T176 y ASTM D2419)

Colocando una botella sifón a 1 m sobre la superficie de trabajo, y aparte adicionando en una probeta plástica el agregado, al cual se le vertió mediante el sifón un nivel de 102 mm aproximadamente de solución de cloruro de calcio, y removiendo las burbujas de aire contenidas en la probeta de manera manual, se dejó reposando la mezcla del agregado con la solución durante 10 min.

Posteriormente, agitándose la probeta durante medio minuto y 90 ciclos; luego con una pizeta lavando las paredes interiores se ajustó el nivel final a 380 mm, dejándose reposar durante 20 min para proceder a tomar los valores de superiores de arena y arcilla contenidos. La ecuación **(4.1)** muestra el cálculo para el equivalente de arena.

$$\%E_A = \frac{L_{Arena}}{L_{Arcilla}} * 100 \quad \text{Ecc 4.1}$$

Donde: $\%E_A$ es el equivalente de arena del agregado muestreado (%); L_{Arena} es la lectura de arena (m); $L_{Arcilla}$ es la lectura de arcilla (m).

Determinación de azul de metileno (ISSA TB145)

Disolviendo 1 g de azul de metileno en 1000 mL de agua destilada y utilizando una muestra de 1 g del material pétreo que paso a través del tamiz No.200, al cual se le agregó 30 g agua destilada para ser mezclados durante 5 minutos.

Introduciendo una porción de la solución de azul de metileno a una bureta, de ahí, la solución de metileno se agregó en intervalos de 0.5 mL/min con mezclado constante al agregado.

Utilizando un papel filtro se vertió gota a gota con intervalos de adición de azul de metileno de 1 minuto, hasta que se comprobó el punto de formación de un

halo totalmente azul; el valor de azul de metileno es reportado como mL/g = mg/g. La ecuación (4.2) y (4.3) muestra el cálculo de determinación del valor del azul de metileno.

$$V_A = \frac{\text{ml de solución de azul de metileno usado}}{\text{g de } M_s} \quad \text{Ecc 4.2}$$

$$V_A = \frac{\text{mg de azul de metileno usado}}{\text{g de } M_s} \quad \text{Ecc 4.3}$$

Dónde: V_A es el valor de azul de metileno (mg/g); M_s es la masa del agregado seco (g).

Prueba para determinar la densidad, la densidad relativa y la absorción (ASSHTO T84 y ASTM C128)

Tomando una muestra de agregado pétreo húmedo (humedad natural) que previamente fue cuarteado y secando a temperatura de 110 °C hasta que alcanzó un peso constante; el porcentaje de pérdida de peso del agregado húmedo con respecto al seco determino la humedad natural que posee el material.

$$\%h = \left(\frac{M_h - M_s}{M_h} \right) * 100\% \quad \text{Ecc 4.4}$$

Dónde: $\%h$ es el porcentaje de humedad del agregado pétreo (%); M_h es la masa de agregado pétreo con humedad natural (g); M_s es la masa de agregado pétreo totalmente seco (g).

Posteriormente, una muestra de 800 g se dejó en inmersión de agua durante 24 horas; luego pasando el material a una corriente de aire caliente, donde, en intervalos de 15 minutos se tomó una porción y se vertió dentro de un molde cónico normalizado hasta que desbordara, el material ligeramente se apisonó dentro del molde con el pisón, esta prueba se repitió hasta alcanzar la condición saturada superficialmente seca (**Figura C.9.2**).

Igualmente, se determinó el porcentaje de absorción del agregado utilizando una muestra del material en condición saturada superficialmente seca de 298.8 g, la cual se secó a 110 °C hasta peso constante.

Calibrando un picnómetro con agua a 24 °C hasta su máxima capacidad de volumen y registrando el peso, se vació el agua y se introdujo una muestra de agregado de 300 g en condición saturada superficialmente seca, una vez más, Introduciendo agua al picnómetro hasta su punto de aforo, donde, se tapó y agito manualmente durante 20 minutos esto para eliminar el aire y las burbujas de aire contenidas.

Finalmente, se rellenó de nuevo con agua hasta el máximo volumen del picnómetro y se registra el peso. Las ecuaciones que se muestran a continuación determinan los cálculos de absorción, gravedad específica, gravedad aparente, densidad y densidad relativa.

$$\%A = \left(\frac{M_{Sat} - M_s}{M_s} \right) * 100 \quad \text{Ecc 4.5}$$

$$\gamma_E = \frac{M_{Sat}}{(M_P + M_{Sat} - M_{PA})} \quad \text{Ecc 4.6}$$

$$\gamma_A = \frac{M_s}{(M_P + M_s - M_{PA})} \quad \text{Ecc 4.7}$$

$$\rho = \frac{997.5 * M_{Sat}}{(M_P + M_{Sat} - M_{PA})} \quad \text{Ecc 4.8}$$

$$\rho_R = \frac{997.5 * M_s}{(M_P + M_s - M_{PA})} \quad \text{Ecc 4.9}$$

Dónde: %A es el porcentaje de absorción del agregado pétreo (%); M_{Sat} es la masa de agregado pétreo en condición superficialmente seca (g); M_s es la masa de agregado totalmente seco (g); M_P es la masa del picnómetro calibrado con agua (g); M_{PA} es la masa del picnómetro con agua y muestra de agregado superficialmente seco (g); γ_E es la gravedad específica del agregado (Adimensional); γ_A es la gravedad aparente del agregado (Adimensional); ρ es la densidad del agregado (Kg/m³); ρ_R es la densidad relativa del agregado (Kg/m³).

Determinación los sólidos del agregado (AASHTO T104 y ASTM C88)

Preparando las soluciones saturadas, una de sulfato de sodio y otra de sulfato de magnesio se dejaron reposando 48 h antes de su uso; por otro lado, con respecto al agregado se dividió en muestras de 100 gramos para la granulometría de los tamices No.8, 16, 30 y 50.

Con las muestras separadas de agregado procediendo a dejarlas en inmersión; la primera parte de las muestras en sulfato de sodio y la segunda parte en sulfato de magnesio durante un periodo de 18 h; luego, se retiró las soluciones y secó el agregado a 110 °C hasta alcanzar peso constante. Este proceso de inmersión y secado se repitió durante 5 ciclos.

Finalmente, Lavándose el agregado con solución de cloruro de bario a 43 °C y secado a 110 °C, se tamizó por la granulometría de la muestra según fue retenido en los tamices utilizados.

Resistencia a la degradación (AASHTO T97 y ASTM C131)

Tomando una muestra de agregado, y dividiéndola por granulometría, 2500 g retenidos por el tamiz de 6.3 mm y 2500 g retenidos por el tamiz de 4.75 mm; esto se debe a la naturaleza del tamaño de partícula de material evaluado y lo recomendado por indicaciones de la prueba; consecutivamente, se mezcló ambas granulometrías para un total de 5000 g.

Por otra parte, en la máquina de los ángeles se utilizó 8 esferas metálicas, esto por la división granulométrica utilizada de la muestra. Luego, la muestra y las esferas se cargaron a la máquina de los ángeles y programando la máquina para 500 revoluciones.

Una vez terminado este proceso y el material asentado, se procedió a tamizar con el tamiz N° 12 (1.70 mm), donde, se separó el material retenido para ser lavado y secado. Finalmente, se registró el valor de desgaste. La ecuación (4.10) muestra el cálculo para el valor de desgaste obtenido.

$$\%P_{Ab} = \left(\frac{M_T - M_{MR}}{M_T} \right) * 100\% \quad \text{Ecc 4.10}$$

Dónde: $\%P_{Ab}$ es el porcentaje de pérdida por abrasión (%); M_T es la masa total de la muestra que ingreso a la máquina de los Ángeles (g); M_{MR} es la masa de la muestra retenida por el tamiz N°.12.

4.4.2. Relleno Mineral

La evaluación del relleno mineral se basa en la granulometría de este, el cual es tamizado por la malla N°.30. El relleno mineral utilizado es polvo de caliza (CaO) de nivel comercial.

Se seleccionó este relleno mineral como uno de los posibles recomendados por la ISSA A105. Debido a su alcalinidad, que reduce las posibilidades de rotura inmediata de la emulsión al contacto con el agregado además que aporta dureza mecánica en la pasta asfáltica aplicada y curada.

4.4.3. Aditivo

Utilizando sulfato de aluminio como aditivo retardante de rotura en la mezcla y ajustando la granulometría a la utilizada con el relleno mineral. Por otro lado, es importante señalar que el sulfato de aluminio utilizado es de grado comercial (17% de $Al_2(SO_4)_3$).

La selección del sulfato de aluminio como aditivo se basa en las recomendaciones ejemplificadas de retardantes para las mezclas asfálticas mencionadas por *Jiménez, Ulloa & Múnera* en la *Guía de diseño de mezcla de laboratorio para los sellos de lechada asfáltica (slurry seals)* (2016).

4.4.4. Agua

El laboratorio PIENSA-UNI, evaluó las características físico-químicas del agua utilizada en el diseño de mezclas. Cabe destacar que el agua utilizada para la fabricación de la emulsión asfáltica y el agua para mezcla de la pasta de slurry seal son las mismas y provienen del pozo local de la empresa.

4.4.5. Emulsión Asfáltica

La emulsión asfáltica utilizada para el diseño de la pasta de slurry seal se clasifica como una emulsión catiónica de rompimiento lento (CSS-1H), producida por la empresa SOLTECSA. Para su caracterización se utilizó la norma ASTM D244 de métodos de prueba y practicas estándar para emulsiones asfálticas.

Residuo por evaporación

Determinando el residuo de la emulsión asfáltica, el cual cumple la función de establecer el porcentaje de cemento asfáltico que posee la emulsión, el componente principal de esta. Para ello, se tomó un beaker y se vertió emulsión asfáltica en él; seguidamente se colocó el beaker con la emulsión en un trípode y mechero a mezclado constante.

Evaporando el contenido acuoso, hasta dejar solo asfalto liquido (Temperatura 180 °C), obteniéndose así el porcentaje de cemento asfáltico de la emulsión.

La ecuación (4.11) muestra el cálculo de obtención del porcentaje de cemento asfáltico contenido en la emulsión.

$$\%Ce = \left[1 - \left(\frac{Me - R}{Me} \right) \right] * 100 \quad \text{Ecc 4.11}$$

Donde: %Ce es el porcentaje de cemento asfáltico de la emulsión asfáltica (%); Me es la muestra de emulsión asfáltica tomada para evaporación (g); R es el residuo obtenido de la evaporación de la emulsión asfáltica (g).

Tamizaje

Utilizando un tamiz de 850 µm por el cual se hizo pasar una muestra de 400 ml de emulsión asfáltica y posteriormente, se lavó el tamiz para remover la parte liquida de la emulsión retenida en el tamiz; y secando el tamiz para determinar las partículas retenidas.

La ecuación (4.12) muestra el porcentaje de partículas de asfalto contenidas en la emulsión.

$$\%P = \frac{(t_F - t_i)}{10} \quad \text{Ecc 4.12}$$

Donde: $\%P$ es el porcentaje de partículas sólidas de asfalto de la emulsión asfáltica; t_i es el peso del tamiz inicial (g); t_F es el peso del tamiz más las partículas de asfalto retenidas en él (g).

Viscosidad

La viscosidad forma parte de las características reológicas más importantes de la emulsión asfáltica; La viscosidad de la emulsión CSS-1H se determinó mediante el viscosímetro Saybolt Furol a 25 °C; donde, la emulsión se vertió en el viscosímetro y se determinó el tiempo en que se llenó el recipiente normalizado del equipo para la emulsión, esto se realizó tres veces para obtener un promedio de viscosidad de la emulsión.

Penetración

Obteniendo el cemento asfáltico mediante la evaporación de una muestra de 400 ml de emulsión asfáltica se vertió el cemento asfáltico en un contenedor normalizado para la prueba y se determinó la dureza mediante un penetrómetro automático.

Estabilidad de Almacenamiento

Determinando la estabilidad de almacenamiento en un cilindro metálico normalizado para la prueba, este cilindro se llenó hasta su línea de aforo de emulsión asfáltica. Dejando el cilindro reposar en un área sin interferencia de movimiento y cambios a la temperatura (25 °C) durante 24 horas.

Procediendo luego del almacenamiento de 24 horas se extrajo la parte superior de la emulsión contenida en él cilindro, así mismo, la parte inferior de la emulsión contenida en él cilindro; determinándose el porcentaje de asfalto asentado en el almacenamiento.

Parte superior

$$\%Ce_1 = \left(1 - \frac{M_S - R_1}{M_S}\right) * 100 \quad \text{Ecc 4.13}$$

Parte Inferior

$$\%Ce_2 = \left(1 - \frac{M_i - R_2}{M_i}\right) * 100 \quad \text{Ecc 4.14}$$

Estabilidad de almacenamiento (porcentaje de asentamiento)

$$\%\Delta(24 h) = \%Ce_1 - \%Ce_2 \quad \text{Ecc 4.15}$$

Donde: $\%Ce_1$ es el porcentaje cemento asfáltico que se encuentra en la parte superior de la emulsión almacenada (%); M_S es la muestra de emulsión almacenada de la parte superior del cilindro (g); R_1 es el residuo de evaporación de la parte superior de la emulsión que se encuentra en el cilindro (g); $\%Ce_2$ es el porcentaje cemento asfáltico que se encuentra en la parte inferior de la emulsión almacenada (%); M_i es la muestra de emulsión almacenada de la parte inferior del cilindro (g); R_2 es el residuo de evaporación de la parte inferior de la emulsión que se encuentra en el cilindro (g); $\%\Delta(24 h)$ es el porcentaje de asentamiento de la muestra de emulsión asfáltica almacenada durante 24 horas.

4.5. Métodos y procedimientos para la formulación de mezclas de slurry seal de diversas composiciones aplicando diseños experimentales ajustados a los requerimientos tecnológicos de su desempeño funcional

Delimitando las mezclas a una región de diseño experimental para determinar la calidad de las mezclas conforme a los requerimientos establecidos en las variables de respuestas se reduce la cantidad de experimentos a un modelo ajustado para resultados esperados.

4.5.1. Factores y Nivel de Factores

Determinando el diseño experimental ajustado para las formulaciones de mezcla de las pastas de slurry seal, donde, se estableció los factores de control de la pasta del slurry seal, los cuales son:

- ❖ Factor A: Emulsión Asfálticas (x_A).
- ❖ Factor B: Agua (x_B).
- ❖ Factor C: Relleno Mineral (x_C).

Además, simplificando los niveles de factores dentro del software, se estableció un límite inferior y superior (rango de los niveles de factor), donde, los puntos de diseño de mezcla se encontrarán dentro de estos límites; es preciso tener presente que los porcentajes están en basados en la cantidad de agregado pétreo seco y que el aditivo se tomó con un valor constante de 4% en base al agregado pétreo seco.

$$27\% \leq x_A \leq 37\%$$

$$30\% \leq x_B \leq 35\%$$

$$0\% \leq x_C \leq 3\%$$

4.5.2. Determinación de rangos experimentales

Los rangos establecidos en la sección **4.5.1**, en lo que respecta a la emulsión asfáltica, agua y aditivo, se obtuvieron mediante experimentación preliminar. En la prueba preliminar se utilizó 1010 g de agregado pétreo seco, 26% de emulsión asfáltica (CSS-1H), 36% de agua, 2% de sulfato de aluminio y 2% de polvo de caliza. Por otro lado, el rango establecido para el relleno mineral corresponde a las recomendaciones de la ISSA A105, quienes recomiendan un rango de 0 a 3%. Este experimento preliminar se llevó a cabo para determinar la efectividad del sulfato de aluminio como aditivo retardante de rompimiento que ayude a preservar la pasta; donde, por 4 semanas se observó la pasta, preservándose a temperatura ambiente 25 °C y posteriormente aplicándose, resultando con características deseables alcanzar.

4.6. Variables de Respuestas

Los resultados a obtener de las pruebas de las normas mostradas de la **Tabla A.9.1**, estas son las variables de respuestas y establecen los requerimientos para el desempeño funcional de la pasta del slurry seal, determinando así las mezclas que se encuentran dentro de los parámetros de calidad recomendados por la norma ISSA A105 y el conjunto de ensayos establecidos. Las variables de respuesta y rangos de calidad permitidos son:

- El ensayo ISSA TB100 proporciona un valor de desgaste del slurry seal, la norma ISSA A105 recomienda un valor para el slurry seal:

$$\text{Abrasion Húmeda} = y_1 \leq 807 \text{ g/m}^2$$

- El ensayo ISSA TB106 proporciona un valor de consistencia del slurry seal, la norma ISSA A105 recomienda un valor para el slurry seal:

$$\text{Consistencia} = y_2$$

$$2 \text{ cm} \leq y_1 \leq 3 \text{ cm}$$

- El ensayo ISSA TB109 proporciona el valor de adhesión de arena del slurry seal, la norma ISSA A105 recomienda un valor para el slurry seal:

$$\text{Adhesión de Arena} = y_3 \leq 538 \text{ g/m}^2$$

- El ensayo ISSA TB113 proporciona el valor del tiempo de mezclado del slurry seal, la norma ISSA A105 recomienda un valor para el slurry seal:

$$\text{Tiempo de Mezclado} = y_4 \geq 3 \text{ min}$$

- El ensayo ISSA TB147 proporciona el valor de resistencia a la compactación vertical y desplazamiento lateral del slurry seal, la ISSA A105 no considera este requerimiento, sin embargo para fines de evaluación de las mezclas se tomó los siguientes parámetros:

$$\text{Compactación Vertical} = y_5 \leq 3 \text{ mm}$$

$$\text{Desplazamiento Lateral} = y_6 \leq 7.5 \text{ mm}$$

- La siguiente variable es una totalmente nueva, utilizada específicamente en este estudio; los productos a base de emulsiones alifáticas no están diseñadas para preservarse, como el producto que busco este estudio, debido a que se mide el tiempo que la mezcla puede pasar en conservación, la variable presentada se basa en el tiempo de anaquel de las mezclas de la pasta de slurry seal diseñadas, el rango de propuesto es:

$$\text{Tiempo de Anaquel} = y_7 \geq 60 \text{ dias}$$

- El ensayo ISSA TB139 proporciona el valor cohesión de la pasta de slurry seal optima, la norma ISSA A105 recomienda un valor para el slurry seal:

$$\text{Cohesión } [T > 30^\circ\text{C (Fraguado)}] = y_8 \geq 0.12 \text{ kg} * \text{m}$$

- El ensayo ISSA TB114 proporciona el valor desnudamiento por humedad de la pasta de slurry seal optima, la norma ISSA A105 recomienda un valor para el slurry seal:

$$\text{Desnudamiento} = y_9 \leq 20\%$$

4.6.1. Diseño experimental ajustado

El diseño experimental ajustado se basa en la dependencia e interacción de las proporciones de los materiales que participan en la mezcla; ya que existen diferentes problemas reales que resultan al mezclar diferentes composiciones. Por ello, se inició de delimitar la región experimental, donde se reducen los puntos de diseño cerca del punto óptimo buscado.

Tabla 4.1. Composiciones para las mezclas del slurry seal

Corrida	Factores de Control			Variables de Respuesta						
	X_A	X_B	X_C	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5	Y_6	Y_7
1	0.27	0.35	0.03							
2	0.3	0.3	0							
3	0.37	0.3	0.03							
4	0.27	0.3	0							
5	0.32	0.32	0.02							
6	0.27	0.35	0							
7	0.37	0.3	0.03							
8	0.37	0.35	0.03							
9	0.23	0.325	0.015							
10	0.37	0.35	0							
11	0.27	0.3	0.03							
12	0.27	0.35	0.03							
13	0.32	0.325	0.015							
14	0.32	0.283	0.015							
15	0.32	0.325	0.015							
16	0.32	0.32	0.02							
17	0.38	0.325	0.02							
18	0.3	0.35	0.03							
19	0.32	0.325	0.015							
20	0.3	0.35	0.03							
8	0.37	0.35	0.03							
9	0.23	0.325	0.015							
10	0.37	0.35	0							
11	0.27	0.3	0.03							
12	0.27	0.35	0.03							
13	0.32	0.325	0.015							
14	0.32	0.283	0.015							
15	0.32	0.325	0.015							
16	0.32	0.32	0.02							
17	0.38	0.325	0.02							
18	0.3	0.35	0.03							
19	0.32	0.325	0.015							
20	0.3	0.35	0.03							
21	0.32	0.283	0.015							
22	0.23	0.325	0.015							
23	0.3	0.3	0							
24	0.315	0.325	0.015							
25	0.37	0.35	0.03							
26	0.37	0.35	0							
27	0.27	0.35	0							
28	0.325	0.32	0.015							

Tabla 4.1. Composiciones para las mezclas del slurry seal (Continuación)

Corrida	Factores de Control			Variables de Respuesta						
	X_A	X_B	X_C	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5	Y_6	Y_7
29	0.38	0.325	0.02							
30	0.315	0.325	0.015							
31	0.27	0.3	0.03							
32	0.404	0.325	0.015							
33	0.37	0.3	0							
34	0.32	0.325	0.04							
35	0.325	0.32	0.015							
36	0.37	0.3	0							
37	0.32	0.325	0.015							
38	0.404	0.325	0.015							
39	0.27	0.3	0							
40	0.32	0.325	0.04							

Formulaciones de mezclas de las pastas

La **Tabla 4.1** muestra 40 mezclas ordenadas de manera aleatoria, estas consisten en un diseño de 20 mezclas y 1 réplicas para cada una, las cuales se encuentran dentro de la posible región de la pasta optima.

4.7. Métodos y procedimientos para la determinación de la calidad de cada mezcla de slurry seal formulada, conforme a los requerimientos tecnológicos de las normas ISSA A105

Las combinaciones de las mezclas tienden a tener diversos efectos en las variables de respuestas, por ello, se determinó la calidad de cada una de ella mediante los requerimientos tecnológicos conforme a la norma ISSA A105.

4.7.1. Consistencia de la pasta de slurry seal

Utilizando la escala presentada en la norma ISSA TB106; donde, la consistencia de la mezcla es reportada como cm de flujo por el porcentaje total de agua de la mezcla (sumatoria de la humedad natural de agregado más el agua agregada a la mezcla en su diseño). Por lo que, en las 40 formulaciones se utilizó como base 300 g de agregado pétreo seco, el cual se multiplicó por cada uno de los factores como se denotó en la **Sección 4.5.1**.

$$300 \text{ gr}_{\text{Agregado}} * X_{A n} \quad \text{Ecc 4.16}$$

$$300 \text{ gr}_{\text{Agregado}} * X_{B n} \quad \text{Ecc 4.17}$$

$$300 \text{ gr}_{\text{Agregado}} * X_{C n} \quad \text{Ecc 4.18}$$

$$300 \text{ gr}_{\text{Agregado}} * 4\%_{\text{Aditivo}} \quad \text{Ecc 4.19}$$

Empezando con la mezcla de los ingredientes de manera manual en un recipiente, para posteriormente verter la mezcla en un cono normalizado, el cono se encontraba sobre la escala de consistencia utilizada y así se obtuvo el valor de consistencia de las mezclas.

4.7.2. Tiempo de mezclado

Utilizando la normativa recomendada ISSA TB113, donde, el tiempo de mezclado es reportado como minutos. Donde, se utilizó como base 100 g de agregado pétreo seco.

$$100 \text{ gr}_{\text{Agregado}} * X_{A n} \quad \text{Ecc 4.20}$$

$$100 \text{ gr}_{\text{Agregado}} * X_{B n} \quad \text{Ecc 4.21}$$

$$100 \text{ gr}_{\text{Agregado}} * X_{C n} \quad \text{Ecc 4.22}$$

$$100 \text{ gr}_{\text{Agregado}} * 4\%_{\text{Aditivo}} \quad \text{Ecc 4.23}$$

Mezclando en un recipiente de manera manual y cronometrando el tiempo; es importante tener presente que las mezclas no deben romper antes de los 3 minutos de mezclado.

4.7.3. Adhesión de arena de la mezcla de slurry seal

Utilizando normativa recomendada ISSA TB109, donde, la adhesión de arena es reportada como g/m². Donde, se utilizó como base 300 gramos de agregado pétreo seco; por ello, se usó el mismo cálculo de las ecuaciones (4.16), (4.17) (4.18) y (4.19).

Empezando con la mezcla de los ingredientes de manera manual en un recipiente, para posteriormente ser vertidos y enrazados en las láminas rectangulares normalizadas para la prueba; luego las muestras fueron llevadas a un periodo de secado de 24 horas a 65 °C hasta alcanzar peso constante.

Consecutivamente, las muestras secas y frías se colocaron en la máquina de rueda cargada, adicionándole en la superficie 300 gramos de arena Ottawa a 82 °C y la máquina fue cargada con 56.7 kg de peso, también, fue configurada para 100 ciclos por 2:30 min.

Finalmente, la muestra fue limpiada con una brocha y pesándose nuevamente; por lo que, la diferencia entre el peso inicial de las muestras y el post prueba entre el área de la lámina (0.03045 m²) normalizada, es la cantidad de g/m² de arena adherida.

4.7.4. Compactación vertical y desplazamiento lateral de la mezcla de slurry seal

Utilizando la normativa recomendada ISSA TB147; la compactación y el desplazamiento son reportados en milímetros. Donde, se utilizó como base 300 gramos de agregado pétreo seco; utilizando ecuaciones (4.16), (4.17), (4.18) y (4.19) para los cálculos.

Empezando con la mezcla de los ingredientes de manera manual en un recipiente, para posteriormente ser vertidos y enrazados en las láminas rectangulares normalizadas para la prueba; luego las muestras fueron llevadas a un periodo de secado de 24 horas a 65 °C hasta alcanzar peso constante. Las muestras secas y frías se les midió el tamaño lateral con un vernier.

Las muestras fueron colocadas en la máquina de rueda cargada con un peso de 56.7 kg y configurada para 40 ciclos por minuto durante 25 minutos. Después de esto las muestras fueron retiradas y con el vernier se midió la compactación vertical y el desplazamiento lateral promedio con respecto al inicial de cada muestra.

4.7.5. Desgaste por abrasión húmeda

Utilizando la normativa recomendada ISSA TB100; donde, el desgaste es reportado como g/m^2 . Donde, se utilizó como base 400 gramos de agregado pétreo seco.

$$400 \text{ gr}_{Agregado} * X_{A n} \quad \text{Ecc 4.24}$$

$$400 \text{ gr}_{Agregado} * X_{B n} \quad \text{Ecc 4.25}$$

$$400 \text{ gr}_{Agregado} * X_{C n} \quad \text{Ecc 4.26}$$

$$400 \text{ gr}_{Agregado} * 4\%_{Aditivo} \quad \text{Ecc 4.27}$$

Empezando con la mezcla de los ingredientes de manera manual en un recipiente, para posteriormente ser vertidos y enrazados en las láminas circulares normalizadas para la prueba; luego las muestras fueron llevadas a un periodo de secado de 24 horas a 65 °C hasta alcanzar peso constante. Posteriormente, las muestras frías y pesadas se colocaron en inmersión de agua durante un periodo de 1 hora.

Retirando las muestras de la inmersión y colocándolas en la máquina de abrasión con modelo de mezclado N-50 y configurada para 5:25 minutos de abrasión. Después de esto las muestras fueron removidas y lavadas para retirar el material desprendido para ser llevadas a secado durante 18 horas a 65 °C hasta alcanzar peso contante, y finalmente ser pesadas. La ecuación (4.28) y (4.29) muestra el cálculo para obtener el valor de desgaste por abrasión húmeda.

$$y_1 = P_{Mi} - P_{MF} \geq 24.5 \text{ g} \rightarrow (P_{Mi} - P_{MF}) * (37.5 * 0.78^2) \quad \text{Ecc 4.28}$$

$$y_1 = P_{Mi} - P_{MF} \leq 24.5 \text{ g} \rightarrow (P_{Mi} - P_{MF}) * (37.5 * 1^2) \quad \text{Ecc 4.29}$$

Donde: P_{Mi} es el peso inicial de la muestra (g); P_{MF} peso final de la muestra, post abrasión (g).

4.7.6. Tiempo de anaquel

Empezando con la mezcla de los ingredientes de manera manual en un recipiente; donde, se utilizó como base 1300 gramos de agregado pétreo seco.

$$1300 \text{ gr}_{\text{Agregado}} * X_{A n} \quad \text{Ecc 4. 30}$$

$$1300 \text{ gr}_{\text{Agregado}} * X_{B n} \quad \text{Ecc 4. 31}$$

$$1300 \text{ gr}_{\text{Agregado}} * X_{C n} \quad \text{Ecc 4. 32}$$

$$1300 \text{ gr}_{\text{Agregado}} * 4\%_{\text{Aditivo}} \quad \text{Ecc 4. 33}$$

Cada lote de los 40 diseños fue dividido en 4 muestras (A_n, B_n, C_n, D_n), cada una de estas muestras se pesó con una aproximación de 300 g y se almacenaron en bolsas ziplot a temperatura ambiente (25-27 °C aproximadamente), así mismo, cada división correspondía a una medición de 15 días, es decir, las 4 muestras daban un total de 60 días evaluación.

Imponiendo como restricción que si al menos dos muestras evaluadas no se conservaron respectivamente en su día de muestreo, el resultado de esta sería 0 días de conserva, por esta razón, si solo una de las cuatro muestras no se conservó en su evaluación contaría como error manejo de muestreo y se tomó su resultado como 60 días de conserva; es importante tener presente que igualmente debieron llegar a los 60 días de conserva en su muestreo final.

4.8. Métodos y procedimientos para la optimización de la composición de las mezclas de las pastas de slurry seal con relación a los requerimientos tecnológicos de su desempeño funcional

La optimización de las mezclas se basa en el proceso estadístico de la metodología de superficie de respuesta; Por lo tanto, con la utilización de Minitab 19, se obtuvo los puntos de diseños; posteriormente, con las variables de respuestas establecidas y los resultados de las evaluaciones de las mezclas se procedió analizar el modelo obtenido. Organizando los resultados de las variables, donde se representan de la siguiente manera:

- Abrasión Húmeda (g/m^2)
- Consistencia (m)
- Adhesión de arena (g/m^2)
- Tiempo de mezclado (min)
- Compactación Vertical (m) y Desplazamiento Lateral (m)
- Tiempo de anaquel ($días$)

Procediendo a obtener el punto óptimo de diseño, así mismo, con los límites máximos establecidos para las variables. Donde, se propuso minimizar los efectos en la abrasión húmeda, adhesión de arena, compactación vertical, y desplazamiento lateral; de modo contrario la propuesta del tiempo de anaquel se máximo, la consistencia se fijó en el objetivo de 0.025m (2.5 cm) y el tiempo de mezclado se fijó en el objetivo de 3 minutos; por otro lado las pruebas de cohesión y desnudamiento solo se realizaron al punto óptimo, variables que dependen del producto final.

Obteniendo así la propuesta de punto óptimo mediante la metodología de superficie de respuesta presentada en la **Tabla 5.22**, y así se procedió a finalmente, con los resultados obtenidos se procedió a evaluar la mezcla del diseño optimo propuesto por la metodología de superficie de respuesta.

4.8.1. Cohesión de la mezcla optima

Esta prueba solo se realizó a la mezcla del punto óptimo. La normativa recomendada para esta prueba es la ISSA TB139, donde, la ISSA A105 recomienda un valor de cohesión mayor a 0.12 $kg*m$.

Realizando 6 muestras, donde 3 de ellas permanecieron a temperaturas menores a 30 °C y las otras 3 a temperaturas mayores a 30 °C. Las muestras se realizaron con las ecuaciones (4.34), (4.35), (4.36) y (4.37).

$$50 gr_{Agregado} * X_{A \text{ óptimo}} \quad \text{Ecc 4.34}$$

$$50 gr_{Agregado} * X_{B \text{ óptimo}} \quad \text{Ecc 4.35}$$

$$50 gr_{Agregado} * X_{C \text{ óptimo}} \quad \text{Ecc 4.36}$$

$$50 gr_{Agregado} * 4\%_{Aditivo} \quad \text{Ecc 4.37}$$

4.8.2. Desnudamiento por humedad de la mezcla optima

Esta prueba solo se realizó a la mezcla optima. Donde, La norma de referencia utilizada ISSA TB114 recomienda un valor aceptable entre el 10%-20% de desnudamiento para esta prueba.

Evaluando esta variable con 3 muestras de 10 gramos cada una; donde, los 10 g se obtuvieron de la prueba de tiempo de mezclado y fueron secados con una corriente de aire caliente durante 24 horas.

Posteriormente, con las muestras secas se procedió a calentar 400 mL de agua destilada a ebullición en un beaker de 600 mL durante 3 minutos; luego de ello se removió el beaker y se dejó enfriar por 2 minutos, seguidamente se le vertió agua fría para remover el asfalto suspendido. Finalmente, se pasó por papel filtro y se pesó la cantidad de agregado desprendido.

V. Análisis y discusión de resultados

5.1. Componentes del slurry seal

5.1.1. Agregado pétreo

El tipo de material pétreo utilizado corresponde a la roca basáltica de la región de Veracruz, Masaya; la cual se extrae por la empresa PROINCO; de esta manera, las pruebas de evaluación de agregado pétreo utilizadas, las cuales se muestran en la **Tabla A.9.2**.

Granulometría

Los resultados son representados en la **Figura 5.1**, demuestran que el agregado posee una granulometría tipo III; sin embargo, la pasta fue diseñada con una granulometría de agregado de 0.6 mm - 0.0075 mm aproximadamente.

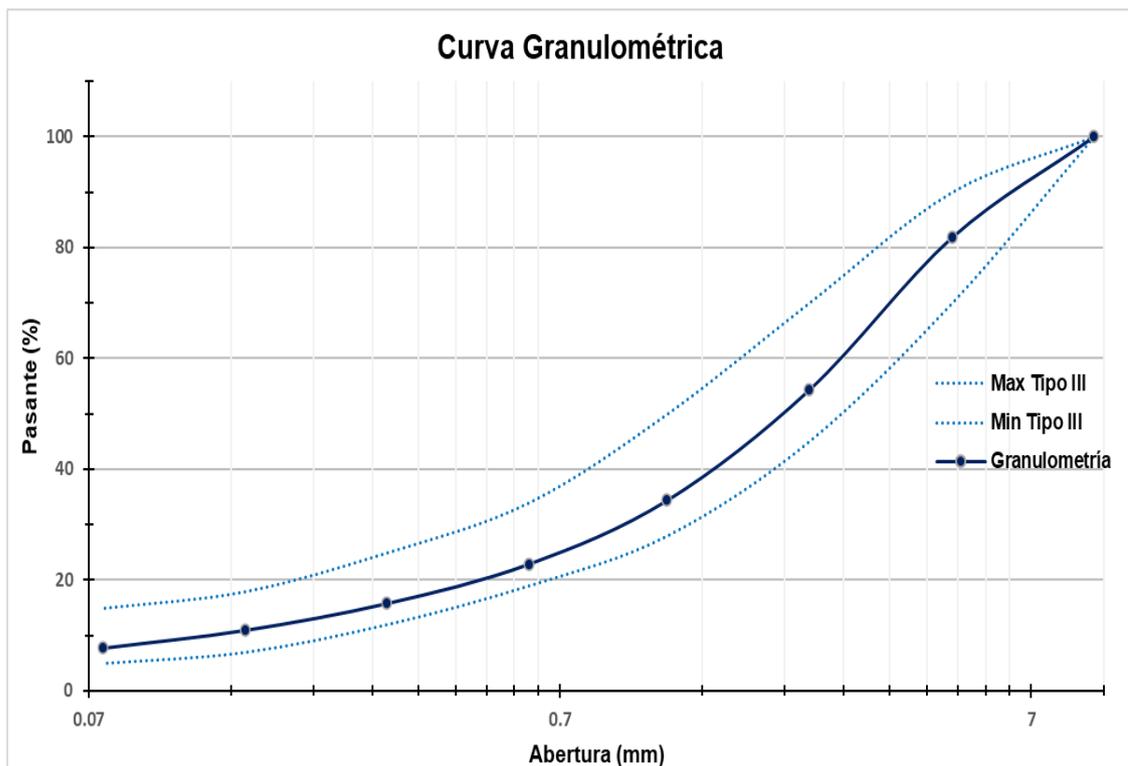


Figura 5.1. Curva Granulométrica del agregado pétreo

Equivalente de arena

La norma referente ISSA A105 indica como máximo el material debe poseer un equivalente de arena de 35% bajo las condiciones estándares; por lo que, el agregado evaluado se encuentra dentro del rango adecuado, como se puede observar en la **Tabla 5.1**, cumpliendo así este requisito para el diseño; los cálculos para esta prueba se realizaron mediante la ecuación (4.1).

Tabla 5.1. Resultados de equivalente de arena del agregado pétreo

Ensayos Realizados	1	2	3	Promedio
Lectura de arena (mm)	127	123.92	125.48	125.46
Lectura de arcilla (mm)	370	429	433	410.67
Tiempo de sedimentación (min)	20	25	25	23.33
Equivalente de arena (%)	34.32	28.88	28.97	30.72

Azul de Metileno

La prueba de azul de metilo indicó el porcentaje de arcillas y materia orgánica perjudiciales para las mezclas diseñadas, donde, se recomienda un máximo de 10 mg/g; por tanto, el agregado evaluado se encuentra por debajo del rango máximo, como se muestra en la **Tabla 5.2**. Para la obtención de estos datos se utilizó la ecuación (4.3).

Tabla 5.2. Resultados del valor de azul de metileno del agregado pétreo

Ensayos Realizados	1	2	3	Promedio
Solución de azul de metileno utilizada (mg)	4	5	4.5	4.5
Muestra de agregado (g)	1	1	1	1
Valor de azul de metileno (mg/g)	4	5	4.5	4.5

Humedad, Absorción, Gravedad específica, Gravedad aparente, Densidad, Densidad relativa

El agregado pétreo pertenece a la región de Veracruz, Masaya del stock de la empresa PROINCO, por ende, el material está sometido a las características geológicas de esta microrregión, así como a las climáticas. Cabe señalar que, las muestras de agregado se tomaron en el periodo de verano, por lo cual, la humedad natural del agregado dependió de esto.

Análogamente, el material pétreo basáltico utilizado presentó características similares a los valores promedio de roca basáltica presentados por *Waddell J. & Dobrowolski J* en el Manual de la Construcción con Concreto, donde se reportó un valor para la roca de basalto de 0.5% de absorción y 2.86 de gravedad específica; los cuales son relativamente cercanos a los resultados que se presentan en la **Tabla 5.3** y **Tabla 5.4**, donde, se calcularon con las ecuaciones (4.4), (4.5), (4.6), (4.7), (4.8) y (4.9) respectivamente.

Tabla 5.3. Resultados del porcentaje de humedad del agregado pétreo

Ensayos Realizados	1	2	3	Promedio
Agregado pétreo con humedad natural (g)	300	303.79	300.65	301.48
Agregado pétreo totalmente seco (g)	298.95	303.47	299.15	300.99
Humedad (%)	0.35	0.10	0.49	0.3

Tabla 5.4. Resultados de absorción, gravedad específica, gravedad aparente, densidad y densidad relativa del agregado pétreo

Ensayos Realizados	1	2	3	Promedio
Muestra para absorción (g)	298.8	300	300.45	299.75
Agregado totalmente seco (g)	297.5	298.66	299.25	298.47
Muestra superficialmente seca (g)	300	300.87	300	300.29
Picnómetro calibrado con agua (g)	721.5	721.5	721.5	721.5
picnómetro con agua y muestra de agregado superficialmente seco (g)	886.8	888.85	886.32	887.32
Absorción (%)	0.43	0.44	0.40	0.42
Gravedad específica	2.22	2.25	2.219	2.23
Gravedad aparente	2.25	2.27	2.214	2.24
Densidad (Kg/m ³)	2221.60	2247.73	2213.71	2227.68
Densidad Relativa (Kg/m ³)	2244.75	2268.77	2220.50	2244.67

Desintegración de sólidos del Agregado

Utilizando del sulfato de sodio y sulfato de magnesio en soluciones se evaluó la solidez del agregado; esto es debido a que la resistencia a la desintegración funciona como un indicador de solidez entre los materiales pétreos. La ISSA A105 recomienda como un máximo 15% de desintegración por Na₂SO₄ y 25% máximo de desintegración por MgSO₄.

Los resultados obtenidos se muestran en la **Tabla 5.5** y **Tabla 5.6** demuestran que el agregado pétreo utilizado tiene una alta resistencia a la desintegración por sulfatos de sodio y magnesio, es decir tienen buen grado de solidez.

Tabla 5.5. Datos obtenidos por solución de sulfato de magnesio

Granulometría de la Muestra						% Perdida por Fracción	% Perdida Ponderada
Tamices Estándar				Cálculos			
Pasa	Retiene	Pasa	Retiene	Antes (gr)	Después (gr)		
3/8"	No. 4	9.50 mm	4.75 mm				
No. 4	No. 8	4.75 mm	2.36 mm	100.0	98.8	1.20	0.33
No. 8	No. 16	2.36 mm	1.18 mm	100.0	98.6	1.40	0.28
No. 16	No. 30	1.18 mm	0.60 mm	100.0	98.9	1.10	0.13
No. 30	No. 50	0.60 mm	0.30 mm	100.0	99.0	1.00	0.07
						Σ	0.81

Tabla 5.6. Datos obtenidos por sulfato de sodio

Granulometría de la Muestra						% Perdida por Fracción	% Perdida Ponderada
Tamices Estándar				Cálculos			
Pasa	Retiene	Pasa	Retiene	Antes (gr)	Después (gr)		
3/8"	No. 4	9.50 mm	4.75 mm				
No. 4	No. 8	4.75 mm	2.36 mm	100.0	97.9	2.10	0.58
No. 8	No. 16	2.36 mm	1.18 mm	100.0	98.6	1.40	0.28
No. 16	No. 30	1.18 mm	0.60 mm	100.0	98.9	1.10	0.13
No. 30	No. 50	0.60 mm	0.30 mm	100.0	99.0	1.00	0.07
						Σ	1.05

Resistencia a la degradación por impacto

Utilizando de la máquina de los ángeles (**Figura C.9.3**) se realizó la prueba de resistencia a la degradación por impacto; donde, la norma ISSA A105 indica un 35% máximo de degradación. Por lo que, se utilizaron 5000 g para la prueba; de ahí, 3151g fueron retenidos por el tamiz No.12, con la utilización de la ecuación (**4.10**) se determinó la degradación de 36.98%. Puesto que, el resultado difiere 1.98% más del máximo recomendado por la ISSA A105, se destaca que no causara efectos adversos, debido a las recomendaciones de la industria de pavimentación, por lo que el resultado se encuentre en el rango tolerable para su utilización en asfaltos.

5.1.2. Emulsión Asfáltica

La emulsión asfáltica utilizada es la CSS-1H, esta es una emulsión catiónica de rompimiento lento; también, es el componente primordial de la pasta, ya que, brinda la base aditiva y selladora a las superficies tratadas debido al cemento asfáltico.

La emulsión asfáltica fue evaluada con 5 pruebas presentadas en la norma ASTM D244 y recomendadas por la ISAA A105 para comprobar su calidad.

Residuo por Evaporación

Evaluando el porcentaje de asfalto contenido en la emulsión con la ecuación (**4.11**), se determinó el porcentaje de asfalto residual (cemento asfáltico). Donde, la norma ASTM D244 sugiere un rango entre 50%-70% de cemento asfáltico, por lo cual, la formulación de la emulsión utilizada cumple con los requerimientos de calidad. La **Tabla 5.7** muestra los resultados obtenidos.

Tabla 5.7. Resultados de % Cemento Asfáltico de la emulsión

Ensayo	Muestra (g)	Residuo (g)	Cemento Asfáltico (%)
1	50.03	31.46	62.88
2	50.89	32.78	64.42
3	50.56	32.67	64.61
Promedio	50.49	32.63	63.97

Tamizaje

Utilizando la Norma ASTM D244 que establece que la emulsión debe tener como máximo 1% de partículas de asfalto solidas contenidas en la emulsión. De ahí, se realizó esta prueba obteniendo un resultado satisfactorio con bajo porcentaje de partículas contenidas en la emulsión las cuales no perjudicaran as mezclas asfálticas; los resultados se muestran en la **Tabla 5.8** los cuales fueron obtenidos mediante la ecuación (4.12).

Tabla 5.8. Resultados de porcentaje de Partículas sólidas de asfalto contenidas en la emulsión

Ensayo	t_F (g)	t_i (g)	Partículas sólidas de asfalto (%)
1	120.02	119.78	0.024
2	120.05	119.78	0.027
3	120	119.78	0.022
Promedio	120.02	119.78	0.024

Viscosidad

Midiendo la viscosidad a una temperatura de 25 °C mediante el viscosímetro Saybol Furol y reportada en segundos; la norma ASTM D244 recomienda un valor entre los rangos de 20 a 100 s; Por lo cual, se obtuvo una viscosidad dentro de los parámetros de calidad, la cual no perjudicará las mezclas asfálticas, los resultados se muestran en la **Tabla 5.9**.

Tabla 5.9. Resultados de Viscosidad a 25 °C de la emulsión CSS-1H

Muestra	Viscosidad 25°C (s)
1	42.47
2	43.65
3	43.29
Promedio	43.13

Penetración

Determinando la dureza del cemento asfáltico contenido en la emulsión, la cual se reporta en décimas de milímetro; la norma ASTM D244 recomienda un valor entre los rangos 40 a 90 dm de penetración. Los valores obtenidos mostrados en la **Tabla 5.10** cumplen con los estándares establecidos, obteniendo una dureza del cemento asfáltico adecuada para el diseño de las pastas asfálticas.

Tabla 5.10. Resultado de penetración del cemento asfáltico de la emulsión

Medición	Penetración (dm)
1	42.8
2	42
3	42.3
Promedio	42.3

Estabilidad de Almacenamiento

La estabilidad de almacenamiento midió el porcentaje de asentamiento de asfalto, lo cual puede conducir a la rotura de la emulsión; por ello, la norma ASTM D244 recomienda un valor de 1% máximo; donde, los datos presentados en las **Tabla 5.11, 5.12 y 5.13** fueron obtenidos mediante las ecuaciones (4.13), (4.14) y (4.15) respectivamente. De ahí, se obtuvo un valor de asentamiento dentro de los límites establecidos, lo que indica que la emulsión posee bajo grado de rotura.

Tabla 5.11. Resultados de estabilidad para la muestra de la parte superior

Muestra	Muestra almacena de la parte superior (g)	Residuo asfáltico de la parte superior (g)	Cemento asfáltico (%)
1	50.13	32.41	64.66
2	50.20	32.84	64.41
3	50.05	31.17	62.27
Promedio	35.12	32.14	63.78

Tabla 5.12. Resultados de estabilidad para la muestra de la parte inferior

Muestra	Muestra almacena de la parte inferior (g)	Residuo asfáltico de la parte inferior (g)	Cemento asfáltico (%)
1	50.86	32.68	64.25
2	50.32	30.41	60.43
3	50.51	32.39	64.12
Promedio	50.56	32.14	62.93

Tabla 5.13. Resultados de porcentaje de asentamiento de la emulsión asfáltica

Estabilidad de almacenamiento promedio	Cemento asfáltico superior (%)	Cemento asfáltico inferior (%)	Asentamiento (%)
	63.78	62.93	0.85

5.1.3. Agua

El laboratorio PIENSA-UNI evaluó los parámetros físico-químicos del agua utilizada en las mezclas asfálticas, obteniendo los resultados de la **Tabla A.9.3**. Donde, se observó que posee alto grado de conductividad eléctrica lo que es directamente proporcional a los sólidos disueltos en ella; por otro lado, se observa la alta alcalinidad del agua esto es debido a las sales contenidas en su composición, por lo tanto, esta agua solo es utilizada en los procesos productivos de la planta SOLTECSA.

Los parámetros óptimos del agua deben encontrarse con un pH de entre 7 a 10, y conductividad eléctrica menor o igual a 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ que es igual 286 ppm de sólidos disueltos. En la evaluación del agua se obtuvo un pH 8.86, encontrándose dentro del rango buscado, por otro lado, la conductividad eléctrica se encuentra por arriba del rango buscado en 713 $\mu\text{S}/\text{cm}$ o 509 ppm de sólidos disueltos, sin embargo, este resultado no tuvo incidencia individual en el desempeño funcional de las mezclas, como se observó posteriormente los efectos de esta depende de las proporciones de los otros dos compuestos.

5.1.4. Relleno Mineral y Aditivo

Es preciso tener presente la función electroquímica de los ingredientes utilizados; ya que el agredo pétreo basáltico es un material de carga aniónica debido a su composición mineral y la emulsión asfáltica utilizada es catiónica; la combinación de estos dos ingredientes hace que la emulsión rompa, separándose el agua contenida de las partículas de asfalto, quedando así la combinación de agregado y cemento asfáltico.

En consecuencia se utilizó ingredientes que retardan el rompimiento lo máximo posible en estado de anaquel, y que brindaron de dureza mecánica a la mezcla final; Utilizando el polvo de caliza y sulfato de aluminio para estos fines.

Ambos ingredientes fueron ajustados a la granulometría del agregado pétreo como lo recomienda la ISSA A105, también las pruebas posteriores comprobaron que estos ingredientes cumplieron su función en la mezcla final.

5.1.5. Mezclas de pastas de Slurry Seal

Consistencia

La consistencia determino la efectividad de usar las pastas asfálticas en las texturas del pavimento, ya que, una consistencia muy acuosa o seca es contraproducente en los momentos de aplicación y en este caso se deseó una consistencia intermedia, por lo que, la pasta solo será colocada y aplicada para los tratamientos de pavimentos.

Reportando la consistencia como cm por porcentaje total de agua en la mezcla; donde, norma ISSA A105 recomienda una consistencia entre 2 a 3 cm. Los resultados obtenidos para los 40 diseños se muestran en la **Tabla B.9.4**

Por otro lado, como se puede observar en la **Figura 5.2**, los valores obtenidos de consistencia varían entre el punto más alto (6 cm) y el punto más bajo (0 cm); igualmente, observando las formulaciones de los diseños 32 y su réplica la muestra 38 se encuentran dentro de los rangos deseados (2 cm).

Así mismo, se observó en la **Figura 5.3**, donde la interacción de los componentes para el rango de consistencia buscada podría encontrarse en las regiones de 32% a 35% de emulsión asfáltica, 30% a 33% de agua y 1.5% a 2% de relleno mineral.

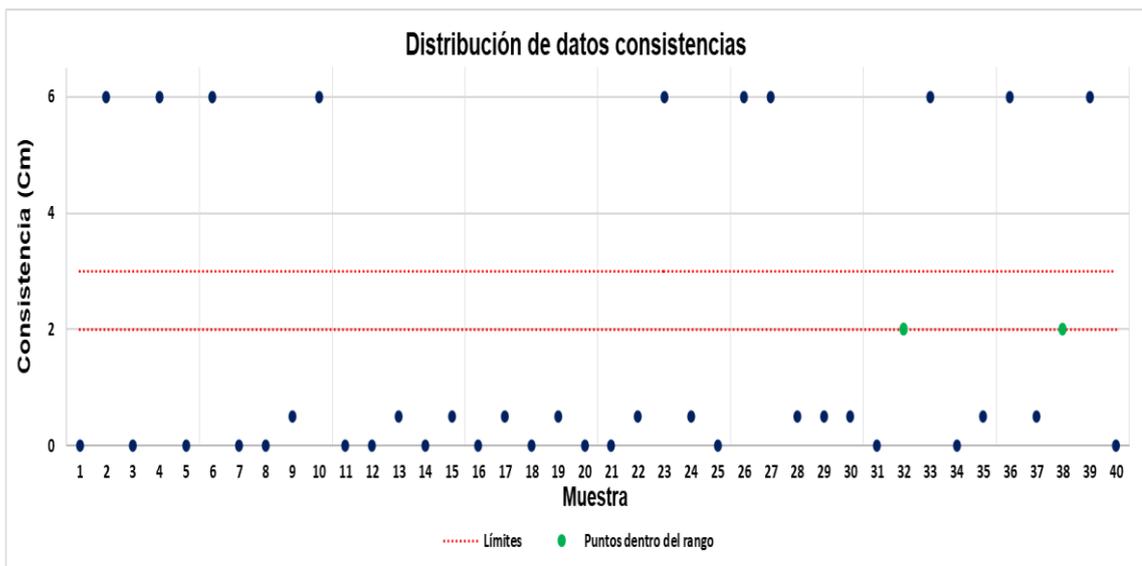
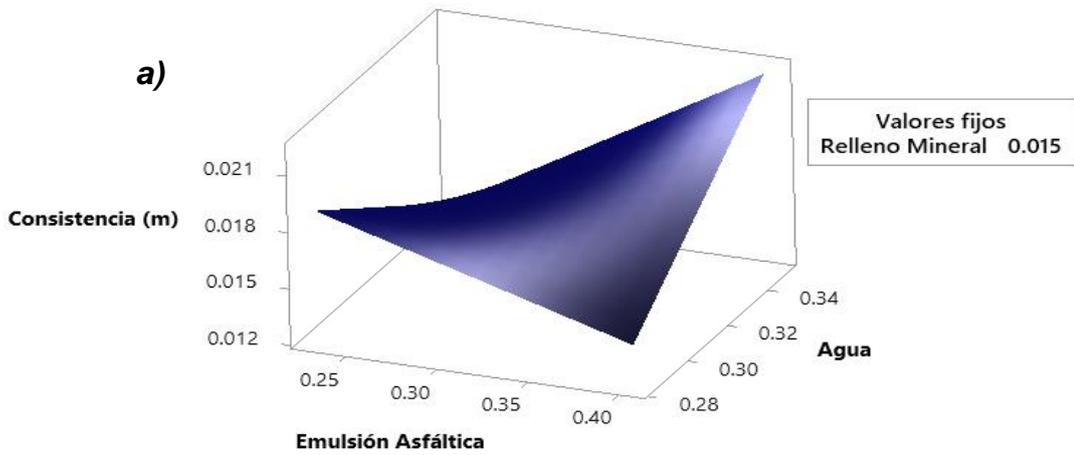
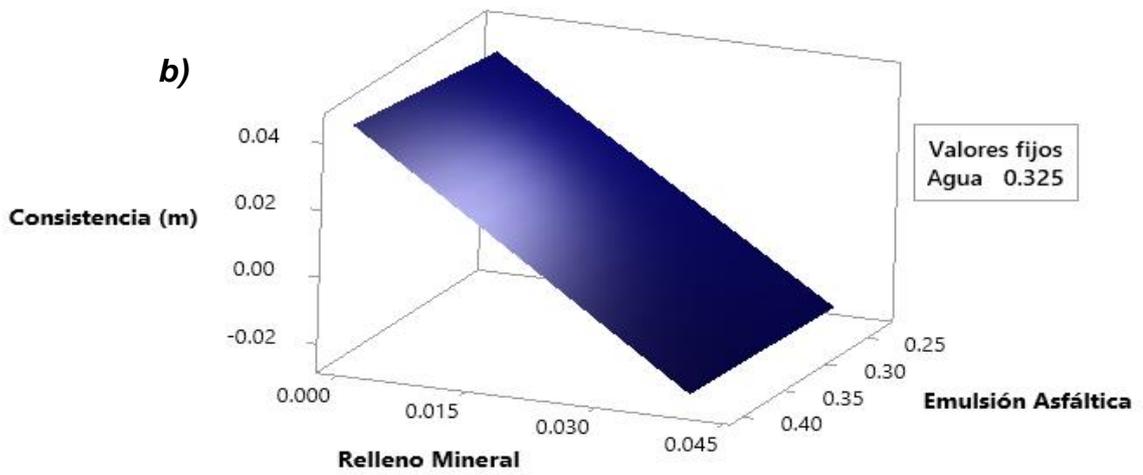


Figura 5.2. Distribución de las consistencias de las mezclas diseñadas

Consistencia (m) vs. Agua; Emulsión Asfáltica



Consistencia (m) vs. Relleno Mineral; Emulsión Asfáltica



Consistencia (m) vs. Relleno Mineral; Agua

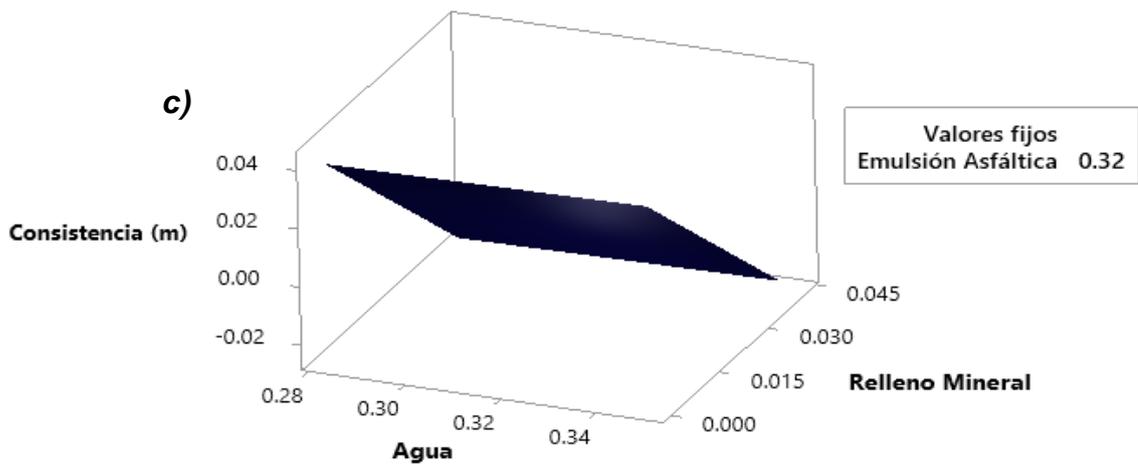


Figura 5.3. Superficie de respuesta de interacción de Consistencia; a) Consistencia vs. Agua, Emulsión asfáltica; b) Consistencia vs. Emulsión Asfáltica, Relleno mineral; c) Consistencia vs. Agua, Relleno Mineral

Tiempo de mezclado

Determinando el tiempo de laboratorio en que la mezcla puede ser controlada antes de su rompimiento; donde, un tiempo de mezclado menor a los 3 minutos conlleva a un rompimiento prematuro, lo que se traduce como una pasta incapaz de aplicarse; Por lo que, la ISSA TB113 establece este tiempo como mínimo. Los resultados obtenidos para el tiempo de mezclado de los 40 diseños se muestran en la **Tabla B.9.5**.

Se observó en la **Figura 5.4**, la región de interacción de los componentes de la mezcla para obtener el tiempo de mezclado mayor o igual a 3 minutos debe encontrarse en los rangos de 25% a 30% de emulsión asfáltica, 30% a 35% de agua y 1% a 2% de relleno mineral.

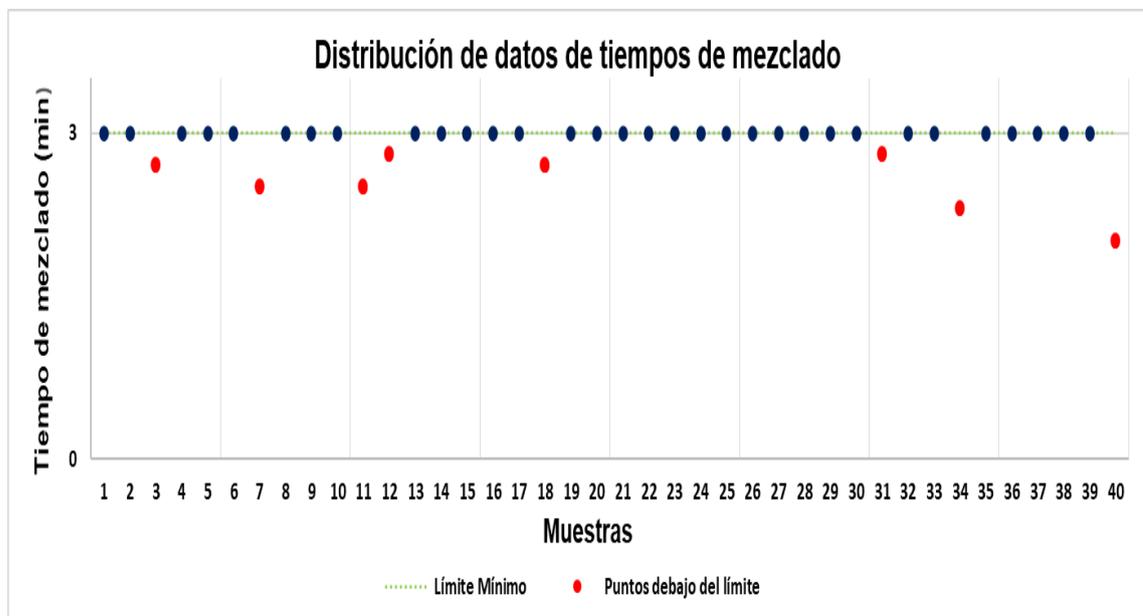
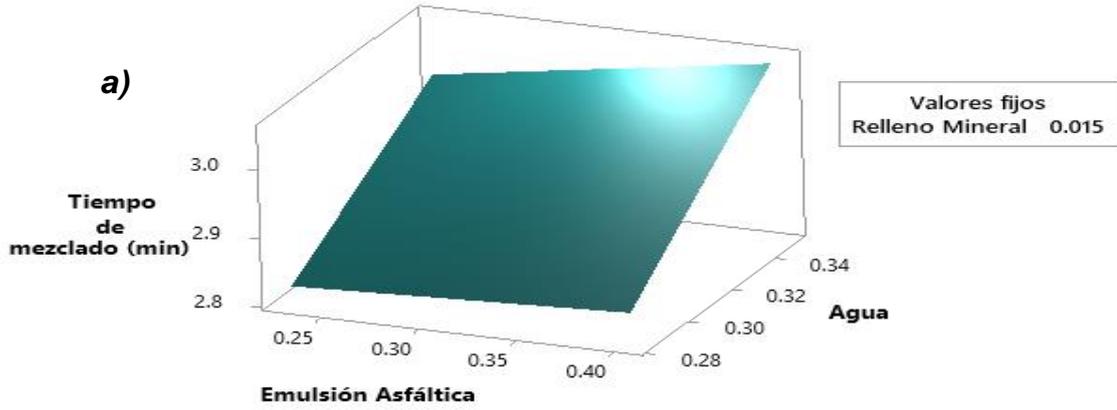
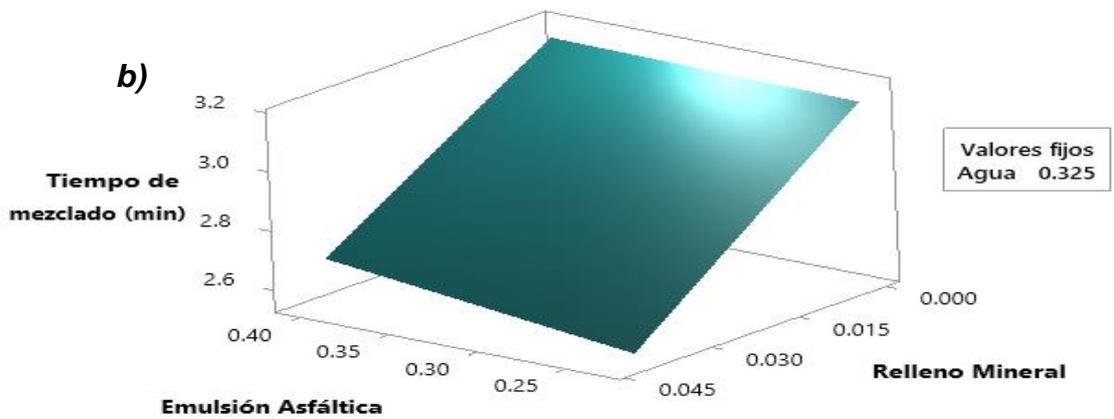


Figura 5.4. Gráfico de distribución para el tiempo de mezclado de las mezclas diseñadas

Tiempo de mezclado (min) vs. Agua; Emulsión Asfáltica



Tiempo de mezclado (min) vs. Relleno Mineral; Emulsión Asfáltica



Tiempo de mezclado (min) vs. Relleno Mineral; Agua

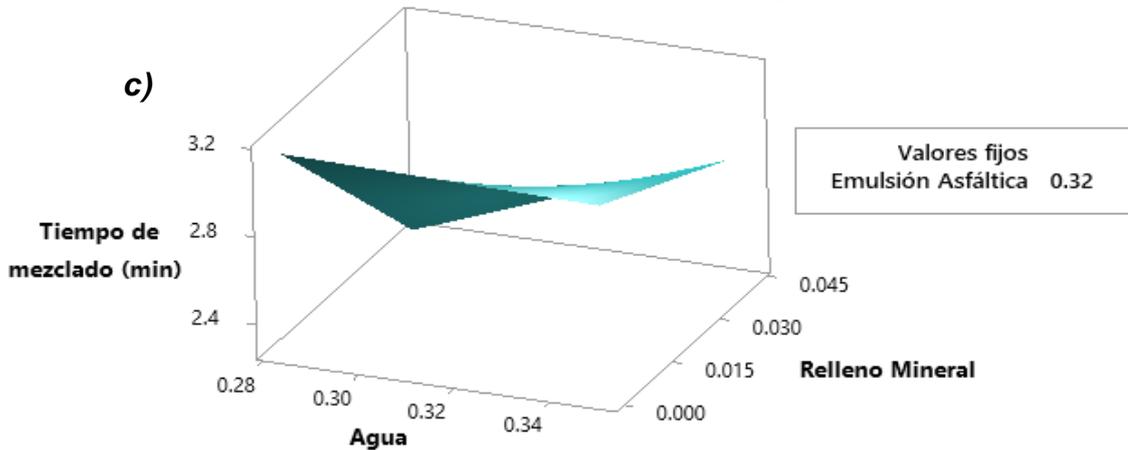


Figura 5.5. Superficie de respuesta de interacción de tiempo de mezclado; a) Tiempo de mezclado vs. Agua, Emulsión asfáltica; b) Tiempo de mezclado vs. Emulsión Asfáltica, Relleno mineral; c) Tiempo de mezclado vs. Agua, Relleno Mineral

Adhesión de arena

El alto contenido del asfalto residual causa desprendimientos de la mezcla asfáltica en pavimentos de tráfico pesado, además, la prueba se utilizó para reducir la adherencia de componentes extraños al pavimento.

Utilizando la ISSA TB109, la adhesión de arena se reportó como g/m². Los resultados obtenidos se muestran en la **Tabla B.9.6**. Así mismo se representan en la **Figura 5.6** donde se puede observar que los diseños de las muestras 23 y 36 no cumplen con los límites establecidos, también, Se puede notar en las formulaciones que dichas muestras no presentan relleno mineral y poseen una fracción de agua y emulsión alta, determinando que esto afecto la resistencia de las muestras para esta prueba.

Por otro lado, se observó en la **Figura 5.7** la interacción de los componentes de la mezcla, donde, los rangos para la obtención de valores bajos adhesión de arena se encuentran en las regiones de 25% a 30% de emulsión asfáltica, 28% a 32% de agua y 1% a 1.5% de relleno mineral, dentro de estas regiones se encuentran valores de adhesión mínima, lo que funciona para una mezcla de asfáltica de alta calidad.

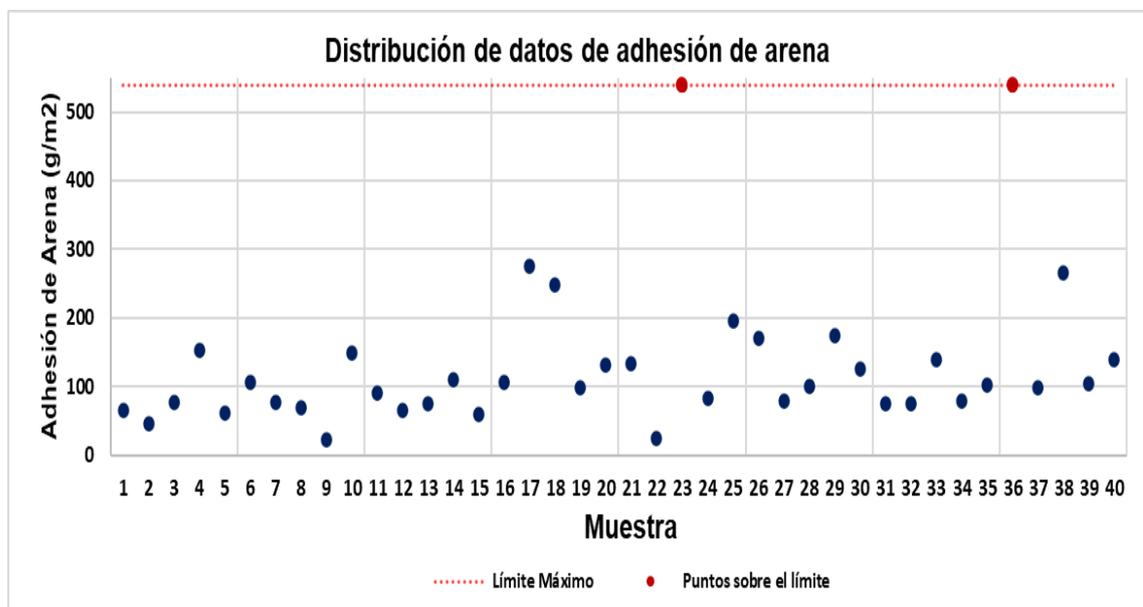
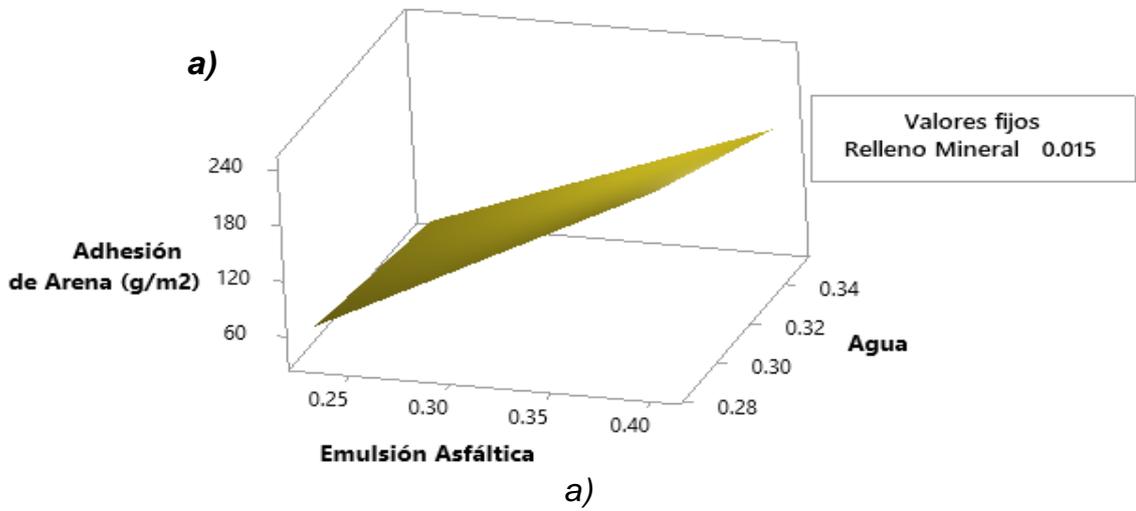
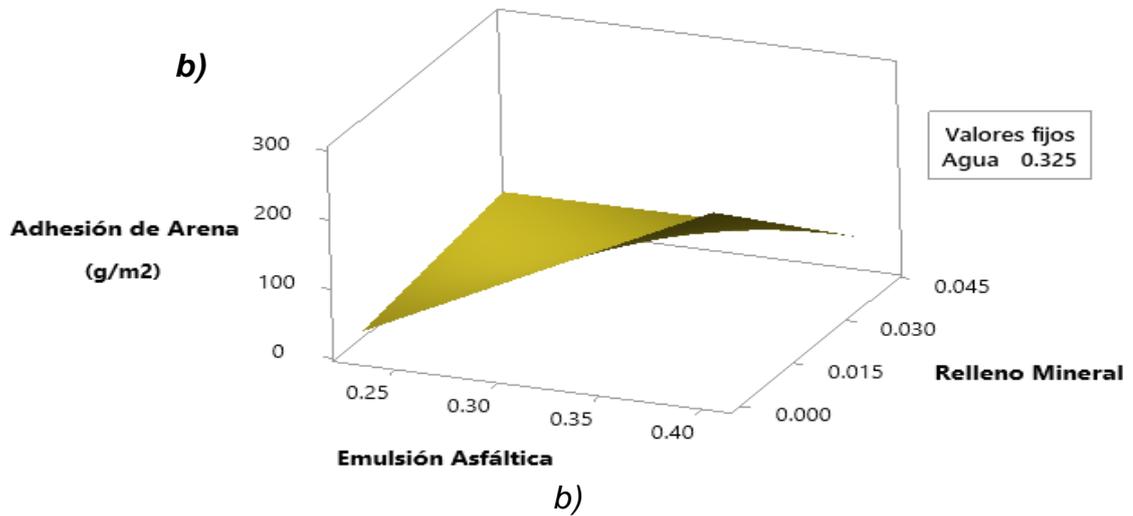


Figura 5.6. Distribución de datos de adhesión de arena para las mezclas diseñadas

Adhesión de Arena (g/m²) vs. Agua; Emulsión Asfáltica



Adhesión de Arena (g/m²) vs. Relleno Mineral; Emulsión Asfáltica



Adhesión de Arena (g/m²) vs. Relleno Mineral; Agua

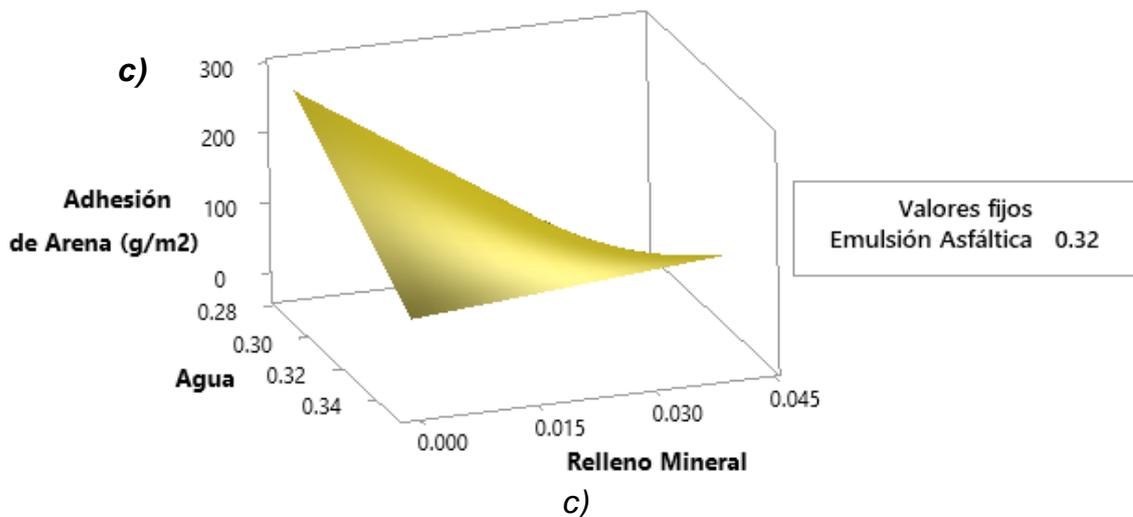


Figura 5.7. Superficie de respuesta de interacción de Adhesión de arena; a) Adhesión de arena vs. Agua, Emulsión asfáltica; b) Adhesión de arena vs. Emulsión Asfáltica, Relleno mineral; c) Adhesión de arena vs. Agua, Relleno Mineral

Compactación vertical y desplazamiento lateral

Determinando la resistencia a la deformación de la pasta asfáltica aplicada mediante las mediciones de compactación vertical y desplazamiento con la utilización la ISSA TB147 y ambas mediciones se reportan como milímetros.

Mostrando los resultados en la **Tabla B.9.7** obtenidos de esta prueba, y graficados en la **Figura 5.8**; observando los puntos que sobrepasan el límite establecido para desplazamiento y compactación, en ambas pruebas las formulaciones 23 y 36 están en límite incumpliendo estos parámetros de calidad; además, estas formulaciones los puntos de emulsión asfáltica y agua están relativamente cercanos, así mismo como un alto y nulo contenido de relleno mineral respectivamente.

Por otro lado, se observó en la **Figura 5.9** y **Figura 5.10** para la compactación vertical y desplazamiento lateral la interacción de los componentes de la mezcla para reducir estas variables se encuentran en las regiones de 25% a 30% de emulsión asfáltica, 28% a 32% de agua y 1.5% a 2% de relleno mineral.

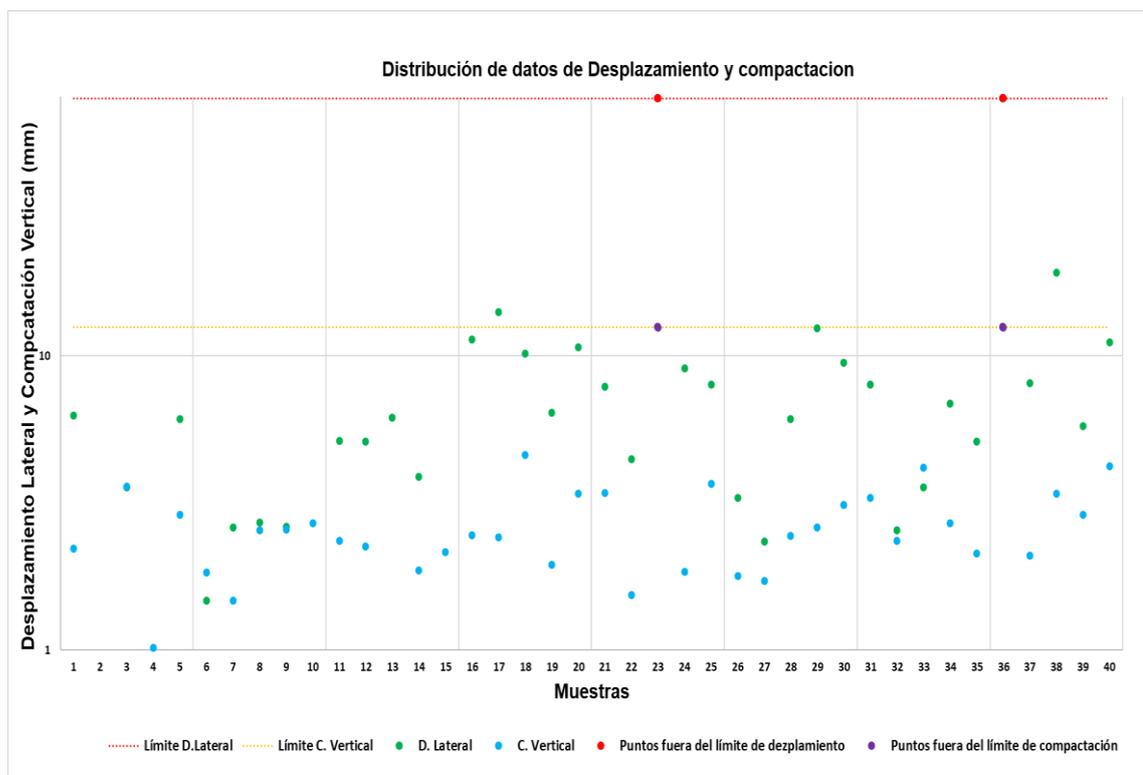
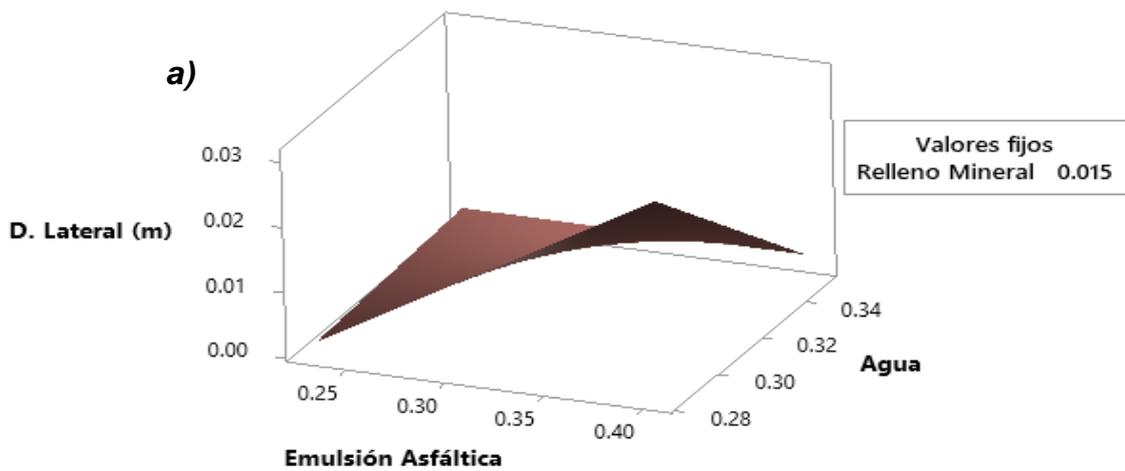
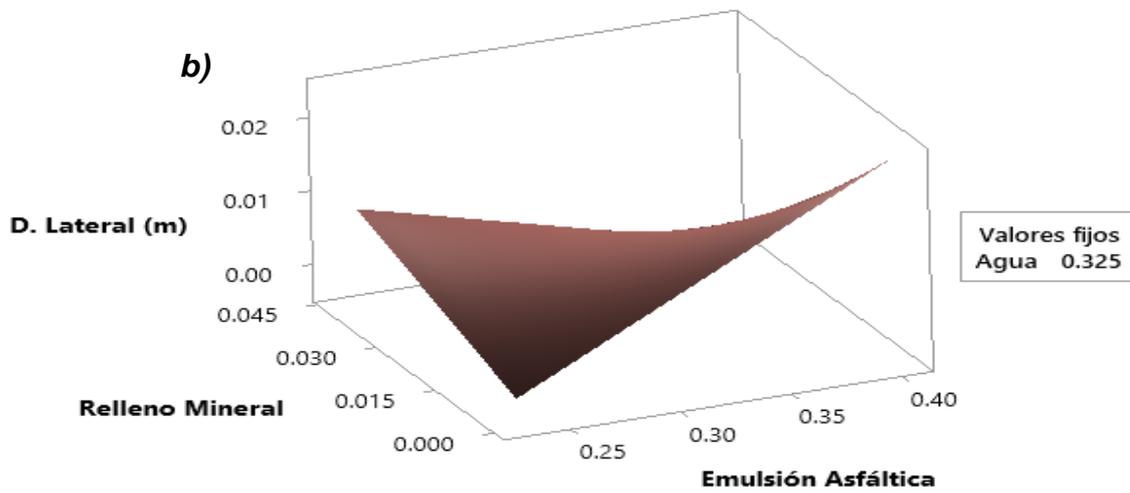


Figura 5.8. Distribución de datos de compactación vertical y compactación vertical de las mezclas diseñadas

D. Lateral (m) vs. Agua; Emulsión Asfáltica



D. Lateral (m) vs. Relleno Mineral; Emulsión Asfáltica



D. Lateral (m) vs. Relleno Mineral; Agua

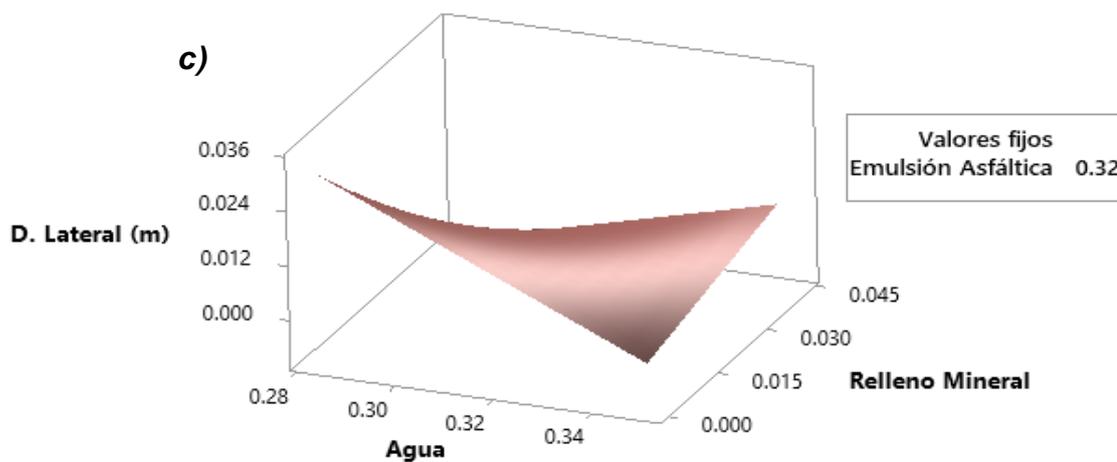
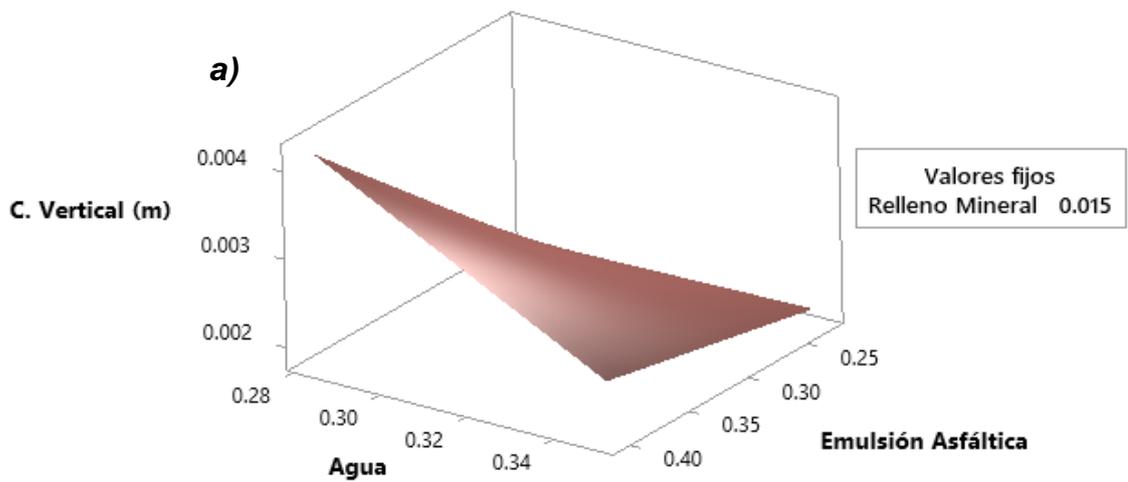
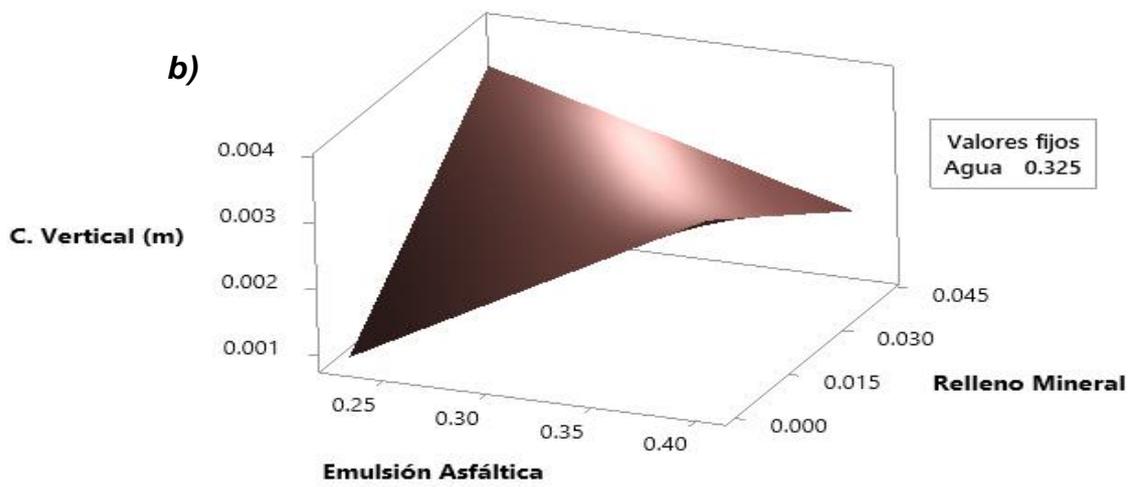


Figura 5.9. Superficie de respuesta de interacción de Desplazamiento lateral; a) Desplazamiento lateral vs. Agua, Emulsión asfáltica; b) Desplazamiento lateral vs. Emulsión Asfáltica, Relleno mineral; c) Desplazamiento lateral vs. Agua, Relleno Mineral

C. Vertical (m) vs. Agua; Emulsión Asfáltica



C. Vertical (m) vs. Relleno Mineral; Emulsión Asfáltica



C. Vertical (m) vs. Relleno Mineral; Agua

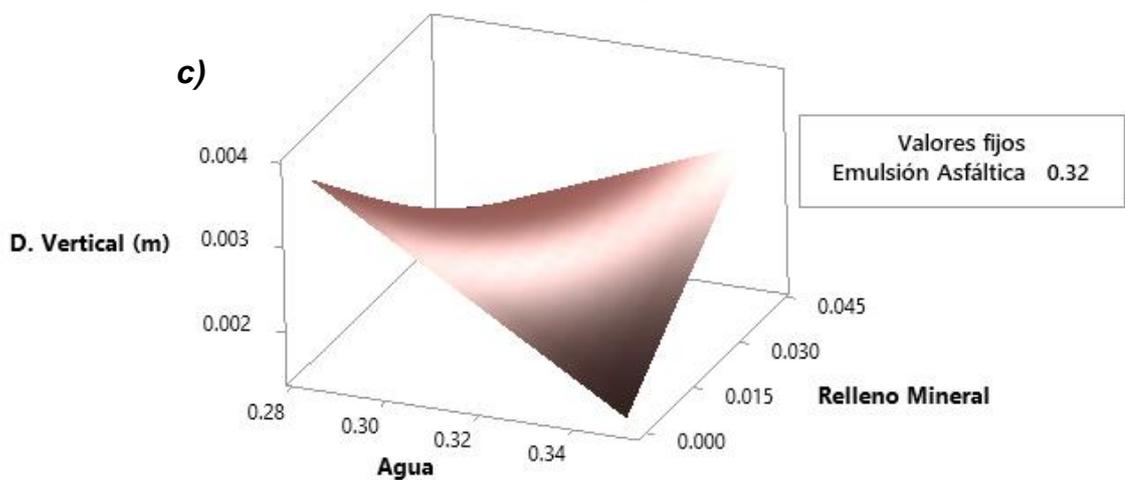


Figura 5.10. Superficie de respuesta de interacción de Compactación vertical; a) Compactación vertical vs. Agua, Emulsión asfáltica; b) Compactación vertical vs. Emulsión Asfáltica, Relleno mineral; c) Compactación vertical vs. Agua, Relleno Mineral

Desgaste por abrasión húmeda

Midiendo las cualidades de desgaste de sistemas de revestimiento de slurry en condiciones de abrasión húmeda; donde, el desgaste es reportado como g/m^2 . La ISSA A105 recomienda un valor máximo de 807 g/m^2 . Además, calculado los resultados con los criterios mostrados en las ecuaciones (4.28) y (4.29) obteniéndose así los resultados mostrados en la **Tabla B.5.8**.

Observando en la gráfica de la **Figura 5.11** las mezclas que sobrepasaron el límite establecido, cuales pertenecen a formulaciones que no poseen relleno mineral en su composición; igualmente, en las anteriores pruebas se ha observado que el relleno mineral utilizado en las formulaciones da un grado de resistencia mecánica a la pasta, lo cual ha sido comprado con la adhesión, compactación, desplazamiento y esta prueba de desgaste.

Se observó, en la **Figura 5.12** la interacción de los componentes de la mezcla, donde la región de composición para la reducción del valor de la variable de se encuentra entre 25% a 30% de emulsión asfáltica, 28% a 32% agua y 1% a 3% de relleno mineral.

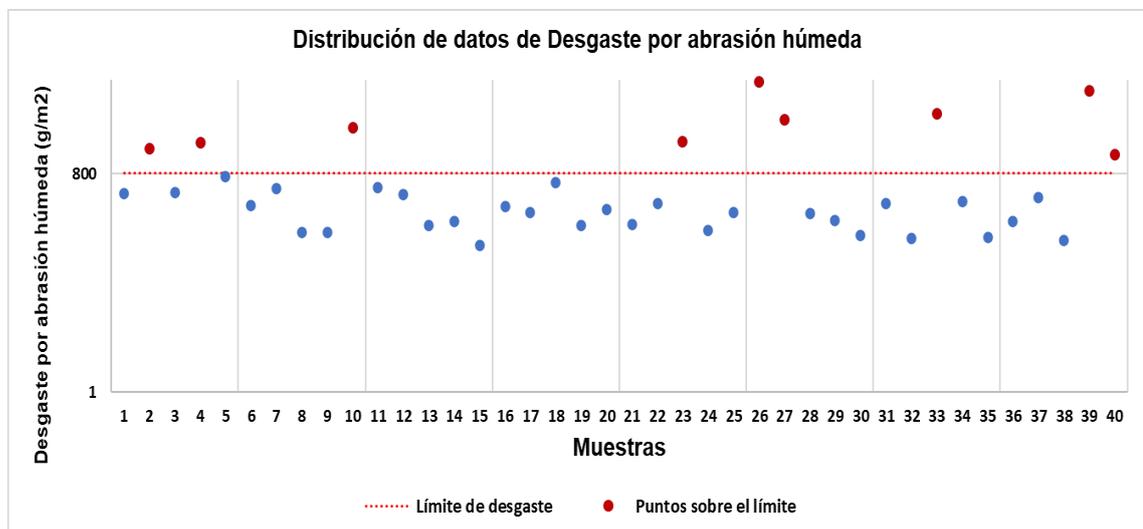
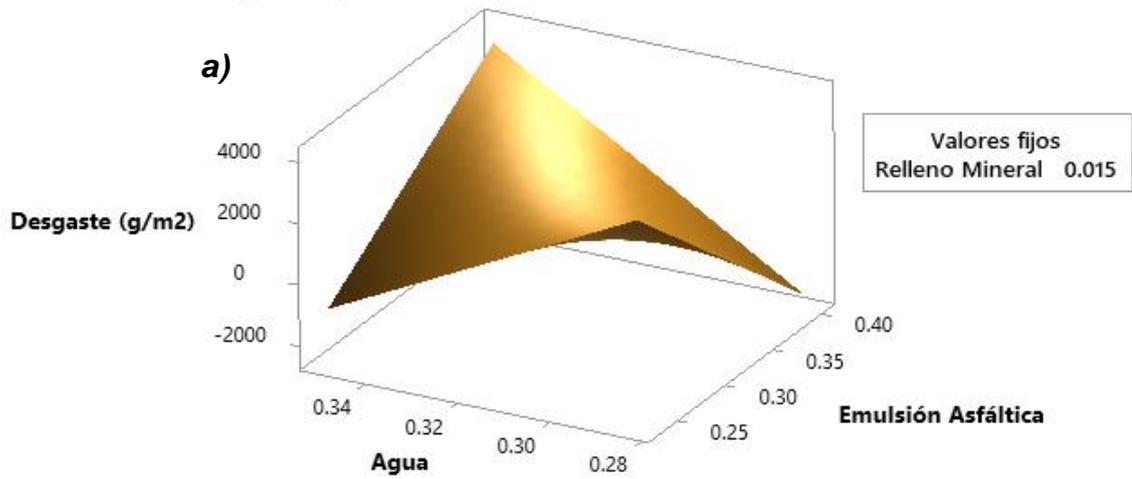
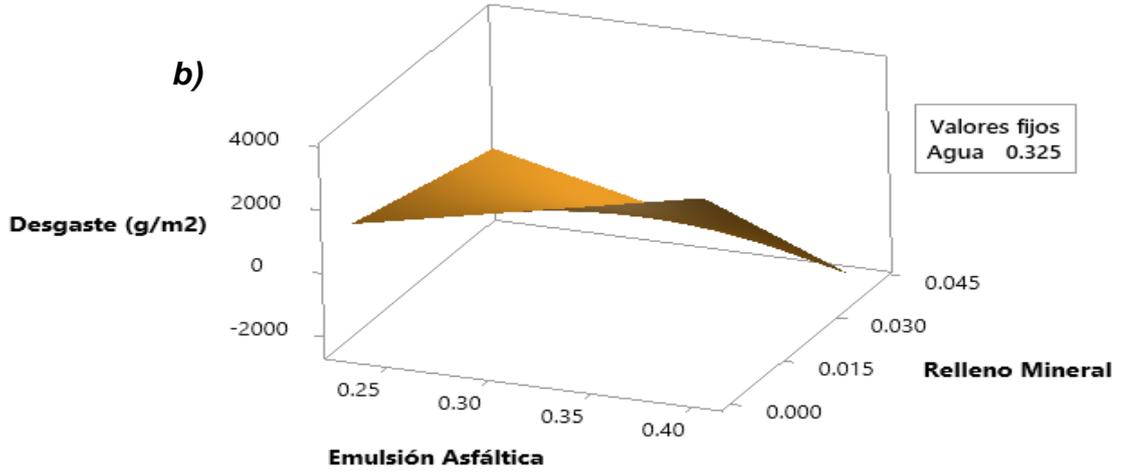


Figura 5.11. Distribución de datos de desgasta por abrasión húmeda de las mezclas diseñadas

Desgaste (g/m²) vs. Agua; Emulsión Asfáltica



Desgaste (g/m²) vs. Relleno Mineral; Emulsión asfáltica



Desgaste (g/m²) vs. Relleno Mineral; Agua

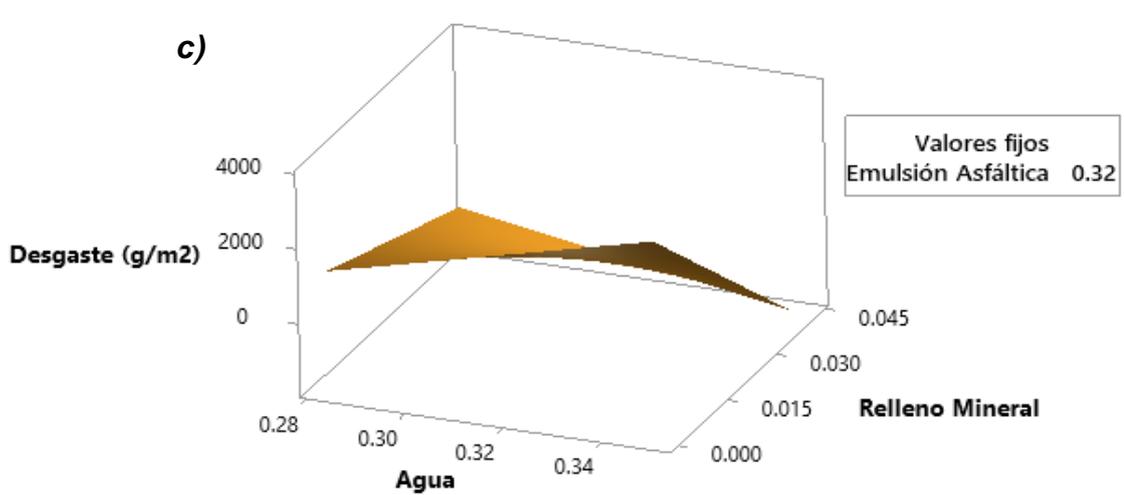


Figura 5.12. Superficie de respuesta de interacción de Desgaste por abrasión húmeda; a) Desgaste vs. Agua, Emulsión asfáltica; b) Desgaste vs. Emulsión Asfáltica, Relleno mineral; c) Desgaste vs. Agua, Relleno Mineral

Tiempo de anaquel

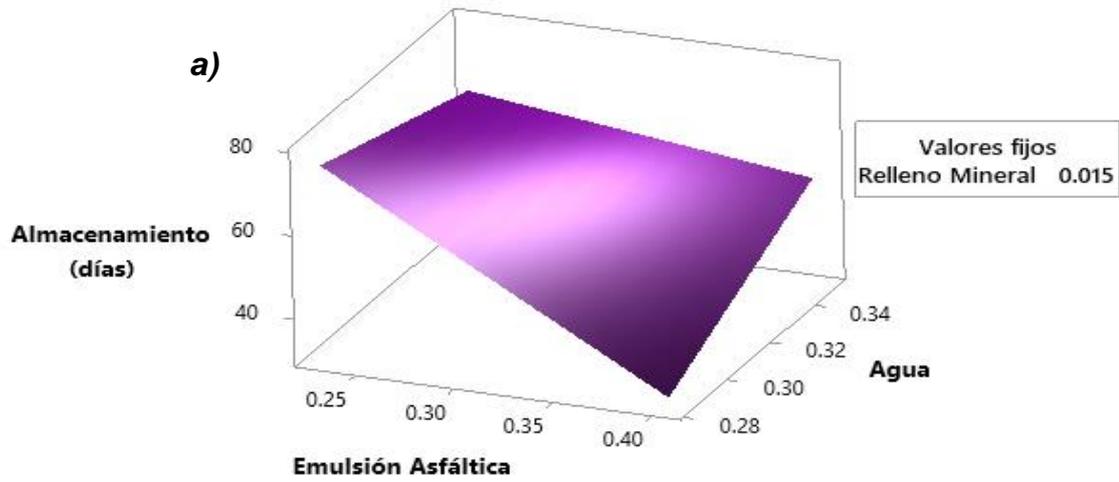
Este es el punto especial de esta pasta asfáltica, debido a que los productos asfálticos no se han diseñado para ser almacenados, ya que, son mezclados y utilizados al momento, por ello, se tomó esta nueva variable; donde, se midió 60 días de almacenamiento por cada uno de los 40 diseños y tomando como criterio la restricción mencionada anteriormente.

De ahí, la **Tabla 5.14** muestra los resultados obtenidos para el tiempo de anaquel, observando las formulaciones 23,33 y 36 no se conservaron según los criterios establecidos; se puede notar que la muestra 33 y su réplica 36 no se conservaron, deduciendo que es efecto de las proporciones de la mezcla, las cuales poseen alto nivel de emulsión y agua. La utilidad tecnológica de las pastas conservadas se basa en eliminar la utilización de maquinarias de mezclado y costos de operación en la aplicación de tratamientos superficiales, ya que es una mezcla que se aplicara directamente a los pavimentos.

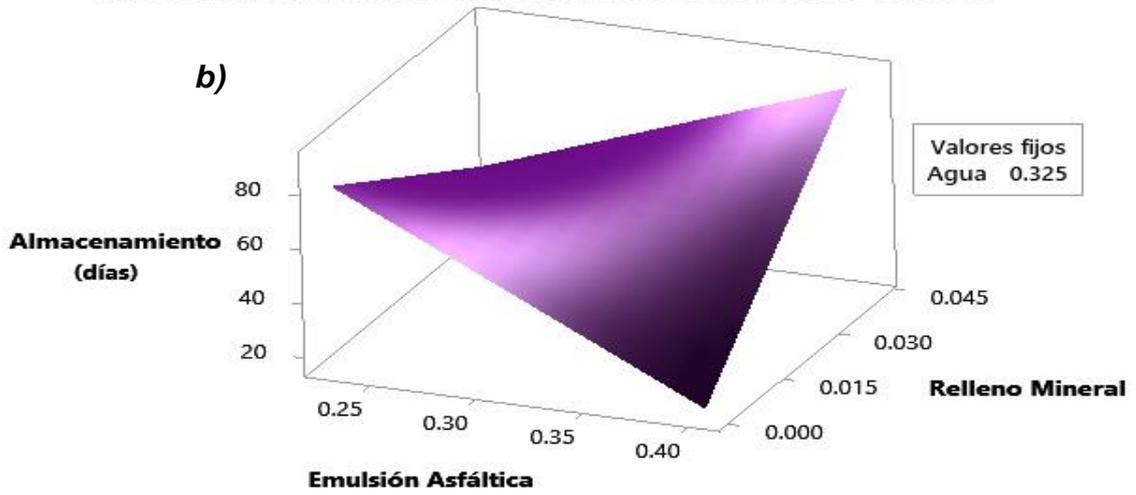
Por otro lado, el caso de la formulación 23 se establece como error de manipulación de muestra, ya que, su réplica se conservó a diferencia de esta. Igualmente, se percibe que las 3 muestras guardan la similitud de no poseer relleno mineral en su composición.

Los resultados se muestran de manera gráfica en las **Figura 5.13**, donde se puede observar que además del aditivo, el relleno mineral ayuda a proporcionar un largo periodo de conservación; así mismo, las formulaciones de altas proporciones de emulsión y agua necesitaran proporciones altas de relleno mineral para conservarse, también, las mezclas con proporciones bajas de los componentes tienen a conservarse menos tiempo.

Almacenamiento (días) vs. Agua; Emulsión asfáltica



Almacenamiento (días) vs. Relleno Mineral; Emulsión asfáltica



Almacenamiento (días) vs. Relleno Mineral; Agua

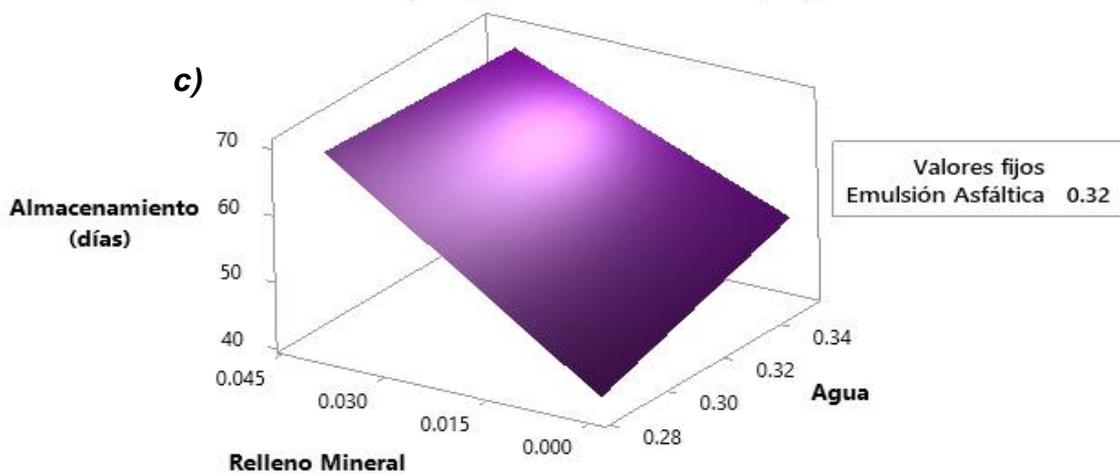


Figura 5.13. Superficie de respuesta de interacción de Tiempo de anaquel; a) Almacenamiento vs. Agua, Emulsión asfáltica; b) Almacenamiento vs. Emulsión Asfáltica, Relleno mineral; c) Almacenamiento vs. Agua, Relleno Mineral

Tabla 5.14. Tiempo de anaquel para las mezclas diseñadas

Muestra (n)	Duración A (días)	Duración B (días)	Duración C (días)	Duración D (días)	Análisis de Conserva
1	15	30	45	60	<i>Pasta Conservada</i>
2	15	30	45	60	<i>Pasta Conservada</i>
3	15	0	45	60	<i>Pasta Conservada</i>
4	15	30	45	60	<i>Pasta Conservada</i>
5	15	30	45	60	<i>Pasta Conservada</i>
6	15	30	0	60	<i>Pasta Conservada</i>
7	15	30	45	60	<i>Pasta Conservada</i>
8	15	30	45	60	<i>Pasta Conservada</i>
9	15	30	45	60	<i>Pasta Conservada</i>
10	15	30	45	60	<i>Pasta Conservada</i>
11	15	30	45	60	<i>Pasta Conservada</i>
12	15	30	45	60	<i>Pasta Conservada</i>
13	15	30	45	60	<i>Pasta Conservada</i>
14	15	30	45	60	<i>Pasta Conservada</i>
15	15	30	45	60	<i>Pasta Conservada</i>
16	15	30	45	60	<i>Pasta Conservada</i>
17	15	30	45	60	<i>Pasta Conservada</i>
18	15	30	45	60	<i>Pasta Conservada</i>
19	15	30	45	60	<i>Pasta Conservada</i>
20	15	30	45	60	<i>Pasta Conservada</i>
21	15	30	45	60	<i>Pasta Conservada</i>
22	15	30	45	60	<i>Pasta Conservada</i>
23	0	30	0	60	<i>Pasta Conservada</i>
24	15	30	45	60	<i>Pasta Conservada</i>
25	15	30	45	60	<i>Pasta Conservada</i>
26	0	30	45	0	<i>No conservada</i>
27	15	30	45	60	<i>Pasta Conservada</i>
28	15	30	45	60	<i>Pasta Conservada</i>
29	15	30	45	60	<i>Pasta Conservada</i>
30	15	30	45	60	<i>Pasta Conservada</i>
31	15	30	45	60	<i>Pasta Conservada</i>
32	15	30	45	60	<i>Pasta Conservada</i>
33	15	0	0	60	<i>No conservada</i>
34	15	30	45	60	<i>Pasta Conservada</i>
35	15	30	45	60	<i>Pasta Conservada</i>
36	0	30	0	60	<i>No conservada</i>
37	15	30	45	60	<i>Pasta Conservada</i>
38	15	30	45	60	<i>Pasta Conservada</i>
39	15	30	45	60	<i>Pasta Conservada</i>
40	15	30	45	60	<i>Pasta Conservada</i>

5.2. Optimización de la composición de las mezclas de la pasta de slurry seal con relación a los requerimientos tecnológicos de su desempeño funcional

Los resultados del diseño óptimo se basan en la predicción realizada por el modelo ajustado de superficie de respuesta con respecto a los factores de control y las variables de respuesta. Obteniendo la predicción mostrada en la **Tabla 5.15**, conteniendo una deseabilidad compuesta del 85.67%, además, cabe señalar que los bajos porcentajes de deseabilidad compuesta se reflejan en la diferenciación de los resultados reales; por lo tanto, se comprobó los resultados propuestos y se determinó la calidad de pasta mediante los ensayos de la **Tabla A.9.1** para la evaluación del desempeño funcional real.

Tabla 5.15. Punto óptimo de diseño propuesto y predicciones de resultados de las variables

Solución Propuesta	
Emulsión Asfáltica	0.23
Agua	0.345
Relleno Mineral	0.0076
Almacenamiento (días)	72
Desgaste (g/m²)	163.01
Adhesión de Arena	12.3898
Compactación vertical (m)	0.0012247
Desplazamiento lateral (m)	0.001258
Consistencia (m)	0.02504
Tiempo de mezclado (min)	3.04286
Deseabilidad compuesta (%)	85.67

5.2.1. Consistencia optima

Midiendo la consistencia de la mezcla la cual no concordó con la predicción, resultando una consistencia elevada de 6 cm, debido a esto se reajustó a una fracción de relleno mineral de 0.0145, con el cual se obtuvo una consistencia promedio de 3.03 cm, como se muestra en la **Tabla 5.16**, obteniéndose un valor en un rango tolerable.

Tabla 5.16. Consistencia de la pasta optima

Muestra (n)	Consistencia (Cm)
1	2.8
2	3
3	3.3
Consistencia Promedio	3.03

5.2.2. Tiempo de Mezclado optimo

Como se mencionó anteriormente el tiempo de mezclado debe ser superior a los 3 minutos para poder concluir que la pasta puede ser controlada y aplicada de forma adecuada, la pasta optima en las 3 réplicas obtuvo un tiempo de mezclado mayor a los 3 minutos, cumpliendo así este requisito.

5.2.3. Desgaste por abrasión Húmeda optima

Como todo producto asfáltico debe resistir el constante estrés del tránsito que estará sobre él. El desgaste por abrasión húmeda es una de las pruebas que se realizó para determinar la resistencia de la pasta optima a dicho desgaste; Por otro lado la predicción optima obtenida de la superficie de respuesta corresponde a 163.01 g/m² lo que es un valor por debajo del máximo permitido por la ISSA A105.

Realizando esta prueba para obtener el valor real de desgaste del punto óptimo, los resultados se presentan en la **Tabla 5.17**. Observando el valor obtenido es muy por debajo del máximo permitido, lo que es sumamente satisfactorio para una mezcla asfáltica, cumpliendo el requerimiento de calidad.

Tabla 5.17. Desgaste por abrasión húmeda de la pasta optima

Muestra (n)	Peso Inicial (g)	Peso Final (g)	Perdida por desgaste (g)	Desgaste por abrasión húmeda (g/m ²)
1	2343.3	2342.9	0.4	15.00
2	2316.8	2316.4	0.4	15.00
3	2330.4	2330.2	0.2	7.50
Promedio	2330.17	2329.83	0.33	12.50

5.2.4. Adhesión de Arena optima

Utilizando la norma ISSA A105 la cual recomienda un valor máximo de 16% de asfalto residual, de ahí utilizando el porcentaje promedio de cemento asfáltico contenido en la emulsión utilizada la fracción optima de 0.23 emulsión asfáltica posee un asfalto residual de 14.71%, valor el cual se encuentra en el rango aceptado por las normas.

Continuando con la prueba de adhesión de arena, la predicción de esta prueba es de un valor de 12.38 g/m²; sin embargo los resultados obtenidos que se muestran en la **Tabla 5.18** difieren de la predicción, por otro lado, este valor es bastante inferior al punto máximo permitido por la norma, por lo que se puede decir que cumple con este parámetro de calidad.

Tabla 5.18. Adhesión de arena de la pasta optima

Muestra (n)	Peso Inicial (g)	Peso Final (g)	Arena adherida (g)	Adhesión de arena (g/m ²)
1	885.65	883.42	2.23	73.23
2	863.19	861.81	1.38	45.32
3	477.82	475.72	2.1	68.97
Promedio	742.22	740.32	1.90	62.51

5.2.5. Compactación vertical y Desplazamiento lateral optima

La predicción para estos parámetros obtenidos mediante superficie de respuesta están estimados en 0.00122 m (1.22 mm) en compactación y 0.00125 m (1.25 mm) en desplazamiento, estos valores se encuentran en un rango de calidad alta; sin embargo los resultados presentados en la **Tabla 5.19** difieren de estos; por otro lado, los resultados datos son satisfactorios para la pasta, es importante señalar que las capas más finas de pasta aplicada poseen menos compactación y desplazamiento. Señalando que la pasta debe ser utilizada como tratamiento superficial.

Tabla 5.19. Compactación vertical y Desplazamiento lateral de la pasta optima

Muestra (n)	Longitud inicial (mm)	Longitud final (mm)	Desplazamiento lateral (g)	Compactación vertical (mm)
1	50.76	53.7	2.94	2.17
2	52.13	56.3	4.17	2.46
3	53.42	57.01	3.59	1.94
Promedio	52.10	55.67	3.57	2.19

5.2.6. Cohesión óptima

En las 3 muestras de la mezcla del punto óptimo a una temperatura menor a 30 °C no se obtuvo cohesión (**Figura C.9.9**), esto contrasta con el almacenamiento de la pasta, ya que, no debe romper en esta temperatura de anaquel.

Por otro lado las 3 muestras que permanecieron a temperatura mayores a 30 °C obtuvieron los resultados que se muestran en la **Tabla 5.20**. Observando una Cohesión promedio de $0.136 \text{ kg}\cdot\text{m}$, valor sobre el mínimo recomendado por la ISSA A105, Cumpliendo así este requerimiento de calidad.

Tabla 5.20. Cohesión ($T > 30 \text{ }^\circ\text{C}$) de la mezcla del punto óptimo

Muestra (n)	Tiempo de Cohesión (h)	Cohesion ($[T > 30 \text{ }^\circ\text{C}] \text{ (Kg}\cdot\text{m)}$)
1	4:30	0.13
2	4:50	0.13
3	5:10	0.15
Promedio	4:50	0.136

5.2.7. Desnudamiento por Humedad óptima

Determinando el nivel de mezclado y el revestimiento del cemento asfáltico en la mezcla con esta prueba y reportando como porcentaje con la utilización de la ISSA TB114, además la ISSA A105 recomienda un valor mínimo para esta prueba de 90%; por lo cual, los resultados se presentan en la **Tabla 5.21**, donde, se puede observar que la pasta asfáltica diseñada posee un grado de desnudamiento de 9.94%, lo que resulta en un revestimiento de 90.06% un nivel satisfactorio de la calidad de la pasta óptima

Tabla 5.21. Desnudamiento por humedad de la pasta óptima

Muestra (n)	Peso Inicial (g)	Peso Final (g)	Desnudamiento por humedad (%)
1	10.5	9.7	7.61
2	10	8.9	11
3	10.7	9.5	11.21
Promedio	10.4	9.17	9.94

5.2.8. Análisis de predicción y datos reales de la pasta asfáltica optima

Las variables evaluadas para la pasta de slurry seal proporcionaron límites y requerimientos tecnológicos con respecto a su desempeño funcional deseados alcanzar por la mezcla optima, por ello, la metodología de superficie de respuesta con un diseño central compuesto resulta conveniente por el modelo estadístico, sin embargo, la optimización de las formulaciones, en lo cual se buscó obtener valores que ofrecieran una pasta de calidad superior, difirieron de los resultados reales, como se muestra en la **Tabla 5.22**, donde a simple vista se puede observar la diferencia entre los resultados obtenidos de predicción.

De esta manera se examinó los resultados con respecto a los límites planteados por las variables de respuesta, limites recomendados por la norma ISSA A105, con los que se puede evaluar los resultados reales obtenidos, donde estos cumplen con los requisitos de calidad; por ello, se puede destacar que el proceso de optimización por la metodología de superficie de respuesta cumplió en optimizar el desempeño funcional de la pasta de slurry seal.

Tabla 5.22. Comparación de los resultados reales y la predicción para la pasta optima

Composición y Variables	Datos Promedios Reales	Datos de predicción
Emulsión Asfáltica	0.23	0.23
Agua	0.34	0.345
Relleno Mineral	0.013	0.0076
Almacenamiento (días)	120	72
Desgaste por abrasión (g/m²)	12.50	163.01
Adhesión de Arena (g/m²)	62.51	12.38
Compactación vertical (m)	0.002	0.001
Desplazamiento lateral (m)	0.003	0.001
Consistencia (m)	0.030	0.025
Tiempo de mezclado (min)	3	3.042
Cohesion ([T>30 °C] (Kg*m))	0.136	-
Desnudamiento por humedad (%)	9.94	-

VI. Conclusiones

Evaluando los componentes con los requerimientos de los parámetros establecidos en las normas AASHTO y ASTM, se obtuvo las propiedades físicas, químicas y tecnológicas del agregado pétreo con respecto a la mezcla final de pasta de slurry seal cumpliendo con los requisitos de calidad, obteniendo un agregado adecuado para los diseños realizados; igualmente, las propiedades físico-químicas evaluadas del agua no tuvieron incidencia en la compatibilidad, resultando apta para la producción de los diseños de mezcla de la pasta; así mismo, el relleno mineral y el aditivo presentan la característica de ser alcalinos lo que ayuda a preservar la pasta asfáltica en largos periodos de anaquel; donde el relleno mineral aporta dureza mecánica y estabilidad a las mezclas diseñadas, resultando ser productos totalmente compatibles para los diseños.

Formulando 20 mezclas y una réplica por mezcla de pasta de slurry seal con un diseño de experimento ajustado a los requerimientos tecnológicos de su desempeño funcional con respecto a las variables de respuesta, se encontró que las regiones experimentales que poseen puntos de relleno mineral entre 1% a 2%, agua entre 30% a 35%, emulsión asfáltica 25% a 30% cumplen con los valores necesarios para la obtención de mezclas de calidad, lo que se refleja en las gráficas de superficie de respuesta.

Evaluando la calidad de las mezclas asfálticas diseñadas de las regiones que se encuentran con proporciones de relleno mineral mayores o igual 3% y proporción de agua menores a 30%, las cuales obtuvieron resultados no conformes a los requerimientos de calidad propuestos, así mismo, las mezclas con 0% de relleno mineral, fracciones de agua de 35% y fracciones emulsión igual o mayores a 30% resultaron no conformes; Por otro lado, Observando los resultados obtenidos de los puntos que no poseen estas composiciones, las mezclas cumplen con los parámetros de los requerimientos tecnológicos de la calidad para el slurry seal.

Optimizando el desempeño funcional de las mezclas conforme a los requerimientos tecnológicos con respecto a las normas de calidad ISSA A105 mediante la metodología de superficie de respuesta, se logró disminuir los parámetros de desgaste por abrasión húmeda a 12.5 g/m², compactación vertical a 2 mm, el desplazamiento lateral a 3 mm, adhesión de arena a 62.51 g/m²

además de fijar el tiempo de mezclado a 3 min y consistencia 3 cm, maximizar el tiempo de anaquel a 120 días, obteniendo así un punto óptimo de 23% Emulsión asfáltica CSS-1H, 34% de agua y 1.3% de relleno mineral, resultando con una pasta de slurry seal de alta calidad.

VII. Recomendaciones

- Comparar la compatibilidad de los rellenos minerales recomendados por la ISSA A105 para los diseños de slurry seal con respecto al polvo de caliza, que puedan aportar mayor resistencia mecánica y estabilidad a las mezclas.
- Comprobar los aditivos de cloruro de aluminio y bórax recomendados como retardantes de rotura de las mezclas asfálticas en los diseños asfálticos para prolongar el tiempo de anaquel.
- Reducir el diseño de experimento a un modelo más ajustado utilizando la metodología de superficie de respuesta de Box-Behnken propuesta en Minitab.
- Determinar la compatibilidad electroquímica con los otros aditivos recomendados con los componentes del slurry seal que resulten en tiempos de anaquel prolongados
- Determinar los parámetros de aplicación y rendimiento aplicado en las redes viales para tratamientos superficiales a mayor escala.

VIII. Referencias

- (MTI), M. d. (Recuperado Noviembre 2020). *Logistics Capacity Assessments (LCAs)*. Obtenido de <https://dlca.logcluster.org/display/public/DLCA/2.3+Nicaragua+Red+Vial>
- Asphalt Institute, & Asphalt Emulsion Manufacturers Association. (2001). *Manual Básico de Emulsiones Asfálticas serie No. 19*. USA: Asphalt Institute.
- Gutiérrez Pulido, H., & Salazar, R. d. (2008). *Análisis y diseño de experimentos*. México D.F, México: McGRAW-Hill / Interamericana Editores, S.A. de C.V.
- Henry, J. G., & Heinke, G. W. (1999). En *Ingeniería Ambiental (2 edición)* (pág. 166). Juarez, México: Prentice HALL, Inc.
- ISSA. (2010). Norma de Rendimiento Recomendada para Slurry Seal A105. *ISSA A105*, 16.
- ISSA Technical Bulletins*. (Recuperado noviembre 2020). Obtenido de <https://www.slurry.org/page/TechnicalBulletins>
- Jiménez Acuña, M., Ulloa Calderón, A., & Múnera Miranda., J. C. (2016). *Guía de Diseño de Mezclas de Laboratorio para los Sellos de Lechada Asfáltica (Slurry Seals)*. San José, Costa Rica: LanammeUCR.
- La comunidad petrolera*. (16 de abril de 2016). Obtenido de <https://lacomunidadpetrolera.com/2016/04/betun-o-bitumen.html>
- López, J. K. (2018). *Mortero Asfáltico o Slurry Seal como tratamiento superficial para pavimentos de afirmado*. Lima, Perú: Universidad Ricardo Palma. Facultad de Ingeniería.
- Materials, A. S. (2014). *ASTM International*. Obtenido de <https://www.astm.org/Standards/D2419>
- Materials, A. S. (2015). *ASTM International*. Obtenido de <https://www.astm.org/DATABASE.CART/HISTORICAL/C128-04A-SP.htm>
- Materials, A. S. (2017). *ASTM International*. Obtenido de <https://www.astm.org/Standards/C117-SP.htm>

- Materials, A. S. (2018). *ASTM International*. Obtenido de <https://www.astm.org/Standards/C88.htm>
- Materials, A. S. (2019). *ASTM International*. Obtenido de <https://www.astm.org/Standards/C136>
- Materials, A. S. (2019). *ASTM International*. Obtenido de <https://www.astm.org/Standards/D75.htm>
- Materials, A. S. (2020). *ASTM international*. Obtenido de <https://www.astm.org/Standards/C131.htm>
- Mejía Guarango, C. A. (2018). *Diseño de un mortero asfáltico con emulsión, modificada con caucho molido de neumáticos*. Quito, Ecuador: [Tesis de Grado Universidad Central del Ecuador] <http://dspace.uce.ec/handle/25000/17491>.
- Narvaéz, E. V. (2020). *Diseño de un Micropavimento tipo III, que cumpla con los estándares de calidad establecidos por la norma internacional ISSA A143, aplicando el método de Superficie de Respuesta*. Managua, Nicaragua: [Tesis de Grado Universidad Nacional de Ingeniería] <http://ribuni.uni.edu.ni/id/eprint/3717>.
- Rondón, H. A., & Reyes, F. A. (2015). *Pavimentos, Materiales, construcción y diseño*. Bogotá, Colombia: Ecoe Ediciones.
- Salud, O. M. (2013). *Guías para la calidad del agua potable Volumen 1*. Ginebra, Suiza: Ediciones O.M.S.
- Setyawan , A., Sarwono, D., & Adnan, M. (2015). The Development of Slurry Seal Design with Ordinary Portland Cement Replacement by Low Calcium Fly Ash. *Applied Mechanics and Materials*, 8.
- Transportation, U. D. (1994). *Condiciones para Prácticas de Diseño, Construcción y Rendimiento de Micro-pavimento*. Washington D.C, EEUU: Federal Highway Administration .
- Wadell, J., & Dobrowolsky, J. (2001). *Manual de la Construcción con Concreto, Tomo I*. Mexico D.F, Mexico: McGraw-Hill/ Interamericana S.A.

IX. Anexos

A. Ensayos para evaluación y determinación de los requerimientos tecnológicos de calidad de los materiales y la pastas de slurry seal

Tabla A.9.1. Ensayos para el análisis de la mezcla del slurry seal recomendada por la ISSA A105

Prueba ISSA No.	Prueba
TB 100	Desgaste por Abrasión Húmeda.
TB 106	Medición de Consistencia del slurry seal.
TB 109	Exceso de asfalto por el método de rueda cargada con adhesión de arena.
TB 113	Tiempo de Mezclado.
TB 114	Desnudamiento por Humedad.
TB 139	Cohesión de la mezcla del slurry seal.
TB 147	Resistencia a la compactación vertical y desplazamiento lateral

Tabla A.9.2. Normas para evaluar los componentes del slurry seal

ASHTO	ASTM	Prueba
T176	D2419	Valor equivalente de arena y agregados finos.
T104	C88	Determinación los sólidos del agregado mediante el uso de sulfato de sodio o sulfato de magnesio.
T330	-	Valor de azul de metileno.
T96	C131	Resistencia a la degradación de agregados gruesos de tamaño pequeño por abrasión e impacto en la máquina de Los Ángeles.
T27	C136	Prueba por tamizado de agregados finos y gruesos.
T11	C117	Prueba estándar para materiales más finos que un tamiz de 75 µm (N.º200) en los agregados minerales mediante lavado.
T84	C128	Prueba para determinar la densidad, la densidad relativa (gravedad específica), y la absorción de agregados finos
-	C702	Esta práctica cumple la función de reducción de muestras grandes de agregados al tamaño apropiado para realizar pruebas.
-	D244	Métodos estándar y pruebas para emulsiones asfálticas. Las pruebas a realizar son: Residuo por evaporación, Viscosidad Saybolt furol, Estabilidad de almacenamiento, Tamizado, Penetración de residuo por evaporación.

Tabla A.9.3. Resultados de evaluación físico-química del agua

Metodo	Ensayo Realizado	Unidad	Resultados	Norma Capre*
Visual	Aspecto	NE	Clara	NE
4500-B	Potencial de Hidrógeno	pH	8.86	6.5-8.5**
2510-B	Conductividad Eléctrica	μS/cm	713	400**
2130-B	Turbiedad	UNT	0.081	5
2120-C	Color Verdadero	mg/L(Pt-Co)	<1.00	15
2320-B	Alcalinidad	mg/L CaCO ₃	274.6	NE
2320-B	Carbontados	mg/L CaCO ₃	<0.40	NE
2320-B	Bicarbonatos	mg/L CaCO ₃	274.6	NE
4500-B	Nitratos	mg/L	6.38	50
4500-B	Nitritos	mg/L	<0.003	0.1
4500-D	Cloruros	mg/L	37.3	250
3500-B	Hierro Total	mg/L	<0.006	0.3
4500-E	Sulfatos	mg/L	27.35	250
2340-C	Dureza Total	mg/L CaCO ₃	86.8	400*
2340-C	Dureza Cálcica	mg/L CaCO ₃	55.5	NE
3500-B	Calcio	mg/L	22.24	100**
3500-B	Magnesio	mg/L	7.61	50
8149	Manganeso	mg/L	<0.005	0.5
3500-X	Sodio	mg/L	106.35	200
3500-C	Potasio	mg/L	13.84	10
4500-F	Flúor	mg/L	0.821	0.7

Leyenda de reporte de resultados: Se reporta por parámetro de acuerdo a la Unidad que se indica en la columna y línea respectiva.

Abreviaturas y símbolos: ≤ menor al límite de detección que se especifica por parámetro, **NE**= No especificada en la Norma, **NR**= No Reporta.

Métodos Normas y/o Decreto empleados: **SM** = Standard Methods for the Examination of Water & Wastewater 23 RD 2017.

HACH: Metodología HACH EPA = Environmental Protection Agency, * Normas de Calidad del Agua Para Consumo Humano: Norma Regional CAPRE **Valor Recomendado

B. Resultados de los requerimientos tecnológicos de calidad de las muestras de las pastas de slurry seal

Tabla B.9.4. Consistencia de las mezclas diseñadas

Muestra (n)	Consistencia (Cm)	Agua Total (%)
1	0	65
2	6	60
3	0	60
4	6	60
5	0	62
6	6	65
7	0	60
8	0	65
9	0.5	62.5
10	6	65
11	0	60
12	0	65
13	0.5	62.5
14	0	58.3
15	0.5	62.5
16	0	62
17	0.5	62.5
18	0	65
19	0.5	62.5
20	0	65
21	0	58.3
22	0.5	62.5
23	6	60
24	0.5	62.5
25	0	65
26	6	65
27	6	65
28	0.5	62
29	0.5	62.5
30	0.5	62.5
31	0	60
32	2	62.5
33	6	60
34	0	62.5
35	0.5	62
36	6	65
37	0.5	62.5
38	2	62.5
39	6	60
40	0	62.5

Tabla B.9.5. *Tiempo de mezclado de las mezclas diseñadas*

Muestra (n)	Tiempo de mezclado (min)
1	3
2	3
3	2.7
4	3
5	3
6	3
7	2.5
8	3
9	3
10	3
11	2.5
12	2.8
13	3
14	3
15	3
16	3
17	3
18	2.7
19	3
20	3
21	3
22	3
23	3
24	3
25	3
26	3
27	3
28	3
29	3
30	3
31	2.8
32	3
33	3
34	2.3
35	3
36	3
37	3
38	3
39	3
40	2

Tabla B.9.6. Adhesión de arena de las mezclas diseñadas

Muestra (n)	Contenido de asfalto %	Adhesión de Arena (g/m²)
1	17.3934	65.47
2	19.326	46.78
3	23.8354	77.84
4	17.3934	151.96
5	20.6144	60.63
6	17.3934	105.40
7	23.8354	77.20
8	23.8354	68.54
9	14.8166	21.57
10	23.8354	149.92
11	17.3934	91.23
12	17.3934	65.68
13	20.6144	74.55
14	20.6144	110.67
15	20.6144	59.15
16	20.6144	105.25
17	24.4796	274.49
18	19.326	247.48
19	20.6144	98.77
20	19.326	132.02
21	20.6144	133.33
22	14.8166	24.68
23	19.326	538
24	20.2923	82.35
25	23.8354	195.75
26	23.8354	169.61
27	17.3934	79.37
28	20.9365	99.69
29	24.4796	173.72
30	20.2923	126.14
31	17.3934	75.72
32	26.02568	75.86
33	23.8354	140.00
34	20.6144	79.01
35	20.9365	101.40
36	23.8354	538
37	20.6144	97.45
38	26.02568	266.01
39	17.3934	104.03
40	20.6144	138.93

Tabla B.9.7. Desplazamiento y Compactación de las mezclas diseñadas

Muestra (n)	Desplazamiento Lateral (mm)	Compactación Vertical (mm)
1	6.26	2.21
2	0.91	0.7
3	3.58	3.6
4	0.98	1.02
5	6.11	2.88
6	1.47	1.84
7	2.62	1.47
8	2.71	2.55
9	2.63	2.57
10	0.7	2.7
11	5.14	2.35
12	5.12	2.25
13	6.16	0.83
14	3.88	1.87
15	0.62	2.16
16	11.36	2.46
17	14.06	2.42
18	10.16	4.6
19	6.42	1.95
20	10.71	3.4
21	7.86	3.42
22	4.45	1.54
23	75	12.5
24	9.06	1.85
25	8.01	3.67
26	3.29	1.79
27	2.34	1.72
28	6.11	2.44
29	12.39	2.62
30	9.49	3.11
31	7.98	3.3
32	2.56	2.36
33	3.57	4.18
34	6.89	2.7
35	5.11	2.13
36	75	12.5
37	8.09	2.1
38	19.192	3.4
39	5.77	2.88
40	11.1	4.23

Tabla B.9.8. Desgaste por abrasión húmeda de las mezclas diseñadas

Muestra (n)	Desgaste (g/m2)
1	435
2	1690.65
3	442.5
4	2076.75
5	727.5
6	303.75
7	510
8	131.25
9	131.25
10	3235.05
11	517.5
12	423.75
13	161.25
14	187.5
15	90
16	296.25
17	243.75
18	600.00
19	165.00
20	266.25
21	168.75
22	322.50
23	2123.55
24	142.50
25	240.00
26	13326.30
27	4106.70
28	232.50
29	191.25
30	120.00
31	318.75
32	108.75
33	5001.75
34	337.50
35	112.50
36	183.75
37	378.75
38	105.00
39	10038.60
40	1433.25

Tabla B.9.9. Resultados granulométricos promedio del agregado pétreo por tamizado

		Granulometría				
		Muestra de 1010 gr			Especificaciones ISSA	
		Retenido		Pasante		
Tamiz	mm	gr	%	%	Min	Max
3/8	9.5	0	0	100	100	100
N ^o 4	4.75	183.3	18	81.85	70	90
N ^o 8	2.36	278.3	28	54.30	45	70
N ^o 16	1.18	200.7	20	34.43	28	50
N ^o 30	0.6	116.3	12	22.91	19	34
N ^o 50	0.3	71.6	7	15.82	12	25
N ^o 100	0.15	48.9	5	10.98	7	18
N ^o .200	0.075	32.5	3	7.76	5	15
Bandeja		16.9				
Total		948.5				

Tabla B.9.10. Optimización del diseño de mezclas con respecto a las variables de respuesta

Corrida	Tipo de punto	Factores de Control			Variables de Respuesta							
		X _A	X _B	X _C	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄	Y ₆	Y ₇	Y ₈	
1	1	0.27	0.35	0.03	435	0	65.47	3	0.0022	0.0063	60	
2	1	0.3	0.3	0	1690.65	0.06	46.78	3	0.0007	0.0009	60	
3	1	0.37	0.3	0.03	442.5	0	77.84	2.7	0.0036	0.0036	60	
4	1	0.27	0.3	0	2076.75	0.06	151.96	3	0.0010	0.0010	60	
5	0	0.32	0.32	0.02	727.5	0	60.63	3	0.0029	0.0061	60	
6	1	0.27	0.35	0	303.75	0.06	105.40	3	0.0018	0.0015	60	
7	1	0.37	0.3	0.03	510	0	77.20	2.5	0.0015	0.0026	60	
8	1	0.37	0.35	0.03	131.25	0	68.54	3	0.0026	0.0027	60	
9	-1	0.23	0.325	0.015	131.25	0.005	21.57	3	0.0026	0.0026	60	
10	1	0.37	0.35	0	3235.05	0.06	149.92	3	0.0027	0.0007	60	
11	1	0.27	0.3	0.03	517.5	0	91.23	2.5	0.0024	0.0051	60	
12	1	0.27	0.35	0.03	423.75	0	65.68	2.8	0.0023	0.0051	60	
13	0	0.32	0.325	0.015	161.25	0.005	74.55	3	0.0008	0.0062	60	
14	-1	0.32	0.283	0.015	187.5	0	110.67	3	0.0019	0.0039	60	
15	0	0.32	0.325	0.015	90	0.005	59.15	3	0.0022	0.0006	60	
16	0	0.32	0.32	0.02	296.25	0	105.25	3	0.0025	0.0114	60	
17	-1	0.38	0.325	0.02	243.75	0.005	274.49	3	0.0024	0.0141	60	
18	1	0.3	0.35	0.03	600	0	247.48	2.7	0.0046	0.0102	60	
19	0	0.32	0.325	0.015	165	0.005	98.77	3	0.0020	0.0064	60	
20	1	0.3	0.35	0.03	266.25	0	132.02	3	0.0034	0.0107	60	
21	-1	0.32	0.283	0.015	168.75	0	133.33	3	0.0034	0.0079	60	
22	-1	0.23	0.325	0.015	322.5	0.005	24.68	3	0.0015	0.0045	60	
23	1	0.3	0.3	0	2123.55	0.06	538.00	3	0.0064	0.0750	60	
24	1	0.315	0.325	0.015	142.5	0.005	82.35	3	0.0019	0.0091	60	
25	1	0.37	0.35	0.03	240	0	195.75	3	0.0037	0.0080	60	
26	1	0.37	0.35	0	13326.3	0.06	169.61	3	0.0018	0.0033	0	
27	1	0.27	0.35	0	4106.7	0.06	79.37	3	0.0017	0.0023	60	
28	0	0.325	0.32	0.015	232.5	0.005	99.69	3	0.0024	0.0061	60	
29	-1	0.38	0.325	0.02	191.25	0.005	173.72	3	0.0026	0.0124	60	
30	1	0.315	0.325	0.015	120	0.005	126.14	3	0.0031	0.0095	60	
31	0	0.27	0.3	0.03	318.75	0	75.72	2.8	0.0033	0.0080	60	
32	-1	0.404	0.325	0.015	108.75	0.02	75.86	3	0.0024	0.0026	60	
33	1	0.37	0.3	0	5001.75	0.06	140.00	3	0.0042	0.0036	0	
34	0	0.32	0.325	0.04	337.5	0	79.01	2.3	0.0027	0.0069	60	
35	0	0.325	0.32	0.015	112.5	0.005	101.40	3	0.0021	0.0051	60	
36	1	0.37	0.3	0	183.75	0.06	538.00	3	0.0064	0.0750	0	
37	1	0.32	0.325	0.015	378.75	0.005	97.45	3	0.0021	0.0081	60	
38	-1	0.404	0.325	0.015	105	0.02	266.01	3	0.0034	0.0192	60	
39	1	0.27	0.3	0	10038.6	0.06	104.03	3	0.0029	0.0058	60	
40	-1	0.32	0.325	0.04	1433.25	0	138.93	2	0.0042	0.0111	60	

Para la **Tabla B.9.10** los puntos de diseño:

- *Punto 1*: dentro de los rangos establecidos.
- *Punto -1*: fuera de los rangos establecidos.
- *Punto 0*: centro de los rangos establecidos.

C. Figuras de muestras y equipos utilizados



Figura C.9.1. Muestra de agregado pétreo cuarteado.



Figura C.9.2. Agregado pétreo en condición saturada superficialmente seca



Figura C.9.3. Máquina de Los Ángeles

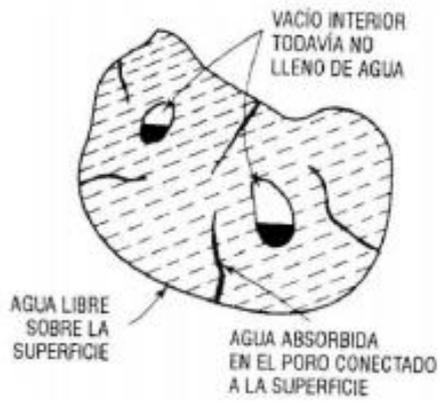


Figura C.9.4. Partícula de agregado húmedo en la que se muestra la distribución de agua interior y exterior

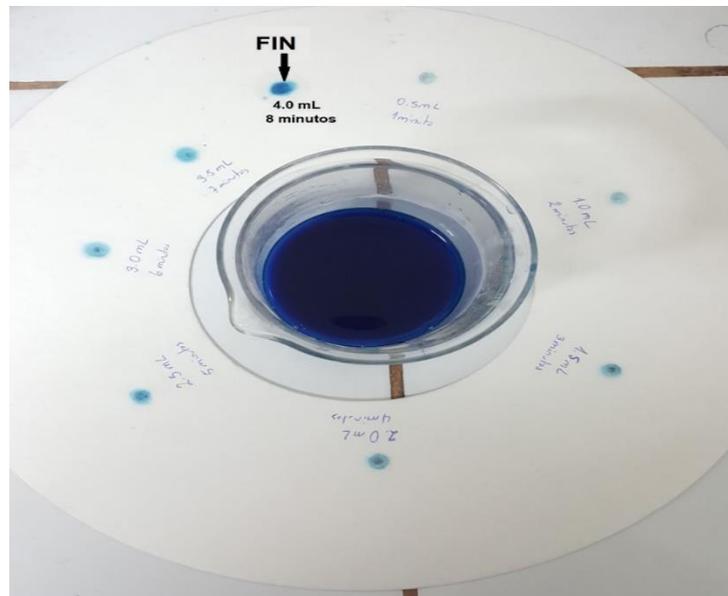


Figura C.9.5. Ensayo de valor de azul de metileno para la evaluación del agregado pétreo



Figura C.9.6. Muestra de cemento asfáltico obtenido del ensayo de residuo por evaporación



Figura C.9.7. Muestras post ensayo de rueda cargada y adhesión de arena



Figura C.9.8. Muestras post ensayo de desgaste por abrasión húmeda



Figura C.9.9. Muestra de Ensayo de Cohesión a Temperatura $< 30\text{ }^\circ\text{C}$



Figura C.9.10. *Muestra post Cohesión 4:30 h a Temperatura >30 °C*