

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

***DETERMINACIÓN DE LAS CONDICIONES EXPERIMENTALES MÁS
FAVORABLES PARA LA OBTENCIÓN DE EMULSIONES ASFÁLTICAS
MODIFICADAS CON POLÍMEROS DESECHADOS EN LA RECONSTRUCCIÓN DE
PAVIMENTOS***

PROYECTO DE GRADUACIÓN SOMETIDO A LA CONSIDERACIÓN DE LA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA COMO REQUISITO FINAL PARA OPTAR
POR EL GRADO DE LICENCIATURA EN INGENIERÍA QUÍMICA

HECTOR ARTURO COWARD UGALDE

CIUDAD UNIVERSITARIA “RODRIGO FACIO”

SAN JOSÉ, COSTA RICA

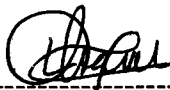
2014

TRIBUNAL EXAMINADOR

DETERMINACIÓN DE LAS CONDICIONES EXPERIMENTALES MÁS FAVORABLES PARA LA OBTENCIÓN DE EMULSIONES ASFÁLTICAS MODIFICADAS CON POLÍMEROS DESECHADOS EN LA RECONSTRUCCIÓN DE PAVIMENTOS

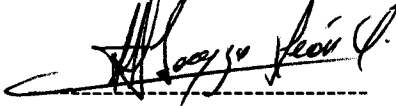
Sustentante: Hector Arturo Coward Ugalde

Aprobado por:



M.Sc. Geraldo Chacón Valle
Profesor Catedrático
Escuela de Ingeniería Química

Presidente del tribunal



M.Sc. Octavio Loayza León
Profesor Instructor
Escuela de Ingeniería Química

Director del proyecto

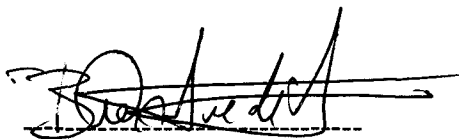


Ing. Eddie Calvo Díaz
Recope

Lector del proyecto

M.Sc. Hernán Camacho Soto
Profesor Catedrático
Escuela de Ingeniería Química

Lector del proyecto



Dr. Benito A. Stradi Granados
Catedrático
Escuela de Ingeniería Química

Miembro invitado

PENSAMIENTO

*“Si lo puedes soñar,
lo puedes hacer”*

Walt Disney

DEDICATORIA

“A mi familia, por apoyarme en todo momento.”

AGRADECIMIENTO

A Dios, a mis padres Hector Coward Lord y Sandra Ugalde Lopez, a mis hermanas Edna, Natasha y Sheyla, a mi novia Alba Valverde Castillo, por brindarme su apoyo y comprensión a lo largo del proyecto.

Al Lic. Jaime Scott Davis, exfuncionario de Recope, por darme la idea del proyecto y compartir su conocimiento.

A la Ing. Paola Orozco Ballesterero y al Msc. Jimmy Fernández Zúñiga, ambos del Dpto. de Investigación de Recope, por darme la oportunidad de realizar el proyecto.

Al Ing. Eddie Calvo Díaz, de la Dirección de Planificación de Recope por su apoyo incondicional en todo momento, por ayudarme en la redacción del documento y darme la guía para realizarlo y por compartir su conocimiento.

A los señores Luis Gonzalo Segura Guzmán, Gerardo Rojas Chacón y Alnolfo Saballo Navarro, operarios de la planta de emulsiones asfálticas del plantel El Alto de Recope y a su jefe, el Ing. Manuel Walsh Cortés, por ayudarme a hacer las emulsiones asfálticas, por compartir su valioso conocimiento y ayudarme en todo momento con mis necesidades de materiales y problemas surgidos.

A todos los trabajadores del Laboratorio de Control de Calidad de Recope en El Alto por dejarme trabajar ahí, enseñarme, acompañarme y ayudarme a realizar las pruebas de control de calidad de las emulsiones asfálticas.

Al Lic. Rodrigo González Rojas, a la secretaria Herlyn Arias Ramírez y al Ing. Allan Ching Wo Cruz, todos del Dpto. de Investigación de Recope, por su compañía, paciencia y ayuda durante todo el desarrollo del proyecto.

Al Ingeniero Octavio Loayza León director del proyecto, por guiar este proyecto, apoyarme y ayudarme a llevarlo a cabo.

RESUMEN

Se determinaron las condiciones experimentales más favorables para la obtención de emulsiones asfálticas modificadas con caucho de llanta de desecho, aprovechando el material pétreo y el asfalto reciclado para la reconstrucción de pavimentos flexibles, en un proceso de rompimiento lento. El proyecto fue realizado en Recope que proveyó todos los equipos y recursos utilizados en él.

Para lograrlo, se elaboraron emulsiones asfálticas sin modificar con un 65 % V/V de asfalto fluidificado (condiciones similares a las emulsiones hechas por Recope), a diferentes condiciones de operación y composición de solución jabonosa. Se usaron los siguientes equipos:

- Una bomba centrífuga a velocidades de 1800 rpm y 2100 rpm.
- Un molino coloidal a velocidades de 2700 rpm, 3000 rpm y 3300 rpm.

Además, se emplearon dos composiciones diferentes para elaborar las soluciones jabonosas. Aproximadamente 0,80 % m/m y 1,12 % m/m de emulsificante en la emulsión asfáltica. Para el 0,80 % m/m, la solución jabonosa fue preparada con 4 ml de ácido clorhídrico, 26 g de emulsificante y 1065 g de agua, para un total de 1,1 l de solución jabonosa. Y para el 1,12 % m/m, la solución jabonosa fue preparada con 5 ml de ácido clorhídrico, 36 g de emulsificante y 1065 g de agua, también para un total de 1,1 l de solución jabonosa.

Se comprobó que las mejores condiciones para elaborar las emulsiones asfálticas en la planta piloto fueron: una velocidad de agitación de 2100 rpm en la bomba centrífuga y una velocidad de 3300 rpm del molino coloidal. La composición por utilizar fue de 1,12 % m/m de emulsificante.

Lo anterior, debido a que la emulsión asfáltica elaborada cumplió con todos los parámetros establecidos de estabilidad, densidad, malla N° 20, evaporación y penetración y mostró un buen comportamiento en la mezcla con el agregado. Con las mismas condiciones establecidas, se realizó la emulsión asfáltica modificada al 1 % m/m de caucho (con respecto a la masa del asfalto fluidizado).

Por otra parte, se prepararon diferentes lechadas asfálticas con diferentes composiciones de pavimento reciclado (0 % m/m y 20 % m/m), de caucho incorporado en base seca (0 % y 20 % m/m) y con emulsión asfáltica (modificada al 1% m/m de caucho o sin modificación). Las lechadas asfálticas poseen un 20 % de emulsión asfáltica y 10 % de agua, con respecto al peso del agregado.

A las lechadas asfálticas, se les realizó el ensayo de desnudamiento por humedad, para analizar los resultados de adherencia del asfalto con el agregado y la estabilidad de la

lechada asfáltica. Estas lechadas asfálticas fueron comparadas también con lechadas asfálticas elaboradas con emulsión de Recope.

La lechada asfáltica elaborada con emulsión asfáltica modificada al 1 % m/m con caucho y 20 % m/m de pavimento reciclado y la producida con emulsión asfáltica modificada al 1 % m/m, obtuvieron los mejores resultados en la prueba de desnudamiento, mostrando una excelente estabilidad al pasar por el ensayo, debido a que no se separaron los agregados, y un buen cubrimiento del asfalto sobre el agregado, con un valor alto en el porcentaje de desnudamiento.

El mayor porcentaje de cubrimiento en la prueba de desnudamiento se obtuvo con una emulsión asfáltica modificada al 1 % m/m de caucho y 0 % m/m de pavimento para un valor de 93 % de cubrimiento de asfalto en promedio. La mayor diferencia de 6,25 % de cubrimiento de asfalto se dio al pasar de una lechada con emulsión asfáltica no modificada y con 0 % m/m de pavimento reciclado a unas lechadas asfálticas con emulsión asfáltica modificadas al 1 % m/m de caucho y sin incluir pavimento reciclado.

Se obtuvo una muy buena emulsión asfáltica modificada al 1% m/m de caucho. En el cual la emulsión modificada obtuvo resultados aceptables según la normativa de control de calidad para emulsiones asfálticas de rompimiento lento, con resultados positivos en los ensayos de viscosidad, densidad, estabilidad, evaporación y penetración, pero no en el caso de la prueba de malla N° 20.

En general las lechadas asfálticas elaboradas con emulsión asfáltica modificada al 1% m/m de caucho, mostraron el mejor cubrimiento en la prueba de desnudamiento. El cual se evidenció con poco desprendimiento de asfalto, alta adherencia del asfalto sobre el agregado y buena estabilidad al pasar la lechada asfáltica por la prueba

Se recomienda realizar emulsiones asfálticas modificadas con caucho, con una granulometría que pase la malla N° 200 para el caucho y utilizar el equipo indicado para realizar el proceso de modificación del asfalto, con el fin de obtener mejores resultados en el desempeño de la emulsión asfáltica.

ÍNDICE GENERAL

TRIBUNAL EXAMINADOR.....	i
PENSAMIENTO.....	ii
DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTO.....	iv
RESUMEN.....	v
ÍNDICE GENERAL.....	vii
ÍNDICE DE CUADROS.....	xi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xviii
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1. EMULSIÓN ASFÁLTICA.....	4
1.1. EMULSIONES.....	4
1.2. EMULSIONES ASFÁLTICAS.....	5
1.3. VENTAJAS DE LAS EMULSIONES ASFÁLTICAS.....	5
1.4. CLASIFICACIÓN DE LAS EMULSIONES ASFÁLTICAS.....	6
1.5. EMULSIONES ASFÁLTICA ANIÓNICAS.....	7
1.5.1. COMPORTAMIENTO DE LA EMULSIÓN ANIÓNICA CON MATERIALES ÁCIDOS.....	9
1.5.2. COMPORTAMIENTO DE LAS EMULSIONES ANIÓNICAS CON LOS MATERIALES ALCALINOS.....	10
1.6. EMULSIONES ASFÁLTICAS CATIÓNICAS.....	10
1.6.1. COMPORTAMIENTO DE LA EMULSIÓN CATIÓNICA CON LOS MATERIALES ÁCIDOS.....	11
1.6.2. COMPORTAMIENTO DE LAS EMULSIONES CATIÓNICAS CON LOS MATERIALES ALCALINOS.....	12
1.7. PRINCIPALES USOS DE LAS EMULSIONES ASFÁLTICAS.....	12
1.8. PROCESO DE ELABORACIÓN DE EMULSIONES ASFÁLTICAS.....	13
1.9. FUNCIONES PRINCIPALES DEL AGENTE EMULSIFICANTE...	14

1.10.	EMPRESAS COMERCIALIZADORAS DE EMULSIFICANTES CATIÓNICO.....	14
1.11.	EMULSIONES ASFÁLTICAS DE ROMPIMIENTO LENTO.....	14
1.12.	ELABORACIÓN DE EMULSIONES ASFÁLTICAS, CON ENFASIS EN LAS DE ROMPIMIENTO LENTO.....	15
1.13.	MEDIOS DE ROMPIMIENTO DE UNA EMULSIÓN.....	18
1.14.	INVENTARIAR LOS RECURSOS Y EQUIPOS NECESARIOS PARA LA ELABORACIÓN DE EMULSIONES ASFÁLTICAS MODIFICADAS DE ROMPIMIENTO LENTO.....	19
1.15.	PRUEBAS DE CONTROL DE CALIDAD PARA LA EMULSIÓN ASFÁLTICA MODIFICADA Y NO MODIFICADA.....	20
CAPÍTULO 2. PAVIMENTO.....		25
2.1.	PAVIMENTO.....	25
2.2.	ESTRUCTURA DE PAVIMENTO.....	26
2.3.	TIPOS DE ACABADOS ASFÁLTICOS UTILIZADOS EN LA ACTUALIDAD.....	27
2.4.	TIPOS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS.....	30
2.5.	ESCOGENCIA DEL AGREGADO PARA LA ELABORACIÓN DE MEZCLA ASFÁLTICAS.....	31
2.6.	FUNCIÓN PRINCIPAL DE UN AGREGADO.....	33
2.7.	MINERALES PRINCIPALES PRESENTES EN LOS AGREGADOS DE COSTA RICA.....	37
2.8.	DEFINICIÓN DE MINERAL.....	38
2.9.	MINERALES COMUNES.....	38
2.10.	ADHERENCIA DEL ASFALTO EN EL MATERIAL PÉTREO.....	40
2.11.	TEORÍAS Y PARÁMETROS QUE AFECTAN LA ADHESIÓN.....	41
2.12.	CARACTERIZAR LAS MATERIAS PRIMAS PARA EL DESARROLLO DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS.....	43
2.13.	DEFINICIÓN DE CARACTERÍSTICAS POR COMPARAR.....	50
2.14.	LECHADA ASFÁLTICA.....	51

2.15.	ENSAYOS PARA CARACTERIZAR UNA LECHADA ASFÁLTICA.....	52
2.16.	PRUEBA DE DESNUDAMIENTO PARA LECHADAS ASFÁLTICAS.....	56
2.17.	LECHADAS ASFÁLTICAS MODIFICADAS CON POLÍMERO....	57
2.18.	PREPARACIÓN DE CONCRETOS ASFÁLTICOS QUE CONTIENEN PAVIMENTO RECICLADO Y EMULSIONES ASFÁLTICAS MODIFICADAS CON POLÍMEROS.....	58
2.18.1	TIPOS DE RECICLADO.....	58
2.18.2	PAVIMENTOS INDICADOS PARA RECICLADO.....	59
2.18.3	RECICLADO FRÍO EN EL SITIO.....	61
2.18.4	TIPOS DE RECICLADO.....	61
2.18.5	VENTAJAS Y LIMITACIONES DEL RECICLADO EN FRÍO.....	62
2.19.	PAVIMENTO CON EMULSIÓN ASFÁLTICA MODIFICADA CON POLÍMERO Y PAVIMENTO RECICLADO.....	63
2.20.	PROCESOS PARA OBTENER CAUCHO MOLIDO.....	63
2.21.	FALLAS MÁS COMUNES DETECTADAS EN LOS PAVIMENTOS NACIONALES.....	64
CAPITULO 3. MATERIALES, EQUIPO Y METODOLOGÍA EXPERIMENTAL..		70
3.1.	EQUIPO EXPERIMENTAL.....	79
3.2.	MATERIALES.....	79
3.3.	DIAGRAMA DEL EQUIPO.....	80
CAPÍTULO 4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....		81
CAPITULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		125
NOMENCLATURA.....		129
BIBLIOGRAFIA.....		130
APÉNDICE.....		132
APÉNDICE A. DATOS EXPERIMENTALES.....		132
APÉNDICE B. DATOS INTERMEDIOS.....		147
APENDICE C. MUESTRA DE CÁLCULO.....		149

APÉNDICE D. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....	154
D.1 MODIFICACIÓN DE ASFALTO CON CAUCHO MOLIDO.....	154
D.2 ELABORACIÓN DE EMULSIONES ASFÁLTICAS EN LA PLANTA PILOTO (MOLINO COLIDAL PRM-100).....	155
D.3 PRUEBA DE ESTABILIDAD DE ALMACENAMIENTO, ASTM D- 6930.....	156
D.4 ENSAYO DE DENSIDAD DE UNA EMULSIÓN ASFÁLTICA A 25 °C, ASTM D-6937.....	157
D.5 ENSAYO DE VISCOSIDAD DE SAYBOLT FUROL, ASTM 7496.....	158
D.6 ENSAYO DE DESTILACIÓN, ASTM D-6997.....	158
D.7 ENSAYO DE PENETRACIÓN DEL RESIDUO OBTENIDO POR EVAPORACIÓN, ASTM D-5.....	160
D.8 ENSAYO DE PORCENTAJE RETENIDO EN TAMIZ N°20, ASTM D-6933.....	161
D.9 PRUEBA DE DESNUDAMIENTO POR HUMEDAD ISSA 114.....	161
ANEXOS.....	163

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1.1.	Simbología utilizada en la clasificación de las emulsiones asfálticas.	6
Cuadro 1.2.	Ejemplos de emulsificantes catiónicos comerciales.....	14
Cuadro 1.3.	Distribución del tamaño de partícula en una emulsión asfáltica....	18
Cuadro 2.1.	Clasificación de una roca según su acidez.....	40
Cuadro 2.2.	Propiedades físicas y químicas del asfalto AC-30 y sus especificaciones.....	47
Cuadro 2.3.	Métodos de ensayos para caracterizar y evaluar la calidad de las lechadas asfálticas.....	53
Cuadro 3.1.	Equipo utilizado para llevar a cabo el proyecto de emulsión asfáltica modificada con polímero desechable.....	79
Cuadro 3.2.	Reactivos utilizados para realizar las emulsiones asfálticas.....	80
Cuadro 4.1.	Granulometrías establecidas para una lechada asfáltica por CR-2010	82
Cuadro 4.2.	Resultados de las pruebas de control de calidad de RECOPE de la emulsión asfáltica de rompimiento lento, con una velocidad de agitación de 2700 rpm para el molino coloidal y 1800 rpm para la bomba centrífuga. pH de 1,9.....	89
Cuadro 4.3.	Resultados de análisis para la CSS-1 realizada con velocidades de 3000 rpm para el molino coloidal y 1800 rpm para la bomba centrífuga. pH de la solución jabonosa: 1,9.....	90
Cuadro 4.4.	Resultados de análisis para la CSS-1 realizada con velocidades de 3000 rpm para el molino coloidal y 2100 rpm para la bomba centrífuga. pH de la solución jabonosa: 1,9.....	92
Cuadro 4.5.	Resultados de análisis para la CSS-1 utilizada en las lechadas asfálticas, realizada con velocidades de 3300 rpm para el molino coloidal y 2100 rpm para la bomba centrífuga. pH de la solución jabonosa: 2,0.....	94
Cuadro 4.6.	Resultados de análisis para la CSS-1 modificada con caucho al 1 % m/m utilizada en las lechadas asfálticas, realizada con velocidades	

	de 3300 rpm para el molino coloidal y 2100 rpm para la bomba centrífuga. pH de la solución jabonosa: 2,0.....	99
Cuadro 4.7.	Caracterización del asfalto AC-30 utilizado en el proyecto, ensayos elaborados por parte del control de calidad de RECOPE.....	101
Cuadro 4.8.	Diseño factorial aplicado a las lechadas asfálticas fabricadas con emulsión de la planta piloto.....	102
Cuadro 4.9.	Resultados de la prueba de desnudamiento de la lechada asfáltica elaborada con emulsión asfáltica catiónica de rompimiento lento elaborada por Recope.....	105
Cuadro 4.10.	Resultados de la prueba de desnudamiento de la lechada asfáltica elaborada con emulsión asfáltica de planta piloto.....	110
Cuadro 4.11.	Los factores del diseño para el diseño factorial del proyecto.....	119
Cuadro 4.12.	Diseño factorial con las unidades originales de las variables.....	119
Cuadro 4.13.	Diseño factorial con las unidades codificadas de las variables.....	120
Cuadro 4.14.	Algoritmo de Yates para el diseño factorial 2^3	120
Cuadro 4.15.	Estimación de la varianza del diseño factorial 2^3	121
Cuadro 4.16.	Valores necesarios para la estimación de la desviación típica del diseño factorial 2^3	121
Cuadro A.1.	Densidades aproximadas de las sustancias utilizadas en el proyecto..	132
Cuadro A.2.	Condiciones para la elaboración de 1,1 l de solución jabonosa utilizada para emulsión asfáltica, realizada con velocidades de 2700 rpm para el molino coloidal y 1800 rpm para la bomba centrífuga. pH de la solución jabonosa: 1,9.....	132
Cuadro A.3.	Composición de la CSS-1 realizada con velocidades de 2700 rpm para el molino coloidal y 1800 rpm para la bomba centrífuga. pH de la solución jabonosa: 1,9.....	132
Cuadro A.4.	Temperatura de los componentes para la elaboración de la CSS-1 realizada con velocidades de 2700 rpm para el molino coloidal y 1800 rpm para la bomba centrífuga. pH de la solución jabonosa: 1,9.	132
Cuadro A.5.	Condiciones para la elaboración de 1,1 l de solución jabonosa	

	utilizada para emulsión asfáltica, realizada con velocidades de 3000 rpm para el molino coloidal y 1800 rpm para la bomba centrífuga. pH de la solución jabonosa: 1,9.....	133
Cuadro A.6.	Composición de la CSS-1 realizada con velocidades de 3000 rpm para el molino coloidal y 1800 rpm para la bomba centrífuga. pH de la solución jabonosa: 1,9.....	133
Cuadro A.7.	Temperatura de los componentes para la elaboración de la CSS-1 realizada con velocidades de 3000 rpm para el molino coloidal y 1800 rpm para la bomba centrífuga. pH de la solución jabonosa: 1,9.	133
Cuadro A.8.	Toma de datos para las pruebas de control de calidad para la CSS-1 realizada con velocidades de 3000 rpm para el molino coloidal y 1800 rpm para la bomba centrífuga. pH de la solución jabonosa: 1,9.	133
Cuadro A.9	Condiciones para la elaboración de 1,1 l de solución jabonosa utilizada para emulsión asfáltica, realizada con velocidades de 3000 rpm para el molino coloidal y 2100 rpm para la bomba centrífuga. pH de la solución jabonosa: 1,9.....	134
Cuadro A.10.	Composición de la CSS-1 realizada con velocidades de 3000 rpm para el molino coloidal y 2100 rpm para la bomba centrífuga. pH de la solución jabonosa: 1,9.....	135
Cuadro A.11.	Temperatura de los componentes para la elaboración de la CSS-1 realizada con velocidades de 3000 rpm para el molino coloidal y 2100 rpm para la bomba centrífuga. pH de la solución jabonosa: 1,9.	135
Cuadro A.12.	Toma de datos para las pruebas de control de calidad para la CSS-1 realizada con velocidades de 3000 rpm para el molino coloidal y 2100 rpm para la bomba centrífuga. pH de la solución jabonosa: 1,9.	135
Cuadro A.13	Condiciones para la elaboración de 1,1 l de solución jabonosa utilizada para emulsión asfáltica utilizada en las lechadas asfálticas, realizada con velocidades de 3300 rpm para el molino coloidal y 2100 rpm para la bomba centrífuga. pH de la solución jabonosa: 2,0.	136
Cuadro A.14.	Composición de la CSS-1 utilizada en las lechadas asfálticas,	

	realizada con velocidades de 3300 rpm para el molino coloidal y 2100 rpm para la bomba centrífuga. pH de la solución jabonosa: 2,0.	136
Cuadro A.15.	Temperatura de los componentes para la elaboración de la CSS-1 utilizada en las lechadas asfálticas, realizada con velocidades de 3300 rpm para el molino coloidal y 2100 rpm para la bomba centrífuga. pH de la solución jabonosa: 2,0.....	137
Cuadro A.16.	Toma de datos para las pruebas de control de calidad para la CSS-1 utilizada en las lechadas asfálticas, realizada con velocidades de 3300 rpm para el molino coloidal y 2100 rpm para la bomba centrífuga. pH de la solución jabonosa: 2,0.....	137
Cuadro A.17	Condiciones para la elaboración de 1,1 l de solución jabonosa utilizada para emulsión asfáltica modificada con 1% m/m de caucho, utilizada en las lechadas asfálticas, realizada con velocidades de 3300 rpm para el molino coloidal y 2100 rpm para la bomba centrífuga. pH de la solución jabonosa: 2,0.....	138
Cuadro A.18.	Composición de la CSS-1 modificada con 1% m/m de caucho, utilizada en las lechadas asfálticas, realizada con velocidades de 3300 rpm para el molino coloidal y 2100 rpm para la bomba centrífuga. pH de la solución jabonosa: 2,0.....	138
Cuadro A.19.	Temperatura de los componentes para la elaboración de la CSS-1 modificada con 1 % m/m de caucho, utilizada en las lechadas asfálticas, realizada con velocidades de 3300 rpm para el molino coloidal y 2100 rpm para la bomba centrífuga. pH de la solución jabonosa: 2,0.....	138
Cuadro A.20.	Toma de datos para las pruebas de control de calidad para la CSS-1 modificada con caucho al 1 % m/m utilizada en las lechadas asfálticas, realizada con velocidades de 3300 rpm para el molino coloidal y 2100 rpm para la bomba centrífuga. pH de la solución jabonosa: 2,0.....	139
Cuadro A.21.	Mezcla de agregado con 20 % m/m de RAP y 0 % m/m de caucho	

	incorporado en base seca, utilizado para elaborar la lechada asfáltica, con 2,0780 g de agua y 4,0884 g de emulsión de Recope...	140
Cuadro A.22.	Mezcla de agregado con 20 % m/m de RAP y 20 % m/m de caucho incorporado en base seca, utilizado para elaborar la lechada asfáltica, con 2,0251 g de agua y 4,1697 g de emulsión de Recope...	140
Cuadro A.23.	Mezcla de agregado con 0 % m/m de RAP y 20 % m/m de caucho incorporado en base seca, utilizado para elaborar la lechada asfáltica, con 2,1806 g de agua y 4,2283 g de emulsión de Recope...	141
Cuadro A.24.	Mezcla de agregado con 0 % m/m de RAP y 0 % m/m de caucho incorporado en base seca, utilizado para elaborar la lechada asfáltica, con 2,2811 g de agua y 4,2246 g de emulsión de Recope...	141
Cuadro A.25.	Resultados de las pruebas de desnudamiento para las lechadas asfálticas con emulsión de Recope.....	142
Cuadro A.26.	Mezcla de agregado con 0 % m/m de RAP y 20 % m/m de caucho incorporado en base seca, utilizado para elaborar la lechada asfáltica, con 2,0816 g de agua y 4,1959 g de emulsión CSS-1 elaborada en la planta piloto.....	142
Cuadro A.27.	Mezcla de agregado con 0 % m/m de RAP y 20 % m/m de caucho incorporado en base seca, utilizado para elaborar la lechada asfáltica, con 2,4678 g de agua y 5,0182 g de emulsión CSS-1 modificada al 1 % m/m de caucho.....	142
Cuadro A.28.	Mezcla de agregado con 20 % m/m de RAP y 20 % m/m de caucho incorporado en base seca, utilizado para elaborar la lechada asfáltica, con 2,0784 g de agua y 4,1527 g de emulsión CSS-1 elaborada en la planta piloto.....	143
Cuadro A.29.	Mezcla de agregado con 20 % m/m de RAP y 20 m/m % de caucho incorporado en base seca, utilizado para elaborar la lechada asfáltica, con 2,1930 g de agua y 4,3635 g de emulsión CSS-1 modificada al 1 % m/m de caucho.....	144
Cuadro A.30.	Mezcla de agregado con 20 % m/m de RAP y 0 % m/m de caucho	

	incorporado en base seca, utilizado para elaborar la lechada asfáltica, con 2,1261 g de agua y 4,1793 g de emulsión CSS-1 elaborada en la planta piloto.....	144
Cuadro A.31.	Mezcla de agregado con 20 % m/m de RAP y 0 % m/m de caucho incorporado en base seca, utilizado para elaborar la lechada asfáltica, con 2,1149 g de agua y 4,2941 g de emulsión CSS-1 modificada al 1 % m/m de caucho.....	145
Cuadro A.32.	Mezcla de agregado con 0 % m/m de RAP y 0 % m/m de caucho incorporado en base seca, utilizado para elaborar la lechada asfáltica, con 2,1023 g de agua y 4,1679 g de emulsión CSS-1, elaborada en la planta piloto.....	145
Cuadro A.33.	Mezcla de agregado con 0 % m/m de RAP y 0 % m/m de caucho incorporado en base seca, utilizado para elaborar la lechada asfáltica, con 2,1394 g de agua y 4,2021 g de emulsión CSS-1 modificada al 1 % m/m de caucho.....	146
Cuadro A.34.	Resultados de las pruebas de desnudamiento para las lechadas asfálticas con emulsión modificada al 1 % m/m de caucho o sin modificación, elaboradas con la planta piloto.....	146
Cuadro B.1.	Resultados de análisis para la CSS-1 realizada con velocidades de 3000 rpm para el molino coloidal y 1800 rpm para la bomba centrífuga. pH de la solución jabonosa: 1,9.....	147
Cuadro B.2.	Resultados de análisis para la CSS-1 realizada con velocidades de 3000 rpm para el molino coloidal y 2100 rpm para la bomba centrífuga. pH de la solución jabonosa: 1,9.....	147
Cuadro B.3.	Resultados de análisis para la CSS-1 utilizada en las lechadas asfálticas, realizada con velocidades de 3300 rpm para el molino coloidal y 2100 rpm para la bomba centrífuga. pH de la solución jabonosa: 2,0.....	147
Cuadro B.4.	Resultados de análisis para la CSS-1 modificada con caucho al 1 % m/m utilizada en las lechadas asfálticas, realizada con velocidades	

de 3300 rpm para el molino coloidal y 2100 rpm para la bomba
centrífuga. pH de la solución jabonosa: 2,0..... 148

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1.	Tipos de emulsiones según su forma de dispersión.....	4
Figura 1.2.	Representación de una micela en una emulsión asfáltica aniónica....	8
Figura 1.3.	Representación de una micela en una emulsión asfáltica catiónica...	10
Figura 1.4.	Representación de una emulsión asfáltica.....	13
Figura 1.5.	Molino coloidal.....	13
Figura 1.6.	Rompimiento de una emulsión asfáltica.....	16
Figura 1.7.	Opciones para poder modificar la emulsión asfáltica con polímero....	17
Figura 1.8.	Planta piloto para la elaboración de emulsiones asfálticas y modificación de asfaltos PRM-100.....	20
Figura 1.9.	Probetas utilizadas para la prueba de estabilidad.....	21
Figura 1.10.	Picnómetro utilizado en la prueba de densidad.....	22
Figura 1.11.	Prueba de viscosidad de una emulsión asfáltica.....	22
Figura 1.12.	Prueba de evaporación de emulsión asfáltica.....	23
Figura 1.13.	Ensayo de penetración.....	24
Figura 1.14.	Ensayo de malla N° 20.....	24
Figura 2.1.	Representación de las cargas en pavimentos rígidos y flexibles.....	25
Figura 2.2.	Estructura de un pavimento flexible.....	26
Figura 2.3.	Material pétreo.....	32
Figura 2.4.	Máquina de los Ángeles.....	45
Figura 2.5.	Granulometría densa para pavimentos con emulsión asfáltica.....	46
Figura 2.6.	Granulometrías establecidas para una lechada asfáltica por CR-2010..	52
Figura 2.7.	Ensayo de consistencia en lechadas asfálticas.....	54
Figura 2.8.	Equipo de cohesión húmeda.....	54
Figura 2.9.	Equipo utilizado para el ensayo de pérdida por abrasión de lechadas asfálticas.....	55
Figura 2.10.	Equipo utilizado para el ensayo de exudación de lechadas asfálticas...	56
Figura 2.11.	Ensayo de desnudamiento por humedad.....	57

Figura 2.12.	Pavimento asfáltico deteriorado, indicado para reciclado.....	60
Figura 2.13.	Molienda de caucho en forma preliminar y en procesos de criogénesis.....	64
Figura 2.14.	Baches.....	65
Figura 2.15.	Descascaramiento.....	65
Figura 2.16.	Parches mal hechos.....	66
Figura 2.17.	Grietas longitudinales y transversales.....	67
Figura 2.18.	Grietas por contracción.....	67
Figura 2.19.	Grietas cuarteadas.....	68
Figura 2.20.	Ahuellamiento o roderas.....	68
Figura 2.21.	Erosión al costado de la calle.....	69
Figura 3.1.	Diagrama de planta piloto de emulsiones asfálticas.....	80
Figura 4.1.	Arena industrial utilizada como material pétreo para elaborar las lechadas asfálticas.....	83
Figura 4.2.	Tamizador utilizado en el proyecto.....	83
Figura 4.3.	Material pétreo separado por las mallas establecidas por la granulometría del CR-2010.....	84
Figura 4.4.	Pavimento reciclado utilizado en el proyecto.....	84
Figura 4.5.	Trituradora de mandíbula utilizada en el proyecto.....	85
Figura 4.6.	Molino utilizado para el proceso de criogénesis.....	86
Figura 4.7.	Especificación requerida para la emulsión asfáltica por el emulsificante Redicote E-4868.....	86
Figura 4.8.	Planta piloto de emulsión asfáltica.....	87
Figura 4.9.	Envase plástico utilizado para almacenar la emulsión asfáltica.....	88
Figura 4.10.	Mezclado de la tercera emulsión asfáltica con el agregado nuevo de granulometría tipo 2 para elaborar una lechada asfáltica.....	93
Figura 4.11.	Recipiente metálico utilizado para modificar el asfalto con caucho.....	96
Figura 4.12.	Modificación del asfalto.....	96
Figura 4.13.	Residuo de emulsión asfáltica modificada al 3 % m/m de caucho, que quedó depositado en la malla N° 20.....	97

Figura 4.14.	Ensayo de masa retenida en la malla N° 20 de la emulsión asfáltica modificada al 1% m/m de caucho.....	100
Figura 4.15.	Emulsión asfáltica modifica al 1 % m/m de caucho.....	101
Figura 4.16.	Mezclado de Lechadas asfálticas elaboradas con 0 % m/m de RAP y 20 % m/m de caucho vía seca. (a) Lechada asfáltica con emulsión asfáltica catiónica lenta de Recope (b) Lechada asfáltica con CSS-1 (c) Lechada asfáltica con CSS-1M al 1 % m/m de caucho.....	102
Figura 4.17.	Mezclado de Lechadas asfálticas elaboradas con 20 % m/m de RAP y 20 % m/m de caucho vía seca. (a) Lechada asfáltica con emulsión lenta de Recope (b) Lechada asfáltica con CSS-1 (c) Lechada asfáltica con CSS-1M al 1 % m/m de caucho.....	103
Figura 4.18.	Mezclado de Lechadas asfálticas elaboradas con 20 % m/m de RAP y 0 % m/m de caucho vía seca. (a) Lechada asfáltica con emulsión lenta de Recope (b) Lechada asfáltica con CSS-1 (c) Lechada asfáltica con CSS-1M al 1% m/m de caucho.....	104
Figura 4.19.	Mezclado de Lechadas asfálticas elaboradas con 0 % m/m de RAP y 0 % m/m de caucho vía seca. (a) Lechada asfáltica con emulsión lenta de Recope (b) Lechada asfáltica con CSS-1 (c) Lechada asfáltica con CSS-1M al 1% m/m de caucho.....	104
Figura 4.20.	Ensayo de desnudamiento por humedad para las lechadas con 0 % m/m de RAP y 0 % m/m de caucho base seca con emulsión asfáltica de Recope.....	106
Figura 4.21.	Ensayo de desnudamiento por humedad para las lechadas con 0 % m/m de RAP y 20 % m/m de caucho base seca con emulsión asfáltica de Recope.....	107
Figura 4.22.	Ensayo de desnudamiento por humedad para las lechadas con 20 % m/m de RAP y 0 % m/m de caucho base seca con emulsión asfáltica de Recope.....	108
Figura 4.23.	Ensayo de desnudamiento por humedad para las lechadas 20 % m/m de RAP y 20 % m/m de caucho base seca con emulsión asfáltica de	109

	Recope.....	
Figura 4.24.	Ensayo de desnudamiento por humedad para las lechadas con 0 % m/m de RAP, 0 % m/m de caucho y CSS-1.....	111
Figura 4.25.	Ensayo de desnudamiento por humedad para las lechadas con 0 % m/m de RAP, 0 % m/m de caucho y CSS-1M al 1 % m/m de caucho..	112
Figura 4.26.	Ensayo de desnudamiento por humedad para las lechadas 20 % m/m de RAP, 0 % m/m de caucho y CSS-1.....	113
Figura 4.27.	Ensayo de desnudamiento por humedad para las lechadas con 20 % m/m de RAP, 0 % m/m de caucho y CSS-1M al 1 % m/m de caucho..	114
Figura 4.28.	Ensayo de desnudamiento por humedad para las lechadas con 0 % m/m de RAP, 20 % m/m de caucho y CSS-1.....	115
Figura 4.29.	Ensayo de desnudamiento por humedad para las lechadas 0 % m/m de RAP, 20 % m/m de caucho y CSS-1M al 1 % m/m de caucho.....	116
Figura 4.30.	Ensayo de desnudamiento por humedad para las lechadas 20 % m/m de RAP, 20 % m/m de caucho y CSS-1.....	117
Figura 4.31.	Ensayo de desnudamiento por humedad para las lechadas 20 % m/m de RAP, 20 % m/m de caucho y CSS-1M al 1 % m/m de caucho.....	118
Figura 4.32.	Gráfica de efecto e interacciones del diseño factorial 2^3	122
Figura 4.33.	Interacción entre el % m/m de caucho incorporado en base húmeda y el % m/m de pavimento reciclado.....	123
Figura 4.34.	Lechadas asfálticas elaboradas con 20 % m/m de RAP y 0 % m/m de caucho. (a) Lechada asfáltica con emulsión lenta de Recope (b) Lechada asfáltica con CSS-1 (c) Lechada asfáltica con CSS-1M al 1% m/m de caucho.....	124
Figura 4.35.	Lechadas asfálticas elaboradas con 0 % m/m de RAP y 0 % m/m de caucho base seca. (a) Lechada asfáltica con emulsión lenta de Recope (b) Lechada asfáltica con CSS-1 (c) Lechada asfáltica con CSS-1M al 1% m/m de caucho.....	124

INTRODUCCIÓN

La construcción de caminos data desde mucho tiempo atrás. El primer camino fue realizado por los egipcios en el año 2500 A.C. Se usaba para el acarreo de materiales.

En la época moderna, para las primeras impermeabilizaciones de superficie, se empleó brea, sustancia viscosa de color rojo oscuro que se obtiene haciendo destilar al fuego la madera de varios árboles de la clase de las Coníferas. Luego, conforme se fue desarrollando la industria petrolera, se pasó al uso del asfalto que se aplicaba sobre la capa superficial.

Posteriormente, se llegó a usar como una mezcla con piedra sobre la superficie previamente rociada con el asfalto. A partir de ese momento, se empezaron a hacer modificaciones con la metodología empleada en las capas superficiales.

Está plenamente probado que los asfaltos convencionales poseen propiedades satisfactorias, tanto mecánicas como de adhesión, para la elaboración de capas superficiales, en distintas condiciones del clima (viento, luz, oxígeno, ozono, lluvia) y de tránsito. Sin embargo, en la actualidad, los grandes volúmenes de tráfico que se generan, para los criterios de diseño vehicular requeridos, aunado al exceso de carga, las altas temperaturas que se alcanzan, así como el incremento en la presión de inflado de las llantas y las difíciles condiciones climáticas que se presentan en el país, hacen que utilizar el asfalto convencional en la construcción de carreteras no satisfaga las expectativas, tal como cumplir un determinado periodo de servicio, es decir, menor resistencia al envejecimiento, la poca durabilidad de un camino que se refleja en deformaciones y fisuras dentro de una carpeta asfáltica.

Estos problemas son causados, además, por la mala selección de materiales en los diseños, mal proceso de construcción, mantenimiento y por la baja calidad del ligante. La necesidad de optimizar las inversiones provoca en algunos casos que las propiedades de los asfaltos convencionales resulten insuficientes.

Por ejemplo, con asfaltos convencionales aún con los grados más duros (según en clasificación de ensayo de penetración), no es posible eliminar el problema de las deformaciones tipo roderas, producidas por el tránsito vehicular, especialmente cuando se afrontan condiciones de altas temperaturas.

Una alternativa para mejorar las propiedades reológicas y físicas que posee el asfalto es mediante su modificación con un polímero. Al variar sus características, se puede contar con un ligante asfáltico más viscoso a temperaturas elevadas, lo que permite reducir las deformaciones permanentes tipo roderas o ahuellamiento y aumentar la rigidez de las capas o superficies de rodamiento. Por otro lado, se disminuyen las fisuras o el agrietamiento, por efecto de bajas temperaturas y por fatiga, aumentando también su elasticidad. Y por último, se cuenta con un ligante con mejores propiedades adhesivas.

Existen tres tipos de métodos, para la elaboración del concreto asfáltico:

1. Mezcla asfáltica en caliente.
2. Mezcla asfáltica de baja temperatura.
3. Emulsiones asfálticas o pavimentación en frío.

¿Cómo se debe elegir entre ellas? En el caso de la mezcla asfáltica en caliente, esta metodología utiliza temperaturas elevadas de 150° a 175°C aproximadamente, lo cual implica que se debe aportar la suficiente cantidad de energía. Puesto que el combustible debe aportar esta energía, se requiere mucha cantidad de este lo que genera gases de combustión que incrementan el calentamiento global. Además, debido a las temperaturas que se requieren en el proceso, el asfalto se descompone y produce hidrocarburos poliaromáticos, los cuales son contaminantes.

En el caso de la mezcla asfáltica de baja temperatura, esta requiere una menor temperatura en el mezclado, aproximadamente entre 95° a 120°C, por lo que se afecta menos el ambiente. Pero como la oxidación que se da en el proceso de mezclado es menor, se puede

obtener un producto con un menor grado de dureza comparado a la mezcla asfáltica en caliente.

Por estos motivos, contestando la pregunta anterior, mediante las emulsiones asfálticas se pretende: resolver tanto el problema ambiental, como económico, ya que se trabaja a bajas temperaturas lo que permite una fácil aplicación a temperatura ambiente, y además, se puede transportar a largas distancias, sin necesidad de un equipo especial.

En vista de las circunstancias mencionadas, es de especial importancia un proyecto sobre emulsiones asfálticas modificadas con polímeros de desecho. Con esto se logra solventar un poco la problemática que se presenta con estos desechos, mediante este tipo de reciclaje y consecuentemente reducir los costos, para la elaboración de dichas emulsiones. Otro factor importante para el proyecto, es evaluar cómo se comporta la emulsión asfáltica modificada con polímero, al reciclar el material pétreo y el asfalto.

Objetivo General

Determinar las condiciones experimentales más favorables para la obtención de emulsiones asfálticas modificadas con hule de desecho de llanta, en presencia de material pétreo y el asfalto reciclado, para la reconstrucción de pavimentos flexibles, en un proceso de rompimiento lento.

CAPÍTULO 1. EMULSIÓN ASFÁLTICA

1.1 EMULSIONES

Una emulsión es la suspensión estable de un fluido en otro, en el que no es miscible. La emulsión está compuesta por dos fases, una fase dispersa (fase discontinua), y otra fase dispersante (fase continua).

Se presentan dos tipos de emulsiones: Las de tipo directo, también llamadas aceite en agua, en las cuales la fase más viscosa (por ejemplo el aceite) está dispersa en la fase menos viscosa (el agua); y las del tipo inverso, conocidas como agua en aceite. En estas la fase viscosa es la fase continua y el fluido menos viscoso es la fase dispersa. (Pintor, 1985). En la Figura 1.1, se presenta un esquema de las emulsiones directas e inversas.

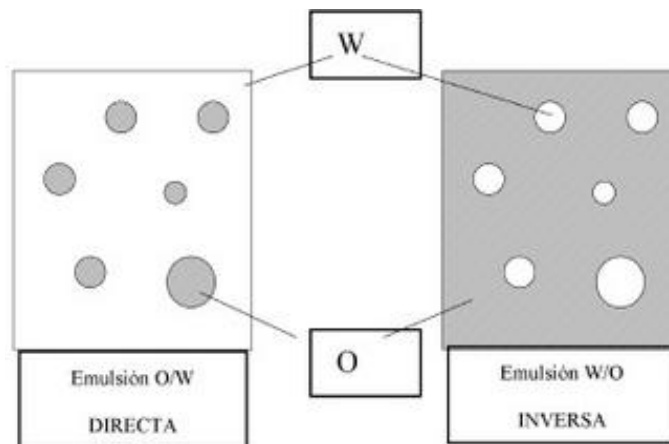


Figura 1.1. Tipos de emulsiones según su forma de dispersión.

Nota: En donde el significado de W es agua y O es aceite.

1.2 EMULSIONES ASFÁLTICAS

Una emulsión asfáltica es un tipo de emulsión directa, en la que la fase dispersa corresponde al asfalto (fluido viscoso) y la fase dispersante al agua.

Para poder mezclar el agua y el asfalto, es necesario agregar un agente emulsor o emulsificante, el cual posee la función de formar una película alrededor de los glóbulos o gotas de asfalto, darle a estos glóbulos una carga negativa o positiva, según sea las características químicas del emulsificante, y así poder generar repulsión entre las micelas de asfalto, para poder darle a la emulsión estabilidad (Zuñiga García, 2012).

Por razones económicas, y también ambientales, estas emulsiones asfálticas fueron introducidas al mercado, ya que tienen la función de rebajar la viscosidad. Este es un procedimiento en el que se le adiciona un combustible al asfalto, tal como nafta, queroseno o búnker, para poder disminuir la viscosidad, pero, en el caso de las emulsiones asfálticas, se agrega agua que es un disolvente no contaminante.

1.3 VENTAJAS DE LAS EMULSIONES ASFÁLTICAS.

Según (Acosta, 1984), las principales ventajas que poseen las emulsiones asfálticas son:

- Económicas, ya que no requieren aplicarse en caliente, y el agregado no necesita estar completamente seco en el caso de emulsiones catiónicas.
- Versátiles y fáciles para su aplicación
- Obtienen buenos resultados al aplicarse en las carreteras.
- Tiene un buen comportamiento al mezclarse con el agregado, hasta con los agregados difíciles de recubrir en el cemento asfáltico, debido a la baja viscosidad que posee la emulsión.

1.4 CLASIFICACIÓN DE LAS EMULSIONES ASFÁLTICAS.

Las emulsiones asfálticas se pueden clasificar con respecto a dos criterios importantes: Según la carga eléctrica que le atribuya el agente emulsificante (catiónico, aniónico o no iónica) y de acuerdo con la velocidad de rompimiento (rápido, medio ó lento) de la emulsión. También existen otros criterios con respecto al grado de viscosidad (alta o baja) de la emulsión asfáltica.

La nomenclatura sugerida por el Instituto del Asfalto, que se usa para identificar un tipo de emulsión asfáltica, incluye su naturaleza eléctrica, la velocidad de rompimiento o rotura y el grado de viscosidad (relacionado con el contenido de asfalto base) (Rodriguez Galagarza, 2001). En algunos casos, se indica si es una emulsión asfáltica de alta flotación ó si es una emulsión asfáltica que proviene de un asfalto de alta dureza.

En el cuadro 1.1, se identifica la simbología utilizada, para la nomenclatura y clasificación de las emulsiones asfálticas.

Cuadro 1.1. Simbología utilizada en la clasificación de las emulsiones asfálticas. Modificado de (Huffman, s.f.).

Símbolo	Significado
RS	Emulsión asfáltica aniónica de rompimiento rápido
MS	Emulsión asfáltica aniónica de rompimiento medio
SS	Emulsión asfáltica aniónica de rompimiento lento
CRS	Emulsión asfáltica catiónica de rompimiento rápido
CMS	Emulsión asfáltica catiónica de rompimiento medio
CSS	Emulsión asfáltica catiónica de rompimiento lento
Prefijos	
HF	Alta flotación
Sufijos	
1	Se refiere a una emulsión asfáltica de baja viscosidad, de 20 SSF a 100 SSF a 50 °C
2	Se refiere a una emulsión asfáltica de alta viscosidad, de 100 SSF a 400 SSF a 50 °C
M	Posee un porcentaje de polímero
H	Proveniente de un asfalto de alta dureza

Con respecto a la emulsión no iónica, esta no es de mucha utilidad debido a la falta de la carga en la emulsión, adherencia o afinidad con el agregado y su carencia de usos.

Al aplicar una corriente eléctrica a una emulsión que contiene partículas de asfalto con carga negativa, ellas migrarán hacia el ánodo (que tiene carga positiva), por esta razón la emulsión es aniónica. Recíprocamente, las partículas de asfalto con carga positiva se desplazarán hacia el cátodo (que tiene carga negativa), y la emulsión será catiónica. En las emulsiones no iónicas, las partículas de asfalto son neutras y por ende no migran a ningún polo (Bolaños, 2009).

Las emulsiones asfálticas catiónicas representan el 95 % en producción en general, en el mercado, debido a sus muchos usos y aplicaciones. Las emulsiones asfálticas aniónicas, estas representan el 5 % en producción (Bolaños, 2009).

En el país, la Refinadora Costarricense del Petróleo, S.A. (Recope) tiene la obligación de comercializar y elaborar las emulsiones asfálticas. Debido a las características que posee el material pétreo utilizado en Costa Rica, solo se producen las emulsiones asfálticas catiónicas y no las aniónicas. Actualmente, en Recope se producen emulsiones catiónicas de rompimiento rápido de baja viscosidad CRS-1 y con pedido se fabrican emulsiones catiónicas de rompimiento lento de baja viscosidad (CSS-1). Se pretende producir, a largo plazo, emulsiones catiónicas de rompimiento lento de baja viscosidad modificadas con polímeros (CSS-1P).

1.5 EMULSIONES ASFÁLTICA ANIÓNICAS.

En las emulsiones asfálticas aniónicas, las micelas de asfalto se encuentran cargadas negativamente en su superficie, tal como se presenta en la Figura 1.2).

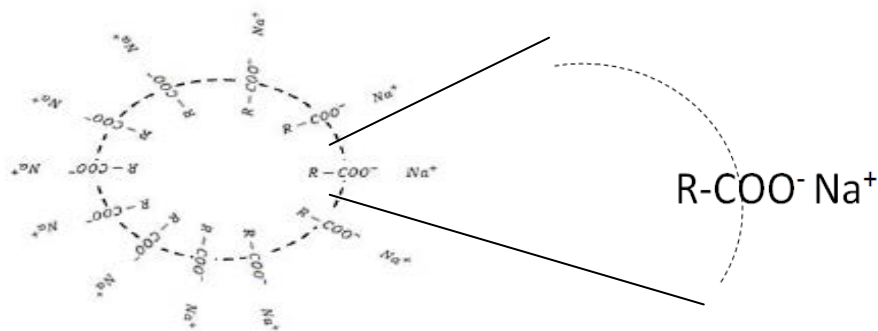


Figura 1.2. Representación de una micela en una emulsión asfáltica aniónica.

Estas emulsiones también se les conocen como emulsiones alcalinas porque el emulsificante utilizado para poder elaborarlas es producido a partir de la acción de una base fuerte ($NaOH$ o KOH), sobre un ácido débil (Molina, 1973).

La formula general que posee el emulsificante es:



Debido a la estructura que presenta el agente emulsificante, la parte del hidrocarburo no polar (grupo R) se concentra en los glóbulos del asfalto, ocasionando que estos adquieran una carga negativa. Como las micelas que se forman poseen una misma carga, se genera repulsión entre ellas lo que provoca una relativa estabilidad, y así logrando obtener una emulsión asfáltica aniónica.

El agente emulsificante se fija a la micela de asfalto y al agregado parcialmente y no desaparece en su totalidad con el agua de evaporación. Este tiene un papel muy importante como agente de adhesividad entre el asfalto y el agregado.

El pH óptimo que requiere una emulsión asfáltica aniónica está entre 11 y 12. Si le agregamos un ácido a la emulsión aniónica, se desestabilizan las micelas de asfalto y esta se precipita en forma de floculos (Acosta, 1984).

Debido a que las emulsiones asfáltica aniónicas poseen una carga negativa, estas requieren de un agregado con una superficie de carga opuesta (positiva) para que exista una afinidad entre el asfalto y el agregado. Por lo mencionado anteriormente, requiere de agregados de origen calizo ó alcalino ($CaCO_3$) (Pintor, 1985).

En la fabricación de las emulsiones aniónicas, no se deben utilizar las aguas duras (presencia de sales disueltas de calcio o magnesio) porque se producen problemas de coagulación (Acosta, 1984).

Los principales factores que influyen en el rompimiento de una emulsión asfáltica aniónica son (Arriola, 2001):

- La evaporación de la fase acuosa.
- Proceso de difusión de la fase acuosa.
- En un menor grado, algunos factores fisicoquímicos y la absorción superficial de una parte del emulsificante en el material pétreo.

1.5.1 COMPORTAMIENTO DE LA EMULSIÓN ANIÓNICA CON MATERIALES ÁCIDOS.

En una emulsión aniónica, los glóbulos de asfalto poseen carga negativa, esto ocasiona que no tengan atracción con los agregados de origen silicato (SiO_4^{-4}), por la igualdad de cargas. Se da una afinidad de atracción de cargas, entre los cationes Na^+ que están en la película protectora de las micelas del asfalto y los aniones (SiO_4^{-4}) presentes en la superficie del agregado, en el cual se da la formación de un silicato de sodio que es soluble. Pero luego, los aniones de las micelas del asfalto ($RCOO^-$) son atraídos por los cationes H^+ del medio ácido, formando un ácido graso inactivo. Debido a esto, no ocurre la adhesividad entre el asfalto y el material pétreo. Sí se logra observar el rompimiento de la emulsión aniónica, pero no se presenta la adherencia entre el agregado y el asfalto (Molina, 1973).

1.5.2 COMPORTAMIENTO DE LAS EMULSIONES ANIÓNICAS CON LOS MATERIALES ALCALINOS.

Según (Molina, 1973), los glóbulos de asfalto de una emulsión aniónica están cubiertos de aniones ($RCOO^-$) absorbidos y adheridos y estos sufrirán una atracción con los cationes Ca^{+2} del material pétreo ($CaCO_3$).

Los iones Na^+ y CO_3^{-2} serán atrapados en la fase acuosa y se formarán unas moléculas de jabón de cal insoluble compuestas de dos aniones de $RCOO^-$ y un catión Ca^{+2} .

1.6 EMULSIONES ASFÁLTICAS CATIONICAS

En estas emulsiones asfálticas, los glóbulos de asfalto se encuentran cargados positivamente (ver Figura 1.3).

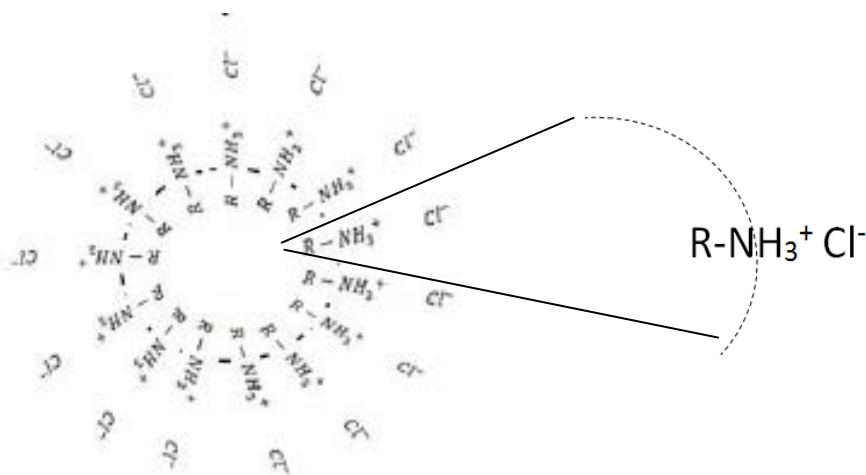
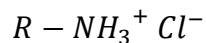


Figura 1.3. Representación de una micela en una emulsión asfáltica catiónica.

El emulsificante catiónico consiste en una sal de amonio cuaternario, o de una sal amina, que resulta de la reacción de un ácido mineral (ácido clorhídrico ó ácido nítrico) sobre la amina grasa, la cual es una amina que posee una cadena larga no polar. Esta amina se

comporta como una base débil. Como el ácido usado es fuerte, estas emulsiones se denominan también emulsiones ácidas (Molina, 1973).

La formula general que presenta el emulsificante es:



De igual forma que en las emulsiones asfáltica aniónicas, el grupo hidrocarburo (no polar) es absorbido por los glóbulos de asfalto, generando partículas con carga positiva (Acosta, 1984). Por la carga positiva que presentan las micelas, estas poseen una mayor adhesión con agregados silicios.

El pH óptimo que requiere una emulsión asfáltica catiónica está comprendido entre 2 y 3. Si se añade una base, se desestabilizarán las micelas y se producirá la coagulación, la cual flocculará después.

Las ventajas que presentan las emulsiones asfáltica catiónicas, con respecto a las emulsiones aniónicas, son (Acosta, 1984):

- Se produce afinidad automática aún con el agregado húmedo, sin necesidad de aditivos.
- Si la temperatura no es muy baja, se puede trabajar en la construcción del tratamiento hasta en la noche.

1.6.1 COMPORTAMIENTO DE LA EMULSIÓN CATIÓNICA CON LOS MATERIALES ÁCIDOS.

En las emulsiones catiónicas al mezclarse con un material ácido (origen silicato), sus glóbulos de asfalto presentes en la emulsión son atraídos por los iones SiO_4^{-4} que están en el agregado, y la capa protectora de iones Cl^- que rodea cada glóbulo es neutralizada por los iones H^+ . Esto logra que se produzca la ruptura de la emulsión y la adherencia entre el

asfalto y el material pétreo, debido a la formación de un compuesto insoluble (sal formada por el silicato y la amina) (Molina, 1973).

1.6.2 COMPORTAMIENTO DE LAS EMULSIONES CATIONICAS CON LOS MATERIALES ALCALINOS.

Si la emulsión usada es del tipo catiónico, se dará primero el ataque del ácido, contenido en la fase acuosa, al material calizo, y se formará un cloruro de calcio soluble que se difundirá. Los cationes de calcio, al utilizarse de esta manera en la formación del cloruro, liberarán los aniones CO_3^{-2} que vienen a rodear la superficie del material. Se tiene entonces la presencia de micelas de asfalto cargados positivamente, y la superficie del material cubierta de aniones CO_3^{-2} .

Los glóbulos serán de esta manera atraídos hacia el material y la ruptura se realizará acompañada de adhesividad, debido a la formación de una sal insoluble (carbonato de amina). El Ca^+ queda en la superficie del agregado calizo (Molina, 1973).

1.7 PRINCIPALES USOS DE LAS EMULSIONES ASFÁLTICAS.

Los usos más comunes de los distintos tipos de emulsiones (Rodriguez Galagarza, 2001) son:

- En la elaboración de mezclas asfálticas en frío, en sitio o en planta.
- Como capa de imprimación para mejorar la adherencia entre la base y la carpeta.
- Como riego de liga para mejorar la adherencia entre materiales asfáltico.
- Para estabilizar el agregado de base.
- En tratamientos superficiales que sirven como superficie de ruedo, o solamente como superficie de protección (sellos asfálticos)
- En la técnica de diseño de pavimentos de macadam de penetración (la cual es una aplicación sucesiva de gravillas y ligante).

1.8 PROCESO DE ELABORACIÓN DE EMULSIONES ASFÁLTICAS.

Como se definió anteriormente, una emulsión asfáltica es la dispersión de una sustancia líquida en otra, en la cual es inmisible. Se debe utilizar un emulsificante para poder obtener estas micelas o glóbulos de asfalto de manera estable en el agua, como se observa en la Figura 1.4.

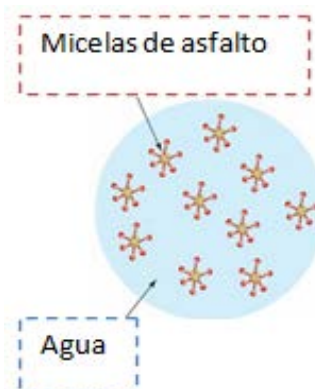


Figura 1.4. Representación de una emulsión asfáltica.

El equipo en que se preparan las emulsiones asfálticas modificadas es el molino coloidal (ver Figura 1.5). La función de este es aplicar un esfuerzo de cizallamiento con una alta velocidad, para dividir el asfalto en pequeñas gotas y generar la dispersión de este en el agua. El molino coloidal que se utiliza gira a velocidades de 2000 a 3500 rpm.



Figura 1.5. Molino coloidal.

1.9 FUNCIONES PRINCIPALES DEL AGENTE EMULSIFICANTE.

Las principales funciones que posee un agente emulsificante son:

- Facilita la formación de la emulsión asfáltica durante el proceso de producción.
- Mantiene la emulsión asfáltica estable durante el período de almacenamiento y transporte hasta que se emplea con el propósito específico.
- Influye sobre el comportamiento de la emulsión, facilitando el recubrimiento del material pétreo y su adhesividad.

1.10 EMPRESAS COMERCIALIZADORAS DE EMULSIFICANTES CATIONICO.

Algunas empresas que comercializan los emulsificantes catiónicos son:

- Químikao S.A.
- AkzoNobel Surface Chemistry.
- AMINOCAP Indústria e Comércio Ltda.

En el Cuadro 1.2, se presentan algunos emulsificantes comerciales.

Cuadro 1.2. Ejemplos de emulsificantes catiónicos comerciales.

Nombre del emulsificante	Tipo de rompimiento
ASFIER 100	Medio y rápido
ASFIER 121	Rápido
ASFIER 211	Lento
EMULCAP WF-30/70	Lento
REDICOTE-4868	Lento
REDICOTE EM44	Rápido

1.11 EMULSIONES ASFÁLTICAS DE ROMPIMIENTO LENTO.

Las emulsiones asfálticas de curado lento se diseñan para lograr mezclas estables. Se emplean con granulometrías cerradas, con alto porcentaje de finos, ya que poseen una mayor área superficial por unidad de volumen. La aglutinación de las micelas de asfalto de la emulsión asfáltica depende básicamente de la evaporación del agua. Las emulsiones de

rompimiento lento generalmente son empleadas en mezclas con granulometría cerrada, para estabilización de suelos, en carpetas asfálticas y algunos reciclados y para el sellado con lechadas asfálticas (Mora, 1983). Uno de los usos más importantes que se da a las emulsiones asfálticas de rompimiento lento para un pavimento, es en el tratamiento superficial con lechada asfáltica (Huffman, s.f.).

1.12 ELABORACIÓN DE EMULSIONES ASFÁLTICAS, CON ENFASIS EN LAS DE ROMPIMIENTO LENTO.

Antes de conocer el proceso de elaboración de emulsiones asfálticas de rompimiento lento, es bueno saber en qué consiste el proceso de rompimiento de una emulsión asfáltica.

El rompimiento de una emulsión asfáltica es el proceso en el cual al poner en contacto la emulsión asfáltica y el agregado pétreo, sea por riego o por acción de mezclado, se da una separación del asfalto del agua (proceso de coagulación y floculación) y el recubrimiento del mineral con una película. El agua debe liberarse, y finalmente, evaporarse. El cemento asfáltico depositado tendrá, prácticamente, las mismas propiedades que si hubiera sido aplicado en caliente, en tibio o por medio de un solvente de petróleo (asfalto rebajado). En cambio, el espesor de la película suele ser bastante menor.

El proceso de rompimiento no ocurre en todas las emulsiones a la misma velocidad. Allí es donde el emulsificante tiene un rol fundamental, pues, de acuerdo con su composición química y dosificación en la emulsión, será la velocidad de rotura de esta (Martínez, 1997).

Precisamente, la rapidez con que se presenta este fenómeno proporciona una manera de clasificar a las emulsiones asfálticas, en rompimiento rápido, medio o lento.

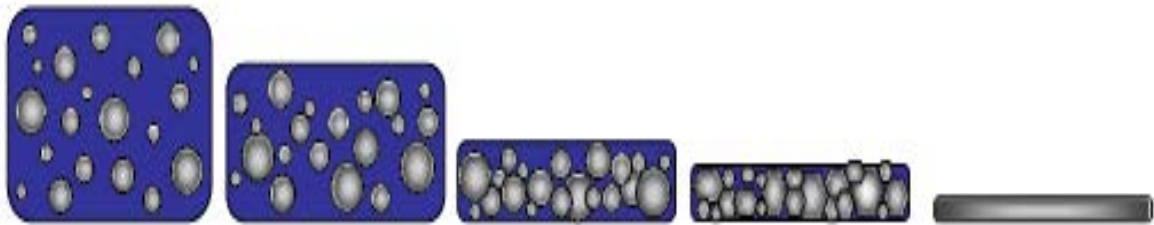


Figura 1.6. Rompimiento de una emulsión asfáltica.

Para fabricar una emulsión asfáltica catiónica de rompimiento lento, primero se realiza la fase jabonosa, conformada por agua, emulsificante y HCl. Se utiliza HCl para darle la estabilidad necesaria a la emulsión asfáltica catiónica y se procura que el potencial de hidrógeno (pH) de la fase jabonosa tenga el valor establecido por la formulación del emulsificante de rompimiento lento utilizado. La fase jabonosa se encuentra a 30°C - 60 °C de temperatura y esta se incorpora en el molino coloidal. El asfalto se dosifica en el molino coloidal al mismo tiempo que la solución jabonosa, a una temperatura del asfalto entre 130°C - 170 °C y finalmente se extrae la emulsión asfáltica. La emulsión asfáltica que se forma instantáneamente tiene una temperatura entre 60°C - 95 °C. Las temperaturas del asfalto y de la solución jabonosa dependen de la composición de la emulsión asfáltica que se desea y de la temperatura de la emulsión. Se debe evitar que la diferencia de temperatura entre la solución jabonosa y el asfalto sea amplia al entrar al contacto en el proceso de emulsificación, debido al choque térmico que se genera.

Para el caso de una emulsión asfáltica modificada de rompimiento lento, se siguen los mismos pasos descritos anteriormente, agregando el polímero en la emulsión asfáltica. Según (Bolaños, 2009) se tienen varias formas de incorporar el polímero en la emulsión:

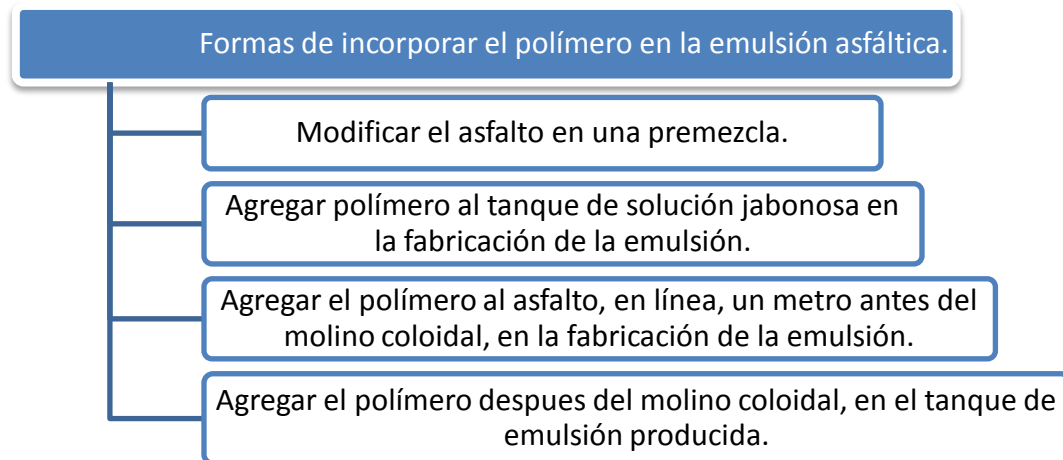


Figura 1.7. Opciones para poder modificar la emulsión asfáltica con polímero.
Fuente: (Bolaños, 2009).

Al obtener las emulsiones asfálticas, estas deben caracterizarse y cumplir con las especificaciones establecidas de control de calidad.

Para las emulsiones modificadas, no se posee una normativa que defina las características por cumplir. Por lo tanto se tomó como criterio la normativa de una emulsión convencional, solo con algunos cambios como en la prueba de evaporación.

El equipo básico para preparar esta emulsión asfáltica de rompimiento lento incluye una máquina con una alta velocidad de giro, como se mencionó anteriormente, conocida como molino coloidal. Esta divide el asfalto en pequeñas gotas y gira a una velocidad de 1000 a 6000 rpm, la cual produce a su vez gotas muy pequeñas que son un factor vital en la formación de emulsiones estables (Pintor, 1985). El tamaño de las gotitas de asfalto depende de la energía mecánica aplicada por el molino.

En el Cuadro 1.3, se presenta la distribución de tamaños de un análisis microscópico de una emulsión típica (Pintor, 1985).

Cuadro 1.3. Distribución del tamaño de partícula en una emulsión asfáltica (Pintor, 1985).

Diámetro de miscela de asfalto (mm)	Porcentaje cuantitativo (%)
< 0,001	28
0,001 – 0,005	57
0,005 – 0,010	15

En el almacenamiento de una emulsión asfáltica, se debe agitar suavemente o recircular para mantener el producto uniformemente estable. Esta emulsión asfáltica debe permanecer en un depósito cerrado.

El manual de emulsiones asfálticas indica que la emulsión asfáltica de rompimiento lento debe almacenarse a temperaturas de 10 a 60 °C (Huffman, s.f.).

1.13 MEDIOS DE ROMPIMIENTO DE UNA EMULSIÓN.

El rompimiento de una emulsión asfáltica, se puede explicar por tres medios principales:

1. Evaporación de la fase continua.
2. Ionización de los ácidos ante la acción de la fase acuosa de la emulsión.
3. Absorción de los agregados de la parte polar de la emulsión.

1. Evaporación de la fase acuosa

Cuando la radiación hace que el agua de la emulsión se disipe con parte del emulsionante, las diminutas gotas de asfaltos comenzarán a unirse y concentrarse molecularmente sobre las partículas de agregado. Además, al ocurrir este proceso, el agua que se evapora produce mayor acidez o alcalinidad en la emulsión, esto afectará la estabilidad en esta y entonces se dará el rompimiento.

En el caso del rompimiento por evaporación, interviene el factor climático. Será más rápido el rompimiento en un día soleado y caluroso, con fuerte viento y poca humedad.

2. Rompimiento por ionización

Los agregados pétreos, tienen carga eléctrica superficial positiva (origen calcáreos $CaCO_3$) o negativa si son silíceos SiO_4^{-4} .

Entonces se produce rompimiento si el cambio iónico entre el ácido y el emulsificante es incompatible, permitiendo mayor adhesión entre el asfalto y el agregado. Además, es necesario agregar que el proceso se acelera cuanto más fino es el agregado, pues la superficie de contacto es mayor en relación con el peso de la emulsión.

3. Rompimiento por absorción

El agregado pétreo, debido a la carga que presentan, absorben la parte polar del emulsificante. De esta forma, los glóbulos de asfalto se adhieren a las partículas del agregado. Teóricamente, si el agregado está húmedo, en el momento de aplicar una emulsión aniónica, esta no se adhiere a la superficie. Pero se da el caso contrario con la emulsión catiónica, pues ejerce una adhesión inmediata por los glóbulos de asfalto, formando una película no lavable alrededor del agregado.

En resumen, los factores que afectan el rompimiento son:

- Condiciones atmosféricas a la hora de aplicar la emulsión.
- Formulación de la emulsión.
- Características del agregado pétreo sobre el que se usará (humedad, porosidad, granulometría, pH, etc).

1.14 INVENTARIAR LOS RECURSOS Y EQUIPOS NECESARIOS PARA LA ELABORACIÓN DE EMULSIONES ASFÁLTICAS MODIFICADAS DE ROMPIMIENTO LENTO.

El equipo utilizado para obtener la emulsión asfáltica modificada y convencional, es el molino coloidal PRM-100 (anteriormente conocido como CVERM-50) producido por Adelo Argentina (Figura 1.8).



Figura 1.8. Planta piloto para la elaboración de emulsiones asfálticas y modificación de asfaltos PRM-100.

Las materias primas utilizadas en el proyecto para obtener las emulsiones asfálticas modificadas, tales como el *HCl*, el asfalto fluidizado o rebajado (86 % asfalto AC-30 y 16 % bunker con respecto al volumen), agua y el emulsificante catiónico de rompimiento lento fueron suministradas por la Refinadora Costarricense de Petróleo (Recope).

1.15 PRUEBAS DE CONTROL DE CALIDAD PARA LA EMULSIÓN ASFÁLTICA MODIFICADA Y NO MODIFICADA.

Según el Manual de Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras, Caminos y Puentes CR-2010 en conformidad con la norma AASHTO M 208 y ASTM D2397 (Transporte, 2010). Las pruebas que se realizaron a las emulsiones asfálticas modificadas y no modificadas son las siguientes:

- a. Prueba de estabilidad de almacenamiento a 24 h, ASTM D-6930.
- b. Densidad a 25 °C, ASTM D-6937.
- c. Viscosidad Saybolt Furol a 25 °C, ASTM 7496.
- d. Fracción de masa de asfalto. Residuo por evaporación, modificación de residuo por destilación, ASTM D-6997.
- e. Penetración al residuo a 25 °C, 100 g, 5 s, ASTM D-5.

f. Fracción de masa de asfalto retenida en malla N° 20, ASTM D-6933.

a. Prueba de estabilidad de almacenamiento, ASTM D-6930.

La prueba de estabilidad de almacenamiento mide la tendencia de las partículas de asfalto a sedimentarse durante el almacenamiento de la emulsión. Se realiza colocando emulsión en una probeta de 500 ml y dejándola a temperatura ambiente (25 °C) durante 24 h. Posteriormente, se extraen muestras de 50 ml de la parte superior e inferior de la probeta y se determina el residuo asfáltico por evaporación. La especificación indica que la diferencia entre ambas muestras no debe ser mayor al 1%.



Figura 1.9. Probetas utilizadas para la prueba de estabilidad.

b. Densidad de una emulsión asfáltica a 25 °C, ASTM D-6937.

Esta prueba consiste en mantener la emulsión asfáltica en un frasco de 83,2 ml, la cual se coloca una hora en un baño a 25 °C, y después se determina su masa.



Figura 1.10. Picnómetro utilizado en la prueba de densidad.

c. Ensayo de viscosidad de Saybolt Furol, ASTM 7496.

Mediante esta prueba, se determina el grado de fluidez de la emulsión. Se hace con un viscosímetro del tipo Furol en el que se determina el tiempo que tarda la emulsión en llenar un matraz aforado de 60 cm³. Durante el ensayo, la emulsión se encuentra a 25 °C.



Figura 1.11. Prueba de viscosidad de una emulsión asfáltica.

d. Ensayo de evaporación, modificado de residuo por destilación ASTM D-6997.

Con la prueba de evaporación, es posible determinar las proporciones de agua y de residuo asfáltico. No se aplica la prueba de destilación por la presencia de caucho molido, para evitar la posible degradación de algunos componentes de estos. Mediante el proceso de evaporación se separa el agua y los aceites presentes en la emulsión, por lo que dentro del vaso de precipitados metálico (beaker) queda solamente el residuo asfáltico, el cual se utiliza en la prueba de penetración.



Figura 1.12. Prueba de evaporación de emulsión asfáltica.

e. Ensayo de penetración del residuo obtenido por evaporación, ASTM D-5.

Mediante la prueba de penetración es posible determinar la dureza del residuo asfáltico. El residuo obtenido en la prueba de evaporación se coloca en una cápsula que se introduce en un baño a 25 °C, posteriormente se deja caer una aguja de 100 g durante 5 s y se mide la penetración en décimas de milímetro.



Figura 1.13. Ensayo de penetración.

f. Ensayo de porcentaje retenido en tamiz N°20, ASTM D-6933.

A través del ensayo para determinar el porcentaje retenido en el tamiz N° 20 se obtiene la cantidad de muestra que posee un tamaño mayor que 850 micrones. Dicho porcentaje debe ser menor que 0,1 %. En este ensayo se pasan 1000 mL de emulsión asfáltica a 25 °C a través de la malla N° 20, posteriormente se lava y se seca la malla para determinar la cantidad de asfalto retenido.



Figura 1.14. Ensayo de malla N° 20.

CAPÍTULO 2. PAVIMENTO

2.1 PAVIMENTO.

El pavimento es una estructura integrada por un conjunto de capas de distintos materiales, con espesores y capacidades estructurales definidas, colocadas y conformadas, para recibir las cargas de tránsito y transmitir las de forma reducida al terreno natural o subrasante. Este pavimento no debe excederse en su capacidad de soporte, y además debe proveer protección contra la acción de los agentes del intemperismo, y también, ser una superficie de rodamiento segura y confortable para los usuarios.

Existen 2 tipos de pavimentos:

- Flexible
- Rígido

El pavimento rígido está constituido por material pétreo y cemento pòrtland y el flexible está constituido por material pétreo y cemento asfáltico (emulsión asfáltica para nuestro caso).

En la Figura 2.1, se puede notar que las cargas aplicadas por los vehículos en un pavimento rígido se disipan en una mayor área y por lo tanto afectan en menor grado al pavimento. En el caso de los pavimentos flexibles, se distribuyen en menor área ocasionando que las cargas lleguen a mayor profundidad. Por tal motivo, un pavimento rígido bien diseñado tiene una vida útil de 30 a 50 años, mientras que para el pavimento flexible es de 15 a 20 años.

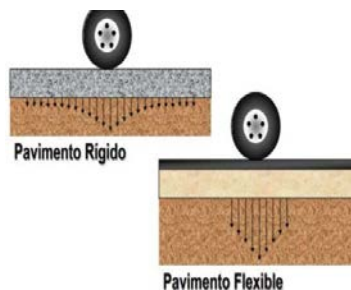


Figura 2.1. Representación de las cargas en pavimentos rígidos y flexibles.

La ventaja que presenta un pavimento flexible con respecto al rígido es principalmente el costo, y una mayor facilidad de mantenimiento.

2.2 ESTRUCTURA DE PAVIMENTO.

Como se observa en la Figura 2.2, el pavimento está formado por la sub-base, base y la carpeta asfáltica.

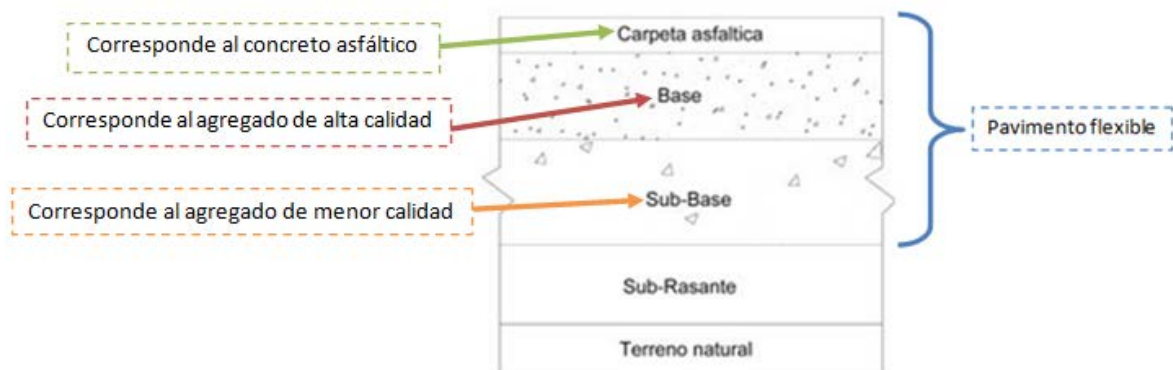


Figura 2.2. Estructura de un pavimento flexible.

En las capas superiores del pavimento, donde los esfuerzos son mayores, se utilizan materiales con mayor capacidad de carga y en las capas inferiores, donde los esfuerzos son menores, se colocan materiales de menor capacidad. La carpeta asfáltica corresponde a la capa superior de un pavimento flexible que proporciona la superficie de rodamiento para los vehículos y se elabora con material pétreo y productos asfálticos.

Un pavimento debe cumplir con los siguientes requisitos:

1. Tener estabilidad ante los agente del intemperismo.
2. Resistencia a la acción de las cargas impuestas por el tránsito.
3. Textura apropiada para el rodamiento.
4. Alta vida útil.
5. Condiciones adecuadas de impermeabilidad.
6. Ser económico.

2.3 TIPOS DE ACABADOS ASFÁLTICOS UTILIZADOS EN LA ACTUALIDAD.

Los diferentes acabados asfálticos que se emplean para la pavimentación en la carpeta asfáltica, sobre ella o debajo, son:

- **Tratamiento superficial:**

Consiste en una capa de cemento asfáltico, el agregado y su posterior compactación, con el fin de proporcionar a la superficie de la calzada protección contra el desgaste por efecto del tráfico, ofrecer a los vehículos una superficie de rodadura antiderrapante y limpia, impermeabilizar la superficie y para rejuvenecer viejos pavimentos, si es un tratamiento de conservación.

Tipos de tratamientos superficiales

1. *Superficial simple.*

Denominado también TS-1, se define como una aplicación única de asfalto o emulsión asfáltica a cualquier superficie asfáltica o granular (nueva o existente), seguida de una capa de agregado de tamaño uniforme (variable dependiente de las condiciones de tránsito proyectadas). El espesor de este tratamiento es aproximadamente igual al tamaño nominal del agregado.

2. *Superficial múltiple.*

Corresponde a dos o más tratamientos superficiales simples colocados uno sobre otro. El proceso se repite para cada continuación del tratamiento con el tamaño de agregado descendiente (agregado pequeño queda arriba, para obtener una menor fricción con las llantas de los vehículos) en cada aplicación, en aproximadamente la mitad del tamaño de la capa anterior.

3. *Simple engravillado.*

Se utiliza generalmente en Europa como alternativa al TS-2 (superficial doble). Consiste en una primera capa con agregado grueso y un porcentaje mayor de vacíos. Esta capa se compacta y luego se distribuye una segunda capa de agregados de menor tamaño (sin aplicación previa de ligante) que se incrusta en los vacíos de la primera capa, para culminar con la aplicación del ligante. Este tratamiento es recomendado para elevados niveles de tráfico.

4. *Simple inverso engravillado.*

Es recomendado para pavimentos exudados (exceso de asfalto) o con situaciones de tráfico pesado y altas temperaturas de servicio. La primera capa del agregado se distribuye sin aplicación previa del ligante asfáltico. Posteriormente, se aplica el ligante y la segunda capa de agregados, para finalmente compactar.

5. *Inverso.*

Este tratamiento superficial es similar al TS-2, sin embargo, la granulometría aumenta de tamaño en la segunda capa, al contrario del TS-2, en el que se da una disminución. Es utilizado para corregir exudación.

6. *Con refuerzo de geotextil.*

Corresponde a una capa de emulsión asfáltica, colocada generalmente en superficies sumamente oxidadas y con agrietamientos.

- **Capa de sello**

Es un delgado tratamiento superficial usado para mejorar la textura y la impermeabilidad de la superficie de ruedo. Dependiendo del propósito, una capa de sello puede o no ser cubierta de agregado. Algunas de estas capas de sellos son:

1. *De restauración.*

Consiste en una ligera aplicación de emulsión asfáltica de cura lenta diluida con agua. Es usada para renovar viejas superficies asfálticas sellando pequeñas fisuras para evitar la entrada de agua y aire, reforzando la adherencia entre la nueva capa de restauración y la existente.

2. *De impermeabilización.*

Es definida como una aplicación de emulsión asfáltica seguida de una capa de agregado fino, como arena o polvo de piedra.

3. *De imprimación.*

Consiste en la aplicación de un material asfáltico líquido y de baja viscosidad, directamente encima de la superficie de una base sobre la cual se colocará posteriormente una capa de rodamiento.

4. *Riego antipolvo.*

Se realiza en caminos de tierra para fijar el material suelto de su superficie. El objetivo final es obtener una película delgada de asfalto a partir de riegos sucesivos efectuados con una emulsión muy diluida.

- **Macadam de penetración**

Es la más antigua de todas las aplicaciones y está aún muy extendido. Consiste en una carpeta asfáltica de capas sucesivas de piedras progresivamente más pequeñas de abajo hacia arriba, limpias y angulosas. Cada capa se extiende y se acuña mediante compactación por vibración después de lo cual se baña con ligante asfáltico.

- **Lechada asfáltica (Slurry seal)**

Las lechadas asfálticas son la combinación de un agregado denso con emulsión asfáltica, agua, relleno mineral (filler) y aditivos (si son necesarios) las cuales son aplicadas en una fina capa para recubrir y proteger el pavimento. Estas se utilizan para mantenimiento de carreteras, lo que mejora las características funcionales de la superficie del pavimento existente.

- **Micro superficie (Micro surfacing)**

Es una técnica moderna de tratamientos superficiales usada para realizar procedimientos preventivos o correctivos de la superficie del pavimento. Consiste en una mezcla de emulsión asfáltica modificada con polímero, agregado mineral, mineral fino, agua y aditivos.

Con respecto al concreto asfáltico (ligante asfáltico más el material pétreo), el cual se aplica en la carpeta asfáltica, este posee un tipo de granulometría, y de acuerdo con esta se clasifica.

2.4 TIPOS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS.

La mezcla asfáltica, o concreto asfáltico, corresponde a la mezcla de ligante asfáltico con el material pétreo. Para poder definir los tipos de mezclas asfálticas empleadas, se debe establecer que existen tres tipos de agregado. El agregado grueso es el que queda retenido en la malla N° 4, el fino es el que pasa la malla N° 4 y queda retenido en la malla N° 200 y por último, el agregado en polvo, corresponde al que pasa la malla N° 200.

Entonces, de acuerdo con estos tipos de agregados se realizan las diferentes mezclas asfálticas (emulsión asfáltica + material pétreo):

1. Mezcla asfáltica de granulometría densa. En general, este término comprende todos los tipos de mezclas en las que el ligante se combina con los agregados a temperatura ambiente o al menos una temperatura muy similar, cubriéndolos con una película de diferentes espesores (en mayor o menor proporción), de forma que, una vez compactadas, tienen un bajo porcentaje de vacíos. Esta mezcla asfáltica presenta un contenido de vacíos entre el 3 % y el 8 %.
2. Mezcla asfáltica de granulometría abierta. Este tipo de mezcla resulta de la combinación de un agregado que predominantemente es grueso y de granulometría uniforme, y un ligante bituminoso, que al aplicarse puede manejarse, extenderse y compactarse a la temperatura ambiente. Presenta un alto contenido de vacíos, mayor del 15 %.
3. Mezcla asfáltica de granulometría discontinua. Este tipo de mezcla asfáltica resulta de la combinación de agregados finos y gruesos solamente, pero de igual manera a los anteriores posee un ligante asfáltico. Presenta un contenido de vacíos entre 8 % y 15 %.

2.5 ESCOGENCIA DEL AGREGADO PARA LA ELABORACIÓN DE MEZCLA ASFÁLTICAS.

La mezcla asfáltica o concreto asfáltico es un material que se elabora mediante la combinación y distribución de un ligante asfáltico (emulsión asfáltica), agregado, relleno mineral y en algunos casos se utilizan modificantes o aditivos para el ligante y para el agregado.

Una pregunta muy importante es: ¿Cómo se debe de escoger el agregado para realizar de manera exitosa esa mezcla asfáltica? Para poder contestar esta pregunta de manera correcta, debemos considerar varios factores, tales como la definición de un agregado, la función que

este realiza, y la afinidad que tenga con la emulsión asfáltica para garantizar que se dé una buena adherencia.



Figura 2.3. Material pétreo.

Definición de agregado:

- Según (Rodríguez Galagarza, 2001), los agregados son materiales granulares duros de composición mineral, tales como arena o grava, están compuestos predominantemente de partículas individuales (naturaleza granular).
- Según ASTM (American Society for Testing and Materials), el agregado es un material inerte tal como arena, escoria, grava o piedra quebrada o combinación de ellas, en el cual el material cementante es mezclado para formar un mortero o concreto (Acosta, 1984).

Generalmente, se utiliza para material de fundición y como componente básico en mezclas de concreto asfáltico e hidráulico. En una mezcla asfáltica, el agregado corresponde de un 90 % a un 96 % del peso total de la mezcla (Rodríguez Galagarza, 2001).

2.6 FUNCIÓN PRINCIPAL DE UN AGREGADO.

Las principales funciones que debe cumplir son: resistir y transmitir las cargas del tránsito al pavimento, resistir la abrasión del tránsito y las condiciones climáticas y proveer una resistencia al deslizamiento.

En una mezcla asfáltica, el propósito del asfalto es funcionar como un material ligante que aglomere las partículas de agregado y permita obtener una mayor durabilidad en la capa densificada.

Las características del material granular tienen gran incidencia en las siguientes propiedades de las mezclas asfálticas: estabilidad, deformación permanente, fricción, rugosidad, durabilidad, trabajabilidad, resistencia, entre otras (Rodríguez Galagarza, 2001).

Las propiedades más importantes que deben cumplir los agregados para mezclas asfálticas son:

1. Tamaño.
2. Resistencia.
3. Forma y textura.
4. Limpieza y humedad.
5. Peso volumétrico unitario.
6. Peso específico.
7. Absorción.

1. Tamaño

El tamaño de un agregado se refiere a la distribución de la granulometría del material. Se requiere un tamaño uniforme y el agregado de mayor tamaño no debe medir más de dos veces el diámetro del agregado más pequeño.

Se tiene un máximo de dimensión de tamaños, porque si se tiene una alta variación entre 2 tamaños de agregado, entonces los agregados grandes no se adhieren bien con la liga asfáltica y los pequeños quedan sumergidos en el ligante asfáltico. Esto se debe a que un agregado fino posee una mayor área superficial por unidad de volumen, lo cual provoca que se adhiera una mayor cantidad de ligante asfáltico y en el caso de un agregado grueso, este tiene una menor área superficial por unidad de volumen, generando lo contrario.

La escogencia del tamaño del agregado para realizar una mezcla asfáltica afecta una serie de factores como:

- Dosificación de los materiales en el diseño, como en el caso de un tratamiento superficial.
- Funcionalidad en el extendido del agregado.
- Capacidad de evaluar el agua superficial.
- Economía.
- Acomodamiento final de las partículas.
- Acabado de la superficie.

2. Resistencia:

El agregado presente en el pavimento será sometido a la abrasión generada por el tránsito vehicular, por lo que se requiere que sea lo suficiente duro para evitar que se generen partículas quebradas por la acción del tráfico sobre la superficie.

La resistencia al desgaste generalmente se usa como un indicador de la calidad del agregado, como se ha mencionado anteriormente. Los agregados de mayor resistencia son colocados en las capas superiores para poder soportar las mayores cargas provocadas por el tránsito circulante.

Las rocas con mayor resistencia son las denominadas trapianas, basalto, diabasa, andesita, diorita, etc. Un agregado débil, desde el punto de vista abrasivo, es el granito, que además es difícil de triturar por su estructura.

3. Forma y textura superficial de las partículas

Estas características afectan especialmente a un tratamiento superficial en los aspectos de adhesividad con la liga propiamente. En cuanto a la forma, el agregado cúbico es el más deseable para construcción de tratamientos superficiales. Las partículas planas o elongadas tienden a alinearse sobre sus caras planas y son cubiertas completamente por el asfalto, por lo que genera una superficie resbaladiza y no uniforme. Por otro lado, los agregados redondos poseen una fricción interna baja, tienden a rodar y ser desplazados por el tránsito.

La tendencia de un agregado a tener partículas planas es medida por el índice de lajas o índice Flakiness, que corresponde al porcentaje por peso de partículas que tienen su dimensión mínima al 60% de la dimensión media del agregado. Las caras fracturadas se miden mediante el porcentaje del material que posee una cara fracturada o dos o más caras fracturadas.

En resumen, la mejor forma de una partícula es la cuboide o angulosa no alargada, pero es usual permitir un máximo de 10 % de material inapropiado. Tomando en cuenta la textura superficial, esta no debe ser muy rugosa, pues demanda mucho ligante asfáltico al exponer mayor superficie de contacto. Tampoco se quiere muy lisa porque ofrecería una fricción relativamente baja entre las partículas de agregado.

4. Limpieza y humedad

El recubrimiento de polvo, limos, arcilla, arena y contaminantes, hace que se exponga mayor área de contacto y por lo tanto, se necesita mayor cantidad de emulsión para cubrir. Si las partículas están sucias o cubiertas con arcilla o sedimentos, la emulsión asfáltica no se adhiere al agregado de manera correcta, también se puede ocasionar un aumento en la velocidad de rompimiento, generando malos acabados. Es necesario lavar el material (agregado) o usar un agente activo de adherencia, lo que encarece el proceso constructivo del pavimento.

Si el material está muy húmedo, también hemos visto que esa humedad es nociva al aplicar la liga asfáltica, esto es debido a que se genera una competencia termodinámica entre el agua y el asfalto por adherirse a la superficie del agregado y el agua puede desplazarlo, provocando pérdida de estabilidad, altos contenidos de espacios vacíos y permeabilidad. La humedad afecta en mayor escala el agregado fino, porque se produce un hinchamiento.

5. Peso volumétrico unitario

Si en una roca este valor es alto, quiere decir que tiene por lo general baja porosidad y absorción y un alto peso específico. Para los áridos, el peso unitario se relaciona con los siguientes factores:

- Peso específico (el material más pesado baja más).
- Acomodo (suelto es diferente a compactado)
- Graduación (la distribución de tamaño influye porque si existe una mejor graduación, o sea, la curva granulométrica es continua, la densidad es mayor al disminuir los vacíos entre las partículas).
- Textura (de acuerdo con la rugosidad superficial, las partículas se acomodarán dependiendo de la fricción entre ellas).
- Forma (las partículas alargadas se acomodan peor que las esféricas o cuboides).
- Contenido de humedad (afecta sobre todo al material fino porque se produce hinchamiento).

6. Peso específico

Este peso se usa para el diseño de mezclas, además se utiliza para calcular los huecos (% de vacíos) de las mezclas asfálticas compactadas. También es útil para corregir las cantidades del agregado en un tratamiento o mezcla asfáltica si el peso varía considerablemente. Si el peso específico resulta menor del que se venía utilizando, entonces se riega menos material por m².

7. Absorción y adsorción

Esta propiedad del agregado afecta el rompimiento de una emulsión y está relacionada con la afinidad que se presente entre el material pétreo y ligante asfáltico. Si el agua hace contacto con el árido, se da el caso de que esa agua queda atraída al agregado o bien en libertad. Si el material es muy poroso y con gran capacidad de absorbencia, procesará rápidamente el agua base de la emulsión y hará que las partículas de asfalto se concentren fácilmente.

2.7 MINERALES PRINCIPALES PRESENTES EN LOS AGREGADOS DE COSTA RICA.

Los minerales presentes en los áridos, se pueden encontrar en tres tipos de rocas: en las rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas.

En el caso de la roca ígnea, esta es de origen magmático. Se forman al enfriarse y solidificarse el magma. Está formado por el entrelazamiento de silicatos minerales.

Las sedimentarias, se forman por la acumulación de sedimentos, ya sea pedazos de roca, restos de seres vivos, etc. Por esto es que se presenta la estratificación característica de este tipo de rocas. Son las de más abundancia en la superficie terrestre.

Las metamórficas incluyen a las dos anteriores. Estas son las que cambian su forma original en cuanto a composición o textura, por diferentes efectos como el calor, presión, agentes químicos, etc. Menciona (Acosta, 1984), que la adhesión de un agregado con el ligante asfáltico parece ser influenciada por la cantidad y tipos de minerales presentes en el agregado.

2.8 DEFINICIÓN DE MINERAL

Los minerales son sustancias naturales de composición química definida y de estructura cristalina determinada, que a veces se presenta en forma geométrica más o menos regular (Acosta, 1984).

Los minerales deben cumplir 3 cualidades importantes:

1. Unidad material
2. Origen natural
3. Pertenecer a la parte sólida de la corteza terrestre

Su materia está formada por un ordenamiento sistemático de átomos, iones o moléculas, dando origen a un medio homogéneo periódicamente denominado como materia cristalina (Acosta, 1984).

2.9 MINERALES COMUNES

Algunas características de los principales minerales presentes en nuestras rocas son (Acosta, 1984):

- Albita y anortita: son feldespatos plagioclasa. Los feldespatos son silicatos minerales.

La albita contiene sodio y la anortita calcio. Sus respectivas fórmulas son $\text{Si}_3\text{AlO}_8\text{Na}$ y $\text{Si}_2\text{Al}_2\text{O}_8\text{Ca}$. La ortoclasa es potásica. La anortita se intemperiza más rápidamente que la albita y, a su vez, ambos se intemperizan más rápido que el feldespato ortoclasa.

- Olivino: es un silicato ferromagnésico que cristaliza primero, a partir de un magma y que se intemperiza rápidamente en la superficie terrestre. Su estructura cristalina se basa en iones aislados de Si_4 y en iones positivos de Fe, Mg o ambos. La fórmula general es $(\text{Mg, Fe})_2\text{SiO}_4$. La disposición estructural comunica al mineral doble refracción, gran dureza y alto peso específico. Es de color verde oscuro, a veces amarillento y hasta incoloro. Es elemento esencial de las rocas originadas por erupciones. Por sí solo forma una roca llamada peridotita.

- Augita: Silicato ferromagnésico, constituido alrededor de cadenas aisladas de tetraedros de silicio-oxígeno. De color verde muy oscuro a negro. Es más resistente que el olivino. Constituye una variedad negra de piroxeno (silicato de hierro, cal y magnesio; muy duro y de color blanco, verde o negro).
- Magnetita: óxido de hierro de color oscuro. Fuertemente magnético. Importante depósito mineral metalífero. De forma octaédrica. Se presenta en masa compacta y en granos sueltos en las arenas magnéticas. De color negro y brillo metálico apagado a mate. Tiene aspecto de escoria cuando está incluido en los basaltos. Se le halla muy diseminado en rocas eruptivas.
- Apatito: es el principal portador del ácido fosfórico. Desde incoloro y transparente, hasta turbio-opaco pasando por diversas coloraciones, destacándose el verde amarillento. Existe en dos variedades: como apatito y como fosforita.
- Titanita: Se presenta en cristales de tipo muy diverso. Los contenidos en las rocas eruptivas tienen forma de sobre. Es de dureza media y alto peso específico, de color amarillo verdoso o pardo rojizo a negro.
- Cuarzo: Sílice anhidra que se presenta cristalizado en romboedros, en prismas hexagonales terminados por pirámides o en dobles pirámides también hexagonales.
- Andesita: Roca ígnea de grano fino sin cuarzo o sin ortoclasa, compuesta de alrededor de 75% de feldespatos plagioclasa y el resto de silicatos ferromagnésicos.

Es importante entender que el agregado, dependiendo de su origen, puede ser de característica alcalinas (superficie cargada positivamente) o ácidas (superficie cargada negativamente).

Una roca no está compuesta solamente de componentes de silicatos (origen ácido) o carbonato (origen alcalino), sino mas bien es una combinación de estos componentes. En el Cuadro 2.1, se da la clasificación de una roca que toma en cuenta la acidez o alcalinidad, en otras palabras, considerando el porcentaje de dióxido de silicio (silicatos).

Se define de esta forma ya que las rocas ácidas son las que tienen más del 66% y las básicas son las que tienen menos del 50% de SiO₂.

Cuadro 2.1. Clasificación de una roca según su acidez (Acosta, 1984).

Ácidas	Intermedias	Básicas
Granitos	Diorita	Basaltos
Granito Pórfido	Sienita	Gabro
Graniodorita	Traquita	Peridotita
Dacita	Andesita	Piroxenia
Riolita	Fanolita	Diabasa

Como se definió anteriormente, un factor muy importante que se debe dar entre el agregado y el cemento asfáltico es la adherencia entre ellos. Por lo tanto, al usar una emulsión cargada negativamente (aniónica), es recomendable que se emplee un agregado básico (cargado positivamente), y para el caso de una emulsión cargada positivamente (catiónica), se recomienda usar un agregado ácido (cargado negativamente).

2.10 ADHERENCIA DEL ASFALTO EN EL MATERIAL PÉTREO.

La adherencia es el esfuerzo que se necesita para desprender el asfalto de la superficie del agregado. Existen dos tipos de adherencia:

- Activa: se manifiesta inmediatamente en el material cuando el agregado hace contacto con la emulsión, dejando una película que no se elimina fácilmente. Esta adhesividad es nula o insignificante.
- Pasiva: se da luego de que la emulsión se rompe. Es la adherencia que se da con respecto al tiempo y es de mayor importancia.

Para aumentar la adhesividad se encuentra el uso de un ligante asfáltico con alta viscosidad y un agregado que esté limpio y rugoso.

2.11 TEORÍAS Y PARÁMETROS QUE AFECTAN LA ADHESIÓN.

Los factores que causan una mejor o peor adhesión, entre el ligante y un árido, pueden ser:

1. Carga eléctricas. Si se quiere demostrar qué tipo de emulsión se tiene, se introducen 2 electrodos y se induce un campo magnético. Las partículas cargadas negativamente serán atraídas por el ánodo (positivo) y las positivas emigraran hacia el cátodo (negativo).

Basándonos en lo anterior y de acuerdo con las leyes de potencial eléctrico, se afirma también que las emulsiones son afines con los agregados, si sus glóbulos presentan carga diferente a la carga predominante en la superficie del árido. Así, el material pétreo usado en la construcción de carreteras será del grupo silíceo (silicatos) o calizo (carbonato de calcio). Los del grupo silíceo presentan cargas eléctricas superficiales negativas predominantemente y las del grupo de las calizas presentan cargas eléctricas positivas.

Además, como el silíceo está presente en la corteza terrestre en aproximadamente un 75%, se supone que el uso de las emulsiones asfálticas catiónicas es el de mayor eficacia.

2. Minerales presentes en los áridos. La mineralogía está muy relacionada con los aspectos eléctricos en cuanto a la adhesividad y susceptibilidad al agua. Si los minerales tienen diferentes polaridades al líquido que los cubre, se satisface la demanda de energía y se produce la adhesión.

Por eso es que a los agregados se les denomina hidrofílicos o hidrofóbicos, dependiendo si tienen afinidad o no, respectivamente, con el agua. Muchos clasifican los agregados negativos (ácidos) como hidrofílicos y los positivos (básicos) como hidrofóbicos. En este caso, los materiales calcáreos tendrán mayor afinidad con el ligante bituminoso que con el agua.

Los minerales que parecen provocar una buena adhesividad con el asfalto son el olivino y la augita. Los que la disminuyen son las ortoclasas, biotitas y honblendas. Por ejemplo, las rocas que tienen mucho mineral ferromagnésico, como el basalto, tienen gran afinidad por los betunes. Sin embargo, si contienen minerales alterados en arcillas, ese basalto no es conveniente en la construcción con asfalto, pues no se produce buena adhesividad.

3. Porosidad. El hecho de que un agregado tenga intersticios accesibles afecta el entramamiento entre ese árido y el ligante. Si el material granular es muy poroso, tiene grietas y capilaridades, se produce la penetración del material bituminoso que, al secarse formará una retención fuerte entre ambos.

Pero este puede ser afectado por el agua intersticial que siempre estará presente en el árido en cierta proporción.

Para muchos, la alta porosidad es perjudicial desde el punto de vista de la dosificación. Al demandar mayor cantidad de ligante los costos subirán.

Además, desde un punto de vista estructural y de permeabilidad, un agregado muy poroso no parece producir buena adhesividad, porque absorbe gran parte de la liga dosificada en relación con su peso, o sea, esa dosificación resulta deficiente.

4. Textura superficial. Al igual que con la porosidad interior, la textura de la superficie puede influir en la adhesividad de un agregado con el ligante. Si la superficie es muy áspera, se presenta una mayor área de contacto difícil de humedecer por la liga, máxime si se encuentra atrapada agua o aire en los pequeños poros de la superficie.

Eso provocaría un pavimento acolchado y por lo tanto, con mucha capacidad para descarnarse.

Ahora bien, una superficie lisa puede dar lugar a un cubrimiento fácil del ligante pero no presenta el vínculo físico de trabazón que brinda el agregado rugoso. Es de suponer entonces, que se debe optar por un agregado de mediana rugosidad superficial.

5. Revestimiento superficial. Un líquido que supla la película que forma el otro, porque el primero satisface la mayor demanda de energía, o bien, el líquido más adhesivo suplanta al otro, que tienen pobres propiedades adherentes.

Como se mencionó en las características que debe cumplir el agregado, el polvo y la humedad son agentes que afectan físicamente la adhesión liga-agregado, pues pueden formar una superficie intermedia que no permite el contacto efectivo, produciendo el desplazamiento del árido. Además, los finos demandan mayor cantidad de ligante.

Para otros, el humedecimiento natural y el polvo no afectan la adhesividad si se utilizan emulsiones de baja viscosidad y de rompimiento lento.

2.12 CARACTERIZAR LAS MATERIAS PRIMAS PARA EL DESARROLLO DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS.

La materia prima para poder obtener una mezcla asfáltica a partir de una emulsión asfáltica modificada, está conformada por: asfalto, agua, emulsificante, material pétreo y el polímero.

- Agregados.

Como se mencionó anteriormente, los agregados son partículas de composición mineral producto de la fragmentación de rocas o de depósitos naturales. Estos se clasifican como agregado grueso (retenido malla N° 4), fino (pasando malla N° 4 y retenido en malla N° 200) y polvo mineral (pasando malla N° 200). En una mezcla asfáltica, el agregado corresponde al 90 – 96 % del peso. El agregado utilizado debe cumplir con las

especificaciones indicadas por el Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes (CR-2010).

Para caracterizar el agregado, se deben obtener propiedades importantes como:

1. Gravedad específica del agregado grueso y fino: La gravedad específica equivale a la razón de masa por unidad de volumen de material a una temperatura dada, con la relación de masa del mismo volumen de agua destilada y su respectivo volumen. Las pruebas se realizan según las normas ASTM C127 Y ASTM C128.
2. Determinación de las caras fracturadas en agregado: Se define como el porcentaje por peso del material con una o más caras fracturadas. La angulosidad del agregado garantiza un alto grado de fricción interna y de resistencia a la deformación plástica. Para el agregado grueso se realiza según ASTM D5821 y para el fino se utiliza la norma ASTM C1252.
3. Partículas planas y elongadas: Esta característica del agregado se determina por la fracción gruesa, de acuerdo con el procedimiento que se establece en la norma ASTM D4791.
4. Abrasión en Máquina de los Ángeles: Con la prueba de abrasión en la máquina de Los Ángeles (AASHTO T96), se estima la resistencia del agregado grueso a la abrasión y degradación mecánica durante el manejo, construcción y vida de servicio. Esta resistencia se mide como el porcentaje por masa del agregado que se pierde a través de la malla N° 4 (4,75 mm) durante la prueba de degradación mecánica. El desgaste por abrasión de la Máquina de los Ángeles no debe ser mayor al 40 %.

La Máquina de los Ángeles es un tambor de acero de 710 ± 6 mm de diámetro interior y de 510 ± 6 mm de longitud interior montado horizontalmente por sus

vástagos axiales con una tolerancia de inclinación de 1 en 100, uno de los cuales debe tener un dispositivo de polea o similar, para acoplar el motor. En su manto cilíndrico debe tener una abertura para introducir la muestra, con una tapa provista de dispositivos para fijarla firmemente en su lugar y que asegura estanqueidad al polvo.



Figura 2.4. Máquina de los Ángeles.

5. Granulometría: La graduación o la granulometría es la característica que más influye en el desempeño de la mezcla asfáltica, en parámetros tales como rigidez, estabilidad, permeabilidad, trabajabilidad, resistencia al daño por humedad y resistencia al agrietamiento por fatiga. La graduación es la distribución de los tamaños de las partículas de agregados.
6. Índice de durabilidad: El índice de durabilidad es un valor que muestra la resistencia relativa de un agregado para producir finos dañinos, del tipo arcilloso, cuando se somete a métodos de degradación mecánica. Este se realiza según el procedimiento que se establece en la norma ASTM D3744 o AASHTO T 210. El índice de durabilidad permitido no debe ser menor de 35.

7. Equivalente de arena: El propósito de esta prueba es indicar, en condiciones normales, las proporciones relativas de arcillas o finos con características de plasticidad, que se presenten en suelos granulares y agregados finos. El término equivalente de arena expresa el concepto de que la mayor parte de los suelos granulares y de los agregados finos están conformados por la mezcla de partículas gruesas de constitución granular, arenas, y generalmente por material arcilloso o fino de plasticidad indeseable de constitución aglutinante. Este se realiza según el procedimiento que se establece en la norma ASTM D2419 o AASHTO T 176. El equivalente de arena permitido no debe ser menor de 35.

Como se plantea utilizar una granulometría para mezclas densas, se puede escoger la granulometría mostrada en la Figura 2.5.

Tabla 703-9
Rangos requeridos
Granulometría densa para pavimentos con emulsión asfáltica

Malla	Porcentaje por peso que pasa la malla estándar (AASHTO T 27 y AASHTO T 11)				
	Designación de la Granulometría				
	A	B	C	D	E
50 mm	100 ⁽ⁿ⁾				
37,5 mm	95 - 100 ⁽ⁿ⁾	100 ⁽ⁿ⁾			
25 mm	---	95 - 100 ⁽ⁿ⁾	100 ⁽ⁿ⁾		
19 mm	60 - 80 (7)	---	95 - 100 ⁽ⁿ⁾	100 ⁽ⁿ⁾	
12,5 mm	---	60 - 80 (7)	---	95 - 100 ⁽ⁿ⁾	100 ⁽ⁿ⁾
9,5 mm	---	---	60 - 80 (7)	---	95 - 100
4,75 mm	20 - 55 (7)	25 - 60 (7)	35 - 65 (7)	45 - 70 (7)	60 - 80 (7)
2,36 mm	10 - 40 (6)	15 - 45 (6)	20 - 50 (6)	25 - 55 (6)	35 - 65 (6)
300 µm	2 - 16 (4)	3 - 18 (4)	3 - 20 (4)	5 - 20 (4)	6 - 25 (4)
75 µm	0 - 5 (3)	1 - 7 (3)	2 - 8 (3)	2 - 9 (3)	2 - 10 (3)

Figura 2.5. Granulometría densa para pavimentos con emulsión asfáltica (Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes CR-2010).

- Asfalto.

Es un material adhesivo que se puede encontrar en estado sólido, semisólido o viscoso. Está constituido principalmente por hidrocarburos de alto peso molecular. Del 70 % al 90 % del peso corresponde a carbonos e hidrógenos. Este material es obtenido de la destilación fraccionaria del petróleo, específicamente preparado para la elaboración de mezclas asfálticas.

La función que cumple el asfalto dentro de la mezcla asfáltica es aglutinar los agregados de manera que haya impermeabilidad, unión en la estructura interna del agregado y durabilidad (resistencia al efecto por humedad y envejecimiento del material que liga).

El asfalto utilizado, también conocido como cemento asfáltico, es el AC-30. Este cumple con las especificaciones de calidad de Recope, según su grado de viscosidad. Para elaborar las emulsiones asfálticas el asfalto se combina con bunker, el cual se considera como un asfalto rebajado, ya que para poder cumplir con las especificaciones deseadas se le adiciona un 16 % en volumen de búnker, esto con el fin de disminuir la viscosidad.

En el Cuadro 2.2, se presenta las especificaciones de calidad que debe cumplir el asfalto AC-30.

Cuadro 2.2. Propiedades físicas y químicas del asfalto AC-30 y sus especificaciones. Fuente: Manual de calidad de Recope.

Propiedad	Promedio	Mínimo	Máximo	Límite de especificación	Método
Densidad a 15 °C	1020 kg/m ³	1010 kg/m ³	1080 kg/m ³	-	ASTM D70
Temperatura de inflamación	309 °C	234 °C	380 °C	Mín. 232 °C	ASTM D92
Viscosidad a 135 °C	488 mm ² /s	378 mm ² /s	599 mm ² /s	Mín. 359 mm ² /s	ASTM D2170
Viscosidad a 165 °C	131 cSt	101 cSt	172 cSt	-	ASTM D2170
Viscosidad a 60 °C	304 Pa.s	245 Pa.s	354 Pa.s	(240 a 360) Pa.s	ASTM D2171

Cuadro 2.2. (Continuación) Propiedades físicas y químicas del asfalto AC-30 y sus especificaciones. Fuente: Manual de calidad de Recope.

Propiedad	Promedio	Mínimo	Máximo	Límite de especificación	Método
Penetración a 25 °C, 100 g, 5 s	69 1/10 mm	50 1/10 mm	72 1/10 mm	Mín. 50 1/10 mm	ASTM D5
Solubilidad en tricloroetano expresado como fracción de asfalto	99,81 %	99,60 %	100,00 %	Mín. 99 %	ASTM D2042
Pérdida por calentamiento expresado como fracción de asfalto	0,09 %	0,01 %	0,69 %	Reportar	ASTM D1754
Viscosidad post-pérdida 60 °C	726 Pa.s	536 Pa.s	1100 Pa.s	Máx. 1500 Pa.s	ASTM D2171
Índice de Suceptibilidad Térmica, VTS	3,5 Unidades	3,4 Unidades	3,7 Unidades	-	-
Relación de Viscosidades Absolutas	2	3	1,8	-	-

El asfalto rebajado corresponde al 65 % en volumen de la emulsión asfáltica por elaborar.

- Agua.

En una emulsión asfáltica, el agua cumple con la función de disolvente, así como de moderador de reacciones químicas. Corresponde al 35 % en volumen de la emulsión asfáltica. Debe tenerse especial cuidado con la pureza del agua que se utilice ya que la presencia de ciertos minerales o contaminantes puede afectar las propiedades de la emulsión, especialmente si se refiere a iones de calcio y magnesio. En general puede decirse, al igual que en mezclas de concreto, que el agua utilizada debe cumplir con los mismos requisitos de pureza que se requieren para el agua de consumo humano. Para el proyecto se empleó agua municipal.

- Emulsificante catiónico de rompimiento lento.

El emulsificante o emulsor es el agente tensoactivo que modifica la tensión superficial en la interfaz entre las partículas de asfalto y del agua, y que mantiene los glóbulos de asfalto, cargados de manera positiva, estables en suspensión. El emulsificante catiónico para elaborar la emulsión asfáltica modificada es el REDICOTE E4868 producido por AKZO NOBEL. Este corresponde a un emulsificante catiónico de rompimiento lento y para su estabilidad requiere de HCl.

- Hule molido de neumático

Las llantas están compuestas especialmente por fibras de acero y polímeros del tipo caucho natural (NR), caucho polisopreno (IR), caucho butadieno de estireno (SBR) o caucho polibutadieno (BR). Estos polímeros tienen propiedades térmicas, mecánicas y químicas, que al ser sometidos a cargas excesivas, inclemencias del clima y agentes químicos, no presentan alteraciones significativas en sus propiedades mecánicas, lo cual hace que sea una alternativa como reemplazo de material granular en la construcción de estructuras de pavimento (Ortiz & Reyes, 2004). Este proceso es considerado de vía seca, ya que se incorpora en la mezcla asfáltica, como un sustituto del material pétreo, y no modifica las propiedades del asfalto. Este material debe pasar malla N° 4 (diámetro menor de 4,75 mm).

Además, si el proceso de incorporación es en base húmeda (incorporando el polímero en el asfalto), el hule molido es un modificador de las propiedades del asfalto, el cual mejora la flexibilidad y resistencia a la tensión de las mezclas asfálticas, reduciendo la aparición de grietas por fatiga o por cambios de temperatura. El caucho molido se obtiene a partir de la molienda de neumáticos.

Para elaborar la emulsión asfáltica, se puede adicionar CaCl_2 el cual da mayor estabilidad de almacenamiento a la emulsión asfáltica modificada. El HCl se agrega para dar estabilidad al emulsificante, de tal forma que se obtenga una emulsión asfáltica modificada de manera estable.

2.13 DEFINICIÓN DE CARACTERÍSTICAS POR COMPARAR.

Como se mencionó anteriormente, el primer alcance de este proyecto es incorporar el mayor porcentaje posible de polímero de desecho, siempre y cuando la emulsión asfáltica obtenida obtenga buenos resultados con los estándares de calidad y pruebas de caracterización.

El resultado final que queremos obtener es la comparación entre la emulsión asfáltica modificada y el concreto asfáltico convencional (asfalto + agregado). Por lo tanto, para poder concluir si los resultados son buenos, tenemos tres tipos de propiedades o cualidades buscadas en el concreto asfáltico modificado. Estas corresponden a:

- Elasticidad
- Adhesividad
- Susceptibilidad térmica

Un concreto asfáltico con buenas propiedades de elasticidad impide que en el pavimento se presenten problemas de deformación, roderas o hundimiento, al cesar la carga. Un material elástico vuelve a su posición normal cuando cesa la carga que se le aplica.

Se definen dos tipos de adherencia, la pasiva y la activa. La activa se da en el momento en el cual la emulsión se pone en contacto con el material pétreo, debido a las diferencias de cargas. La pasiva y de mayor importancia, se da con respecto al tiempo. Representa la propiedad del concreto asfáltico que se opone al desprendimiento del material que liga, resistiendo a la acción del agua. Esto se manifiesta en el pavimento como desprendimiento del agregado (desnudamiento) o del asfalto (exudación).

Es muy importante que el concreto asfáltico tenga propiedades de susceptibilidad térmica adecuadas. Si un asfalto es muy susceptible a la temperatura (caso del cemento asfáltico convencional), va a tener altas variaciones de viscosidad con respecto a la temperatura.

Esto genera que a altas temperaturas, este asfalto posea una viscosidad muy baja, y por lo tanto, tienda a fluir, provocando problemas como roderas o hundimientos en el pavimento. En el caso de presentarse temperaturas muy bajas, el concreto tendrá una viscosidad muy alta, ocasionando que el asfalto se fisure. Al modificar el asfalto con el polímero, se busca que sea menos susceptible a la temperatura.

2.14 LECHADA ASFÁLTICA.

Una lechada bituminosa, conocida comúnmente como Slurry Seal, es un tipo de tratamiento superficial en frío, de poco espesor (de 3 a 9 mm), utilizado para mejorar la textura superficial e impermeabilizar pavimentos existentes. Consiste en un agregado fino bien graduado (ver Figura 1), una emulsión asfáltica de rompimiento lento, agua y si es necesario aditivo (cal, cemento, polímero), en proporción tal que tenga una consistencia homogénea y fluida para una buena colocación.

Entre las propiedades más importantes de las lechadas asfálticas se pueden señalar las siguientes (Mora, 1983):

- Impermeabilizan las superficies de rodamiento abiertas por agrietamiento o las superficies a las que les falta ligante.
- Producen una textura superficial regular, áspera y segura lo que evita el deslizamiento de los vehículos, en ciertos tipos de vías.
- Previenen el envejecimiento del pavimento, causado por la oxidación del asfalto.
- Sirven para rellenar huecos y fisuras pequeñas, así como para obtener una superficie homogénea en pavimentos con muchos baches.
- Permiten efectos estéticos o funcionales con capas asfálticas de poco espesor.

Estas se consideran como un tratamiento de bajo costo y por tanto una alternativa que es necesario tomar en cuenta para el mantenimiento y preservación de carreteras.

Malla	TIPO I Porcentaje pasando	TIPO II Porcentaje pasando	TIPO III Porcentaje pasando	Tolerancia en el apilamiento
9,5 mm	100	100	100	-
4,75 mm	100	90 - 100	70 - 90	± 5 %
2,36 mm	90 - 100	65 - 90	45 - 70	± 5 %
1,18 mm	65 - 90	45 - 70	28 - 50	± 5 %
600 µm	40 - 65	30 - 50	19 - 34	± 5 %
300 µm	25 - 42	18 - 30	12 - 25	± 4 %
150 µm	15 - 30	10 - 21	7 - 18	± 3 %
75 µm	10 - 20	5 - 15	5 - 15	± 2 %

Figura 2.6. Granulometrías establecidas para una lechada asfáltica por CR-2010 (Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes).

Las ventajas que presentan las lechadas asfálticas son (Huffman, s.f.):

- Son de rápida aplicación y así permiten una pronta reapertura del pavimento al tráfico.
- Impiden que el agregado esté suelto.
- Proveen textura superficial y resistencia a la fricción excelentes.
- Capacidad para corregir irregularidades superficiales menores.
- No hay necesidad de ajustes por la presencia de bocas de inspección y otras estructuras.
- Excelente tratamiento de bajo costo para calles urbanas.

2.15 ENSAYOS PARA CARACTERIZAR UNA LECHADA ASFÁLTICA.

Los métodos de ensayos para caracterizar y evaluar la calidad de una lechada asfáltica están establecidos en las normas internacionales AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials), ASTM (American Society for Testing and Materials) y las más importantes por la ISSA (International Slurry Surfacing Association), la cual es la organización encargada del tema desde el punto de vista internacional (Jiménez, 2010).

Los principales ensayos aplicados a las lechadas asfálticas (slurry seals), se presentan en el Cuadro 2.3.

Cuadro 2.3. Métodos de ensayos para caracterizar y evaluar la calidad de las lechadas asfálticas (ISSA, 2010).

Método de ensayo	ISSA TB No.	Especificación
Tiempo de mezclado @ 25 °C	TB 113	Controlado en 180 s min.
Consistencia	TB 106	De 2 cm a 3 cm
Cohesión húmeda	TB 139	
@ 30 min mínimo		12 kg•cm
@ 60 min mínimo		20 kg•cm
Desnudamiento por humedad	TB 114	90% mín.
Perdidas por abrasión (pista húmeda)	TB 100	807 g/m ² máx.
Exceso de asfalto	TB 109	538 g/m ² máx.

- ***Tiempo de mezclado, ISSA TB-113***

Consiste en observar el tiempo de mezclado de una muestra de 100 a 200 g de lechada asfáltica a una temperatura de 25 °C. Se establece un tiempo mínimo de 180 s.

- ***Consistencia, ISSA TB-106***

El ensayo de consistencia determina el contenido de agua óptimo para el diseño de una lechada asfáltica que sea estable y manejable. Un flujo entre 2 a 3 cm se considera el óptimo para obtener la mejor mezcla en el lugar de la pavimentación.

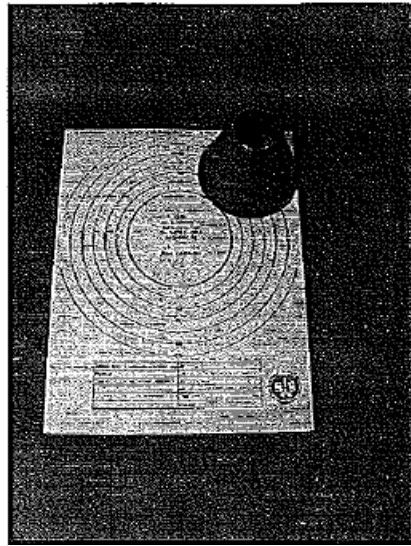


Figura 2.7. Ensayo de consistencia en lechadas asfálticas.

- ***Cohesión húmeda, ISSA TB-139***

Este método consiste en medir el tiempo de rompimiento y curado. La muestra de lechada asfáltica se coloca en el equipo de cohesión y se le aplica una presión de 200 kPa. Luego, el pie de hule se gira en un torque que se mide a lo largo del tiempo. El tiempo de rompimiento se da cuando la lechada, después de moldearse, no puede ser homogenizada nuevamente. También cuando no hay desplazamiento lateral después de compactado el espécimen, o cuando la superficie de la lechada es presionada con una toalla y esta no queda manchada.



Figura 2.8. Equipo de cohesión húmeda.

- *Desnudamiento por humedad, ISSA TB-114*

Este ensayo se aplica a la lechada asfáltica para observar el efecto de la presencia de agua en las mezclas de lechadas asfálticas, y establecer cuál dosificación mantiene las partículas recubiertas con asfalto (Jiménez, 2010).

Si al aplicar la prueba de desnudamiento a la lechada asfáltica se obtiene una retención baja de asfalto en la lechada asfáltica, esto puede indicar una falta de adhesión, falta de conglutinación (propiedad o capacidad de ciertas sustancias y cosas para unirse o fundirse con otras en una sola), una mala formulación de la emulsión (falta de emulsificante), una lechada asfáltica falsa, mucha cantidad de relleno mineral o la calidad de los finos muy pobre (Jiménez, 2010).

- *Perdidas por abrasión, ISSA TB-100*

La muestra curada de lechada asfáltica se sumerge en un baño de agua a 25 °C por un periodo de 1 hora, después se erosiona mecánicamente bajo el agua con una zapata de hule que gira sobre el espécimen, por un tiempo específico. El espécimen es lavado, secado a 60 °C y pesado. La pérdida de peso se expresa en gramos totales perdidos por unidad de área.

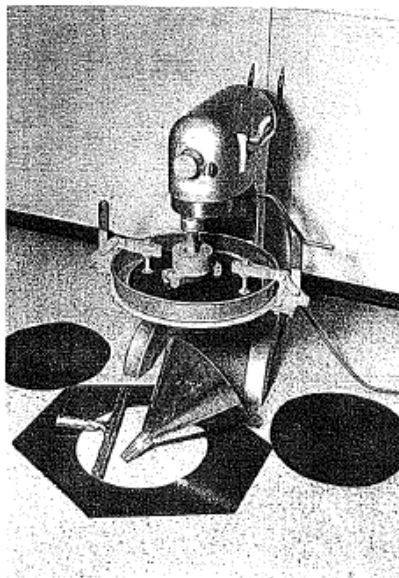


Figura 2.9. Equipo utilizado para el ensayo de pérdida por abrasión de lechadas asfálticas.

- *Exceso de asfalto, ISSA TB-109*

Este ensayo se utiliza para establecer los límites máximos de contenido de asfalto, lo que permite al diseñador de la mezcla evitar la separación del asfalto y el agregado bajo cargas de tránsito pesado produciendo exudación. El ensayo consiste en hacer pasar una rueda sobre un espécimen rectangular con una cantidad establecida de ciclos.

Para poder evaluar la lechada asfáltica modificada con una convencional, se aplicó la prueba de desnudamiento por humedad con el propósito de observar características como la adhesión y cohesión presentes en la mezcla asfáltica.

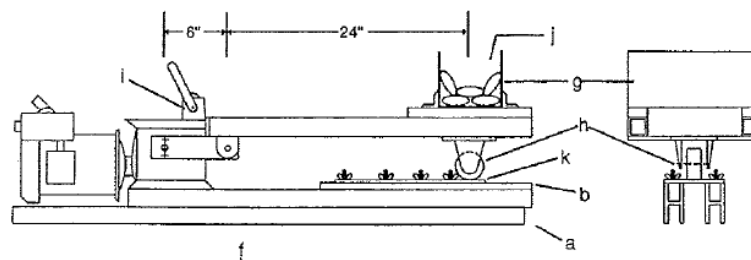


Figura 2.10. Equipo utilizado para el ensayo de exudación de lechadas asfálticas.

2.16 PRUEBA DE DESNUDAMIENTO PARA LECHADAS ASFÁLTICAS.

En un beaker de 1000 mL se agregan 400 mL de agua la cual se somete a ebullición mediante una plantilla, y se le agrega $10 \pm 1g$ de la lechada asfáltica curada. La lechada asfáltica se deja unos 3 mín en el agua hirviendo. Después se decanta y se seca en un papel toalla. Al final se determina visualmente el porcentaje de piedritas que quedan cubiertas de asfalto.

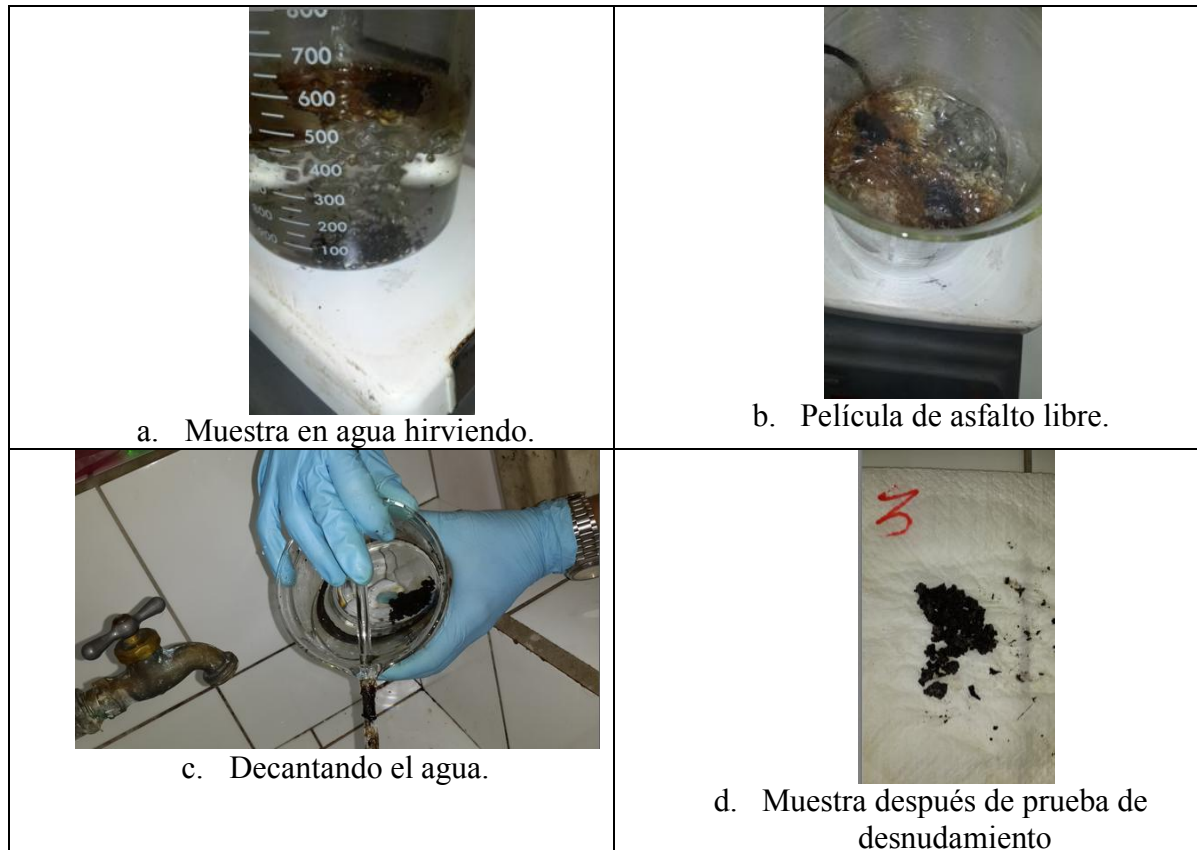


Figura 2.11. Ensayo de desnudamiento por humedad.

2.17 LECHADAS ASFÁLTICAS MODIFICADAS CON POLÍMERO.

Esta consiste en emulsión asfáltica de rompimiento lento modificada con polímero agregado, relleno mineral y agua. Se modifica con polímero con el fin de reducir la susceptibilidad térmica del asfalto residual y mejorar las propiedades mecánicas y de adherencia.

Esta técnica se puede realizar sobre pavimentos nuevos o ya existentes, sobre asfalto o concretos. La velocidad de este proceso depende de la química del agregado y del relleno (filler), la formulación de la emulsión de rompimiento lento, el tipo y la concentración del aditivo (en nuestro caso del polímero) y de la temperatura. La lechada asfáltica puede ser formulada para obtener una de las dos variedades: una apertura al tránsito de 2 a 4 horas o una apertura al tránsito de menos de 1 hora (Mercado, Bracho, & Avendaño, 2008).

2.18 PREPARACIÓN DE CONCRETOS ASFÁLTICOS QUE CONTIENEN PAVIMENTO RECICLADO Y EMULSIONES ASFÁLTICAS MODIFICADAS CON POLÍMEROS.

El reciclado se define como la reutilización, usualmente luego de cierto grado de procesamiento, de un material que ya ha servido para su propósito. En relación con el reciclado de pavimentos asfálticos, se presentan varios métodos que se deben evaluar para su escogencia. Entre los factores que se deben evaluar están (Huffman, s.f.):

- (1) La condición existente que presenta el pavimento.
- (2) El espesor y tipo de material que compone el pavimento existente.
- (3) El requerimiento estructural del pavimento reciclado.
- (4) La disponibilidad de aditivos de reciclado.

2.18.1 TIPOS DE RECICLADO

La ASOCIACIÓN DE RECICLADO Y RECUPERACIÓN DE ASFALTO (AEMA) reconoce cinco tipos de reciclados de pavimentos (Huffman, s.f.):

- Fresado en frío: Se remueve el pavimento asfáltico hasta una profundidad específica y la superficie es restaurada, con las pendientes longitudinal y transversal deseadas, y libres de lomos, huellas y otras imperfecciones superficiales. La remoción del pavimento o fresado se completa con la máquina de tambor giratorio autopropulsada para cepillado en frío. El pavimento asfáltico recuperado es cargado en camiones y acopiado para reciclado en caliente o en frío.
- Reciclado en caliente: Se combina el pavimento asfáltico reciclado (RAP) con agregado nuevo y cemento asfáltico o agente de reciclado, para producir una mezcla asfáltica en caliente. El RAP en su mayor parte es producido por fresado en frío pero también puede elaborarse a partir de la remoción del pavimento y trituración. Los equipos y procedimientos para colocación y compactación de la mezcla son aquellos típicos de las mezclas asfálticas en caliente.

- Reciclado en caliente in-situ: El reciclado se lleva a cabo en el lugar y el pavimento típicamente se procesa hasta una profundidad de 20 a 40 mm. El pavimento asfáltico es calentado, ablandando y escarificado hasta la profundidad especificada. Se agrega una emulsión asfáltica u otro agente de reciclado, y empleando uno de los procesos, se incorpora nueva mezcla asfáltica en caliente en la medida necesaria. Los tres métodos de reciclado en caliente in-situ son escarificación, repavimentación y remezclado.
- Reciclado en frío: Si bien el reciclado en frío se realiza también empleando la planta central o fija, el método más comúnmente utilizado es el reciclado frío in-situ. Habitualmente, el pavimento asfáltico existente es procesado hasta una profundidad de 50 a 100 mm. El pavimento es pulverizado y el material recuperado se mezcla con la emulsión asfáltica o el agente de reciclado emulsionado; luego se le extiende y se le compacta, construyéndose así una base. Las bases recicladas en frío requieren una nueva superficie asfáltica. Para pavimentos de bajo tráfico, puede aplicarse un tratamiento de superficie con una emulsión. Para tráfico intenso, puede aplicarse un tratamiento de superficie con emulsión modificada o una carpeta de rodamiento con una mezcla asfáltica en caliente.
- Recuperación “full-depth”. En este método, toda la sección de pavimento, y en algunos casos es un volumen predeterminado del material subyacente. La recuperación “full-depth” consiste en seis etapas básicas: pulverización, incorporación de aditivos o de emulsión, extendido, compactación, perfilado y colocación de la nueva superficie asfáltica.

2.18.2 PAVIMENTOS INDICADOS PARA RECICLADO.

Usualmente son viejos pavimentos asfálticos, desde una mezcla asfáltica en caliente a una base granular con tratamiento superficial. Dichos pavimentos adolecerán de fisuras y

desintegración severas tales como baches. Frecuentemente, la pobre condición del pavimento se debe a que este es, para el tráfico actuante, demasiado débil o de insuficiente espesor, y así es sobre esforzado. Un pobre drenaje puede también acelerar la velocidad y el tenor del deterioro del pavimento. Todos los tipos de pavimentos asfálticos pueden ser reciclados: carreteras de bajo, medio y alto volúmenes de tráfico, caminos departamentales, calles urbanas, pistas de aeropuertos, y playas de estacionamiento (Huffman, s.f.).



Figura 2.12. Pavimento asfáltico deteriorado, indicado para reciclado.

Para materiales asfálticos, los ensayos incluyen típicamente la extracción convencional de asfalto, tanto para determinar el contenido de asfalto como para calcular, por tamizado, la granulometría de los agregados. En el caso de reciclado en frío, puede agregarse la recuperación del asfalto por el método Abson, el cual es una técnica de extracción del ligante con reactivos como el tricloroetileno, y con ello la determinación de las propiedades del asfalto, incluyendo penetración a 25°C y viscosidad absoluta a 60°C. Para bases granulares y suelos de sub-rasante, se hace normalmente un tamizado por vía húmeda y el equivalente de arena o el índice de plasticidad. Se requiere una mezcla de diseño para determinar tipo y porcentaje de emulsión asfáltica o agente rejuvenecedor, contenido de agua de premezclado, y las propiedades de estabilidad y resistencia de la mezcla reciclada (Huffman, s.f.).

2.18.3 RECICLADO FRÍO EN EL SITIO.

El uso de asfaltos emulsificantes para el proceso de reciclado en frío en el campo consiste en la mezcla de pavimentos asfálticos (RAP) recuperados mediante procesos de escarificación o fresado. Los materiales envueltos en este proceso requieren de un estudio previo profundo, que permita caracterizarlos de la mejor forma con el fin de obtener un producto terminado, de buena calidad (Martínez, 1997).

Este tipo de reciclado presenta grandes ventajas en cuanto a la flexibilidad y capacidad de adaptación en las operaciones de campo ya que permite realizar trabajos que van desde unos cuantos centímetros (tratamientos superficiales) hasta procesos de reciclado en profundidad (reclamación profunda).

2.18.4 TIPOS DE RECICLADO.

Los tipos de reciclado en frío se definen básicamente por las características del camino o carretera que se desean tratar y por las condiciones finales de operación de estas estructuras. Son estas las razones por las cuales el reciclado en frío se puede agrupar en tres tipos básicos (Martínez, 1997):

- Tipo 1.

Este tipo de reciclado consiste en la recuperación de materiales que no han sido tratados con ligantes bituminosos o la presencia de ellos proporcionalmente al resto del material es muy baja, como es el caso de los tratamientos superficiales cuyos espesores tienden a ser menores de 4 cm.

El reciclado frío aplicado a este tipo de estructura permite obtener bases de características mecánicas mejoradas. En este tipo de reciclado, por lo tanto, no se considera el efecto del ligante existente, utilizándose para ello emulsiones con un asfalto residual de penetración 80-100 ó 150-200. Los contenidos de emulsión pueden variar normalmente en un 4 y 7%.

- Tipo 2.

Corresponde a situaciones en donde la profundidad de escarificación abarca no solo la superficie de ruedo sino que toma parte de la base, de tal forma que el porcentaje de la carpeta con respecto al espesor total escarificado es al menos un 50 %. Concretamente esta situación puede darse en carpetas compuestas por una o dos capas con un espesor de 5 y 12 cm, apoyadas sobre una base granular.

- Tipo 3.

Es el tipo de reciclado que se emplea cuando el material por escarificar comprende solamente la superficie de ruedo, por lo que el material recuperado, en mayor o menor grado, contiene ligantes bituminosos. Se aplica a estructuras muy homogéneas que permiten encontrar una fórmula de reciclado mediante la utilización de emulsiones o agentes rejuvenecedores. Este tipo de reciclado trabaja con espesores de 6 a 15 cm o como máximo el espesor de la capa de rodadura.

2.18.5 VENTAJAS Y LIMITACIONES DEL RECICLADO EN FRÍO.

Los métodos de reciclado en frío, en sitio, presentan una serie de aspectos positivos, dentro de los que se pueden mencionar, como ventajas:

- Una reducción significativa en la necesidad de ligante y agregados nuevos.
- Mantenimiento de la geometría existente en la sección de la carretera que se desea reciclar.
- Ahorro significativo de consumo energético comparado con las técnicas de reciclado en caliente.
- Disminución en los costos de acarreo del material pétreo.

Sin embargo, el reciclado en frío, igual que otras técnicas, tiene algunas limitaciones:

- No todo material recuperado es susceptible de ser reciclado en forma eficaz y económica.

- Debido al proceso de curado que requiere una mezcla asfáltica a base de emulsión, limita la apertura inmediata de la circulación de vehículos.

2.19 PAVIMENTO CON EMULSIÓN ASFÁLTICA MODIFICADA CON POLÍMERO Y PAVIMENTO RECICLADO.

El método de elaboración de emulsiones asfálticas modificadas con polímero y pavimento reciclado consiste en elaborar emulsiones asfálticas modificadas con polímero de rompimiento lento para la elaboración de lechadas asfálticas. El pavimento asfáltico reciclado debe ser triturado y tamizado para cumplir con el tipo de granulometría densa establecida de la lechada asfáltica que se diseña. La lechada asfáltica se prepara con el pavimento asfáltico reciclado y agregado nuevo para hacer correcciones a la granulometría.

2.20 PROCESOS PARA OBTENER CAUCHO MOLIDO.

El caucho se obtiene mediante un proceso de molienda que consta de dos niveles y que se puede clasificar en (Cuattrocchio, Botasso, Rebollo, & Soengas, 2006):

1-Trituración previa

Se realiza con trituradoras de cuchillas de 2 o más ejes que giran entre 15 y 20 rpm. El tamaño de producción puede no ser estable, pero eso no tiene gran importancia en esta etapa porque se considera una trituración de tipo macro.

2-Trituración final

Existen dos métodos en los que se requiere que previamente haya sido retirado el componente metálico. Los métodos se enuncian a continuación:

1. A temperatura ambiente: con molinos clásicos y mediante cilindros, se separa la parte textil.

2. Criogénesis: la molienda se realiza entre $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ con ayuda de nitrógeno líquido, lo que da un producto más afín y de mejor finura, con valores que pasan un 100 % la malla N° 100 de ASTM.

En la Figura 2.13, se ejemplifican estos dos procesos finales del caucho molido.

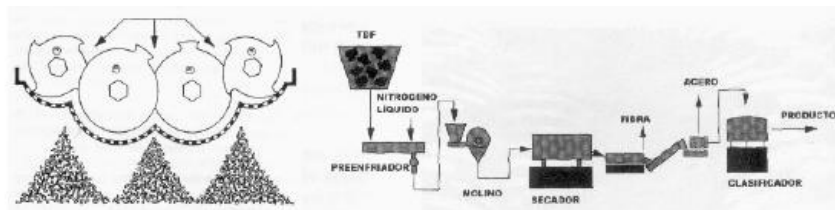


Figura 2.13. Molienda de caucho en forma preliminar y en procesos de criogénesis.

2.21. FALLAS MÁS COMUNES DETECTADAS EN LOS PAVIMENTOS NACIONALES.

Según (Brenes, 2007), las fallas más comunes detectadas en los pavimentos nacionales se pueden clasificar en cuatro grupos:

1. Baches y parches: son los más abundantes en nuestras carreteras y los más reconocidos por los usuarios.
2. Distintas formas de agrietamiento: piel de lagarto (la más común), agrietamientos longitudinal y transversal ya sean estos dos últimos por fatiga, retracción, juntas de construcción o por reflejo de grietas en estructuras de pavimento existentes.
3. Deformaciones permanentes del pavimento conocidas como hundimientos y ahuellamiento o roderas.
4. Varios tipos de deterioro menos comunes como ondulaciones, exudación, erosión, etc.

Baches: Son agujeros en la calzada de tamaño y profundidad considerable producidos por la pérdida de material debido a la combinación de la acción mecánica de las cargas de tránsito y el efecto del intemperismo. El desgaste, el agrietamiento, la infiltración de agua en fisuras, el estancamiento de aguas en hundimientos, el bombeo y el arrastre de material por la escorrentía superficial, contribuyen a su formación (Brenes, 2007).



Figura 2.14. Baches.

Descascaramiento: Es el desprendimiento de agregado en un área considerable de la superficie de la capa asfáltica debido a la pérdida de ligante (desnudamiento), producto del desgaste ocasionado por el tránsito y el intemperismo cuya profundidad no llega a exceder el espesor de la capa (Brenes, 2007).



Figura 2.15. Descascaramiento.

Parches: Son el resultado de una reparación realizada en la superficie del pavimento (capa asfáltica) con el fin de eliminar daños locales como baches, zonas agrietadas o hundimientos, entre otros. Si la reparación ha sido bien ejecutada y el daño local erradicado, el parche mejora la condición o estado de deterioro. Sin embargo, reparaciones

descuidadas o mal ejecutadas contribuyen a empeorar el estado del pavimento, en otras palabras no solo no eliminan el problema sino que se convierten en uno adicional (Brenes, 2007).



Figura 2.16. Parches mal hechos.

Un parche bien ejecutado es aquel que elimina completamente el daño local. Se construye con mezcla asfáltica adecuadamente colocada y compactada en un espacio con bordes cortados en línea rectas, perpendiculares entre si y previamente limpio, con las juntas debidamente selladas con emulsión asfáltica y no deben presentar relieve o depresión sobre el nivel normal de la calzada.

Un parche mal ejecutado, en cambio, es aquel que no cumple con todos los requisitos anteriores, con la mezcla colocada descuidadamente y con los bordes irregulares o contruidos con diferentes materiales, no se elimina el daño y este no tarda en reaparecer.

Agrietamiento: Las grietas o fisuras son discontinuidades producidas por la ruptura de la estructura de un pavimento. Tal ruptura puede deberse a varias razones, a saber:

- Problemas constructivos como cuando hay fisuras de junta longitudinal.
- Reflejo de discontinuidades en estructuras de pavimento existente.
- Acción mecánica de la retracción por fraguado o desecación como en el caso de pavimentos con bases estabilizadas con cemento Portland. o con alto contenido de arcilla.

Acción mecánica de las cargas de tránsito. Ejemplo: Agrietamientos por fatiga (Brenes, 2007).

Se presentan diferentes tipos de agrietamiento (Pintor, 1985):

1. Grietas longitudinales y transversales

Como su nombre lo indica, estas grietas corren a través del pavimento o en dirección a su ancho. Estas fallas usualmente son causadas por movimientos en la base o sub-base, asentamiento lateral de terraplenes, contracción de la base estabilizada, o cualquier otra propiedad del suelo que altere el volumen del pavimento.

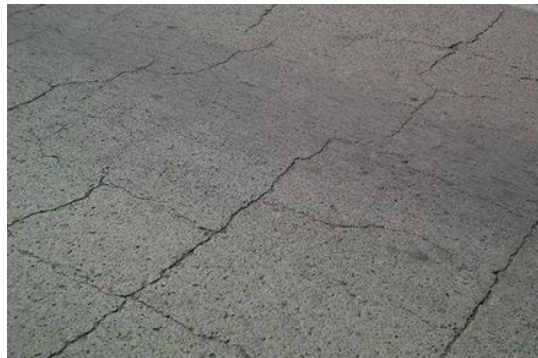


Figura 2.17. Grietas longitudinales y transversales.

2. Grietas por contracción

Son grietas interconectadas que forman una serie de grandes polígonos. Este tipo de grietas es causado por falla en la mezcla de asfalto, tales como cambios de volumen al secarse, un bajo contenido de asfalto o asfalto quebradizo.



Figura 2.18. Grietas por contracción.

3. Grietas cuarteadas

Son grietas interconectadas que forman una serie de pequeños polígonos semejantes a piel de lagarto. En la mayoría de los casos, este tipo de grietas es causado por un soporte inestable y es acompañado por deformaciones en la superficie del pavimento.



Figura 2.19. Grietas cuarteadas.

Ahuellamiento o roderas: Son un hundimiento continuo en la huella de la calzada, de extensión considerable, que se debe a la deformación plástica o permanente de todo el paquete estructural del pavimento. A menudo, este fenómeno aparece acompañado de agrietamiento por fatiga lo que permite la infiltración del agua que se estanca en la rodera agravando la condición (Brenes, 2007).



Figura 2.20. Ahuellamiento o roderas.

Erosión: Es el desgaste de la capa asfáltica de la calzada o los espaldones producido por la acción mecánica de los agentes del intemperismo, principalmente por la escorrentía superficial y agravado por el tráfico de vehículos. Tal desgaste puede manifestarse como una pérdida de ligante (desnudamiento de los agregados) con la esperada pérdida de agregados o incluso la desaparición parcial o total de la capa asfáltica. Se considerarán

como erosión aquellos casos en los que haya pérdida de la capa asfáltica y que no está dentro de las categorías de descascaramiento o baches (Brenes, 2007).



Figura 2.21. Erosión al costado de la calle.

CAPITULO 3. MATERIALES, EQUIPO Y METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Este proyecto tiene como objetivo principal determinar las condiciones experimentales más favorables para la obtención de emulsiones asfálticas de rompimiento lento, modificadas con un polímero desechable, aprovechando también el pavimento reciclado.

Para cumplir con el objetivo general del proyecto, se siguió el siguiente procedimiento:

1. Se definieron y compararon las características entre la mezcla asfáltica modificada y sin modificar.
2. Se caracterizaron las materias primas utilizadas.
3. Se hizo un inventario de los recursos y equipos disponibles en Recope para realizar las emulsiones asfálticas modificadas.
4. Se definió el proceso para realizar la emulsión asfáltica modificada y no modificada.
5. Se hicieron las pruebas de control de calidad a las emulsiones asfálticas elaboradas.
6. Se definió el diseño para elaborar la mezcla asfáltica.
7. Se definió y se efectuó la prueba a la mezcla asfáltica y se compararon los resultados.

Para lograrlo se compararon dos lechadas asfálticas elaboradas con emulsiones asfálticas catiónicas de rompimiento lento producidas en la planta piloto, en la cual una se modificó con 1% de caucho en base del asfalto fluidizado y la otra no. Estas se compararon también con lechadas asfálticas elaboradas con una emulsión asfáltica de rompimiento lento de baja viscosidad producida por Recope.

Para poder obtener buenas condiciones de trabajo en la planta piloto, se produjeron emulsiones asfálticas de rompimiento lento a diferentes condiciones experimentales, variando las velocidades de la bomba centrífuga y del molino coloidal. Además, se prepararon diferentes composiciones de solución jabonosa modificando el pH y el emulsor. Las emulsiones producidas en la planta piloto fueron analizadas mediante 6 pruebas de calidad, a saber:

1. Porcentaje de evaporación.
2. Tamiz N° 20.
3. Densidad.
4. Penetración del asfalto residual.
5. Estabilidad
6. Viscosidad de la emulsión asfáltica.

Por otra parte, se elaboraron lechadas asfálticas a diferentes concentraciones de pavimento reciclado (0 % y 20 % en base de la masa de la mezcla de agregado), diferentes concentraciones de caucho incorporado en base seca (0 % y 20 % en base de la masa de la mezcla de agregado), con un 10 % de agua en base de la masa de la mezcla de agregado seco y 20 % de emulsión asfáltica en base de la masa de la mezcla de agregado seco. Estas lechadas asfálticas generadas con la emulsión asfáltica de Recope, la emulsión asfáltica no modificada y la modificada producidas en la planta piloto, fueron pasadas por una prueba de desnudamiento para lechadas asfálticas por replicado.

Los factores de diseño son la composición de la emulsión asfáltica, la temperatura del proceso de modificación, el tiempo de emulsificación, el tamaño del tanque de emulsificación, el tiempo de curado de la lechada asfáltica, la caracterización de la mezcla de agregado, la caracterización de la lechada asfáltica, el porcentaje de agua incorporado en la lechada asfáltica, el porcentaje de emulsión asfáltica incorporada en la lechada asfáltica, la velocidad de agitación de la bomba centrífuga y del molino coloidal. Los factores experimentales son el porcentaje de caucho incorporado en base seca, el porcentaje de

caucho incorporado en base húmeda y el porcentaje de pavimento reciclado incorporado en la lechada asfáltica. La variable de estudio es el porcentaje de asfalto desnudado en la lechada asfáltica. Las variables incontrolables es la caracterización del asfalto fluidizado y modificado, las características del caucho utilizado, las características del agregado nuevo y del pavimento reciclado, las características del emulsificante utilizado, la temperatura de la emulsión asfáltica, el volumen de la emulsión asfáltica, la masa de asfalto incorporada en la planta piloto, el porcentaje de agua absorbida en la lechada asfáltica, el asfalto recubierto en la superficie del agregado, el tiempo de modificación del asfalto, el proceso de oxidación del asfalto, la características del agua de suministro, la presión atmosférica y la temperatura ambiente. Las variables controlables es la temperatura de la solución jabonosa, la temperatura del asfalto fluidizado, el pH de la solución jabonosa y la masa de la solución jabonosa incorporada en la planta piloto.

El caucho molido fue incorporado en la mezcla asfáltica mediante dos procesos:

1. Incorporación en base húmeda. Se incorporó el caucho como modificador del asfalto.
2. Incorporación en base seca. Se incorporó el caucho como sustituto del material pétreo.

Proceso de obtención del caucho molido para incorporación en base húmeda.

El caucho molido, incorporado en base húmeda, se obtuvo por una donación de la empresa Maloney Technical Products. Este producto se pasó por un proceso de tamizado. Las mallas utilizadas en el proceso de tamizado fueron 10, 14, 25, 35, 45 y 50. Al final se recogió el caucho que pasó la malla N° 45.

Proceso de obtención del caucho molido para incorporación base seca.

El caucho molido utilizado en el proceso de incorporación en base seca, también provino de la empresa Maloney Technical Products. Este, al igual que el incorporado en base húmeda, pasó por un proceso de tamizado. Las mallas utilizadas en el proceso de tamizado fueron

10, 14, 25, 35, 45 y 50. Se utilizó el caucho que pasó la malla N° 10 y el retenido en la malla N° 14.

Proceso de modificación del asfalto con el caucho molido. Proceso de incorporación en base húmeda.

La incorporación del caucho molido en el asfalto se efectuó a una temperatura mínima de 170 °C, la cual fue medida con ayuda de un termómetro de mercurio. Lo anterior debido a las propiedades físicas que presenta este.

Para poder realizar este proceso, se pesó un recipiente metálico de 3,7854 l (1 galón) junto con su tapa y se le adicionaron 2668 g de asfalto fluidificado que estuvo conformado por un 16 % de búnker y 84 % de asfalto AC-30. Posteriormente, el asfalto fluidificado y tapado se introdujo en el horno a una temperatura de aproximadamente 200 °C. Se tapó con el fin de disminuir la transferencia de gases del asfalto fluidificado, y evitar principalmente la oxidación del asfalto por la introducción de oxígeno. Pasadas las 4 horas, se midió su temperatura. Al obtener una temperatura mínima de 170 °C, se adicionaron 3 g de caucho molido producto de la malla N° 45, agitando con un agitador metálico. Esto se realizó en lapsos de 15 a 30 minutos comprobando la temperatura antes de adicionar el caucho. Las adiciones de caucho se realizaron en pequeñas cantidades por la dificultad de disolverlo en el asfalto.

Proceso de elaboración de las emulsiones asfálticas modificadas y no modificadas.

Para elaborar las emulsiones asfálticas, se prepararon soluciones jabonosas por duplicado a un volumen de aproximadamente 1,1 l. Para eso se agregaron, en un beaker de 1000 ml, 1065 g de agua provenientes de la cañería, después se adicionaron, agitando suavemente 5 ml de ácido clorhídrico y 36 g de emulsificante de rompimiento lento REDICOTE E-4868. Esto último se hizo realizando lavados con la solución ácida hasta lograr una disolución homogénea e incorporar todo el emulsificante.

Después de tener las dos soluciones jabonosas listas, se midió el pH con un pHmetro y se incorporaron los 1,1 l de una solución jabonosa en la planta piloto de emulsiones asfáltica, para realizar un lavado mediante recirculación y así acondicionar el equipo. Una vez hecho el lavado, la solución se descartó.

Aparte, en una plantilla eléctrica, se calentó la otra solución jabonosa. Esta se llevó a una temperatura de 40 °C, condición similar que se da en la planta de emulsiones de Recope. Al tener la temperatura deseada de la solución jabonosa, se pesó aproximadamente el 90 % de 1,05 l (alrededor de 950 g) de solución jabonosa en un beaker de vidrio, pesado previamente, y se incorporaron en la planta piloto de emulsiones asfálticas. Luego, la solución jabonosa se recirculó. La velocidad programada en la bomba centrífuga fue de 2100 rpm y la de agitación del molino coloidal fue de 3300 rpm.

Posteriormente, en un tarro metálico de 3,785 l (un galón), pesado previamente, se incorporaron aproximadamente 2500 g de asfalto fluidificado modificado o no modificado. Por diferencia de masa, se agregaron muy lentamente aproximadamente 1994 g de asfalto fluidificado en la planta piloto de emulsiones asfálticas. A este asfalto fluidificado se le midió la temperatura antes de incorporarlo, la cual estaba aproximadamente entre 130 y 135 °C, condiciones similares a las operaciones de Recope.

Al final, cuando se incorporó el asfalto modificado o no modificado en la planta piloto, por diferencia de masa se recalculó la solución jabonosa faltante, y también se incorporó en la planta piloto. Con ayuda de un tubo se agitó la emulsión asfáltica y se dejó por un periodo de 5 min tratando de mantener la temperatura de la emulsión asfáltica entre 60 °C y 65 °C. Para concluir el proceso de emulsificación, se abrió la tubería de purga, se trasvasó la emulsión asfáltica a un envase plástico de 3,785 l (1 galón), e apagó la bomba centrífuga y el molino coloidal y nuevamente se midió la temperatura que tenía la emulsión asfáltica.

Proceso de obtención del pavimento reciclado (RAP).

El pavimento reciclado provino de la orilla de una calle de Moravia. Este se desmenuzó con la ayuda de un mazo y un punzón para obtener un material con un menor tamaño y así poder introducirlo en la trituradora. Después del proceso de trituración del pavimento reciclado, este se tamizó para caracterizar los agregados. Las mallas utilizadas en el proceso de tamizado fueron 3/8, 4, 8, 16, 30, 50, 100 y 200.

El agregado propuesto para incorporarse como sustituto de material pétreo en la lechada asfáltica, fue el retenido en las mallas N° 8 y N° 30. Por lo tanto, estos agregados utilizados de pavimento asfáltico reciclado poseían un tamaño entre 2,36 a 4,75 mm (retenido en malla N° 8) y 0,6 a 1,18 mm (retenido en malla N° 30), aproximadamente. Se incorporó un 50 % de cada tamaño.

Proceso de obtención del agregado nuevo.

El agregado utilizado para elaborar las lechadas asfálticas fue arena industrial, donada por el Laboratorio de Materiales del Ministerio de Obras Públicas y Transporte. Este se tamizó y se guardó en diferentes bolsas plástica etiquetadas con su respectiva malla. Las mallas utilizadas en el proceso de tamizado fueron 3/8, 4, 8, 16, 30, 50, 100 y 200.

Pruebas efectuadas a las emulsiones asfálticas modificadas o no modificadas.***Prueba de estabilidad a 24 h. ASTM D-6930***

Se agregaron aproximadamente 500 g de emulsión asfáltica en una probeta plástica especial para la prueba, la cual se realizó por duplicado. Se dejó reposar la emulsión 24 horas en un sitio sin mucha vibración. Cuando terminó el periodo de espera, se tomaron unos 50 g de la parte superior de la probeta y se colocaron en un beaker metálico con agitador, pesado previamente, con su etiqueta. Posteriormente, se eliminó la parte superior de la emulsión, hasta dejar aproximadamente un poco más de 50 g y se colocó en un segundo beaker metálico con su agitador, pesado con anterioridad, y su respectiva etiqueta. El mismo procedimiento se hizo para la segunda probeta. Después se colocaron los 4 beakers con las

muestras de emulsión asfáltica en el horno a una temperatura de 163 °C, por un periodo de 2 horas. Al término de estas, se agitaron vigorosamente y se dejaron por 1 hora más en el horno. Al finalizar el periodo de evaporación, las muestras asfálticas se dejaron reposar por aproximadamente 30 min y se pesaron. Con las masas medidas, se determinó el porcentaje de diferencia entre el asfalto de la parte superior y la inferior.

Prueba de fracción de masa retenida en malla N° 20. ASTM D-6933

Se pesó una muestra de 1000 g de emulsión asfáltica en un beaker metálico previamente pesado. Se dejó por 1 h en baño maría a 25 °C, para ambientar la temperatura de la emulsión asfáltica. Después se pesó la malla N° 20 con su fundo colocado en la balanza analítica. Después se tamizó la muestra de la emulsión asfáltica y se hicieron varios lavados hasta observar agua transparente al pasar por la malla. Seguidamente, se colocó la malla N° 20 con la muestra de asfalto en un horno a una temperatura de 105 °C por un periodo de 1 h, para evaporar el agua presente en el asfalto. Al finalizar el proceso de secado, se pesó la malla N° 20 con la muestra asfáltica y se determinó la fracción de masa retenida en dicha malla.

Prueba de densidad a 25 °C. ASTM D-6937

Se colocó una muestra de aproximadamente 60 ml de emulsión asfáltica en un beaker metálico, y se dejó por 1 h en baño María a 25 °C. Se pesó el picnómetro metálico con su respectiva tapa metálica. Al terminar el periodo de ambientación de la emulsión asfáltica, se agregó la muestra en el picnómetro con mucho cuidado, se colocó la tapa y con ayuda de papel toalla se fue limpiando el exceso de emulsión asfáltica rebalsada. La tapa se fue presionando y limpiando sucesivamente hasta que dejará de salir muestra del picnómetro. Después se pesó el picnómetro con la muestra de emulsión. Con las masas obtenidas y el volumen del picnómetro, se determinó la densidad de la emulsión asfáltica.

Prueba de viscosidad Saybolt Furol a 25 °C. ASTM D-7496

Se colocó una muestra de aproximadamente 60 ml de emulsión en un beaker metálico y se puso alrededor de 1 hora en baño María a una temperatura de 25 °C, para acondicionar la

emulsión. Se armó el equipo de viscosidad como se observa en la figura 1.11. Posteriormente, se vertió la emulsión asfáltica en el viscosímetro con ayuda de una malla N° 20 para evitar que partículas grandes obstruyeran el equipo. La emulsión asfáltica se agregó con un pequeño exceso cuyo sobrante se eliminó con una piseta y así se llevó hasta la marca del equipo. Con cronómetro en mano, se quitó el tapón y se midió el tiempo que tardó la emulsión en llegar a la marca de aforo.

Prueba de evaporación. Modificación de prueba de residuo por destilación. ASTM D-6997

Se colocaron, en un beaker metálico con agitador, pesado previamente, unos 50 g de la emulsión asfáltica. Esto se realizó por duplicado. Se colocaron los 2 beakers en el horno a una temperatura de 163 °C, por un periodo de 2 horas. Luego, se sacaron del horno, se agitaron vigorosamente y se volvieron a introducir por 1 hora. Al finalizar el proceso de evaporación, cuando los beakers con el residuo de asfalto se encontraban a temperatura ambiente, se pesaron y se determinó el porcentaje de residuo por evaporación presente en la emulsión asfáltica.

Prueba de penetración al residuo a 25 °C, 100 g, 5 s. ASTM D-5

Los dos beakers, con el residuo de asfalto obtenido en la prueba de evaporación, se introdujeron en el horno a 163 °C. Luego de aproximadamente 30 min, el asfalto líquido se pasó por un anillo metálico, utilizado para la prueba de penetración de asfalto. Este anillo, con la muestra de asfalto, se dejó a temperatura ambiente por 1 h para poder solidificar el asfalto. Posteriormente, se introdujo en un baño a 25 °C por un lapso de 1 h, para estabilizar la temperatura del asfalto y se instaló el equipo que se muestra en la Figura 1.13. Finalmente, se colocó la muestra de asfalto en el equipo, se ajustó el cronómetro en 0, se presionó el botón del penetrómetro para introducir la aguja en el asfalto residual y se anotó el resultado de la penetración. Este procedimiento se realizó 3 veces en total, dejando espacios de 1 cm con respecto al borde y a las penetraciones.

Elaboración de lechadas asfálticas

Para elaborar las lechadas asfálticas, primero se elaboraron las mezclas de agregados de aproximadamente 10 g en un vaso plástico tarado con ayuda de una balanza analítica y una cuchara plástica. En la mezcla del agregado, se añadieron 0 % m/m y 20 % m/m de pavimento reciclado y caucho en base seca con respecto a la masa total de la mezcla, según el diseño escogido. Después, se adicionó un 10 % de agua (con respecto a la masa de la mezcla de agregado) con ayuda de un gotero y se agitó la mezcla. Al final, se agregó un 20 % de emulsión asfáltica (con respecto a la masa de la mezcla de agregado) modificada, no modificada y elaborada de Recope, según el diseño escogido, y se agitó. Después, se adicionaron en un trozo rectangular de papel metálico pesado previamente un poco más de 10 g de lechada asfáltica y se compactó con ayuda de una espátula metálica. Al finalizar, se introdujeron las muestras de lechadas asfálticas en el horno a 60 °C por un periodo de aproximadamente 15 horas, para facilitar el periodo de curado.

Prueba de desnudamiento para lechadas asfálticas.

Esta prueba consistió en determinar visualmente el porcentaje de desprendimiento de asfalto en la lechada asfáltica curada. Se colocó una muestra de aproximadamente (10±1) g, en un beaker con 400 g de agua hirviendo (agua en vigorosa ebullición) y se dejó por un periodo de 3 minutos. Al finalizar el periodo de desnudamiento, se le agregó agua fría y se separó el asfalto suspendido. Luego, se decantó la muestra, se puso en un papel toalla y se esperó que se secase. Al estar seca la muestra, se determinó visualmente el porcentaje de desnudamiento y el grado de compactación.

3.1. EQUIPO EXPERIMENTAL.

En el Cuadro 3.1, se muestra el equipo utilizado para el desarrollo de las pruebas experimentales.

Cuadro 3.1. Equipo utilizado para llevar a cabo el proyecto de emulsión asfáltica modificada con polímero desechable.

Equipo	Fabricante	Serie	Ámbito
Planta piloto para emulsiones asfálticas y modificación de asfalto	E-asfalto	PRM-100	-
Balanza analítica del laboratorio de Investigación	DENVEV INSTRUMENT	BA004LA	(0,0001 – 200) g
Balanza granataria del laboratorio de Investigación	UWE	5343	(0,5 – 15000) g
Penetrómetro	HUMBOLPT	OT002LA	(0,1 – 399) 1/10 mm
Termómetro de baño de 25 °C	-	TE153LA	-
Termómetro	-	-	-
Horno a 105 °C	BLUEM	29003	-
Horno a 163 °C			-
Estufa para modificación del asfalto			-
Balanza granataria del laboratorio de control de calidad	RAIN WEIGHS	BA-002LA	(0,1 – 10000) g
Balanza analítica para prueba de malla N° 20	OHAUS	BA-003LA	(0,0001 – 200)g
Balanza analítica para prueba de densidad	OHAUS	BA-001LA	(0,001 – 200)g
PHmetro	Thermo scientific	5709	(0 - 14) pH

3.2. MATERIALES.

En el Cuadro 3.2 se muestran distintas características de los reactivos utilizados durante el desarrollo de la etapa experimental.

Cuadro 3.2. Reactivos utilizados para realizar las emulsiones asfálticas.

Reactivo	Fabricante	Pureza	Grado
Acido clorhídrico Redicote-4868	-	35 %	Industrial
Emulsificante de rompimiento lento	AKZO NOBEL	-	Industrial

3.3. DIAGRAMA DEL EQUIPO.

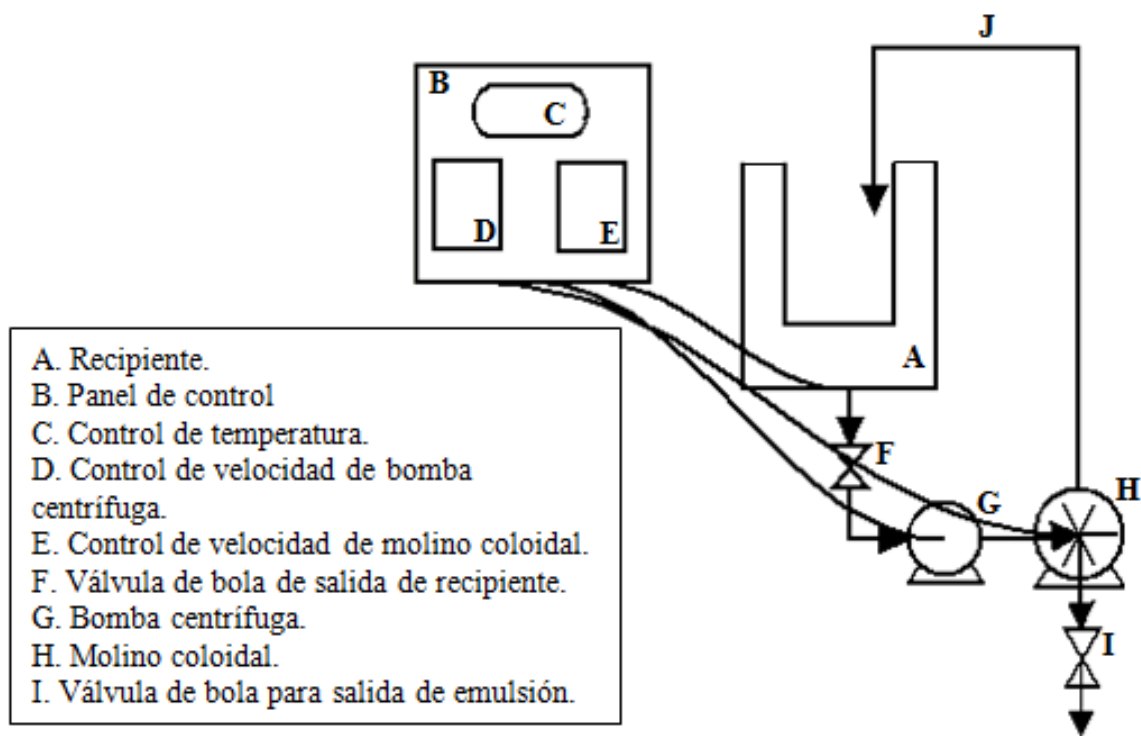


Figura 3.1. Diagrama de planta piloto de emulsiones asfálticas.

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Para poder evaluar el comportamiento de una mezcla asfáltica modificada con polímero y una sin modificar para la reconstrucción de pavimentos flexibles, primeramente se definieron los factores de diseño, con el fin de realizar el diseño factorial.

Como factores de diseño, se incorporó:

1. El polímero en la emulsión asfáltica mediante la modificación previa del asfalto.
2. El polímero en el agregado por vía seca.
3. El pavimento reciclado en el agregado.

Se definió la adhesividad de la mezcla asfáltica como la característica principal para poder evaluar el comportamiento de la mezcla asfáltica. Esta propiedad fue seleccionada para el análisis, dado que una de las problemáticas principales en las carreteras del país son el desprendimiento del agregado por falta de adhesión y la abundante cantidad de huecos producto de la incapacidad para soportar las cargas y los diferentes agentes del intemperismo, esencialmente las lluvias.

Las lechadas asfálticas fueron seleccionadas, para el diseño de pavimento, por ser una técnica de tratamiento superficial que disminuye los costos en las carreteras mediante prevención, y por ser una técnica aplicada para relleno de huecos. Lo más importante es que este diseño utiliza una granulometría pequeña provocando así que la mezcla asfáltica generada posea una alta densidad. Por lo anterior, el porcentaje de espacios vacíos es pequeño y se evita la expansión rápida de grietas a través de la mezcla. Además, este tipo de diseño utiliza emulsiones asfálticas de rompimiento lento, lo cual garantiza que se produzca una buena penetración, adhesión y cohesión entre la emulsión asfáltica y el agregado.

En el Manual de Especificación General para la Construcción de Carreteras Caminos y Puentes CR-2010 se presentan 3 tipos de granulometría para las lechadas asfálticas, ver Cuadro 4.1. Se seleccionó el tipo 2 para desarrollar el proyecto debido a que es el tipo de agregado que mayormente se encuentra en la calle. Esta granulometría está compuesta principalmente por agregado fino y una pequeña cantidad de agregado grueso, es densa y genera un bajo porcentaje de vacíos. Al tener un bajo porcentaje de espacios vacíos, cuando ocurre una grieta, esta se distribuye con menor velocidad y menor fuerza, mientras que en el caso contrario, al tener un porcentaje alto de vacíos, la grieta se distribuye con mayor intensidad.

Cuadro 4.1. Granulometrías establecidas para una lechada asfáltica por CR-2010 (Manual de Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras, Caminos y Puentes).

Malla N°	TIPO I Porcentaje pasando	TIPO II Porcentaje pasando	TIPO III Porcentaje pasando	Tolerancia en el apilamiento
3/8 (9,5 mm)	100	100	100	-
4 (4,75 mm)	100	90 – 100	70 – 90	±5 %
8 (2,35 mm)	90 – 100	65 – 90	45 – 70	±5 %
16 (1,18 mm)	65 – 90	45 – 70	28 – 50	±5 %
30 (600 μ m)	40 – 65	30 – 50	19 – 34	±5 %
50 (300 μ m)	25 – 42	18 – 30	12 – 25	±4 %
100 (150 μ m)	15 – 30	10 – 21	7 – 18	±3 %
200 (75 μ m)	10 – 20	5 – 15	5 – 15	±2 %

La piedra utilizada para realizar las lechadas asfálticas fue arena industrial donada por el Laboratorio del Ministerio de Obras Públicas y Transportes. Esta piedra posee un 32 % de abrasión de los Ángeles (dato facilitado por personal del Laboratorio del Ministerio de Obras Públicas y Transportes). Este agregado es de forma cúbica y de alta dureza.



Figura 4.1. Arena industrial utilizada como material pétreo para elaborar las lechadas asfálticas.

Para poder realizar la formulación de las lechadas asfálticas del tipo 2, este agregado nuevo fue pasado por el tamiz (ver Figura 4.2), para así obtener la granulometría requerida en la lechada asfáltica tipo 2 (ver Figura 4.3). Las mallas utilizadas en el proceso de tamizado fueron 3/8, 4, 8, 16, 30, 50, 100 y 200.

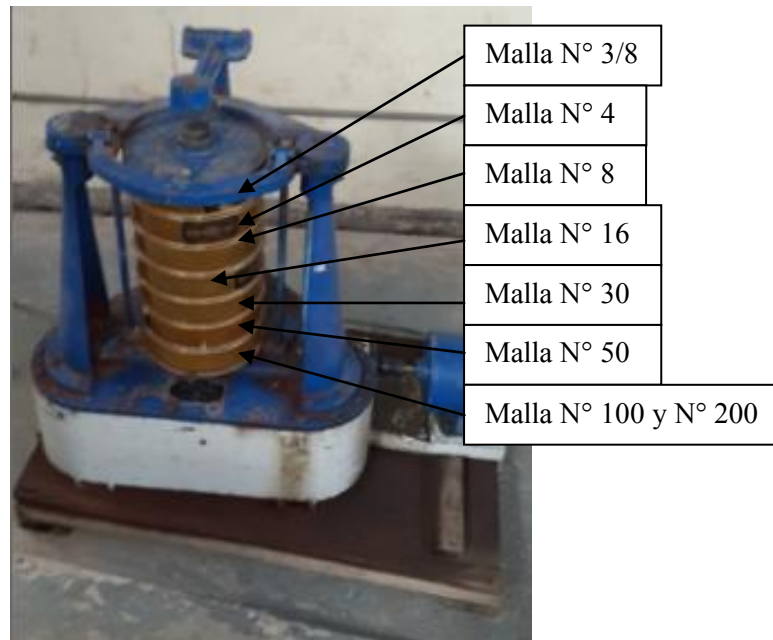


Figura 4.2. Tamizador utilizado en el proyecto.

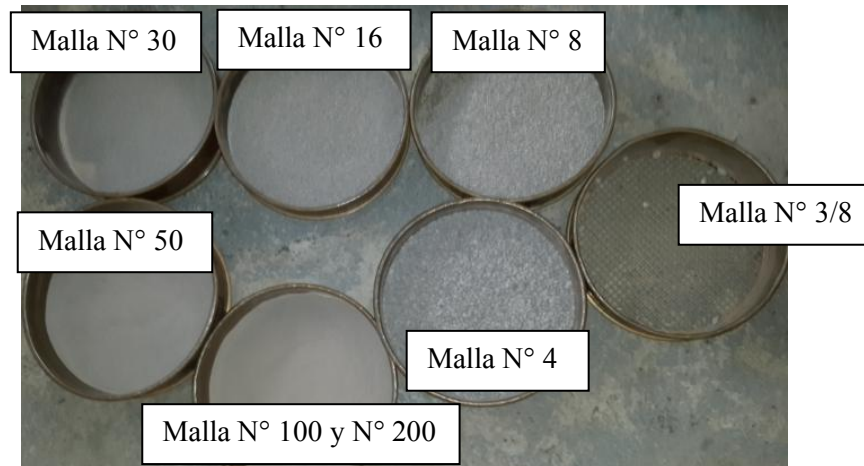


Figura 4.3. Material pétreo separado por las mallas establecidas por la granulometría del CR-2010.

El pavimento reciclado y utilizado en el proyecto se removió del borde de una calle de Moravia, se desmenuzó con la ayuda de un mazo y un punzón (Ver Figura 4.4) y se introdujo en la trituradora (Ver Figura 4.5).



Figura 4.4. Pavimento reciclado utilizado en el proyecto.

Después del proceso de trituración del pavimento reciclado, este, al igual que el agregado nuevo, fue tamizado para poder separar los agregados. El agregado propuesto para

incorporarse como sustituto del material pétreo en la lechada asfáltica fue el retenido en malla N° 8 y malla N° 30, por lo tanto posee un tamaño promedio entre 2,36 a 4,75 mm (retenido en malla N° 8) y entre 0.6 a 1,18 mm (retenido en malla N° 30).



Figura 4.5. Trituradora de mandibula utilizada en el proyecto.

El caucho que se incorporó por vía seca en el agregado, en la mezcla asfáltica, es el mismo comercializado para canchas sintéticas. Se realizó un proceso de tamizado para obtener los tamaños deseados. En el caso del caucho molido, el cual fue usado en el proceso de incorporación en base húmeda, se requirió un tamaño muy fino, debido a la dificultad de disolverse en el asfalto. Por eso se escogió el caucho molido que pasó la malla N° 45. Se escogió este tamaño porque la emulsión asfáltica requiere pasar la prueba de malla N° 20. No fue posible obtener un tamaño más fino de malla, debido a la dificultad de obtención de este, ya que de 20 kg de caucho sin tamizar, se lograron conseguir aproximadamente 100 g de caucho molido que pasó la malla N° 45. Se intentó aplicar el proceso de criogénesis pero los resultados no fueron exitosos debido al tipo de molino utilizado para el proceso y a la manera artesanal en que se realizó dicho procedimiento (Ver Figura 4.6).



Figura 4.6. Molino utilizado para el proceso de criogénesis.

En el caso del caucho molido incorporado en base seca, se propuso un tamaño que pasara la malla N° 10 (retenido en malla N° 14), para poderlo sustituir en la granulometría de lechadas asfálticas de manera satisfactoria. Por lo tanto, el caucho molido incorporado en compañía del material pétreo tuvo un tamaño entre 1,18 mm y 1,70 mm, por eso se sustituyó como un agregado malla N° 16 para la formulación de la lechada asfáltica tipo 2.

La solución jabonosa que se utilizó en la preparación de la emulsión adecuada para lechada asfáltica, cumplió con las especificaciones del emulsificante catiónico lento Redicote E-4868. La información técnica de este producto se encuentra en el anexo.

Typical Emulsion Formulation		CSS-1h
	Asphalt	57+
	Redicote E-4868	0.8 - 1.2
	Hydrochloric acid*	0.1 - 0.25
	pH soap	1.7 - 2.5
	Calcium chloride	0 - 0.1
	Water	to 100

*22°Baume or 35% wt %

Alternative acids such as sulfuric or phosphoric may be used.

Figura 4.7. Especificación requerida para la emulsión asfáltica por el emulsificante Redicote E-4868.

La composición de las primeras soluciones jabonosas fue la siguiente:

- 4 ml de ácido clorhídrico.
- 26 g de emulsificante de rompimiento lento Redicote E-4868.
- 1065 g de agua, para obtener un volumen aproximado de 1,1 l.

Para preparar la solución jabonosa, se agregó en un beaker de 1000 ml los 1065 g de agua, después se le adicionó con mucho cuidado el ácido clorhídrico, y se calentó la solución jabonosa a una temperatura de 40 °C, condiciones similares a las utilizadas en RECOPE. El ácido clorhídrico se incluyó ya que el emulsificante requiere un pH bajo. Así se formaron partículas de asfalto estables.

Al final se agregó, con leve agitación, el emulsificante E-4868 (emulsificante de rompimiento lento) hasta obtener la solución homogénea totalmente disuelta. Esta solución acidificada se calentó a 40 °C para poder disolver con mayor facilidad el emulsificante. Posteriormente, se midió el pH. Este procedimiento se realizó por duplicado para obtener una solución jabonosa que permitiera el lavado en la planta piloto de emulsión asfáltica.

Para obtener la emulsión asfáltica, primero se agregó la solución jabonosa a la planta piloto con el fin de lavar y acondicionar el equipo. Luego se calentó la otra solución jabonosa hasta obtener una temperatura de 40 °C (condición similar a la presente en la planta de Recope). Seguidamente, se pesó un contenedor metálico, al cual se le adicionó el asfalto fluidificado caliente, que provenía de una purga de la planta de emulsiones asfáltica. Este asfalto posee una temperatura de aproximadamente 140 °C.



Figura 4.8. Planta piloto de emulsión asfáltica.

Posteriormente, se adicionaron aproximadamente 950 g de la solución jabonosa y se puso a recircular el molino coloidal que se programó a una velocidad de 2700 rpm y la bomba centrífuga a 1800 rpm, parámetros recomendados por el fabricante del equipo. Después se adicionó el asfalto fluidificado, buscando aproximadamente 1994 g, y al final se agregó el faltante de solución jabonosa para obtener un 65 % de volumen de asfalto fluidificado, condiciones similares a las fabricadas en las emulsiones asfálticas de Recope. Al agregar la solución jabonosa, se activó el cronómetro y se dejó recircular 5 min para asegurar que toda la emulsión asfáltica se hubiera recirculado totalmente. Luego se agitó con un tubo para ayudar a la recirculación de la emulsión asfáltica, y finalmente se introdujo en una botella plástica y se le midió la temperatura.



Figura 4.9. Envase plástico utilizado para almacenar la emulsión asfáltica.

Esta emulsión asfáltica se dejó enfriar hasta temperatura ambiente, para poder realizar las pruebas de control de calidad. Los resultados de los ensayos se presentan en la Cuadro 2.

Cuadro 4.2. Resultados de las pruebas de control de calidad de RECOPE de la emulsión asfáltica de rompimiento lento, con una velocidad de agitación de 2700 rpm para el molino coloidal y 1800 rpm para la bomba centrífuga. pH de 1,9.

Prueba	Resultado	Unidades	Requisito
Densidad a 25 °C	1013,2	kg/m ³	-
Viscosidad Saybolt Furol a 25 °C	40,7	SSF	20 - 100 <i>SSF</i>
Fracción de masa de asfalto. Por Destilación	65,9	% m/m	> 57
Penetración al residuo a 25 °C, 100 g, 5 s	152	1/10 mm	100 – 200
Fracción de masa retenido malla N° 20	0,2	%	< 0,1 %
Estabilidad 24 h, como fracción de masa de asfalto	0,7	%	< 1,0 %

Como se puede observar en el Cuadro 4.2, la emulsión asfáltica elaborada con velocidades de 2700 rpm en el molino coloidal y 1800 rpm en la bomba centrífuga no cumplió con el estándar del ensayo de fracción de masa de asfalto retenida en la malla N°20. Este resultado nos indica que los glóbulos de asfalto que posee la emulsión asfáltica, es de un tamaño grande, no adecuado según los requerimientos para emulsiones asfálticas (la emulsión asfáltica posee un porcentaje de fracción de masa retenido malla N° 20 superior al 0,1%). Esto es debido a diferentes factores como la falta de estabilidad de la emulsión asfáltica por el pH del medio o por la velocidad de agitación del molino coloidal y la bomba centrífuga. Lo anterior sugiere que no se dio el corte necesario para obtener partículas con un tamaño adecuado. Si el medio de dispersión es inestable debido al pH del medio, las partículas se pueden aglutinar, aumentando su tamaño. Pero si observamos el resultado que se presenta con la prueba de estabilidad, podemos observar que este es un valor alto, sin embargo se encuentra dentro de lo permitido, por lo tanto, no podemos afirmar que es el pH del medio el mayor contribuyente para que esta emulsión asfáltica no cumpla con todos los parámetros.

Debido a que la primera emulsión asfáltica elaborada no cumplió con los parámetros establecidos, se optó por cambiar la velocidad de agitación del molino coloidal, para

obtener partículas de asfaltos con menor tamaño, y se subió a 3000 rpm la velocidad de agitación del molino coloidal. Esta segunda emulsión asfáltica, con una velocidad de agitación de 3000 rpm en el molino coloidal y 1800 rpm en la velocidad de agitación de la bomba centrífuga, se realizó con las mismas condiciones utilizadas para elaborar la solución jabonosa.

Los resultados de la segunda emulsión asfáltica elaborada se presentan en la Cuadro 4.3.

Cuadro 4.3. Resultados de análisis para la CSS-1 realizada con velocidades de 3000 rpm para el molino coloidal y 1800 rpm para la bomba centrífuga. pH de la solución jabonosa: 1,9.

Prueba	Resultado	Unidades	Requisito
Densidad a 25 °C	1016,1	kg/m ³	-
Viscosidad Saybolff Furol a 25 °C	29,2	SSF	20 - 100 SSF
Fracción de masa de asfalto. Por Evaporación	62,9	% m/m	> 57
Penetración al residuo a 25 °C, 100 g, 5 s	63,8	1/10 mm	-
Fracción de masa retenido malla N° 20	0,3	%	< 0,1 %
Estabilidad 24 h, como fracción de masa de asfalto	0,1	%	< 1,0 %

Como se observa en el Cuadro 4.3, esta emulsión asfáltica tampoco obtuvo buenos resultados en el ensayo de fracción de masa retenido en malla N° 20. Al aumentar la velocidad de agitación del molino coloidal, posiblemente aumente el número de partículas, debido a que tengan un menor tamaño, pero estas no poseen la estabilidad necesaria, provocando que las partículas choquen y terminen con un tamaño mayor. También se puede observar que la estabilidad disminuye a un 0,1 %, lo cual sugiere que el pH del medio no es el indicativo principal para demostrar que no pase la prueba de malla N° 20.

Otro aspecto importante que debemos apreciar con respecto a la comparación de estas dos emulsiones asfálticas es que la primera, la cual se realizó a una velocidad de 2700 rpm en el molino coloidal, obtuvo 152 (1/10 mm) en el ensayo de penetración del asfalto residual,

mientras que la segunda, a una velocidad de 3000 rpm en el molino obtuvo 63,8 (1/10 mm), en la misma prueba.

Estos resultados tan distintos se deben a que el ensayo de fracción de masa en el asfalto se hizo mediante un método diferente. En el caso de la primera emulsión, el ensayo realizado fue por medio de destilación y en el caso de las demás emulsiones fue por evaporación.

Lo anterior sugiere que al realizar la evaporación de la emulsión asfáltica, el proceso de oxidación en el asfalto es mayor, promoviendo que el asfalto aumente su dureza y obtenga una menor penetración. En el caso de una emulsión asfáltica pasada por el ensayo de destilación, el proceso de oxidación del asfalto es menor, lo cual provoca que el residuo generado por esta prueba, y que se emplea para el ensayo de penetración, obtenga una mayor penetración.

Se decidió realizar el ensayo de fracción de masa de asfalto mediante evaporación debido a que cuando se modifica el asfalto con un polímero, no es aconsejable hacerlo mediante destilación, por cuanto existe la posibilidad de degradación o descomposición del caucho.

El proceso de oxidación en una emulsión asfáltica se da cuando los aceites provenientes del asfalto se oxidan y se convierten en asfaltenos que poseen mayor peso molecular y son más duros, lo que ocasiona que el asfalto tenga mayor dureza y la penetración sea menor en el asfalto.

Dado que la segunda emulsión asfáltica no cumplió con los parámetros requeridos para una emulsión de este tipo, se decidió cambiar la velocidad de la bomba centrífuga aumentándola a 2100 rpm.

La tercera emulsión asfáltica elaborada en la planta piloto de emulsiones asfálticas tuvo las mismas condiciones de preparación de la solución jabonosa de las emulsiones anteriores. Esta emulsión asfáltica se dejó un periodo de 5 min al igual que las demás, con una velocidad de 3000 rpm en el molino coloidal y 2100 rpm en la bomba centrífuga.

Los resultados del análisis de esta emulsión asfáltica se presentan en el Cuadro 4.4.

Cuadro 4.4. Resultados de análisis para la CSS-1 realizada con velocidades de 3000 rpm para el molino coloidal y 2100 rpm para la bomba centrífuga. pH de la solución jabonosa: 1,9.

Prueba	Resultado	Unidades	Requisito
Densidad a 25 °C	1005,7	kg/m ³	-
Viscosidad Saybolt Furol a 25 °C	45	SSF	20 - 100 SSF
Fracción de masa de asfalto. Por Evaporación	64,2	% m/m	> 57
Penetración al residuo a 25 °C, 100 g, 5 s	67,00	1/10 mm	-
Fracción de masa retenido malla N° 20	0,1	%	< 0,1 %
Estabilidad 24 h, como fracción de masa de asfalto	0,3	%	< 1,0 %

Como puede observarse en el Cuadro 4.4, los ensayos obtenidos por esta emulsión asfáltica comparados con las emulsiones anteriores muestran un buen resultado al cumplir limitadamente con la norma de emulsiones asfálticas, y por ende se decidió probar en la lechada asfáltica. Esta emulsión asfáltica cumple limitadamente con la norma debido a que el resultado de fracción de masa retenido malla N° 20 es de 0,1%.

Se procedió a elaborar una mezcla de agregado del tipo 2 para realizar la lechada asfáltica y observar su comportamiento en el proceso de rompimiento de la emulsión asfáltica. En la Figura 4.10, se presenta el mezclado de la tercera emulsión asfáltica con el agregado de granulometría tipo 2.



Figura 4.10. Mezclado de la tercera emulsión asfáltica con el agregado nuevo de granulometría tipo 2 para elaborar una lechada asfáltica.

Esta lechada elaborada con la tercera emulsión asfáltica tuvo un rompimiento muy acelerado, lo que indicó que no tenía las condiciones requeridas para la elaboración de una lechada asfáltica con buenas características.

Para elaborar la lechada asfáltica, primero se realizó la mezcla de agregado tipo 2 con ayuda de la balanza analítica y una cuchara plástica para mezclar, se le agregó un 10 % de agua (correspondiente a la masa de la mezcla del agregado seco) con ayuda de un gotero y se agitó para darle humedad a la mezcla del agregado. Luego se le agregó un 20 % de emulsión asfáltica (con respecto a la masa de la mezcla del agregado seco), ayudándose con un gotero y se agitó nuevamente. Con lo anterior se buscó obtener una lechada asfáltica de aproximadamente 10 g.

Seguidamente, se procedió a la elaboración de una cuarta emulsión asfáltica. Esta vez, para mejorar el tiempo de mezclado de la lechada asfáltica, se cambiaron las condiciones en la solución jabonosa y se aumentó el porcentaje de emulsificante Redicote E-4868, a fin de lograr que la emulsión presentara un rompimiento más lento.

Por otra parte, la segunda solución jabonosa se preparó con:

- 36 g de emulsificante de rompimiento lento Redicote E-4868,
- 5 ml de HCl
- y 1065 g de agua.

Esta cuarta emulsión fue elaborada en la planta piloto en un periodo de 5 min, con una velocidad de 3300 rpm para el molino coloidal (para tratar de disminuir el porcentaje de masa de asfalto retenido en malla N° 20) y una velocidad de 2100 rpm en la bomba. Los resultados de los ensayos se presentan en el Cuadro 4.5.

Cuadro 4.5. Resultados de análisis para la CSS-1 utilizada en las lechadas asfálticas, realizada con velocidades de 3300 rpm para el molino coloidal y 2100 rpm para la bomba centrífuga. pH de la solución jabonosa: 2,0.

Prueba	Resultado	Unidades	Requisito
Densidad a 25 °C	1011,7	kg/m ³	-
Viscosidad Saybolt Furol a 25 °C	77,93	SSF	20 - 100 SSF
Fracción de masa de asfalto. Por Evaporación	65,6	% m/m	> 57
Penetración al residuo a 25 °C, 100 g, 5 s	51,83	1/10 mm	-
Fracción de masa retenido malla N° 20	0,04	%	< 0,1 %
Estabilidad 24 h, como fracción de masa de asfalto	0,5	%	< 1,0 %

Como se observa en el Cuadro 4.5, esta cuarta emulsión asfáltica de rompimiento lento cumplió con todos los ensayos. A esta emulsión (al igual que a la segunda y tercera) se le realizó el ensayo de fracción de masa de asfalto por evaporación. El aumentar la concentración del emulsificante de rompimiento lento y la velocidad del molino coloidal se disminuyó considerablemente el porcentaje de asfalto retenido en la malla N° 20. Esto se dio porqué al aumentar la velocidad de la agitación en el molino coloidal, hace que se genere glóbulos de asfalto de un pequeño tamaño, los cuales se estabilizan con el emulsificante, por eso se requiere agregar mayor cantidad del emulsificante también.

Con base en los buenos resultados obtenidos, el paso siguiente fue la elaboración de las lechadas asfálticas. Las mezclas de agregados contenían en algunos casos un 20 % m/m de

pavimento reciclado y un 20 % m/m de caucho molido. Las lechadas asfálticas, con una masa de 10 g aproximadamente, fueron elaboradas con un 10 % de agua y un 20 % de esta emulsión asfáltica, ambos porcentajes con respecto a la masa del agregado seco. Después de haberlas preparado, se introdujeron en el horno para el proceso de rompimiento y curado.

Para poder realizar una emulsión asfáltica modificada, fue necesario modificar primeramente el asfalto fluidificado y después elaborar la respectiva emulsión. Debido a que la planta piloto fue diseñada para modificar asfalto, se intentó modificar el asfalto fluidificado en ella, sin embargo, el resultado no fue positivo. En el momento en el cual se obtuvo la temperatura mínima de 170 °C (según lo marcado en el panel de control del equipo) y se intentó poner a recircular el equipo, el asfalto fluidificado se atascó en las paredes de la tubería.

Este problema se suscitó ya que el equipo no se encontraba la tubería aislada, ni con el calentamiento adecuado. Además, fue difícil bombear el asfalto fluidificado porque al abrir la válvula de bola para recircular, el asfalto fluidificado se enfrió demasiado rápido, aumentando su viscosidad y atascándose en el equipo.

Como resultado de lo sucedido se optó por modificar el asfalto con caucho molido de malla N° 45 en un galón metálico con tapa, en el horno. En la Figura 4.11 se presenta el galón metálico utilizado para modificar el asfalto fluidificado.



Figura 4.11. Recipiente metálico utilizado para modificar el asfalto con caucho.

El primer paso fue obtener un asfalto modificado al 3 % m/m con respecto al peso del asfalto fluidificado. El caucho molido pasó la malla N° 45. Véase la Figura 4.12. Para modificar el asfalto, se calentó en el horno a una temperatura de 200 °C. Cuando se obtuvo una temperatura mínima de 170 °C, medida con un termómetro, se incorporó el asfalto en pequeñas cantidades de 3 g aproximadamente y en intervalos de 15 min.

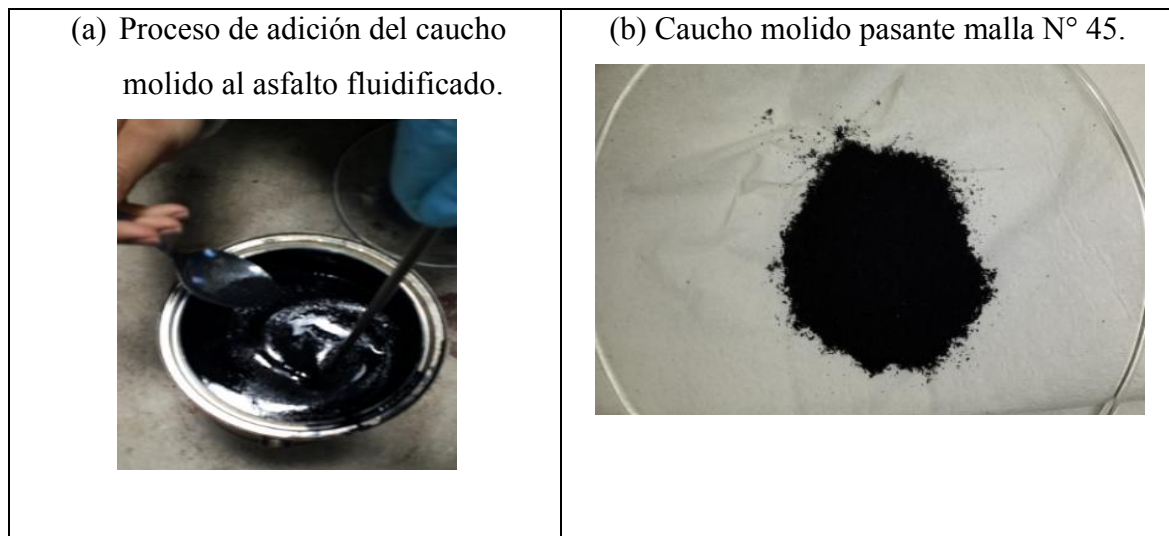


Figura 4.12. Modificación del asfalto.

La emulsión asfáltica realizada con este asfalto al 3% m/m, mantuvo las condiciones de operación y elaboración de la solución jabonosa usada en la emulsión asfáltica catiónica de rompimiento lento, utilizada para realizar las lechadas asfálticas.

Para realizar los ensayos de la emulsión asfáltica modificada al 3 % m/m de caucho, se efectuó la prueba de malla N° 20. Esta es la prueba que tiene la mayor dificultad para cumplir con lo estipulado. Al realizar esta prueba se obtuvo un mal resultado, ya que ni siquiera fue posible realizarla adecuadamente, ni terminar el ensayo de malla N° 20 dado que la emulsión se obstruyó al agregarla en la malla. El tamaño de las partículas de asfalto y posiblemente del caucho fue muy grande, como se puede observa en la Figura 4.13.



Figura 4.13. Residuo de emulsión asfáltica modificada al 3 % m/m de caucho, que quedó depositado en la malla N° 20.

Dado que no fue posible realizar el ensayo de malla N° 20 para esta emulsión asfáltica modificada al 3 % m/m, se decidió no continuar con los demás ensayos.

La falla de esta emulsión puede ser atribuida a diferentes circunstancias posibles:

1. El equipo utilizado para modificar el asfalto no fue el ideal, ya que al modificar un asfalto, debido a las dificultades de solubilidad que posee el caucho en el asfalto, es necesario tener una fuerte y continua agitación y elevadas temperaturas, consideraciones no disponibles por limitación de equipos.
2. Posiblemente el hinchamiento del asfalto al modificarse fue muy elevado, ya que en el proceso de modificación del asfalto, los asfaltenos presentes en él asfalto se

hinchaban. Lo cual provoca un aumento en el tamaño del glóbulo de asfalto en la emulsión asfáltica, pasando finalmente por un proceso de aglutinamiento con los demás glóbulos.

El término aglutinamiento (otros sinónimos: aglutinación, aglomeración, conglutinación, coagulación, etc.) y en inglés “oalescence”, implica la unión de los glóbulos al chocar. Respecto al punto 2 anterior, otra posible circunstancia que se pudo haber dado fue que las condiciones de la composición de la solución jabonosa utilizada no fueron las adecuadas para esta emulsión asfáltica modificada al 3 % m/m y que provocó la unión de los glóbulos.

Debido al resultado obtenido en la emulsión asfáltica modificada al 3 % m/m de caucho, se procedió a disminuir su porcentaje al 2 % m/m y se realizó la modificación del asfalto con la misma metodología empleada anteriormente.

La nueva emulsión asfáltica modificada al 2 % m/m se realizó en las mismas condiciones de operación que la anterior, a saber, también se dejó por un periodo de 5 min con constante agitación, una velocidad de 3300 rpm en el molino coloidal y 2100 rpm en la bomba centrífuga.

Al igual que la emulsión asfáltica modificada al 3 % m/m, esta emulsión asfáltica modificada al 2 % m/m, no dio un buen resultado en la prueba de malla N° 20. Por lo cual se decidió disminuir el porcentaje de caucho en el asfalto fluidificado en 1 % m/m.

Por último, se modificó el asfalto fluidificado con un 1 % m/m de caucho molido el cual pasó la malla N° 45. En este caso, se utilizó directamente el asfalto fluidificado (14 % v/v bunker y 86 % v/v asfalto AC-30, el mismo que utiliza RECOPE para poder elaborar las emulsiones asfálticas) debido a limitaciones de tiempo con el proyecto. Este asfalto fluidificado fue modificado en las mismas condiciones de operación dadas en las otras pruebas. También se siguió el mismo procedimiento para elaborar la solución jabonosa.

Los resultados de esta emulsión asfáltica modificada se presentan en el Cuadro 4.6.

Cuadro 4.6. Resultados de análisis para la CSS-1 modificada con caucho al 1 % m/m utilizada en las lechadas asfálticas, realizada con velocidades de 3300 rpm para el molino coloidal y 2100 rpm para la bomba centrífuga. pH de la solución jabonosa: 2,0.

Prueba	Resultado	Unidades	Requisito
Densidad a 25 °C	1043,7	kg/m ³	-
Viscosidad Saybold Furol a 25 °C	27,31	SSF	20 - 100 SSF
Fracción de masa de asfalto. Por Evaporación	64,5	% m/m	> 57
Penetración al residuo a 25 °C, 100 g, 5 s	82,50	1/10 mm	-
Fracción de masa retenido malla N° 20	0,48	%	< 0,1 %
Estabilidad 24 h, como fracción de masa de asfalto	0,2	%	< 1,0 %

Como se puede observar en el Cuadro 4.6, la emulsión asfáltica modificada al 1 % m/m obtuvo buenos resultados, comparada con las anteriores emulsiones asfálticas modificadas.

En la prueba de densidad a 25 °C, se obtuvo un valor mayor de 1043,7 kg/m³ comparada con la emulsión asfáltica sin modificar de 1011,7 kg/m³. Lo anterior obedece a la presencia del caucho.

En la prueba de viscosidad Saybold Furol a 25 °C, la emulsión asfáltica modificada obtuvo un valor de 27,31 SSF, un valor permitido, y la no modificada 77,93 SSF. Se presenta una mayor viscosidad de la emulsión asfáltica al estar modificada.

En el ensayo de penetración al residuo a 25 °C, 100 g y 5 s, se obtuvo un 82,50 (1/10 mm) en la emulsión asfáltica modificada al 1 % m/m y la emulsión no modificada obtuvo un 51,83 (1/10 mm). La mayor penetración en el ensayo obtenida en la emulsión asfáltica modificada se debió a que en el proceso de evaporación (ensayo de evaporación), como el asfalto se encuentra modificado, es menor el proceso de oxidación por tener mayor resistencia a este proceso (resistencia a la oxidación). Esto generó que el asfalto obtenido como residuo fuera menos duro y de mayor penetración.

En la prueba de masa de asfalto retenida en la malla N° 20, el resultado no fue exitoso para emulsión asfáltica modificada al 1 % m/m ya que se obtuvo 0,48 % de asfalto retenido. Pero comparado con las emulsiones asfálticas modificadas al 2 % m/m y 3 % m/m, el resultado fue muy bueno. Si se quiere disminuir ese porcentaje, es necesario modificar el asfalto fluidificado mediante otro equipo, o utilizar una malla N° 200 para obtener los glóbulos del tamaño adecuado.



Figura 4.14. Ensayo de masa retenida en la malla N° 20 de la emulsión asfáltica modificada al 1 % m/m

En el ensayo de estabilidad de 24 h, la emulsión asfáltica modificada al 1 % m/m obtuvo un excelente resultado de 0,2 % de fracción de masa de asfalto, comparado con un 0,5 % de la emulsión asfáltica sin modificar, en las mismas condiciones. Este valor en la estabilidad de la emulsión asfáltica modificada sugiere que la composición de la solución jabonosa fue ideal.



Figura 4.15. Emulsión asfáltica modificada al 1 % m/m de caucho.

De igual manera que en la emulsión asfáltica catiónica de rompimiento lento sin modificar, se realizaron las correspondientes lechadas asfálticas en las mismas condiciones de elaboración. El asfalto utilizado para elaborar las emulsión asfáltica modificada y sin modificar tuvo la caracterización del Cuadro 4.7.

Cuadro 4.7. Caracterización del asfalto AC-30 utilizado en el proyecto, ensayos elaborados por parte del control de calidad de RECOPE.

Prueba	Resultado	Unidades	Requisito
Densidad a 15 °C	1042	kg/m ³	-
Viscosidad a 60 °C	358	Pa.s	(240 - 360)
Penetración a 25 °C, 100 g, 5 s	54	1/10 mm	>50
Pérdida por calentamiento expresado como fracción de masa	0,280	%	< 1,0
Solubilidad en tricloroetileno	99,20	%	> 99,0
Viscosidad a 135 °C	532	mm ² /s	>350
Viscosidad post-pérdida 60 °C	661	Pa.s	<1500
Índice de susceptibilidad térmica, VTS	3,5	Unidades	(3,3 a 3,9)
Relación de viscosidades	1,8	-	-

Dado que se quiso evaluar la adhesividad presentada por la emulsión asfáltica modificada y una no modificada con el agregado, se escogió la prueba de desnudamiento TB 114 de lechadas asfálticas.

En la comparación de la emulsión asfáltica elaborada en la planta piloto convencional con la modificada mediante polímero al 1 % m/m de caucho con base en la masa de asfalto fluidificado, se realizó un diseño factorial 2^3 . Los tres factores analizados fueron: la incorporación de caucho en base seca, la incorporación de pavimento reciclado y el tipo de emulsión asfáltica. Este diseño factorial se realizó por duplicado.

Cuadro 4.8. Diseño factorial aplicado a las lechadas asfálticas fabricadas con emulsión de la planta piloto.

VARIABLES DE DISEÑO	Nivel alto (+)	Nivel bajo (-)
% de polímero (vía húmeda)	1 % m/m	0 % m/m
% de polímero (vía seca)	20 % m/m	0 % m/m
% de pavimento reciclado	20 % m/m	0 % m/m

Para obtener una referencia de las emulsiones asfálticas generadas en la planta piloto, se realizaron las lechadas asfálticas también con una emulsión asfáltica catiónica de rompimiento lento producida por Recope.

En las figuras que se presentan a continuación, se enseña el proceso de mezclado de las diferentes emulsiones con la mezcla de agregado correspondiente:

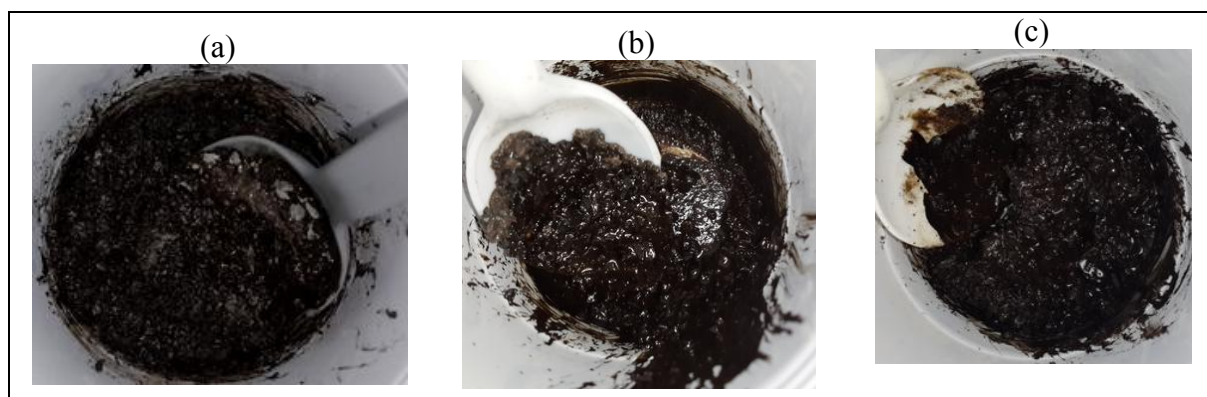


Figura 4.16. Mezclado de Lechadas asfálticas elaboradas con 0 % m/m RAP y 20 % m/m caucho vía seca. (a) Lechada asfáltica con emulsión asfáltica catiónica lenta de Recope (b) Lechada asfáltica con CSS-1 (c) Lechada asfáltica con CSS-1M al 1 % m/m de caucho.

Como se puede observar en la Figura 4.16, en el mezclado de una emulsión asfáltica con el agregado que contiene un 20 % m/m de caucho en base seca, las mezclas con las emulsiones asfálticas elaboradas en la planta piloto dieron mejores resultados, mostrando un aspecto de barro húmedo. En el caso de la mezcla con la emulsión asfáltica de Recope, hubo un rompimiento prematuro, observándose como barro seco.

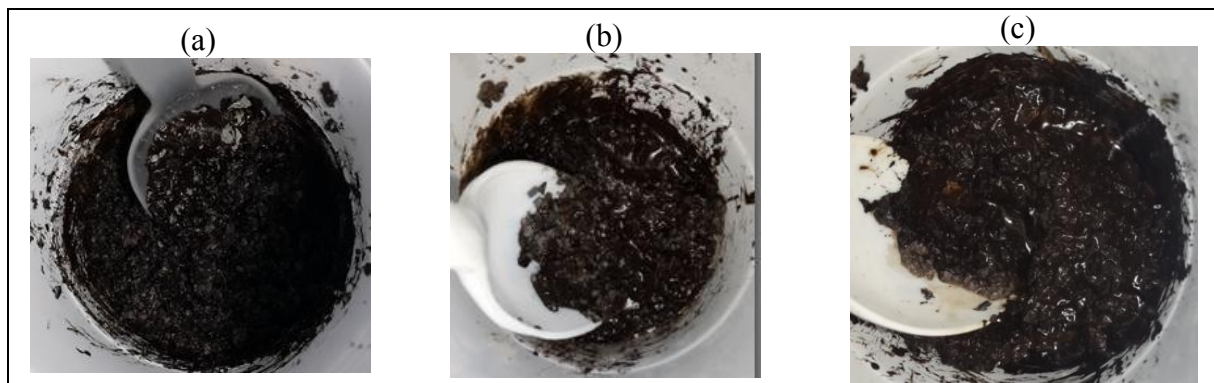


Figura 4.17. Mezclado de Lechadas asfálticas elaboradas con 20 % m/m RAP y 20 % m/m caucho vía seca. (a) Lechada asfáltica con emulsión lenta de Recope (b) Lechada asfáltica con CSS-1 (c) Lechada asfáltica con CSS-1M al 1 % m/m de caucho.

En el mezclado de la lechada asfáltica que contenía un 20 % m/m de pavimento reciclado y un 20 % de caucho vía seca, se obtuvo un comportamiento similar a las lechadas asfálticas mencionadas anteriormente. El mejor comportamiento de mezclado se obtuvo con las emulsiones elaboradas en la planta piloto, donde el rompimiento no fue prematuro, observándose un barro húmedo. Cabe mencionar que las tres lechadas asfálticas se realizaron en las mismas condiciones.

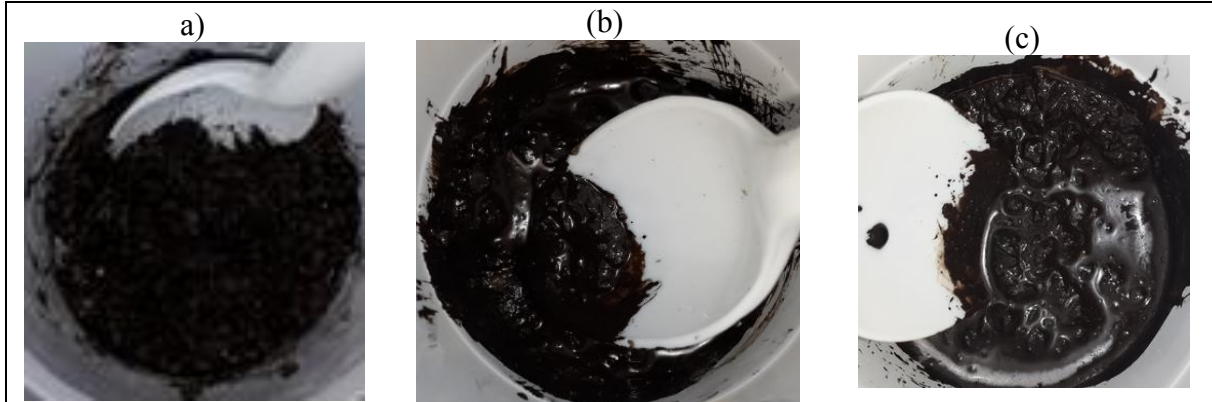


Figura 4.18. Mezclado de Lechadas asfálticas elaboradas con 20 % m/m RAP y 0 % m/m caucho vía seca. (a) Lechada asfáltica con emulsión lenta de Recope (b) Lechada asfáltica con CSS-1 (c) Lechada asfáltica con CSS-1M al 1 % m/m de caucho.

En el caso del mezclado de las lechadas asfálticas con un 20 % m/m de pavimento reciclado, las lechadas que contenían la emulsiones elaboradas en la planta piloto también dieron los mejores resultados. El barro formado tenía un aspecto muy húmedo y bastante fluido, perfecto para elaborar una lechada asfáltica. Para la lechada asfáltica elaborada con la emulsión de Recope, se obtuvo un aspecto seco similar al de los resultados anteriores, no ideal.

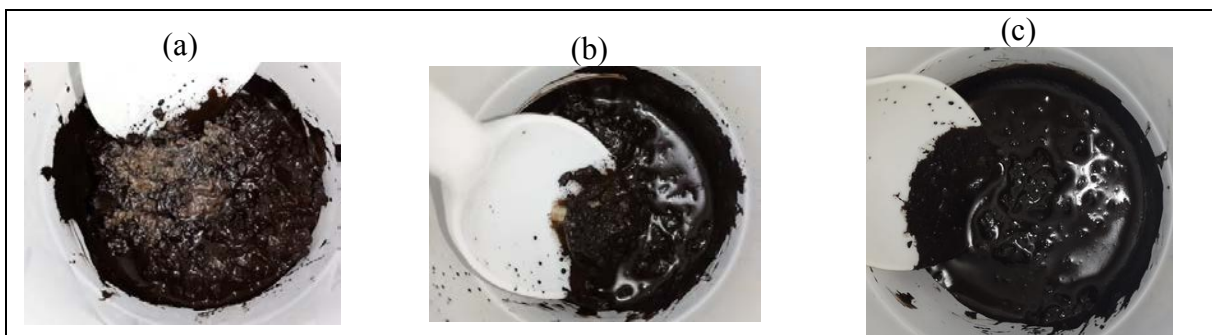


Figura 4.19. Mezclado de Lechadas asfálticas elaboradas con 0 % m/m RAP y 0 % m/m caucho vía seca. (a) Lechada asfáltica con emulsión lenta de Recope (b) Lechada asfáltica con CSS-1 (c) Lechada asfáltica con CSS-1M al 1 % m/m de caucho.

Por último, para el mezclado de las lechadas asfálticas únicamente con agregado nuevo, el comportamiento fue similar al mencionado anteriormente, bastante seco para el elaborado

con emulsión de Recope y un rompimiento prematuro. En las demás emulsiones se observó una buena lechada asfáltica.

Con este primer resultado de elaboración de las lechadas asfálticas, se puede concluir que las emulsiones asfálticas poseen una buena composición y un buen comportamiento.

A continuación se presentan los resultados observados en las pruebas de desnudamiento para las lechadas asfálticas elaboradas con emulsión asfáltica de Recope.

Las lechadas asfálticas fueron llevadas a un proceso de curado en el horno a una temperatura de 60 °C hasta obtener una masa aproximadamente constante, antes de realizar la prueba de desnudamiento, que se realizó en forma aleatoria.

Cuadro 4.9. Resultados de la prueba de desnudamiento de la lechada asfáltica elaborada con emulsión asfáltica catiónica de rompimiento lento elaborada por Recope.

Corrida	Lechada asfáltica	Estimación en prueba de desnudamiento
1	20 % m/m RAP y 0 % m/m caucho	80 %
2	20 % m/m RAP y 20 % m/m caucho	80 %
3	0 % m/m RAP y 20 % m/m caucho	70 %
4	20 % m/m RAP y 20 % m/m caucho	80 %
5	0 % m/m RAP y 20 % m/m caucho	75 %
6	0 % m/m RAP y 0 % m/m caucho	70 %
7	0 % m/m RAP y 0 % m/m caucho	65 %
8	20 % m/m RAP y 0 % m/m caucho	75 %

Como se puede observar en el Cuadro 4.9, los mejores resultados de cubrimiento de asfalto lo mostraron las corridas 2 y 4 con un 80 % de cubrimiento. No obstante, tampoco hubo un buen comportamiento y no se cumplió con el mínimo requerido de un 90 %, para una lechada asfáltica. En el caso de las corridas 1 y 8 que contenían un 20% de pavimento reciclado y 0% de caucho, se obtuvieron los valores parecidos a los anteriores, pero las lechadas asfálticas producidas fueron más compactas.

A continuación se presenta las fotografías de las lechadas asfálticas antes y después de pasar la prueba de desnudamiento.

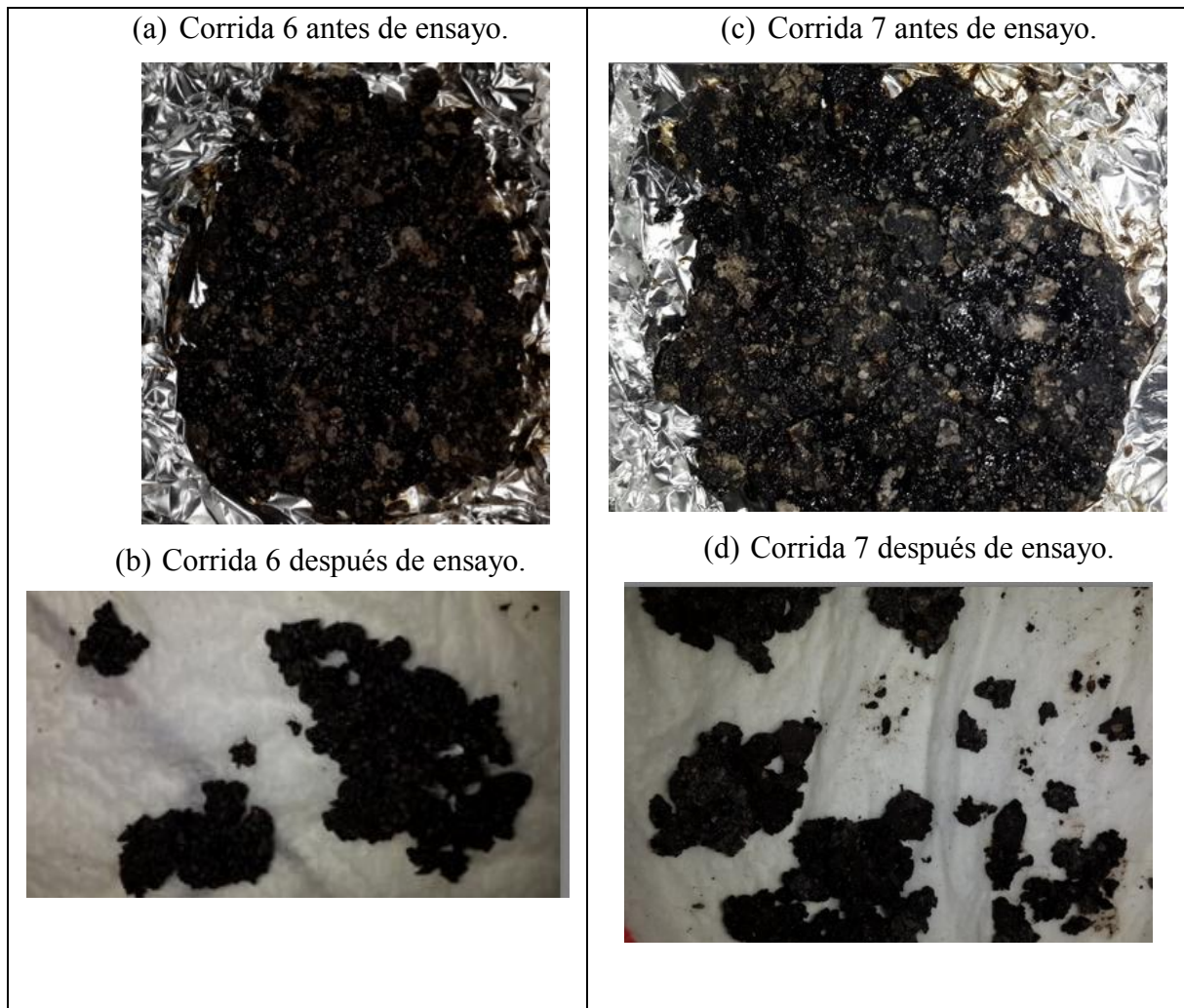


Figura 4.20. Ensayo de desnudamiento por humedad para las lechadas con 0 % m/m RAP y 0 % m/m caucho base seca con emulsión asfáltica de Recope.

Como se observa en la Figura 4.20, las lechadas asfálticas que contenían un 0 % m/m de pavimento reciclado y 0 % m/m de caucho incorporado en base seca, elaboradas con la emulsión asfáltica de Recope, no mostraron un buen cubrimiento del asfalto, tal y como se observó antes de realizar la prueba de desnudamiento. Lo anterior quedó confirmado al pasar la prueba de desnudamiento. Es posible observar en las dos réplicas, pedazos de

uniones de piedras grandes y medianas, también se observaron piedras pequeñas y medianas no cubiertas de asfalto.

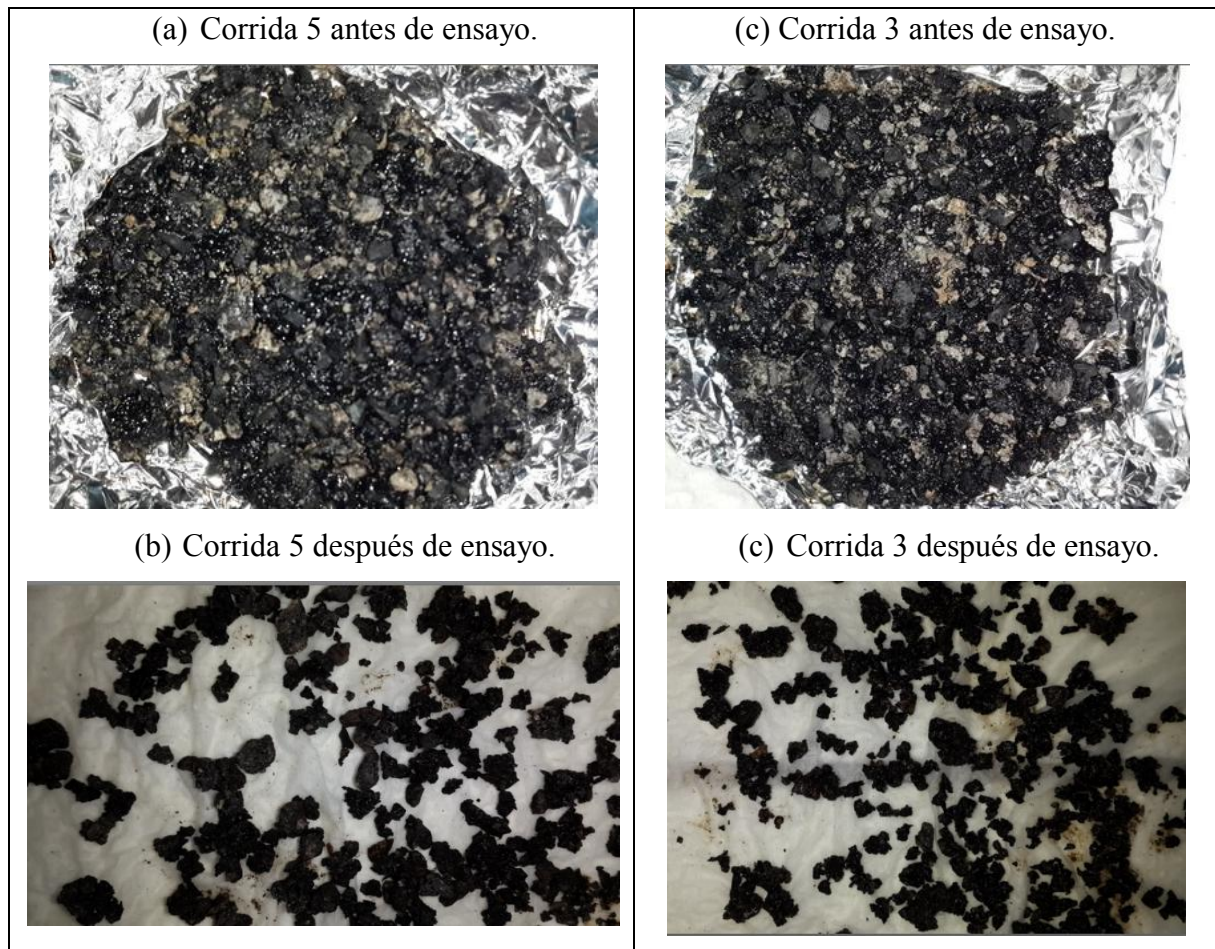


Figura 4.21. Ensayo de desnudamiento por humedad para las lechadas 0 % m/m RAP y 20 % m/m caucho base seca con emulsión asfáltica de Recope.

Esta lechada asfáltica elaborada con 0 % m/m de pavimento asfáltico reciclado (RAP) y 20 % m/m de caucho incorporado en base seca, y hecha con emulsión asfáltica de Recope, también mostró un mal cubrimiento del asfalto en el agregado. Al aplicar la prueba de desnudamiento por humedad, hubo un gran desprendimiento del agregado en la lechada asfáltica, se observaron piedras pequeñas y medianas sin cubrir y se obtuvieron muy pocas uniones de agregados.

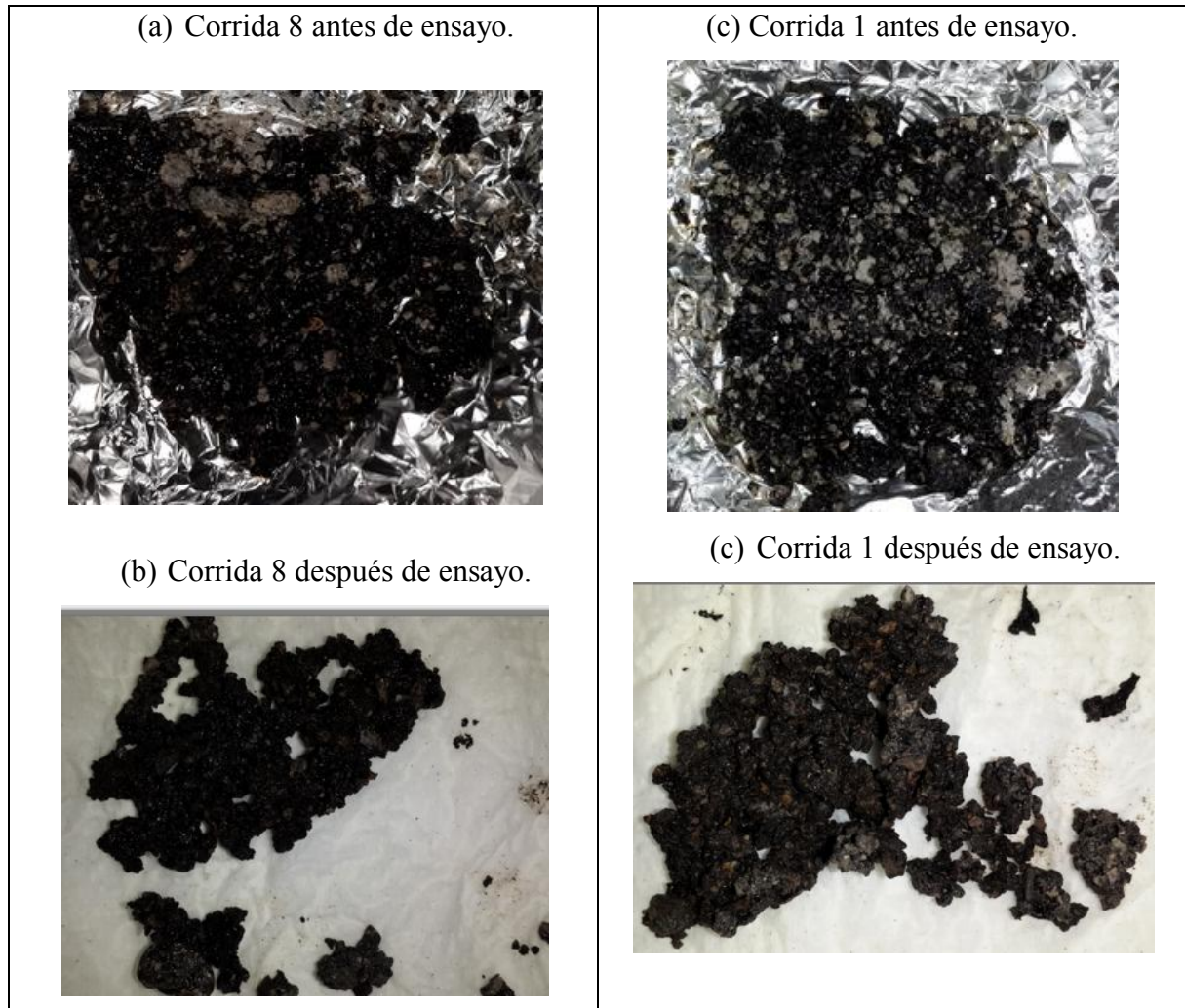


Figura 4.22 Ensayo de desnudamiento por humedad para las lechadas 20 % m/m RAP y 0 % m/m caucho base seca con emulsión asfáltica de Recope.

En esta lechada asfáltica con un 20 % m/m de pavimento reciclado y 0 % m/m de caucho base seca elaborada con emulsión asfáltica de Recope se obtuvo un mayor cubrimiento del asfalto comparado con las lechadas anteriores, como se observó en las lechadas asfálticas antes de realizar la prueba de desnudamiento por humedad. Al realizar la prueba de desnudamiento, se observó un resultado con uniones más grandes de agregado, poco desprendimiento de asfalto y muy pocas piedras descubiertas.

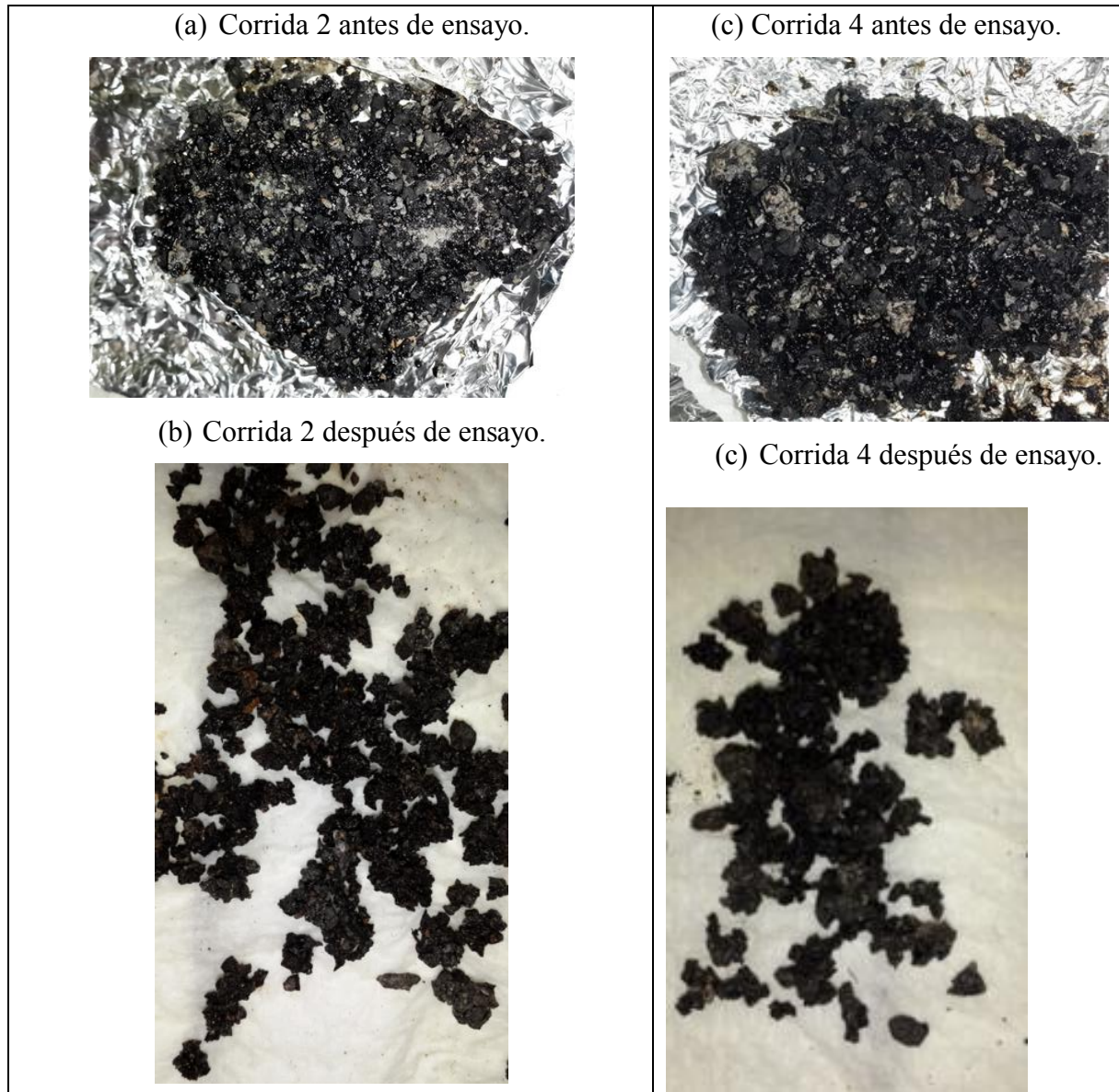


Figura 4.23. Ensayo de desnudamiento por humedad para las lechadas 20 % m/m RAP y 20 % m/m caucho base seca con emulsión asfáltica de Recope.

Al igual que las demás lechadas asfálticas elaboradas con emulsión asfáltica de rompimiento lento de Recope, esta obtuvo un resultado similar ya que no mostró un buen cubrimiento del asfalto sobre el agregado. Al realizar la prueba de desnudamiento, se observaron piedras medianas y grandes unidas entre sí, y muy poco desprendimiento de asfalto.

Después de observar los resultados obtenidos de una lechada asfáltica elaborada con una emulsión asfáltica de rompimiento lento de Recope, se realizó el respectivo diseño factorial y se efectuaron las pruebas de desnudamiento a las lechadas asfálticas preparadas con emulsión de la planta piloto.

Cuadro 4.10. Resultados de la prueba de desnudamiento de la lechada asfáltica elaborada con emulsión asfáltica de planta piloto.

Corrida	Lechada asfáltica	Estimación en prueba de desnudamiento
1	0 % m/m RAP y 0 % m/m caucho y CSS-1M	99 %
2	20 % m/m RAP y 20 % m/m caucho y CSS-1M	85 %
3	0 % m/m RAP y 20 % m/m caucho y CSS-1M	90 %
4	20 % m/m RAP y 20 % m/m caucho y CSS-1	85 %
5	20 % m/m RAP y 20 % m/m caucho y CSS-1M	85 %
6	0 % m/m RAP y 20 % m/m caucho y CSS-1	80 %
7	20 % m/m RAP y 0 % m/m caucho y CSS-1M	95 %
8	0 % m/m RAP y 20 % m/m caucho y CSS-1M	85 %
9	0 % m/m RAP y 0 % m/m caucho y CSS-1M	98 %
10	20 % m/m RAP y 0 % m/m caucho y CSS-1	95 %
11	0 % m/m RAP y 20 % m/m caucho y CSS-1	85 %
12	20 % m/m RAP y 0 % m/m caucho y CSS-1M	98 %
13	0 % m/m RAP y 0 % m/m caucho y CSS-1	90 %
14	20 % m/m RAP y 20 % m/m caucho y CSS-1	80 %
15	20 % m/m RAP y 0 % m/m caucho y CSS-1	92 %
16	0 % m/m RAP y 0 % m/m caucho y CSS-1	92 %

Las lechadas asfálticas que obtuvieron los mejores resultados en la prueba de desnudamiento fueron las confeccionadas con emulsión asfáltica modificada, 99 % y 98 % de asfalto retenido.

Otro buen resultado en la prueba de desnudamiento se presentó en las lechadas asfálticas elaboradas con 20 % m/m de pavimento reciclado y emulsión modificada, con un 95 % y 98 % de asfalto retenido. Para el caso de la lechada con emulsión sin modificar y con 20 % m/m de pavimento reciclado, se obtuvo un buen resultado con 95 % y un 92 %.

A continuación se presentan los resultados antes y después de las pruebas de desnudamiento de las lechadas asfálticas y otras características adicionales.

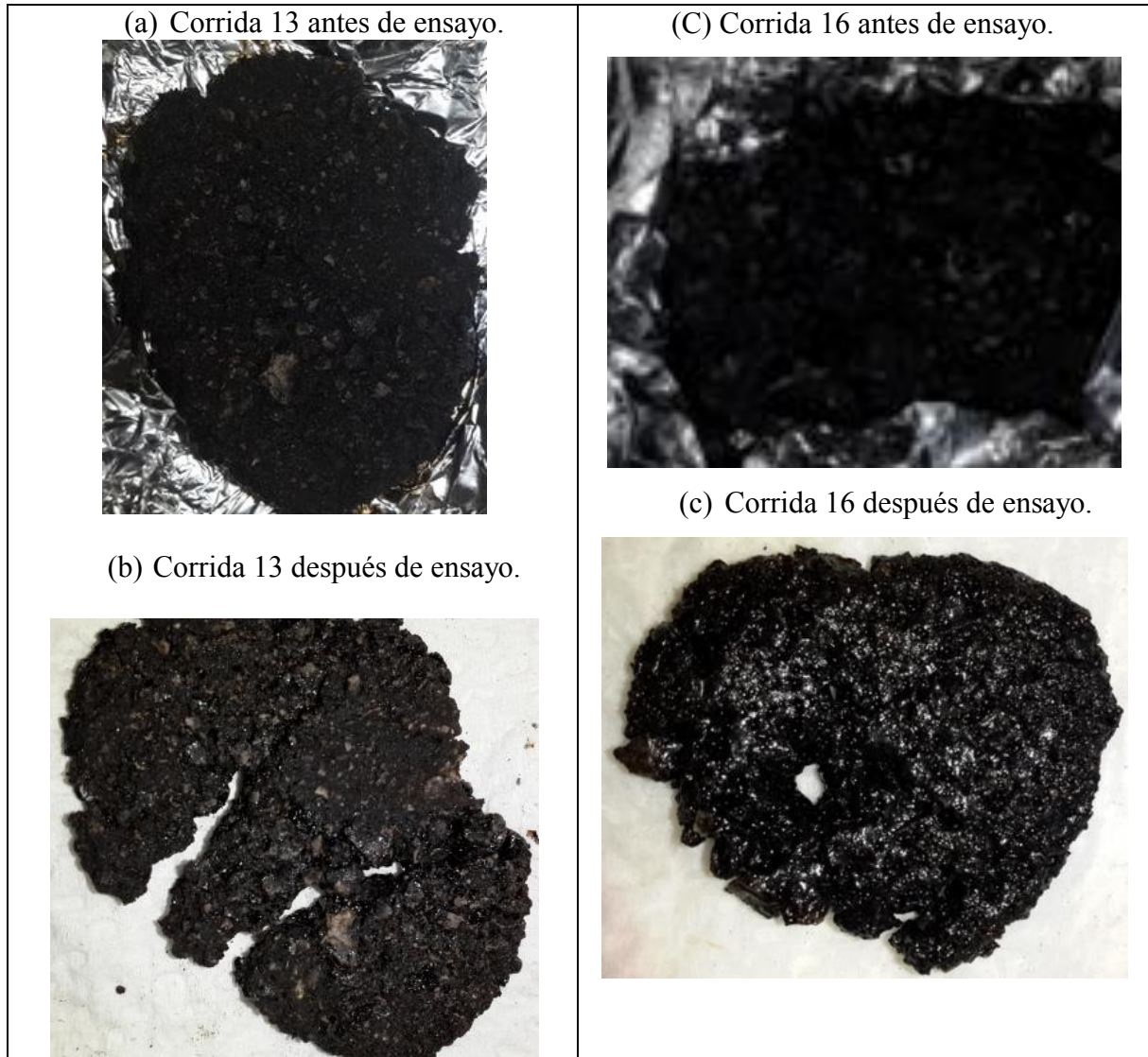


Figura 4.24. Ensayo de desnudamiento por humedad para las lechadas 0 % m/m RAP, 0 % m/m caucho y CSS-1.

Tal y como se observó en las lechadas asfálticas que contenían 0 % m/m de pavimento reciclado y 0 % m/m de caucho incorporado en base seca, con emulsión asfáltica sin modificar y antes de realizar la prueba de desnudamiento, hubo un buen cubrimiento del asfalto sobre el agregado, en comparación con las lechadas realizadas con emulsión de Recope. En la corrida 13, se observó un menor cubrimiento del asfalto en las piedras. Aún

así, la muestra fue estable al pasar por la prueba de desnudamiento, la cual se mantuvo unida, indicando que el asfalto penetró y que hubo un buen mezclado.

En la corrida 16 se obtuvieron resultados satisfactorios en cuanto a la adhesión y cubrimiento del asfalto sobre el agregado.

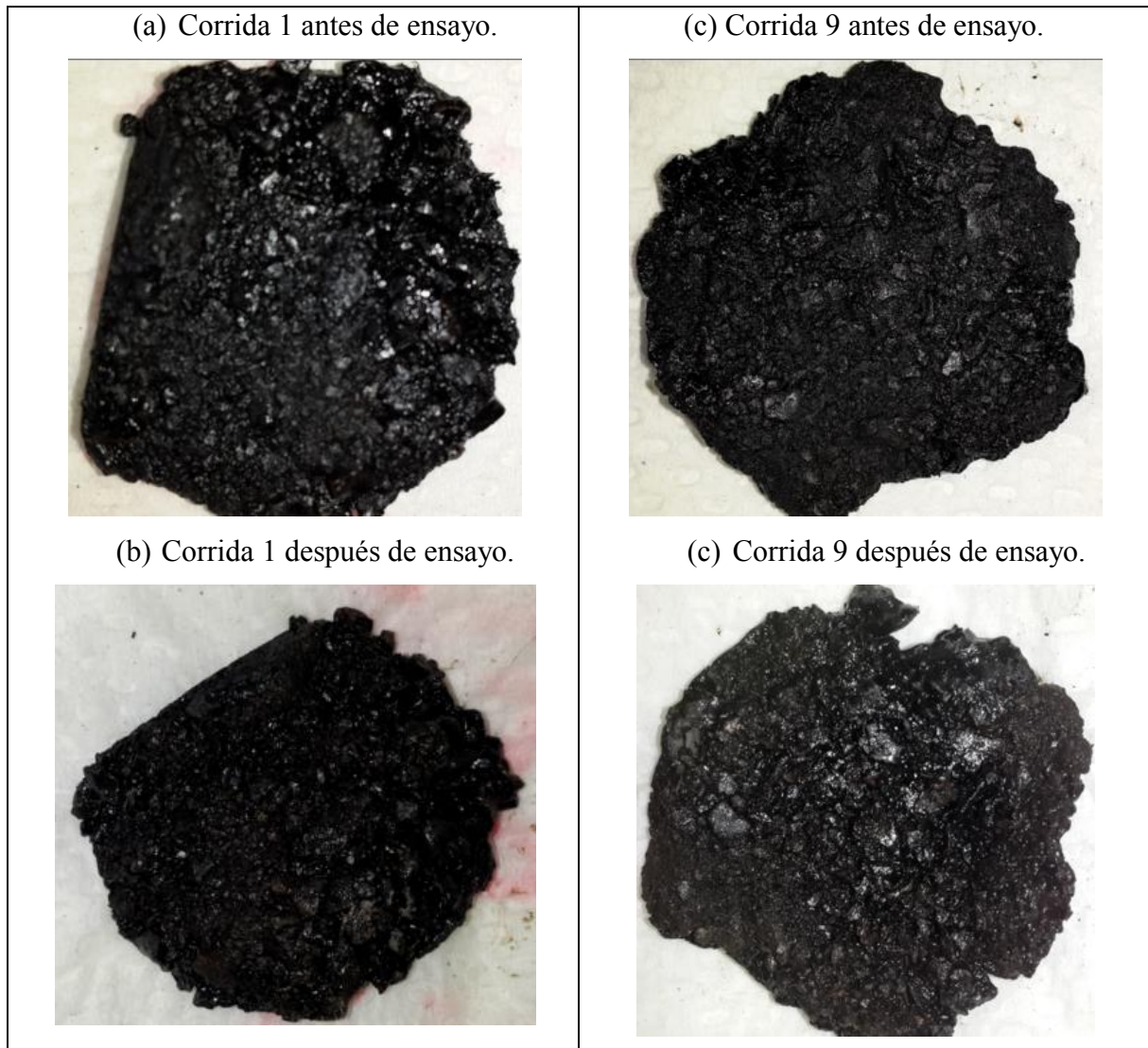


Figura 4.25. Ensayo de desnudamiento por humedad para las lechadas 0 % m/m RAP, 0 % m/m caucho y CSS-1M al 1 % m/m de caucho.

En el caso de la emulsión modificada al 1 % m/m presente en la lechada asfáltica, con las mismas características de agregados que la anterior (0 % m/m de pavimento reciclado y un 0 % m/m de caucho incorporado en base seca), los resultados fueron sorprendentes, por lo tanto la emulsión asfáltica si funcionó para estas condiciones. Al realizar la prueba de desnudamiento, las lechadas asfálticas curadas mostraron un buen cubrimiento del asfalto sobre el agregado. La lechada asfáltica con estas características se mantuvo intacta, hubo muy poco desprendimiento del asfalto y muy buena adherencia y cohesión.

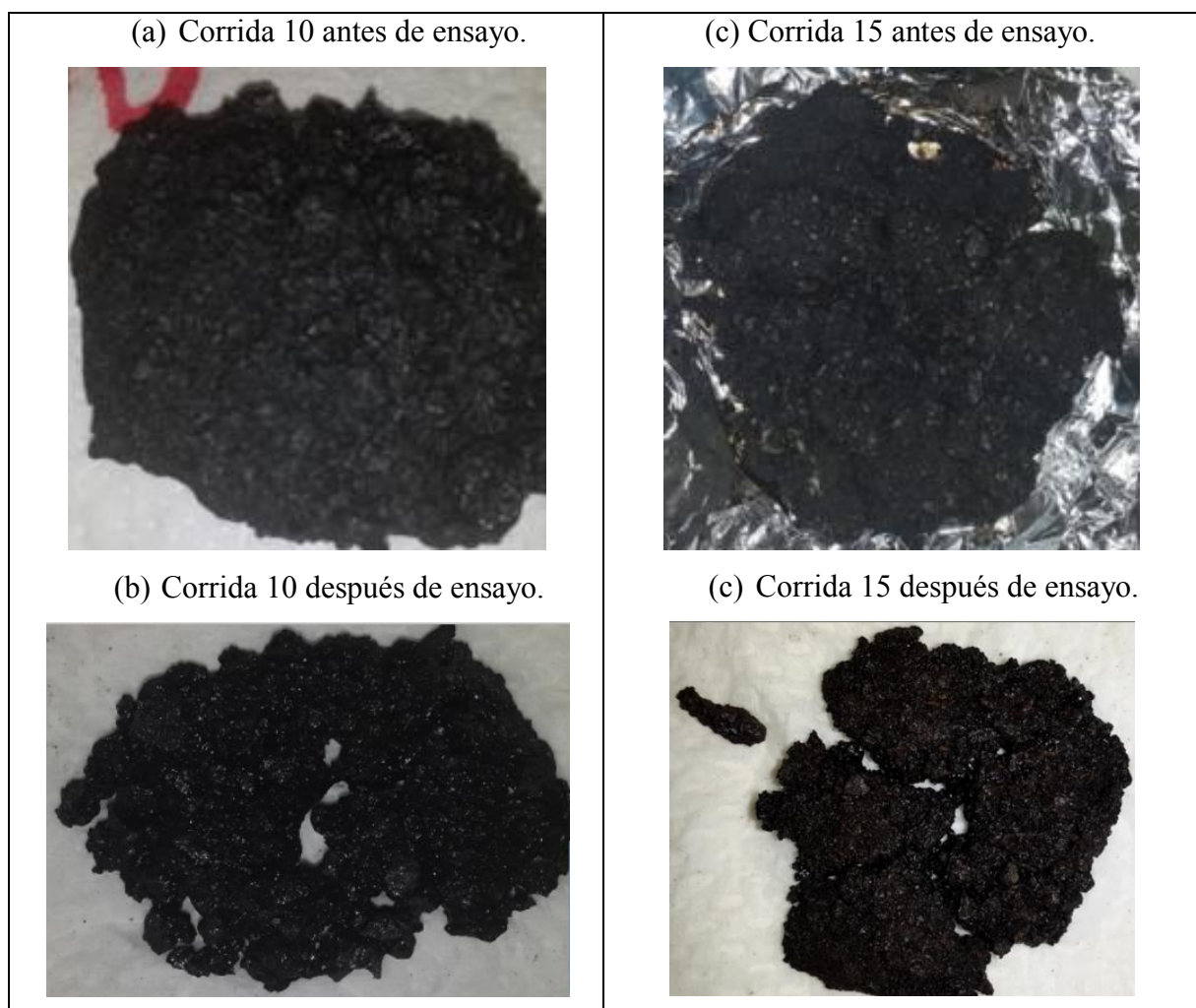


Figura 4.26. Ensayo de desnudamiento por humedad para las lechadas 20 % m/m RAP, 0 % m/m caucho y CSS-1.

La lechada asfáltica curada con un 20 % m/m de pavimento reciclado y emulsión sin modificar, mostró un buen cubrimiento del asfalto. Sin embargo, se observaron partes con coloración café descubiertas. Al realizar la prueba de desnudamiento, se detectó poco desprendimiento del asfalto, una unión fuerte de la lechada asfáltica con alta adherencia y cohesión de la mezcla asfáltica y pocas fisuras.

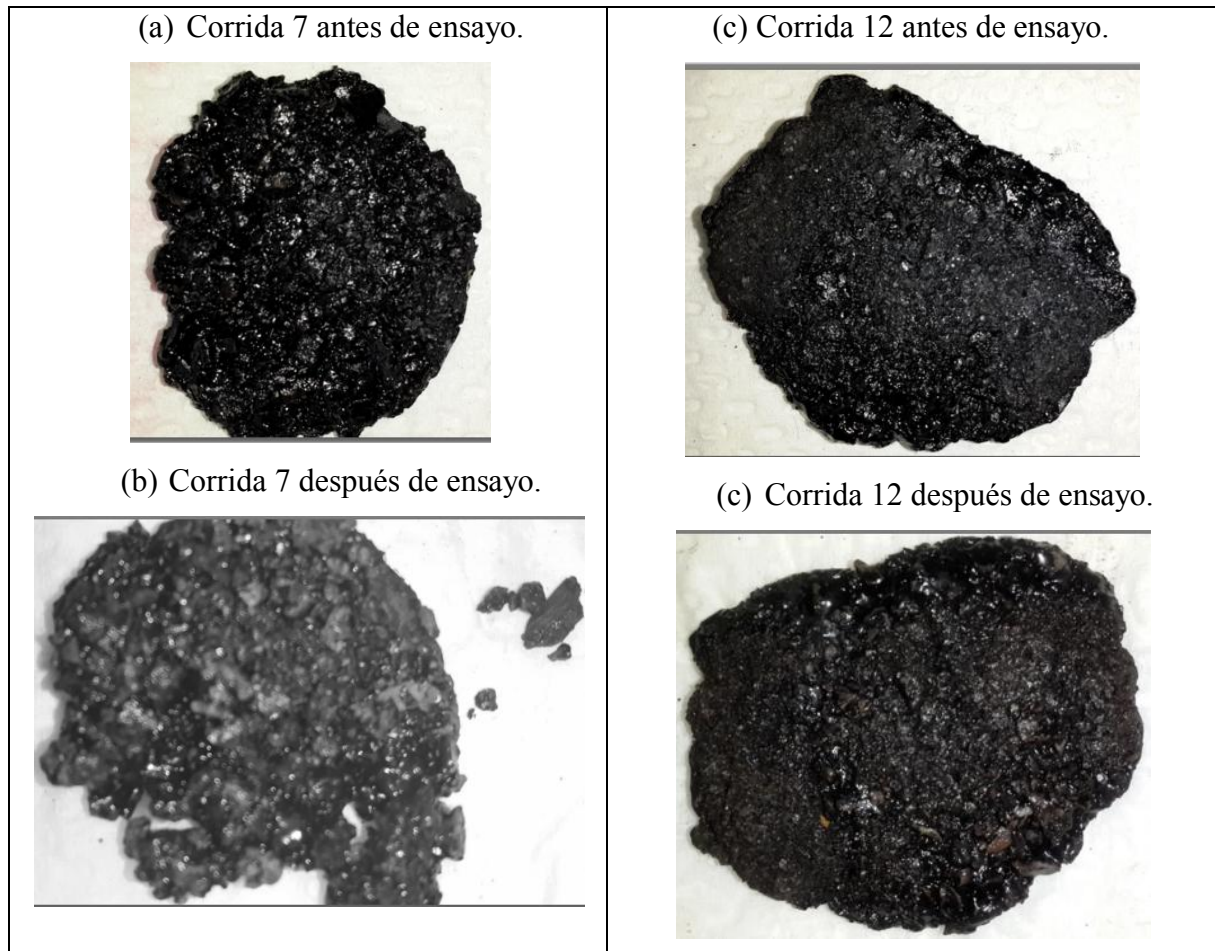


Figura 4.27. Ensayo de desnudamiento por humedad para las lechadas 20 % m/m RAP, 0 % m/m caucho y CSS-1M al 1 % m/m de caucho.

Con respecto a la lechada asfáltica con las mismas características, pero con emulsión asfáltica modificada al 1 % m/m, hubo un cambio. Las lechadas asfálticas curadas mostraron un excelente cubrimiento del asfalto sobre el agregado, durante la prueba de

desnudamiento por humedad. En dicha prueba, se observó muy poco desprendimiento del asfalto, y una buena adherencia y cohesión de la mezcla asfáltica.

En la corrida 7, se desprendió un poco de agregado producto del golpe que tuvo al caer al fondo del beaker, pero su estructura se observó muy sólida y unida.

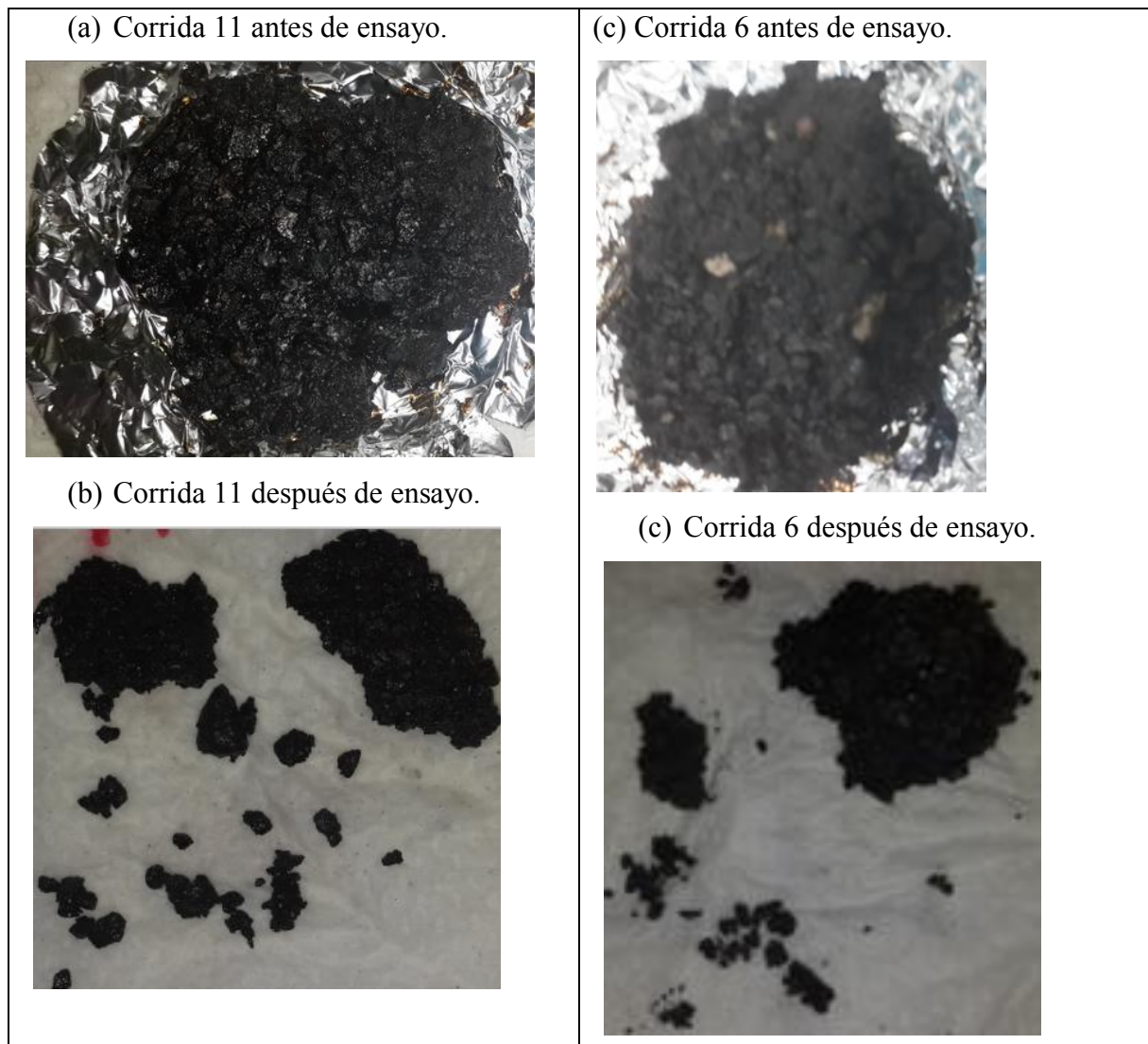


Figura 4.28. Ensayo de desnudamiento por humedad para las lechadas 0 % m/m RAP, 20 % m/m caucho y CSS-1.

La lechada asfáltica curada conformada de 0 % m/m de pavimento reciclado, 20 % m/m de caucho en base seca y emulsión asfáltica sin modificar, mostró un buen cubrimiento del asfalto sobre el agregado, pero con pequeñas partes sin cubrir y una coloración café.

Al realizar la prueba de desnudamiento, se observó bastante desprendimiento del agregado y poco de asfalto, con partes de agregados unidas y estables.

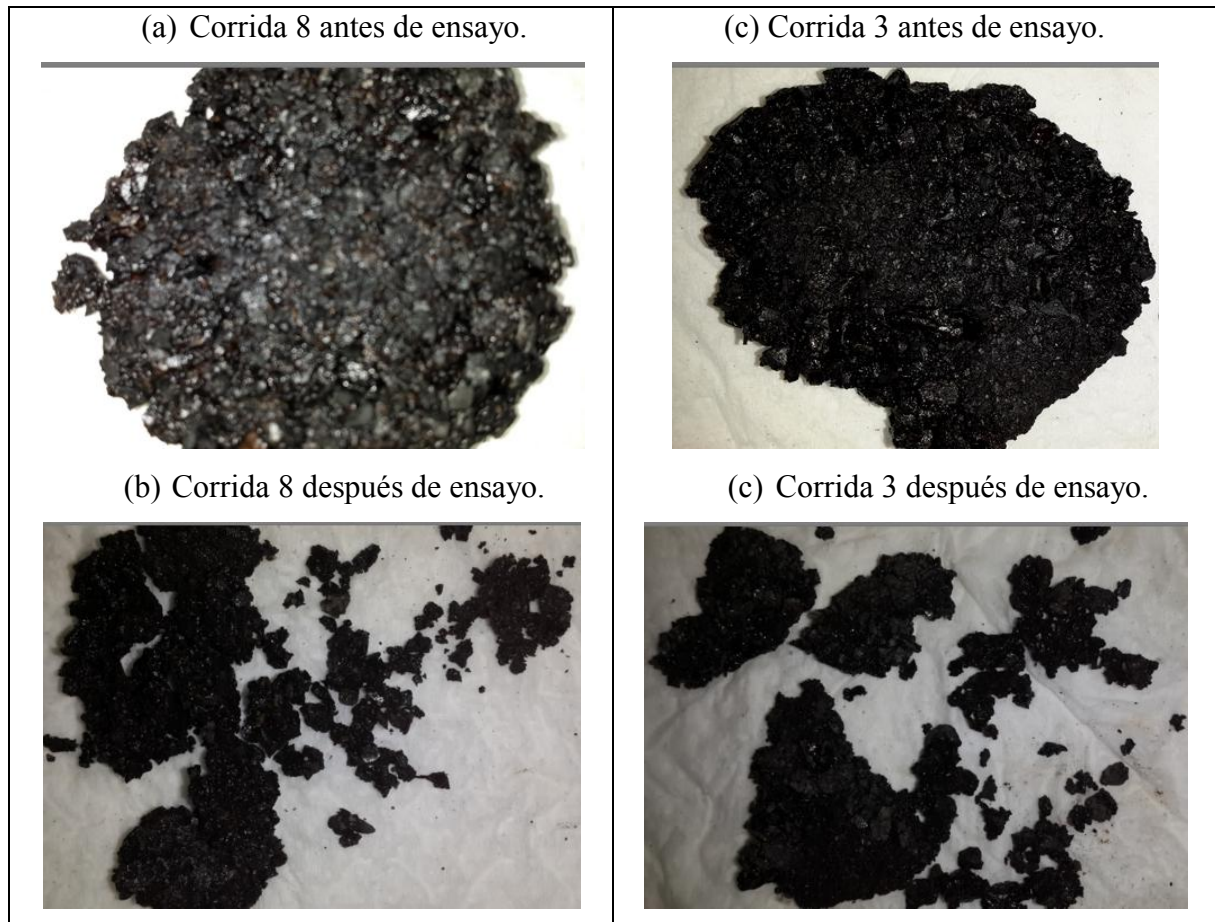


Figura 4.29. Ensayo de desnudamiento por humedad para las lechadas 0 % m/m RAP, 20 % m/m caucho y CSS-1M al 1 % m/m de caucho.

Las lechadas asfálticas curadas y conformadas con 0 % m/m de pavimento reciclado, 20 % m/m de caucho en base seca y la emulsión asfáltica modificada al 1 % m/m de caucho, mostraron un buen cubrimiento del asfalto en el agregado, como se puede observar antes de realizar la prueba de desnudamiento por humedad.

El resultado de la prueba de desnudamiento por humedad mostró poco desprendimiento del asfalto, bastante desprendimiento del agregado, poca estabilidad, falta de adhesividad y cohesión en la mezcla asfáltica. La presencia del caucho incorporado en vía seca, dio inestabilidad a la lechada asfáltica al pasar por el ensayo de desnudamiento por humedad.

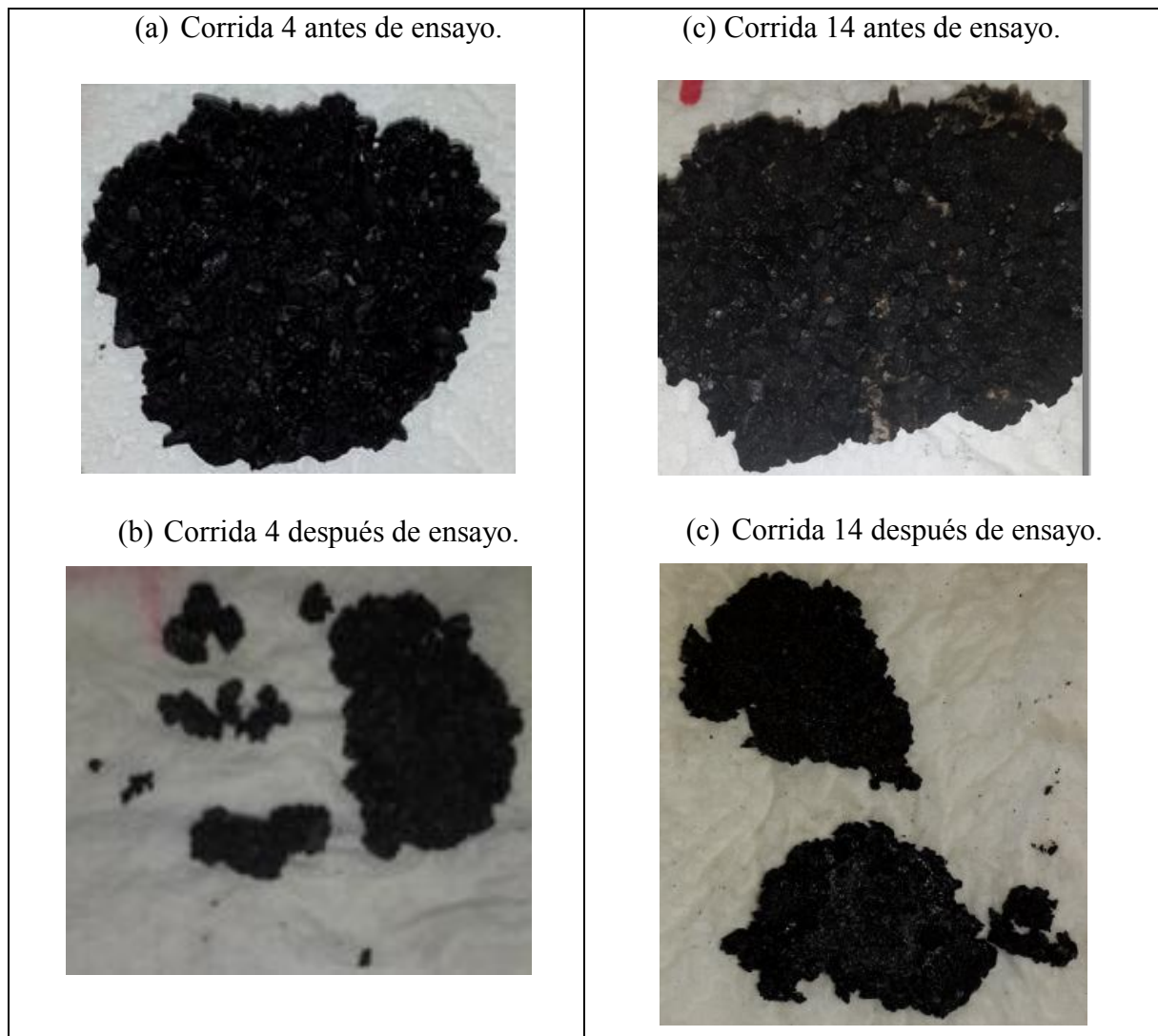


Figura 4.30. Ensayo de desnudamiento por humedad para las lechadas 20 % m/m RAP, 20 % m/m caucho y CSS-1.

Las lechadas asfálticas curadas con 20 % m/m de pavimento reciclado, 20 % m/m de caucho incorporado en seco y emulsión asfáltica de rompimiento lento sin modificar,

mostraron un buen cubrimiento del asfalto sobre la mezcla de agregado, con pocas zonas sin cubrir.

Al pasar por el ensayo de desnudamiento por humedad, se observaron grandes grupos aglomerados, con poco desprendimiento del agregado. Además se observó una relativa falta de cohesión, adhesión y estabilidad.

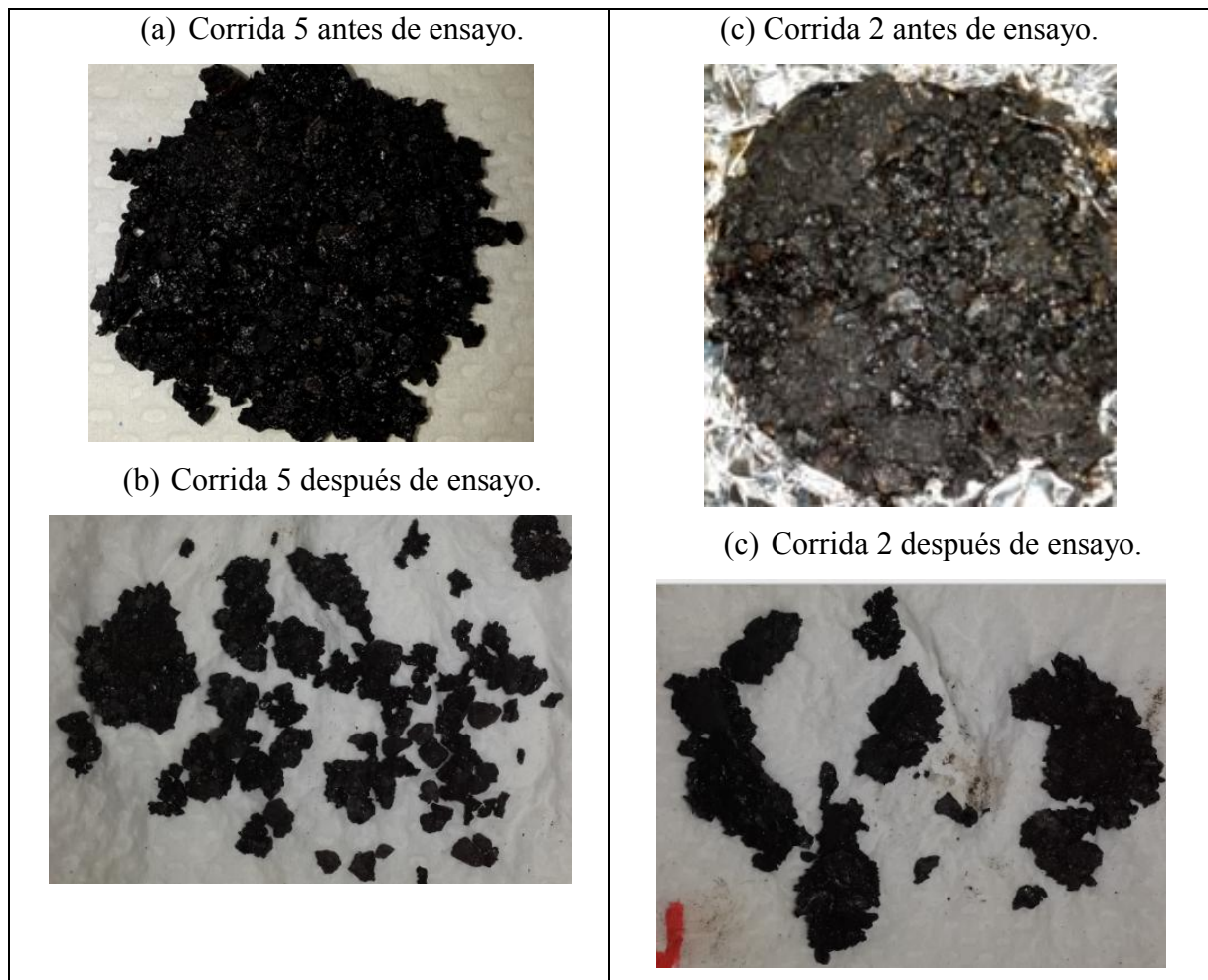


Figura 4.31. Ensayo de desnudamiento por humedad para las lechadas 20 % m/m RAP, 20 % m/m caucho y CSS-1M al 1 % m/m de caucho.

La lechada asfáltica curada con 20 % m/m de pavimento reciclado, 20 % m/m de caucho incorporado en base seca y la emulsión asfáltica modificada, también mostró un buen cubrimiento del asfalto sobre la mezcla del agregado. El resultado en la prueba de desnudamiento no fue mejor que en las lechadas anteriores, producto de la falta de estabilidad de esta. Hubo bastante desprendimiento del agregado y un poco de desprendimiento de asfalto.

Mediante el método de Yates se realizaron los cálculos del diseño factorial 2^3 , para determinar los efectos e interacciones de las variables que influyeron, con un 95 % de nivel de confianza (Box, Hunter, & Hunter, 1993).

En el Cuadro 4.11, se presentan los factores del diseño para el análisis estadístico y sus respectivos niveles para el diseño factorial.

Cuadro 4.11. Los factores del diseño para el diseño factorial del proyecto.

Factores de diseño	Simbología	Nivel alto (+)	Nivel bajo (-)
% de polímero (incorporación vía húmeda)	H	1 % m/m	0 % m/m
% de caucho molido (incorporación vía seca)	S	20 % m/m	0 % m/m
% de pavimento reciclado	P	20 % m/m	0 % m/m

En el Cuadro 4.12, se presenta el diseño factorial 2^3 con unidades originales de las variables y con los porcentajes de desnudamiento promedios en la prueba de desnudamiento por humedad.

Cuadro 4.12. Diseño factorial con las unidades originales de las variables.

N_i	% de polímero (incorporación vía húmeda), H	% caucho molido (incorporación vía seca), S	% de pavimento reciclado, P	% de desnudamiento promedio
1	0	0	0	91,0
2	1	0	0	98,5
3	0	20	0	82,5
4	1	20	0	87,5
5	0	0	20	93,5
6	1	0	20	96,5
7	0	20	20	82,5
8	1	20	20	85,0

Nota: N_i corresponde al número de experimento.

En el siguiente Cuadro 4.13, se encuentra la codificación del cuadro anterior.

Cuadro 4.13. Diseño factorial con las unidades codificadas de las variables.

N_i	% de polímero (incorporación vía húmeda), H	% caucho molido (incorporación vía seca), S	% de pavimento reciclado, P	% de desnudamiento promedio
1	-	-	-	91,0
2	+	-	-	98,5
3	-	+	-	82,5
4	+	+	-	87,5
5	-	-	+	93,5
6	+	-	+	96,5
7	-	+	+	82,5
8	+	+	+	85,0

Nota: N_i corresponde al número de experimento.

Posteriormente se realizaron los cálculos estadísticos mediante el Algoritmo de Yates para observar cuáles variables influían en la adhesividad del asfalto sobre el agregado.

Cuadro 4.14. Algoritmo de Yates para el diseño factorial 2^3 .

N_i	Algoritmo					Identificación
	(1)	(2)	(3)	Media	Estimación	
1	189,5	359,5	717	8	89,625	Media
2	170	357,5	18	4	4,5	H
3	190	12,5	-42	4	-10,5	S
4	167,5	5,5	-3	4	-0,75	HS
5	7,5	-19,5	-2	4	-0,50	P
6	5	-22,5	-7	4	-1,75	HP
7	3	-2,5	-3	4	-0,75	SP
8	2,5	-0,5	2	4	0,75	HSP

Nota: N_i corresponde al número de experimento.

Como se observa en Cuadro 4.14, se obtuvo un valor promedio de 89,625 % en la prueba de desnudamiento de todas las lechadas asfálticas elaboradas con emulsión asfáltica generada en la planta piloto.

Cuadro 4.15. Estimación de la varianza del diseño factorial 2^3 .

N_i	H	S	P	Replica 1	Replica 2	Promedio	Diferencia	Varianza estimada en cada conjunto de condiciones $s_i^2 = (diferencia)^2/2$
1	-	-	-	92	90	91	2	2,00
2	+	-	-	99	98	98,5	1	0,50
3	-	+	-	85	80	82,5	5	12,50
4	+	+	-	85	90	87,5	5	12,50
5	-	-	+	95	92	93,5	3	4,50
6	+	-	+	95	98	96,5	3	4,50
7	-	+	+	85	80	82,5	5	12,50
8	+	+	+	85	85	85	0	0,00
							Total, $S_{i\ total}^2$	49,00

Nota: N_i corresponde al número de experimento.

Cuadro 4.16. Valores necesarios para la estimación de la desviación típica del diseño factorial 2^3 .

Dato	Valor
Grados de libertad (v):	8
Media de las varianzas estimadas (σ^2):	6,125
Efecto (V^F)	1,531
Desviación típica (s)	1,24

En la Figura 4.32, se observan los efectos e interacciones que se deben tomar en consideración para realizar un análisis más profundo.

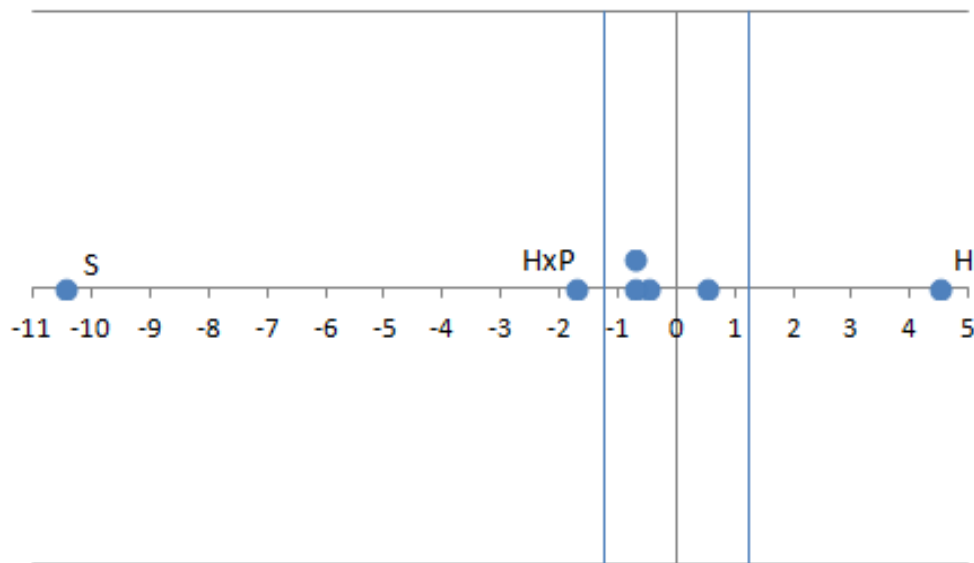


Figura 4.32. Gráfica de efecto e interacciones del diseño factorial 2^3 .

Como se puede observar en la Figura 4.32, los efectos de incorporación de caucho mediante vía seca (S) y por vía húmeda (H) mostraron resultados significativos, por estar fuera del 95 % del nivel de confianza.

Lo anterior indica que estos efectos se deben seguir analizando por separado, para observar cómo varía la adhesividad al aumentar el porcentaje de cada uno, mediante el análisis de una sola variable.

Como se observa en la Figura 4.32, el efecto S (incorporación de caucho en base seca) se encuentra muy fuera de los límites del 95 % de significancia. Este resultado sugiere que al pasar de una lechada asfáltica normal a una con 20 % m/m de caucho en base seca, esta última produce inestabilidad, falta de adhesión y cohesión.

Por otra parte, cuando se preparó una lechada asfáltica con una emulsión asfáltica modificada al 1 % (respecto de la masa del asfalto fluidificado), se obtuvo un valor positivo (efecto H) en la prueba de desnudamiento que dio mejores resultados, en comparación con las lechadas que tenían emulsión no modificada.

La interacción que presentó significancia fue la HxP, en la cual se obtuvo un valor de -1,75 que se encuentra fuera de los límites del 95 % de nivel de confianza.

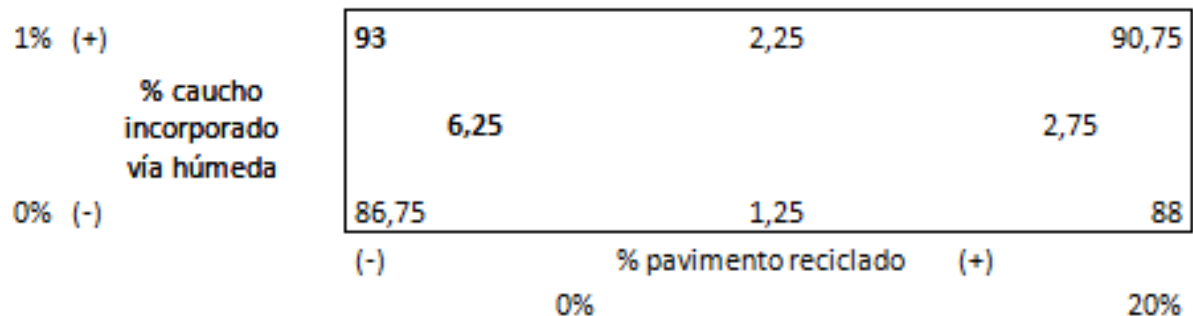


Figura 4.33. Interacción entre el % m/m de caucho incorporado en base húmeda y el % m/m de pavimento reciclado.

Como se aprecia en la Figura 4.33, el mayor porcentaje de cubrimiento en la prueba de desnudamiento se obtuvo cuando se tenía una emulsión asfáltica modificada, con 0 % m/m de pavimento, para un valor de 93 %, en promedio. Aquí es posible observar que la mayor diferencia (de 6,25 %) de cubrimiento de asfalto en la prueba de desnudamiento por humedad fue al pasar de una lechada con emulsión asfáltica no modificada y con 0 % m/m de pavimento reciclado a una lechadas asfáltica con emulsión asfáltica modificada al 1 % m/m de caucho y sin pavimento reciclado.

Mejores resultados observados

Uno de los mejores comportamientos observados, en la prueba de desnudamiento, fue una lechada asfáltica que tenía 20 % m/m RAP y elaborada con emulsión asfáltica modificada al 1 % m/m de caucho.

En la Figura 4.34, se observa la diferencia con respecto a la lechada asfáltica elaborada con la emulsión normal y una lechada asfáltica preparada con emulsión de rompimiento lento hecha por Recope.

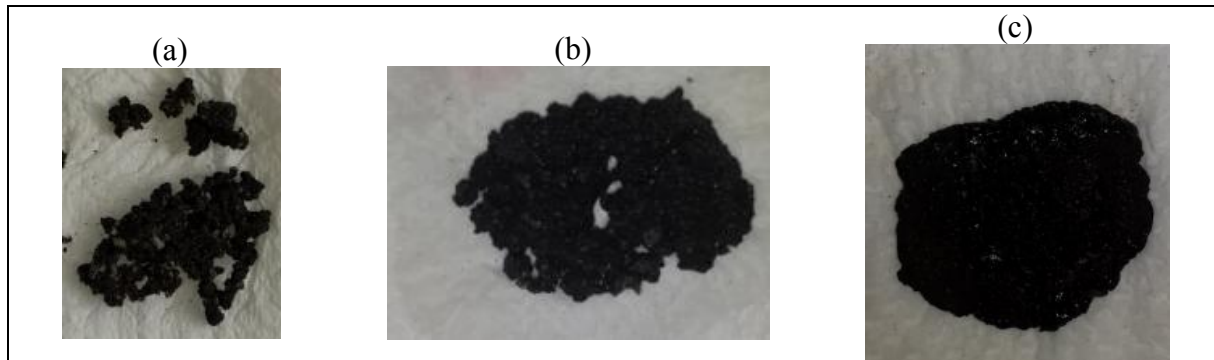


Figura 4.34. Lechadas asfálticas elaboradas con 20 % m/m RAP y 0 % m/m caucho. (a) Lechada asfáltica con emulsión lenta de Recope (b) Lechada asfáltica con CSS-1 (c) Lechada asfáltica con CSS-1M al 1% m/m de caucho.

Otro buen resultado se encontró en la lechada asfáltica con 0 % m/m RAP y 0 % m/m caucho y CSS-1M.

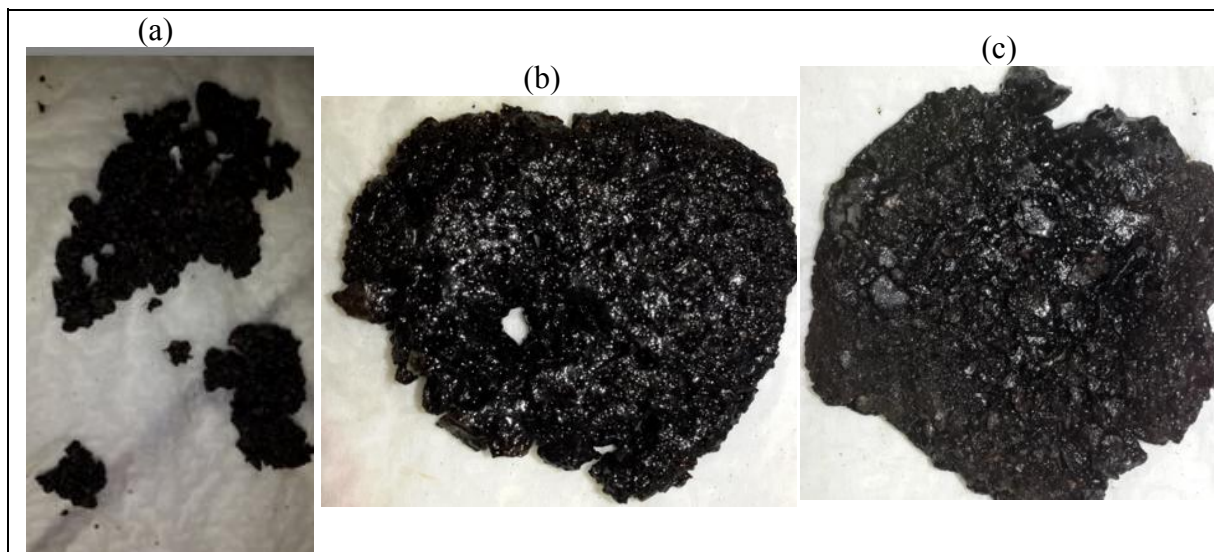


Figura 4.35. Lechadas asfálticas elaboradas con 0 % m/m RAP y 0 % m/m caucho base seca. (a) Lechada asfáltica con emulsión lenta de Recope (b) Lechada asfáltica con CSS-1 (c) Lechada asfáltica con CSS-1M al 1 % m/m de caucho.

La lechadas asfálticas elaboradas con la emulsión asfáltica modificada dieron los mejores resultados, como se observa en las dos últimas Figuras. Se aprecian una mayor adherencia y cohesión del asfalto con los agregados. Además, se presentó un mejor cubrimiento del asfalto sobre el agregado y estabilidad durante la prueba de desnudamiento por humedad.

CAPITULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Luego de observar el proceso de emulsificación, realizar emulsiones no modificadas y modificadas al 1 % m/m de caucho, realizar las pruebas de emulsiones, y de ser evaluadas en una lechada asfáltica, para observar su comportamiento al pasar por la prueba de desnudamiento por humedad, se plantean las siguientes conclusiones:

- Se obtuvo una muy buena emulsión asfáltica modificada al 1 % m/m de caucho. En el cual la emulsión modificada obtuvo buenos resultados según la normativa de control de calidad para emulsiones asfálticas de rompimiento lento, con resultados positivos en los ensayos de viscosidad, densidad, estabilidad, evaporación y penetración, pero no en el caso de la prueba de malla N° 20, dando un resultado un poco alto de lo permitido.
- En general las lechadas asfálticas elaboradas con emulsión asfáltica modificada al 1% m/m de caucho, mostraron el mejor cubrimiento en la prueba de desnudamiento. El cual se evidenció con poco desprendimiento de asfalto, alta adherencia del asfalto sobre el agregado y buena estabilidad al pasar la lechada asfáltica por la prueba
- Al agregar un 20 % m/m de caucho incorporado en base seca en la lechada asfáltica, esta se vuelve inestable, resultado mostrado en la prueba de desnudamiento por humedad.
- El 20% m/m de pavimento asfáltico incorporado como agregado pétreo obtuvo buenos resultados en la lechada asfáltica. Mostrando buena adherencia del asfalto sobre el agregado, lo cual se observó en la prueba de desnudamiento de la lechada asfáltica.

- Se definió, como característica principal, la adherencia que se debe dar entre el asfalto y el agregado para lograr una mejor calidad de estructura compacta, en las carreteras del país. De esta manera, se evita la gran cantidad de huecos y pérdidas de agregados que se presentan en nuestras calles.
- El equipo especializado para hacer emulsiones asfálticas es el molino coloidal que posee velocidades de agitación cercanas a las 3300 rpm. Este equipo influye mucho en el tamaño de las partículas, al igual que la velocidad de la bomba centrífuga.
- Se modificó el asfalto fluidificado con el caucho previamente antes de realizar la emulsión asfáltica, por la dificultad de disolver el polímero en el asfalto.
- Las pruebas utilizadas para evaluar el comportamiento de la emulsión asfáltica son densidad, malla N° 20, viscosidad, penetración, % de masa de asfalto y estabilidad. Se realizó la prueba de evaporación debido a la presencia del caucho en la emulsión asfáltica.
- El ensayo de malla N° 20 realizado a las emulsiones asfálticas fue la prueba más crítica, debido a que es la prueba de emulsión asfáltica más difícil de cumplir.
- Se muestra un resultado distinto en la prueba de penetración de un residuo de asfalto proveniente del ensayo de evaporación con respecto al residuo de asfalto proveniente del ensayo de destilación ya que se da una menor penetración del residuo de asfalto de evaporación, por el aumento de oxidación del asfalto en el proceso.
- El porcentaje de emulsificante influye en la velocidad del proceso de rompimiento de la lechada asfáltica y en la formación del tamaño de partícula.

- Se escogió como diseño de mezcla la lechada asfáltica, por ser una técnica que utiliza emulsiones asfálticas catiónicas de rompimiento lento, con un agregado denso, y por ser útil su aplicación para lograr la preservación de carreteras.
- La prueba para evaluar el comportamiento de la mezcla asfáltica modificada con respecto a una no modificada fue la de desnudamiento por humedad, ya que da una evidencia de la adherencia que se presenta entre el asfalto con el agregado y su comportamiento como lechada asfáltica.
- El mayor cubrimiento de asfalto sobre el agregado se presentó en la lechada asfáltica que contiene emulsión asfáltica modificada al 1 % m/m de caucho (incorporado en base húmeda) y 0 % m/m de pavimento reciclado, obteniendo un valor promedio en la prueba de desnudamiento de asfalto del 93 %.
- La mayor diferencia de cubrimiento de asfalto sobre el agregado (6,25 %), en la prueba de desnudamiento, se dio al pasar de una lechada asfáltica con emulsión asfáltica no modificada y 0 % m/m de pavimento reciclado a una lechada asfáltica con emulsión asfáltica modificada al 1 % m/m de caucho y 0 % m/m de pavimento reciclado.

Como parte del proceso de aprendizaje e investigación, se citan una serie de recomendaciones para futuras investigaciones:

- Hacer más pruebas y observar el comportamiento con cantidades menores al 20 % m/m de caucho en base seca ya que con este porcentaje no se obtuvieron buenos resultados en la lechada asfáltica. También sería recomendable investigar con otros tipos de polímeros.

- Realizar otras pruebas a las lechadas asfálticas, además de la prueba de desnudamiento por humedad, como por ejemplo: consistencia, cohesión húmeda, pérdidas por abrasión (pista húmeda) y exceso de asfalto.
- Utilizar un equipo adecuado para realizar la modificación del asfalto con caucho, y además, disminuir el tamaño de las partículas del polímero para que pase la malla N° 200.
- La planta piloto PRV-100 para emulsión asfáltica utilizada en Recope requiere de un aislamiento en la tubería, para evitar el enfriamiento del asfalto. También se debe revisar el medidor de temperatura.
- Realizar un análisis de varianza al equipo de la planta piloto de emulsiones asfáltica PRV-100.

NOMENCLATURA

Símbolo	Descripción	Unidades
CSS-1	Emulsión asfáltica catiónica de rompimiento lento de baja viscosidad.	-
CSS-1M	Emulsión asfáltica catiónica modificada con polímero de rompimiento lento de baja viscosidad.	-
N	Número de experimentos.	-
P	Penetración en el asfalto.	(1/10) mm
T	Temperatura.	°C
V	Volumen.	l
V^F	Efecto.	-
m	Masa.	g
s	Desviación típica.	-
t	Tiempo.	s
v	Grados de libertad.	-
s_i^2	Varianza estimada de cada conjunto de condiciones.	-
ρ	Densidad.	g/l
σ^2	Media de las varianzas estimadas.	-
Subíndices		
1	Corresponde a la réplica 1.	
2	Corresponde a la réplica 2.	
3	Corresponde a la réplica 3.	
CAUCHO	Se refiere al caucho.	
L	Se refiere a la lechada asfáltica.	
RAP	Se refiere al pavimento asfáltico reciclado.	
T	Se refiere al total.	
A	Se refiere al agregado nuevo.	
F	Se refiere al final.	
O	Se refiere al inicial.	
P	Se refiere al papel.	

BIBLIOGRAFIA

Acosta, J. (1984). *Afinidad entre emulsiones asfálticas y agregados pétreos*. San José: Universidad de Costa Rica.

Arriola, R. (2001). *Parámetros de resistencia y durabilidad de mezclas asfálticas en frío*. San José, Costa Rica: Universidad de Costa Rica.

Bolaños, E. (2009). *Prefactibilidad técnica y económica de las modificaciones a una planta de emulsiones asfálticas para la producción de emulsiones catiónica de rompimiento lento con asfalto modificado*. San José: Universidad de Costa Rica.

Box, G., Hunter, W., & Hunter, J. (1993). *Estadística para investigadores. Introducción al diseño de experimentos, análisis de datos y construcción de modelos*. Barcelona, España: Reverté.

Brenes, A. (2007). *Desarrollo de indicadores de condición para pavimentos flexibles en Costa Rica*. San José, Costa Rica: Universidad de Costa Rica.

Cuattrocchio, A., Botasso, H., Rebollo, O., & Soengas, C. (2006). *Reciclado de residuos de construcción y demolición y de residuos de procesos. El uso de caucho de cubiertas en mezclas asfálticas*. La plata Buenos Aires Argentina: Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional La Plata.

Huffman, J. (s.f.). *Manual básico de emulsiones asfálticas. N°19*. Kansas: Asphalt emulsion manufacturers association.

ISSA. (2010). *Recommended Performance Guideline For Emulsified Asphalt Slurry Seal A105*. Annapolis: International Slurry Surfacing Association.

Jiménez, M. (2010). *Implementación de las ensayos de laboratorio para el diseño de mezcla y evaluación del desempeño para los sellos de lechadas asfálticas (slurry seals) en Costa Rica*. San Jose, Costa Rica: Laboratorio Nacional de Materiales y Modekis Estructurales, Universidad de Costa Rica.

Martínez, O. (1997). *Reciclado de pavimentos flexibles con emulsiones asfálticas*. San José, Costa Rica: Universidad de Costa Rica.

Mercado, R., Bracho, C., & Avendaño, J. (2008). *Emulsiones asfálticas. Usos- rompimiento*. Mérida, Venezuela: Universidad de los Andes.

- Molina, E. (1973). *Emulsiones asfálticas y su uso en la construcción de pavimentos*. San José: Universidad de Costa Rica.
- Mora, F. (1983). *Lechadas bituminosas "slurry seal"*. San José, Costa Rica: Universidad de Costa Rica.
- Ortiz, O., & Reyes, F. (2004). Ahuellamiento en mezclas asfálticas por la adicción de residuos de plástico como reemplazo de material. *Ingeniería*, 123-133.
- Pintor, F. (1985). *Las emulsiones asfálticas en la construcción de tratamientos superficiales en Costa Rica*. San José: Universidad de Costa Rica.
- Rodriguez Galagarza, D. (2001). *Análisis de resistencia y durabilidad de mezclas asfálticas en frío*. San José: Universidad de Costa Rica.
- Transporte, M. d. (2010). *Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes CR-2010*. San Jose, Costa Rica: Republica de Costa Rica.
- Zuñiga García, N. (2012). *Propuesta de una metodología para la evaluación del desempeño de tratamiento superficial en laboratorio*. San José: Universidad de Costa Rica.

APÉNDICE

APÉNDICE A. DATOS EXPERIMENTALES

Cuadro A.1. Densidades aproximadas de las sustancias utilizadas en el proyecto.

Sustancia	Densidad, ρ (g/l)
Agua a 35 °C	997,8686
Asfalto AC-30 a 15 °C	1020
Ácido clorhídrico a 25 °C	1155,2888
Emulsificante Redicote E-4868 a 25 °C	1103,2949

Cuadro A.2. Condiciones para la elaboración de 1,1 l de solución jabonosa utilizada para emulsión asfáltica, realizada con velocidades de 2700 rpm para el molino coloidal y 1800 rpm para la bomba centrífuga. pH de la solución jabonosa: 1,9.

Sustancia	Masa, m (g)	Volumen, V (ml)
Ácido clorhídrico	5	4
Emulsificante	26	28
Agua	1065	1065

Cuadro A.3. Composición de la CSS-1 realizada con velocidades de 2700 rpm para el molino coloidal y 1800 rpm para la bomba centrífuga. pH de la solución jabonosa: 1,9.

Componentes	Masa, m (g)	Volumen, V (ml)	% m/m
Agua	1019,0	1019	29,32
HCl	4,0	4	0,12
Emulsificantes	25,0	27	0,72
Solución jabonosa	1049,0	1050	30,18
Asfalto fluidificado	2426,5	3428	69,82

Cuadro A.4. Temperatura de los componentes para la elaboración de la CSS-1 realizada con velocidades de 2700 rpm para el molino coloidal y 1800 rpm para la bomba centrífuga. pH de la solución jabonosa: 1,9.

Sustancias	Temperatura, T (°C)
Solución jabonosa	40
Asfalto fluidificado	135
Emulsión asfáltica	68

Cuadro A.5. Condiciones para la elaboración de 1,1 l de solución jabonosa utilizada para emulsión asfáltica, realizada con velocidades de 3000 rpm para el molino coloidal y 1800 rpm para la bomba centrífuga. pH de la solución jabonosa: 1,9.

Sustancias	Masa, m (g)	Volumen, V (ml)
Ácido clorhídrico	5	4
Emulsificante	26	28
Agua	1065	1065

Cuadro A.6. Composición de la CSS-1 realizada con velocidades de 3000 rpm para el molino coloidal y 1800 rpm para la bomba centrífuga. pH de la solución jabonosa: 1,9.

Componentes	Masa, m (g)	Volumen, V (ml)	% m/m
Agua	1019,0	1019	34,74
HCl	4,0	4	0,14
Emulsificantes	25,0	27	0,85
Solución jabonosa	1049,0	1050	35,77
Asfalto fluidificado	1884,0	1847	64,23

Cuadro A.7. Temperatura de los componentes para la elaboración de la CSS-1 realizada con velocidades de 3000 rpm para el molino coloidal y 1800 rpm para la bomba centrífuga. pH de la solución jabonosa: 1,9.

Sustancia	Temperatura, T (°C)
Solución jabonosa	40
Asfalto fluidificado	138
Emulsión asfáltica	69

Cuadro A.8. Toma de datos para las pruebas de control de calidad para la CSS-1 realizada con velocidades de 3000 rpm para el molino coloidal y 1800 rpm para la bomba centrífuga. pH de la solución jabonosa: 1,9.

Prueba	Valor medido	Unidad
Estabilidad		
Masa tarro 1. Inicio		
m ₁ tarro + agitador arriba vacío	360,9	g
m ₁ tarro + agitador abajo vacío	354,7	g
Masa tarro 2. Inicio		
m ₂ tarro+ agitador arriba vacío	339,1	g
m ₂ tarro+ agitador abajo vacío	356,8	g
Masa tarro 1, Final	Final	
m ₁ tarro + agitador arriba muestra	393,1	g

Cuadro A.8. (Continuación) Toma de datos para las pruebas de control de calidad para la CSS-1 realizada con velocidades de 3000 rpm para el molino coloidal y 1800 rpm para la bomba centrífuga. pH de la solución jabonosa: 1,9.

Prueba	Valor medido	Unidad
Estabilidad		
m ₁ tarro + agitador abajo muestra Masa tarro 2, Final	386,8	g
m ₂ tarro+ agitador arriba muestra	371,5	g
m ₂ tarro+ agitador abajo muestra	389,2	g
Malla N° 20		
m _{malla #20} inicio	174,2120	g
m _{malla #20} con muestra	177,4617	g
Densidad a 25 °C		
m _{picnometro} vacio	326,582	g
m _{picnometro} con muestra	390,779	g
Viscosidad a 25 °C		
Tiempo	29,15	s
Evaporación		
Masa inicial		
m ₁ tarro + agitado	354,8	
		g
m ₂ tarro + agitador	365,0	g
Masa final		
m ₁ tarro+ agitador	386,3	g
m ₂ tarro+ agitador	396,4	g
Penetración		
P ₁	64,5	(1/10) mm
P ₂	63,5	(1/10) mm
P ₃	63,5	(1/10) mm

Cuadro A.9 Condiciones para la elaboración de 1,1 l de solución jabonosa utilizada para emulsión asfáltica, realizada con velocidades de 3000 rpm para el molino coloidal y 2100 rpm para la bomba centrífuga. pH de la solución jabonosa: 1,9.

Sustancias	Masa, m (g)	Volumen, V (ml)
Ácido clorhídrico	5	4
Emulsificante	26	28
Agua	1065	1065

Cuadro A.10. Composición de la CSS-1 realizada con velocidades de 3000 rpm para el molino coloidal y 2100 rpm para la bomba centrífuga. pH de la solución jabonosa: 1,9.

Componentes	Masa, m (g)	Volumen, V (ml)	% m/m
Agua	989,0	989	33,51
HCl	4,0	4	0,14
Emulsificantes	24,0	26	0,81
Solución jabonosa	1017	1018	34,46
Asfalto fluidificado	1934	1896	65,54

Cuadro A.11. Temperatura de los componentes para la elaboración de la CSS-1 realizada con velocidades de 3000 rpm para el molino coloidal y 2100 rpm para la bomba centrífuga. pH de la solución jabonosa: 1,9.

Sustancias	Temperatura, T (°C)
Solución jabonosa	40
Asfalto fluidificado	136
Emulsión asfáltica	65

Cuadro A.12. Toma de datos para las pruebas de control de calidad para la CSS-1 realizada con velocidades de 3000 rpm para el molino coloidal y 2100 rpm para la bomba centrífuga. pH de la solución jabonosa: 1,9.

Prueba	Valor medido	Unidad
Estabilidad		
Masa tarro 1. Inicio		
m ₁ tarro + agitador arriba vacío	364,5	g
m ₁ tarro + agitador abajo vacío	355,1	g
Masa tarro 2. Inicio		
m ₂ tarro+ agitador arriba vacío	362,3	g
m ₂ tarro+ agitador abajo vacío	354,8	g
Masa tarro 1, Final		
m ₁ tarro + agitador arriba muestra	396,1	g
m ₁ tarro + agitador abajo muestra	386,9	g
Masa tarro 2, Final		
m ₂ tarro+ agitador arriba muestra	394,0	g
m ₂ tarro+ agitador abajo muestra	386,6	g
Malla N° 20		
m _{malla #20} inicio	147,7930	g
m _{malla #20} con muestra	149,0710	g
Densidad a 25 °C		
m _{picnometro} vacío	326,565	g
m _{picnometro} con muestra	390,105	g

Cuadro A.12. (Continuación) Toma de datos para las pruebas de control de calidad para la CSS-1 realizada con velocidades de 3000 rpm para el molino coloidal y 2100 rpm para la bomba centrífuga. pH de la solución jabonosa: 1,9.

Prueba	Valor medido	Unidad
Viscosidad a 25 °C		
Tiempo	45,0	s
Evaporación		
Masa inicial		
m ₁ tarro + agitador	364,4	g
m ₂ tarro + agitador	351,2	g
Masa final		
m ₁ tarro+ agitador	396,2	g
m ₂ tarro+ agitador	383,6	g
Penetración		
P ₁	67,5	(1/10) mm
P ₂	66,5	(1/10) mm
P ₃	67	(1/10) mm

Cuadro A.13 Condiciones para la elaboración de 1,1 l de solución jabonosa utilizada para emulsión asfáltica utilizada en las lechadas asfálticas, realizada con velocidades de 3300 rpm para el molino coloidal y 2100 rpm para la bomba centrífuga. pH de la solución jabonosa: 2,0.

Sustancias	Masa, m (g)	Volumen, V (ml)
Ácido clorhídrico	6	5
Emulsificante	36	39
Agua	1065	1065

Cuadro A.14. Composición de la CSS-1 utilizada en las lechadas asfálticas, realizada con velocidades de 3300 rpm para el molino coloidal y 2100 rpm para la bomba centrífuga. pH de la solución jabonosa: 2,0.

Componentes	Masa, m (g)	Volumen, V (ml)	% m/m
Agua	1003,5	1003	33,16
HCl	5,5	5	0,19
Emulsificantes	34,0	37	1,12
Solución jabonosa	1043	1045	34,46
Asfalto fluidificado	1983,5	1955	65,54

Cuadro A.15. Temperatura de los componentes para la elaboración de la CSS-1 utilizada en las lechadas asfálticas, realizada con velocidades de 3300 rpm para el molino coloidal y 2100 rpm para la bomba centrífuga. pH de la solución jabonosa: 2,0.

Sustancias	Temperatura, T (°C)
Solución jabonosa	40
Asfalto fluidificado	137
Emulsión asfáltica	65

Cuadro A.16. Toma de datos para las pruebas de control de calidad para la CSS-1 utilizada en las lechadas asfálticas, realizada con velocidades de 3300 rpm para el molino coloidal y 2100 rpm para la bomba centrífuga. pH de la solución jabonosa: 2,0.

Prueba	Valor medido	Unidad
Estabilidad		
Masa tarro 1. Inicio		
m ₁ tarro + agitador arriba vacío	360,3	g
m ₁ tarro + agitador abajo vacío	354,4	g
Masa tarro 2. Inicio		
m ₂ tarro+ agitador arriba vacío	349,7	g
m ₂ tarro+ agitador abajo vacío	342,4	g
Masa tarro 1, Final		
m ₁ tarro + agitador arriba muestra	393,3	g
m ₁ tarro + agitador abajo muestra	387,8	g
Masa tarro 2, Final		
m ₂ tarro+ agitador arriba muestra	383,1	g
m ₂ tarro+ agitador abajo muestra	375,9	g
Malla N° 20		
m _{malla #20} inicio	173,9431	g
m _{malla #20} con muestra	174,3701	g
Densidad a 25 °C		
m _{picnometro} vacío	326,532	g
m _{picnometro} con muestra	390,453	g
Viscosidad a 25 °C		
Tiempo	77,93	s
Evaporación		
Masa inicial		
m ₁ tarro + agitador	364	g
m ₂ tarro + agitador	350,7	g
Masa final		
m ₁ tarro+ agitador	396,8	g
m ₂ tarro+ agitador	383,5	g

Cuadro A.16. (Continuación) Toma de datos para las pruebas de control de calidad para la CSS-1 utilizada en las lechadas asfálticas, realizada con velocidades de 3300 rpm para el molino coloidal y 2100 rpm para la bomba centrífuga. pH de la solución jabonosa: 2,0.

Prueba	Valor medido	Unidad
Penetración		
P ₁	52	(1/10) mm
P ₂	51,5	(1/10) mm
P ₃	52	(1/10) mm

Cuadro A.17 Condiciones para la elaboración de 1,1 l de solución jabonosa utilizada para emulsión asfáltica modificada con 1 % m/m de caucho, utilizada en las lechadas asfálticas, realizada con velocidades de 3300 rpm para el molino coloidal y 2100 rpm para la bomba centrífuga. pH de la solución jabonosa: 2,0.

Sustancia	Masa, m (g)	Volumen, V (ml)
Ácido clorhídrico	6	5
Emulsificante	36	39
Agua	1065	1065

Cuadro A.18. Composición de la CSS-1 modificada con 1 % m/m de caucho, utilizada en las lechadas asfálticas, realizada con velocidades de 3300 rpm para el molino coloidal y 2100 rpm para la bomba centrífuga. pH de la solución jabonosa: 2,0.

Componentes	Masa, m (g)	Volumen, V (ml)	% m/m
Agua	990,0	990	33,16
HCl	5,5	5	0,19
Emulsificantes	33,5	36	1,12
Solución jabonosa	1029,0	1031	34,46
Asfalto modificado	1957,5	1969	65,54
Caucho	20,5	-	0,68

Cuadro A.19. Temperatura de los componentes para la elaboración de la CSS-1 modificada con 1 % m/m de caucho, utilizada en las lechadas asfálticas, realizada con velocidades de 3300 rpm para el molino coloidal y 2100 rpm para la bomba centrífuga. pH de la solución jabonosa: 2,0.

Sustancia	Temperatura, T (°C)
Solución jabonosa	40
Asfalto fluidificado	140
Emulsión asfáltica	66

Cuadro A.20. Toma de datos para las pruebas de control de calidad para la CSS-1 modificada con caucho al 1 % m/m utilizada en las lechadas asfálticas, realizada con velocidades de 3300 rpm para el molino coloidal y 2100 rpm para la bomba centrífuga. pH de la solución jabonosa: 2,0.

Prueba	Valor medido	Unidad
Estabilidad		
Masa tarro 1. Inicio		
m ₁ tarro + agitador arriba vacio	353,5	g
m ₁ tarro + agitador abajo vacio	353,6	g
Masa tarro 2. Inicio		
m ₂ tarro+ agitador arriba vacio	354,8	g
m ₂ tarro+ agitador abajo vacio	358,3	g
Masa tarro 1, Final		
m ₁ tarro + agitador arriba muestra	385,1	g
m ₁ tarro + agitador abajo muestra	385,4	g
Masa tarro 2, Final		
m ₂ tarro+ agitador arriba muestra	387	g
m ₂ tarro+ agitador abajo muestra	390,5	g
Malla N° 20		
m _{malla #20} inicio	180,0873	g
m _{malla #20} con muestra	184,9279	g
Densidad a 25 °C		
m _{picnometro vacio}	326,532	g
m _{picnometro con muestra}	392,477	g
Viscosidad a 25 °C		
Tiempo	27,31	s
Evaporación		
Masa inicial		
m ₁ tarro + agitado	346,8	g
m ₂ tarro + agitador	359,6	g
Masa final		
m ₁ tarro+ agitador	379,1	g
m ₂ tarro+ agitador	391,8	g
Penetración		
P ₁	82,5	(1/10) mm
P ₂	83,0	(1/10) mm
P ₃	82,0	(1/10) mm

Cuadro A.21. Mezcla de agregado con 20 % m/m RAP y 0 % m/m de caucho incorporado en base seca, utilizado para elaborar la lechada asfáltica, con 2,0780 g de agua y 4,0884 g de emulsión de Recope.

Malla	Masa, m (g)	% Retenido	% Pasante	Masa de agregado, m_a (g)	Masa de RAP, m_{RAP} (g)	Masa de caucho, m_{caucho} (g)
3/8	0,0000	0,00	100,00	0,0000	0,0000	0,0000
4	1,1965	5,87	94,13	1,1965	0,0000	0,0000
8	4,0862	20,04	74,09	2,0138	2,0724	0,0000
16	5,0147	24,59	49,50	5,0147	0,0000	0,0000
30	4,094	20,08	29,42	2,0924	2,0016	0,0000
50	2,0028	9,82	19,59	2,0028	0,0000	0,0000
100	1,9944	9,78	9,81	1,9944	0,0000	0,0000
200	1,0012	4,91	4,90	1,0012	0,0000	0,0000
Fondo	0,9995	4,90	-	0,9995	0,0000	0,0000
Sumatoria	20,3893	100,00	-	-	-	-

Cuadro A.22. Mezcla de agregado con 20 % m/m RAP y 20 % m/m de caucho incorporado en base seca, utilizado para elaborar la lechada asfáltica, con 2,0251 g de agua y 4,1697 g de emulsión de Recope.

Malla	Masa, m (g)	% Retenido	% Pasante	Masa de agregado, m_a (g)	Masa de RAP, m_{RAP} (g)	Masa de caucho, m_{caucho} (g)
3/8	0,0000	0,00	100,00	0,0000	0,0000	0,0000
4	0,8557	4,24	95,76	0,8557	0,0000	0,0000
8	4,1417	20,50	75,26	2,0220	2,1197	0,0000
16	5,0298	24,90	50,36	1,0181	0,0000	4,0117
30	4,0507	20,05	30,31	2,0309	2,0198	0,0000
50	2,0004	9,90	20,41	2,0004	0,0000	0,0000
100	2,0373	10,08	10,33	2,0373	0,0000	0,0000
200	1,0184	5,04	5,28	1,0184	0,0000	0,0000
Fondo	1,0675	5,28	-	1,0675	0,0000	0,0000
Sumatoria	20,2015	100,00	-	-	-	-

Cuadro A.23. Mezcla de agregado con 0 % m/m RAP y 20 % m/m de caucho incorporado en base seca, utilizado para elaborar la lechada asfáltica, con 2,1806 g de agua y 4,2283 g de emulsión de Recope.

Malla	Masa, m (g)	% Retenido	% Pasante	Masa de agregado, m_a (g)	Masa de RAP, m_{RAP} (g)	Masa de caucho, m_{caucho} (g)
3/8	0,0000	0,00	100	0,0000	0,0000	0,0000
4	0,8929	4,29	95,71	0,8929	0,0000	0,0000
8	4,4850	21,54	74,17	4,4850	0,0000	0,0000
16	5,2181	25,06	49,11	1,1728	0,0000	4,0453
30	3,9987	19,20	29,91	3,9987	0,0000	0,0000
50	2,0193	9,69	20,21	2,0193	0,0000	0,0000
100	2,1976	10,55	9,65	2,1976	0,0000	0,0000
200	1,0186	4,89	4,76	1,0186	0,0000	0,0000
Fondo	0,9913	4,76	-	0,9913	0,0000	0,0000
Sumatoria	20,8215	100,00	-	-	-	-

Cuadro A.24. Mezcla de agregado con 0 % m/m RAP y 0 % m/m de caucho incorporado en base seca, utilizado para elaborar la lechada asfáltica, con 2,2811 g de agua y 4,2246 g de emulsión de Recope.

Malla	Masa, m (g)	% Retenido	% Pasante	Masa de agregado, m_a (g)	Masa de RAP, m_{RAP} (g)	Masa de caucho, m_{caucho} (g)
3/8	0,0000	0,00	100,00	0,0000	0,0000	0,0000
4	0,9485	4,52101545	95,48	0,9485	0,0000	0,0000
8	4,2371	20,1960934	75,28	4,2371	0,0000	0,0000
16	5,6164	26,7705126	48,51	5,6164	0,0000	0,0000
30	4,0558	19,3319288	29,18	4,0558	0,0000	0,0000
50	2,0160	9,60924318	19,57	2,0160	0,0000	0,0000
100	2,0889	9,95672027	9,61	2,0889	0,0000	0,0000
200	0,9998	4,76553637	4,85	0,9998	0,0000	0,0000
Fondo	1,0173	4,84894994	-	1,0173	0,0000	0,0000
Sumatoria	20,9798	100,00	-	-	-	-

Cuadro A.25. Resultados de las pruebas de desnudamiento para las lechadas asfálticas con emulsión de Recope.

Corrida	Masa inicial, m_o (g)	Masa final, m_f (g)	Masa utilizada, m_L (g)	masa papel, m_p (g)	Estimado visual (%)
1	9,3672	0,3616	9,0056	0,2307	80 %
2	10,1341	0,4912	9,6429	0,2773	80 %
3	9,8847	0,4941	9,3906	0,3368	70 %
4	10,3356	0,6598	9,6758	0,2206	80 %
5	10,7239	0,5062	10,2177	0,2654	75 %
6	10,7319	0,4497	10,2822	0,2422	70 %
7	10,1314	0,4414	9,6900	0,2530	65 %
8	9,7543	0,4811	9,2732	0,2165	75 %

Cuadro A.26. Mezcla de agregado con 0 % m/m RAP y 20 % m/m de caucho incorporado en base seca, utilizado para elaborar la lechada asfáltica, con 2,0816 g de agua y 4,1959 g de emulsión CSS-1 elaborada en la planta piloto.

Malla	Masa, m (g)	% Retenido	% Pasante	Masa de agregado, m_a (g)	Masa de RAP, m_{RAP} (g)	Masa de caucho, m_{caucho} (g)
3/8	0,0000	0,00	100,00	0,0000	0,0000	0,0000
4	0,7905	3,87	96,13	0,7905	0,0000	0,0000
8	4,1882	20,49	75,64	4,1882	0,0000	0,0000
16	5,0894	24,90	50,73	1,0470	0,0000	4,0424
30	4,1618	20,36	30,37	4,1618	0,0000	0,0000
50	2,1009	10,28	20,09	2,1009	0,0000	0,0000
100	2,0684	10,12	9,97	2,0684	0,0000	0,0000
200	1,0361	5,07	4,89	1,0361	0,0000	0,0000
Fondo	1,0013	4,89	-	1,0013	0,0000	0,0000
Sumatoria	20,4366	100,00	-	-	-	-

Cuadro A.27. Mezcla de agregado con 0 % m/m RAP y 20 % m/m de caucho incorporado en base seca, utilizado para elaborar la lechada asfáltica, con 2,4678 g de agua y 5,0182 g de emulsión CSS-1 modificada al 1% m/m de caucho.

Malla	Masa, m (g)	% Retenido	% Pasante	Masa de agregado, m_a (g)	Masa de RAP, m_{RAP} (g)	Masa de caucho, m_{caucho} (g)
3/8	0,0000	0,00	100,00	0,0000	0,0000	0,0000
4	1,0944	4,46	95,54	1,0944	0,0000	0,0000

Cuadro A.27. (Continuación) Mezcla de agregado con 0 % m/m RAP y 20 % m/m de caucho incorporado en base seca, utilizado para elaborar la lechada asfáltica, con 2,4678 g de agua y 5,0182 g de emulsión CSS-1 modificada al 1% m/m de caucho.

Malla	Masa, m (g)	% Retenido	% Pasante	Masa de agregado, m_a (g)	Masa de RAP, m_{RAP} (g)	Masa de caucho, m_{caucho} (g)
8	4,4827	18,25	77,29	4,4827	0,0000	0,0000
16	5,3108	21,62	55,68	1,1173	0,0000	4,1935
30	5,5996	22,79	32,88	5,5996	0,0000	0,0000
50	3,9596	16,12	16,76	3,9596	0,0000	0,0000
100	2,0744	8,44	8,32	2,0744	0,0000	0,0000
200	1,1006	4,48	3,84	1,1006	0,0000	0,0000
Fondo	0,9428	3,84	-	0,9428	0,0000	0,0000
Sumatoria	24,5649	100,00	-	-	-	-

Cuadro A.28. Mezcla de agregado con 20 % m/m RAP y 20 % m/m de caucho incorporado en base seca, utilizado para elaborar la lechada asfáltica, con 2,0784 g de agua y 4,1527 g de emulsión CSS-1 elaborada en la planta piloto.

Malla	Masa, m (g)	% Retenido	% Pasante	Masa de agregado, m_a (g)	Masa de RAP, m_{RAP} (g)	Masa de caucho, m_{caucho} (g)
3/8	0,0000	0,00	100,00	0,0000	0,0000	0,0000
4	0,6324	3,11	96,89	0,6324	0,0000	0,0000
8	4,2613	20,95	75,94	2,0116	2,2497	0,0000
16	5,1059	25,10	50,84	1,0931	0,0000	4,0128
30	4,2420	20,86	29,97	2,0833	2,1587	0,0000
50	2,0288	9,97	20,00	2,0288	0,0000	0,0000
100	2,0176	9,92	10,08	2,0176	0,0000	0,0000
200	1,0506	5,17	4,92	1,0506	0,0000	0,0000
Fondo	1,0006	4,92	-	1,0006	0,0000	0,0000
Sumatoria	20,3392	100,00	-	-	-	-

Cuadro A.29. Mezcla de agregado con 20 % m/m RAP y 20 % m/m de caucho incorporado en base seca, utilizado para elaborar la lechada asfáltica, con 2,1930 g de agua y 4,3635 g de emulsión CSS-1 modificada al 1 % m/m de caucho.

Malla	Masa, m (g)	% Retenido	% Pasante	Masa de agregado, m_a (g)	Masa de RAP, m_{RAP} (g)	Masa de caucho, m_{caucho} (g)
3/8	0,0000	0,00	100,00	0,0000	0,0000	0,0000
4	1,0021	4,63	95,37	1,0021	0,0000	0,0000
8	4,4467	20,53	74,84	2,2172	2,2295	0,0000
16	5,0815	23,47	51,37	1,0571	0,0000	4,0244
30	4,7043	21,72	29,65	2,6655	2,0388	0,0000
50	2,1385	9,88	19,78	2,1385	0,0000	0,0000
100	2,0346	9,39	10,38	2,0346	0,0000	0,0000
200	1,2431	5,74	4,64	1,2431	0,0000	0,0000
Fondo	1,0048	4,64	-	1,0048	0,0000	0,0000
Sumatoria	21,6556	100	-	-	-	-

Cuadro A.30. Mezcla de agregado con 20 % m/m RAP y 0 % m/m de caucho incorporado en base seca, utilizado para elaborar la lechada asfáltica, con 2,1261 g de agua y 4,1793 g de emulsión CSS-1 elaborada en la planta piloto.

Malla	Masa, m (g)	% Retenido	% Pasante	Masa de agregado, m_a (g)	Masa de RAP, m_{RAP} (g)	Masa de caucho, m_{caucho} (g)
3/8	0,0000	0,00	100,00	0,0000	0,0000	0,0000
4	0,5939	2,86	97,14	0,5939	0,0000	0,0000
8	4,5075	21,70	75,44	2,1688	2,3387	0,0000
16	5,2925	25,48	49,96	5,2925	0,0000	0,0000
30	4,1645	20,05	29,91	2,1234	2,0411	0,0000
50	2,1497	10,35	19,56	2,1497	0,0000	0,0000
100	2,0043	9,65	9,91	2,0043	0,0000	0,0000
200	1,0425	5,02	4,89	1,0425	0,0000	0,0000
Fondo	1,0158	4,89	-	1,0158	0,0000	0,0000
Sumatoria	20,7707	100,00	-	-	-	-

Cuadro A.31. Mezcla de agregado con 20 % m/m RAP y 0 % m/m de caucho incorporado en base seca, utilizado para elaborar la lechada asfáltica, con 2,1149 g de agua y 4,2941 g de emulsión CSS-1 modificada al 1 % m/m de caucho.

Malla	Masa, m (g)	% Retenido	% Pasante	Masa de agregado, m_a (g)	Masa de RAP, m_{RAP} (g)	Masa de caucho, m_{caucho} (g)
3/8	0,0000	0,00	100,00	0,0000	0,0000	0,0000
4	0,9739	4,72	95,28	0,9739	0,0000	0,0000
8	4,2236	20,47	74,81	2,1562	2,0674	0,0000
16	5,1810	25,11	49,69	5,1810	0,0000	0,0000
30	4,1538	20,13	29,56	2,1034	2,0504	0,0000
50	2,0122	9,75	19,81	2,0122	0,0000	0,0000
100	2,0423	9,89	9,91	2,0423	0,0000	0,0000
200	1,0061	4,88	5,04	1,0061	0,0000	0,0000
Fondo	1,0390	5,04	-	1,0390	0,0000	0,0000
Sumatoria	20,6319	100,00	-	-	-	-

Cuadro A.32. Mezcla de agregado con 0 % m/m RAP y 0 % m/m de caucho incorporado en base seca, utilizado para elaborar la lechada asfáltica, con 2,1023 g de agua y 4,1679 g de emulsión CSS-1, elaborada en la planta piloto.

Malla	Masa, m (g)	% Retenido	% Pasante	Masa de agregado, m_a (g)	Masa de RAP, m_{RAP} (g)	Masa de caucho, m_{caucho} (g)
3/8	0,0000	0,00	100,00	0,0000	0,0000	0,0000
4	1,0427	5,09	94,91	1,0427	0,0000	0,0000
8	4,1591	20,31	74,60	4,1591	0,0000	0,0000
16	5,0436	24,63	49,97	5,0436	0,0000	0,0000
30	4,0705	19,88	30,09	4,0705	0,0000	0,0000
50	2,0073	9,80	20,29	2,0073	0,0000	0,0000
100	2,0745	10,13	10,17	2,0745	0,0000	0,0000
200	1,0639	5,19	4,97	1,0639	0,0000	0,0000
Fondo	1,0181	4,97	-	1,0181	0,0000	0,0000
Sumatoria	20,4797	100,00	-	-	-	-

Cuadro A.33. Mezcla de agregado con 0 % m/m RAP y 0 % m/m de caucho incorporado en base seca, utilizado para elaborar la lechada asfáltica, con 2,1394 g de agua y 4,2021 g de emulsión CSS-1 modificada al 1 % m/m de caucho.

Malla	Masa, m (g)	% Retenido	% Pasante	Masa de agregado, m_a (g)	Masa de RAP, m_{RAP} (g)	Masa de caucho, m_{caucho} (g)
3/8	0,0000	0,00	100,00	0,0000	0,0000	0,0000
4	1,1115	5,35	94,65	1,1115	0,0000	0,0000
8	4,4386	21,35	73,30	4,4386	0,0000	0,0000
16	5,0606	24,34	48,96	5,0606	0,0000	0,0000
30	4,0082	19,28	29,68	4,0082	0,0000	0,0000
50	2,0143	9,69	19,99	2,0143	0,0000	0,0000
100	2,0878	10,04	9,95	2,0878	0,0000	0,0000
200	1,0532	5,07	4,88	1,0532	0,0000	0,0000
Fondo	1,0145	4,88	-	1,0145	0,0000	0,0000
Sumatoria	20,7887	100,00	-	20,7887	-	-

Cuadro A.34. Resultados de las pruebas de desnudamiento para las lechadas asfálticas con emulsión modificada al 1 % m/m o sin modificación, elaboradas con la planta piloto.

Corrida	Masa inicial, m_o (g)	Masa final, m_f (g)	Masa utilizada, m_L (g)	masa papel, m_p (g)	Estimado visual (%)
1	10,1511	0,3097	9,8414	0,2734	99
2	10,1591	0,4607	9,6984	0,3088	85
3	10,3037	0,3529	9,9508	0,2899	90
4	10,3687	0,4202	9,9485	0,3583	85
5	9,6955	0,5376	9,1579	0,3657	85
6	10,7300	0,3779	10,3521	0,3603	80
7	10,2194	0,5735	9,6459	0,2699	95
8	10,0452	0,3280	9,7172	0,2945	85
9	10,1814	0,3466	9,8348	0,3434	98
10	10,8005	0,2510	10,5495	0,3842	95
11	9,9508	0,3505	9,6003	0,2315	85
12	10,4360	0,3580	10,078	0,2663	98
13	10,9012	0,2802	10,621	0,2939	90
14	11,1749	0,4193	10,7556	0,3215	80
15	11,1293	0,3324	10,7969	0,3367	92
16	11,2658	0,3140	10,9518	0,3485	92

APÉNDICE B. DATOS INTERMEDIOS

Cuadro B.1. Resultados de análisis para la CSS-1 realizada con velocidades de 3000 rpm para el molino coloidal y 1800 rpm para la bomba centrífuga. pH de la solución jabonosa: 1,9.

Prueba	Resultado	Unidades	Requisito
Densidad a 25 °C	1016,1	kg/m ³	- 20 - 100
Viscosidad Saybold Furol a 25°C	29,2	SSF	SSF
Fracción de masa de asfalto. Por Evaporación	62,9	% m/m	> 57
Penetración al residuo a 25 °C, 100 g, 5 s	63,83	1/10 mm	-
Fracción de masa retenido malla N° 20	0,32	%	< 0,1%
Estabilidad 24 h, como fracción de masa de asfalto	0,1	%	< 1,0%

Cuadro B.2. Resultados de análisis para la CSS-1 realizada con velocidades de 3000 rpm para el molino coloidal y 2100 rpm para la bomba centrífuga. pH de la solución jabonosa: 1,9.

Prueba	Resultado	Unidades	Requisito
Densidad a 25 °C	1005,7	kg/m ³	- 20 - 100
Viscosidad Saybold Furol a 25°C	45	SSF	SSF
Fracción de masa de asfalto. Por Evaporación	64,2	% m/m	> 57
Penetración al residuo a 25 °C, 100 g, 5 s	67,00	1/10 mm	-
Fracción de masa retenido malla N° 20	0,13	%	< 0,1%
Estabilidad 24 h, como fracción de masa de asfalto	0,3	%	< 1,0%

Cuadro B.3. Resultados de análisis para la CSS-1 utilizada en las lechadas asfálticas, realizada con velocidades de 3300 rpm para el molino coloidal y 2100 rpm para la bomba centrífuga. pH de la solución jabonosa: 2,0.

Prueba	Resultado	Unidades	Requisito
Densidad a 25 °C	1011,7	kg/m ³	- 20 - 100
Viscosidad Saybold Furol a 25°C	77,93	SSF	SSF
Fracción de masa de asfalto. Por Evaporación	65,6	% m/m	> 57
Penetración al residuo a 25 °C, 100 g, 5 s	51,83	1/10 mm	-
Fracción de masa retenido malla N° 20	0,04	%	< 0,1%
Estabilidad 24 h, como fracción de masa de asfalto	0,5	%	< 1,0%

Cuadro B.4. Resultados de análisis para la CSS-1 modificada con caucho al 1 % m/m utilizada en las lechadas asfálticas, realizada con velocidades de 3300 rpm para el molino coloidal y 2100 rpm para la bomba centrífuga. pH de la solución jabonosa: 2,0.

Prueba	Resultado	Unidades	Requisito
Densidad a 25 °C	1043,7	kg/m ³	- 20 - 100
Viscosidad Saybold Furol a 25°C	27,31	SSF	SSF
Fracción de masa de asfalto. Por Evaporación	64,5	% m/m	> 57
Penetración al residuo a 25 °C, 100 g, 5 s	82,50	1/10 mm	-
Fracción de masa retenido malla N° 20	0,48	%	< 0,1%
Estabilidad 24 h, como fracción de masa de asfalto	0,2	%	< 1,0%

APENDICE C. MUESTRA DE CÁLCULO

C.1 Cálculo del porcentaje de masa de los componentes en una emulsión asfáltica.

Para el cálculo del porcentaje de masa de los respectivos componentes utilizados para preparar la emulsión asfáltica modificada al 1 % con caucho y no modificada, se utiliza la ecuación siguiente:

$$\% m_i = \frac{m_i}{m_T} * 100 \% \quad (C.1)$$

Utilizando los datos del Cuadro A.3, columna 2, filas 2, 5 y 6.

$$\% m_i = \frac{1019,0 \text{ g}}{1049,0 \text{ g} + 2416,5 \text{ g}} * 100 \% = 29,32 \% \text{m/m}$$

Resultado que se encuentra tabulado en el Cuadro A.3, columna 4, fila 2. El mismo procedimiento se hizo para calcular todos los porcentajes de masa de la misma columna 4 del Cuadro A.3 y para las demás emulsiones asfálticas.

C.2 Cálculo del porcentaje de estabilidad de almacenamiento de la emulsión asfáltica.

Para el cálculo del porcentaje de estabilidad de almacenamiento de la emulsión asfáltica modifica o convencional, se utiliza la siguiente fórmula:

$$\% \text{ estabilidad} = \frac{(m_{despues} - m_{antes})_{abajo} - (m_{despues} - m_{antes})_{arriba}}{50} * 100 \% \quad (C.2)$$

Utilizando los datos del Cuadro A.8, columna 2, filas 4, 5, 10 y 11 para la réplica 1.

$$\% \text{ estabilidad}_1 = \frac{(386,8 \text{ g} - 354,7 \text{ g}) - (393,1 \text{ g} - 360,9 \text{ g})}{50} * 100 \% = 0,2 \%$$

Y utilizando los datos del Cuadro A.8, columna 2, filas 7, 8, 13 y 14 para la réplica 2.

$$\% \text{ estabilidad}_2 = \frac{(389,2 \text{ g} - 356,8 \text{ g}) - (371,5 \text{ g} - 339,1 \text{ g})}{50} * 100 \% = 0 \%$$

El porcentaje de estabilidad promedio es:

$$\% \text{ estabilidad} = \frac{(0\%) + (0,2\%)}{2} = 0,1\%$$

Resultado que se encuentra tabulado en el Cuadro B.1, columna 2, fila 7. El mismo cálculo se hizo para calcular todos los porcentajes de estabilidad para las demás emulsiones asfálticas.

C.3 Cálculo de la densidad de una emulsión asfáltica a 25 °C.

Para el cálculo de la densidad de una emulsión asfáltica a 25 °C, se utilizó la formula:

$$\text{Densidad} = \frac{(m_{\text{picnometro con muestra}} - m_{\text{picnometro}}) * 1005,05}{63,5} \quad (\text{C.3})$$

Utilizando los datos del Cuadro A.8, columna 2, filas 19 y 20:

$$\text{Densidad} = \frac{(390,779 \text{ g} - 326,582 \text{ g}) * 1005,05}{63,5} = 1016,1 \text{ kg/m}^3$$

Resultado que se encuentra tabulado en el Cuadro B.2, columna 2, fila 2. El mismo cálculo se hizo para calcular todas las densidades para las demás emulsiones asfálticas.

C.4. Calculo de la fracción de masa de asfalto por evaporación.

Para el cálculo de la fracción de masa de asfalto por el método de evaporación en la emulsión asfáltica, se utilizó la formula:

$$\% \text{ asfalto en la emulsión} = \frac{(m_{\text{final}} - m_{\text{inicial}})}{50} * 100\% \quad (\text{C.4})$$

Utilizando los datos del Cuadro A.8, columna 2, filas 25 y 28 para la replica 1:

$$\% \text{ asfalto en la emulsión}_1 = \frac{(386,3 \text{ g} - 354,8 \text{ g})}{50} * 100\% = 63\%$$

Y utilizando los datos del Cuadro A.8, columna 2, filas 26 y 29, para la réplica 2:

$$\% \text{ asfalto en la emulsión}_2 = \frac{(396,4 \text{ g} - 365,0 \text{ g})}{50} * 100 \% = 62,8 \%$$

El porcentaje de asfalto presente en la emulsión asfáltica es:

$$\% \text{ asfalto en la emulsión} = \frac{(63 \% + 62,8 \%)}{2} = 62,9 \% \text{ m/m}$$

Resultado que se encuentra tabulado en el Cuadro B.1, columna 2, fila 4. El mismo procedimiento se efectuó para calcular los porcentajes de asfalto de las demás emulsiones asfálticas.

C.5 Cálculo de la penetración del residuo obtenido por evaporación.

Para el cálculo de la penetración del residuo obtenido por evaporación de una emulsión asfáltica, se utilizó la formula:

$$\text{Penetración} = \frac{(P_1 + P_2 + P_3)}{3} \quad (\text{C.5})$$

Utilizando los datos del Cuadro A.8, columna 2, filas 31, 32 y 33:

$$\text{Penetración} = \frac{(64,5 + 63,5 + 63,5)}{3} = 63,83 \text{ (1/10) mm}$$

Resultado que se encuentra tabulado en el Cuadro B.1, columna 2, fila 5. El mismo cálculo se realizó para calcular la penetración para las demás emulsiones asfálticas.

C.6 Cálculo del porcentaje retenido en tamiz N° 20 de la emulsión asfáltica a 25 °C.

Para el cálculo del porcentaje retenido en el tamiz N° 20 de la emulsión asfáltica a 25 °C, se utilizó la formula:

$$\% \text{ asfalto en malla \#20} = \frac{(m_{\text{malla \#20+muestra}} - m_{\text{malla \#20 vacío}})}{1000} * 100\% \quad (\text{C.6})$$

Utilizando los datos del Cuadro A.8, columna 2, filas 16 y 17:

$$\% \text{ asfalto en malla \#20} = \frac{(177,4617 - 174,2120)}{1000} * 100\% = 0,32 \%$$

Resultado que se encuentra tabulado en el Cuadro B.1, columna 2, fila 6. El mismo cálculo se hizo para calcular todos los porcentajes de asfalto retenido en la malla N° 20 de las demás emulsiones asfálticas.

C.7 Cálculo de la media de las varianzas estimadas (σ^2) del diseño factorial 2^3 .

Para el cálculo de la media de las varianzas estimadas del diseño factorial 2^3 , se utilizó la ecuación:

$$\sigma^2 = \frac{s_i^2}{v} \quad (\text{C.7})$$

Utilizando los datos del Cuadro 4.12, columna 2, filas 10 y del Cuadro 4.13 columna 2, fila 2:

$$\sigma^2 = \frac{49}{8} = 6,125$$

Resultado que se encuentra tabulado en el Cuadro 4.13, columna 2, fila 3.

C.8 Cálculo del efecto (V) del diseño factorial 2^3 .

Para el cálculo del efecto del diseño factorial 2^3 , se utilizó la siguiente fórmula:

$$V^F = \frac{4}{N_T} * \sigma^2 \quad (\text{C.8})$$

Utilizando los datos del Cuadro 4.13, columna 2, fila 3 y con un total de 16 experimentos realizados:

$$V = \frac{4}{16} * 6,125 = 1,531$$

Resultado que se encuentra tabulado en el Cuadro 4.13, columna 2, fila 4.

C.9 Cálculo de la desviación típica (s) del diseño factorial 2^3 .

Para el cálculo de la desviación típica del diseño factorial 2^3 , se utilizó la siguiente fórmula:

$$s = \sqrt{V^F} \quad (\text{C.9})$$

Utilizando los datos del Cuadro 4.13, columna 2, filas 4:

$$s = \sqrt{1,531} = 1,24$$

Resultado que se encuentra tabulado en el Cuadro 4.13, columna 2, fila 5.

APÉNDICE D. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

D.1 MODIFICACIÓN DE ASFALTO CON CAUCHO MOLIDO.

1. Verificar cables de conexión de motores y resistencia eléctrica.
2. Cerrar válvula de salida de embudo y de molino.

Verificar previamente al uso, que los motores de molino y bomba este funcionando en condiciones.

3. Tener el programador de temperatura para ser usado entre 170 a 190°C.
4. Colocar unos 4 litros de gas oil ó aceite para usar en recirculación y "calentar" el equipo.
5. Abrir válvula de salida de embudo.
6. Encender los convertidores de frecuencia de molino y bomba a 30 Hz y 45 Hz respectivamente.
7. Recircular el gas oil hasta que la temperatura indique unos 100°C (aprox. unos 15 minutos).
8. Abrir válvula de salida de molino de manera retirar gas oil.
9. Ya tener pesados el asfalto y el polímero a utilizar.
10. Cerrar la válvula de salida de molino.
11. Verter el asfalto en el embudo previamente calentado al menos a 160°C.
12. Encender la resistencia eléctrica.
13. Como la resistencia eléctrica tiene una altura de 50 mm, llenar con asfalto hasta esa altura en el embudo.
14. La resistencia eléctrica esta instalada en el borde inferior del cono del embudo.
15. Encender la bomba a ciclaje 25 a 30 Hz (marcado en el convertidor de frecuencia).
16. Encender el molino a ciclaje de 40 a 45 Hz (marcado en el convertidor de frecuencia).
17. Recircular e ir vertiendo en forma gradual la cantidad de polímero deseada.
18. Acompañar con una espátula el movimiento de las partículas del polímero dentro del embudo.
19. Llevar la temperatura hasta 180°C.

20. Luego de verter todo el polímero, dejar 5 minutos de rotación del material y obtener muestra.
21. Tener preparado 3 litros de aceite sucio ó diluyente.
22. Si el polímero se encuentra ya disuelto, retirar el material del molino.
23. Si el polímero NO se encuentra disuelto, continuar la recirculación.
24. Luego de retirar el asfalto modificado, verter el diluyente y recircular.
25. Apagar la resistencia.
26. Dejar el diluyente dentro de molino hasta próxima actuación.
27. Apagar los convertidores de frecuencia.
28. Dejar el lugar limpio y en condiciones.

D.2 ELABORACIÓN DE EMULSIONES ASFÁLTICAS EN LA PLANTA PILOTO (MOLINO COLIDAL PRM_100).

1. Verificar cables de conexión de motores y resistencia eléctrica.
2. Cerrar válvula de salida de embudo y de molino.
3. Verificar previamente al uso, que los motores de molino y bomba este funcionando en condiciones.
4. Tener el programador de temperatura para ser usado entre 50 a 70°C.
5. Colocar unos 4 litros de gas oil ó aceite para usar en recirculación y "calentar" el equipo.
6. Abrir válvula de salida de embudo.
7. Encender los convertidores de frecuencia de molino y bomba a 30 Hz y 45 Hz respectivamente.
8. Recircular el gas oil hasta que la temperatura indique unos 50°C (aprox. unos 5 a 10 minutos).
9. Abrir válvula de salida de molino de manera retirar gas oil.
10. Ya tener pesados y calentadas el asfalto (160°C) y la fase acuosa (70°C) a utilizar.
11. Cerrar la válvula de salida de molino.
12. Verter 30% de la fase acuosa y poner a recircular.

13. Encender la bomba a ciclaje 25 a 30 Hz (marcado en el convertidor de frecuencia).
14. Encender el molino a ciclaje de 40 a 45 Hz (marcado en el convertidor de frecuencia).
15. Ir vertiendo de a poco a mano y en forma pareja la misma cantidad de asfalto y fase acuosa hasta finalizar.
16. Encender la resistencia eléctrica.
17. Como la resistencia eléctrica tiene una altura de 50 mm, llenar con liquido emulsivo hasta esa altura en el embudo.
18. La resistencia eléctrica está instalada en el borde inferior del cono del embudo.
19. Recircular.
20. Acompañar con una espátula el movimiento dentro del embudo. Llevar la temperatura a 60 / 70°C.
21. Obtener muestra.
22. Tener preparado 3 litros de aceite sucio ó diluyente.
23. Si la emulsión es OK, retirar el material del molino.
24. Si la emulsión NO se encuentra lista, continuar la recirculación.
25. Luego de retirar la emulsión, verter el diluyente y recircular.
26. Apagar la resistencia.
27. Dejar el diluyente dentro de molino hasta próxima actuación.
28. Apagar los convertidores de frecuencia.
29. Dejar el lugar limpio y en condiciones.

D.3 PRUEBA DE ESTABILIDAD DE ALMACENAMIENTO, ASTM D-6930.

1. Llevar la emulsión asfáltica a temperatura ambiente, de 22 ° C a 28 ° C. Colocar una muestra representativa de 500 ml en el cilindro de estabilidad. Tapar la probeta y dejar que repose, a temperatura ambiente (entre 22 ° C a 28 ° C) durante 24 h. Después de reposar durante este período, quitar aproximadamente 55 ml de emulsión asfáltica de la parte superior del cilindro por medio de la pipeta o sifón sin perturbar el resto de la muestra. a fondo agitar la porción de 55 ml.

2. Pesar $50,0 \pm 0,1$ g de la muestra en un beaker metálico que ha sido previamente pesado con una varilla de metal.
3. Después de retirar la porción superior, desviar los próximos 390 ml (aproximadamente) desde el cilindro . Cuidadosamente remover la emulsión asfáltica restante del cilindro. Pesar $50,0 \pm 0.1$ g en un beaker previamente pesado con una varilla de vidrio.
4. Ajustar la temperatura del horno a 163 ± 3 ° C y poner las muestras en el horno durante 2 h . Al final de este periodo, retirar cada beaker y agitar bien el residuo. Devolver las muestras al horno durante 1 h, después sacar las muestras y dejar enfriar a la temperatura ambiente, y pesar con los agitadores.

D.4 ENSAYO DE DENSIDAD DE UNA EMULSIÓN ASFÁLTICA A 25 °C, ASTM D-6937.

1. Agitar la muestra de emulsión asfáltica y colocarla en un baño de agua de temperatura constante mantenida a $25 \pm 0,5$ ° C durante aproximadamente 1 h.
2. Pesar el picnómetro en la balanza.
3. Retirar la muestra de la emulsión asfáltica del baño y revolver, teniendo cuidado de evitar que quede aire atrapado en la muestra. Si es necesario, filtrar a través de un tamiz de 850 micras (malla N° 20) para eliminar cualquier piel o película que podría estar presente en el asfalto emulsionado.
4. Llevar el picnómetro a aproximadamente 25 ° C y se vierte la emulsión asfáltica en el picnómetro, llenándola por completo (o dentro de 2 mm del borde).
5. Colocar la tapa del picnómetro y quitar con un trapo limpio y seco o papel toalla, el exudado excesivo de asfalto emulsionado a través del orificio en la tapa.
6. Cuando la tapa se coloque firmemente, limpiar el picnómetro cuidadosamente, pesar en la balanza y registrar.

D.5 ENSAYO DE VISCOSIDAD DE SAYBOLT FUROL, ASTM 7496.

1. Poner la muestra de emulsión asfáltica en un beaker y dejarla en un baño de agua a 25 °C aproximadamente 1 h.
2. Insertar un tapón de corcho , con una cuerda atada para una fácil extracción en la cámara de aire en la parte inferior del viscosímetro. El corcho deberá quedar apretado lo suficiente para evitar escapar el aire.
3. Si la temperatura de la prueba seleccionada está por encima de la temperatura ambiente, la prueba puede ser acelerada mediante el precalentamiento de la muestra en su envase original hasta no más de 1,7 ° C por encima de la prueba temperatura. No precalentar nunca ninguna muestra para dentro de 28 ° C de su punto de inflamación, debido a la volatilidad, las pérdidas podrían alterar su composición.
4. Agitar bien la muestra de emulsión asfáltica y luego colarla a través de la malla N° 20 directamente en el viscosímetro hasta que el nivel esté por encima del borde de rebose.
5. Eliminar el rebalse de emulsión asfáltica con ayuda de una pipeta.
6. Revisar que el matraz receptor está en buena posición, a continuación, quitar el corcho del viscosímetro utilizando el cable que está conectado e inicie el tiempo en el mismo instante.
7. Parar el cronómetro en el instante en el cual la emulsión asfáltica llegue a la marca de graduación del vaso receptor. Registre el tiempo de flujo en segundos a los 0,1s más cercanas.

D.6 ENSAYO DE DESTILACIÓN, ASTM D-6997.

1. Se determina la masa de la aleación de aluminio. incluir en esta determinación el alambique, la cubierta, la abrazadera, la termómetro de temperatura , pequeño tapón (si se utiliza) y la junta.
2. Añadir $200 \pm 1,0$ g de la emulsión asfáltica. Anotar esta masa.
3. Fijar firmemente la cubierta del alambique.

4. Insertar el dispositivo de medición de temperatura primero a través de un corcho o tapón de silicona y, a continuación, en uno de los pequeños agujeros proporcionado en la cubierta . Selle el otro orificio con un tapón de corcho o tapón de silicona. Ajustar el dispositivo de medición de temperatura para que el extremo de la sonda o el bulbo queden aproximadamente 6 mm a partir de la parte inferior.
5. Colocar el quemador de anillo alrededor del alambique aproximadamente 150 mm de la parte inferior. Aplicar calor encendiendo este quemador y el ajuste de llama. También aplique suficiente calor de mechero Bunsen para el tubo de conexión para evitar la condensación de agua en este tubo.
6. Cuando la temperatura alcanza aproximadamente $215\text{ }^{\circ}\text{C}$, mover el quemador en anillo aproximadamente a nivel con la parte inferior de alambique. Aumentar la temperatura a $260 \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$, manteniéndola a esta temperatura durante 15 min . Complete la destilación total en $60 \pm 15\text{ min}$ de la primera aplicación de calor. en lugar de mover un solo quemador de anillo, se utiliza un quemador de anillo secundario.
7. Inmediatamente después de la expiración del período de calentamiento, a su vez, de la llama y de nuevo sopesar el quieto y accesorios, se describe en el punto 1. La aleación de aluminio todavía a temperatura ambiente (1) pesa 1,5 g más a $260\text{ }^{\circ}\text{C}$. Para corregir añadir 1,5 g de peso bruto obtenido antes de calcular el porcentaje de residuo por destilación. Calcular y reportar el porcentaje de residuo por destilación. Registrar el volumen de destilado de aceite a los 0,5 ml más cercanos.
8. Calcular y reportar el destilado de petróleo como porcentaje del volumen del asfalto total de emulsión basado en el peso de la muestra.
9. Remover el contenido todavía agitando suavemente el residuo. Esto se puede hacer usando un movimiento de torbellino o agitación con un vaso largo o varilla de acero para obtener material consistente antes de vertido. Retirar la tapa del alambique y verter inmediatamente porciones adecuadas de el residuo en un contenedor o moldes necesaria para el análisis de residuos. Si hay sospecha de cuerpos extraños en el residuo, se vierte el material a través de un tamiz antes de vierte en los moldes de ensayo y los recipiente.

D.7 ENSAYO DE PENETRACIÓN DEL RESIDUO OBTENIDO POR EVAPORACIÓN, ASTM D-5.

1. Examinar el soporte de la aguja y la guía para establecer la ausencia de agua y otros materiales extraños. Si la penetración se espera que supere los 350 (1/10 *mm*) se usa una aguja larga, de lo contrario utilizar una aguja corta. Limpiar la aguja de penetración con tolueno o otro disolvente adecuado, secar con un paño limpio e insertar el aguja en el penetrómetro. A menos que se especifique otra cosa, el peso total es de $100 \pm 0,1$ *g*.
2. Las pruebas se harán con el penetrómetro en el baño, colocar el recipiente de la muestra directamente en el soporte, sumergido en el penetrómetro. Mantenga el recipiente de la muestra (asfalto residual) completamente cubierto con agua en el baño. Si las pruebas se hacen con el penetrómetro fuera del baño, colocar el recipiente de la muestra en el plato, cubra el recipiente con agua por completo desde el baño a temperatura constante y coloque el plato en el plato del penetrómetro.
3. Use el indicador de nivel, asegurar de que el aparato está al nivel.
4. Traer el puntero a cero. Colocar la aguja lentamente y bajarla hasta que su punta sólo haga contacto con la superficie de la muestra. Esto se logra poniendo la punta real de la aguja en contacto con su imagen reflejada en la superficie de la muestra en el agua con la luz bien colocado. Suelte rápidamente el soporte de la aguja para el período de tiempo especificado y ajuste el instrumento para medir la distancia penetración en décimas de milímetro. Si el recipiente se mueve, ignorar el resultado.
5. Hacer al menos tres determinaciones en puntos sobre la superficie de la muestra no menos de 10 mm desde el lado del contenedor de la muestra y no menos de 10 mm de separación entre las penetraciones. Siempre mantener la muestra en temperatura contante llevando la cápsula al baño de temperatura entre repeticiones. Utilice una aguja para cada determinación.

D.8 ENSAYO DE PORCENTAJE RETENIDO EN TAMIZ N°20, ASTM D-6933.

1. La temperatura a la que se realizará la prueba de tamiz está relacionada con la viscosidad de la emulsión asfáltica. Para aquellos materiales cuya viscosidad en segundos Saybolt Furol como se determina por el método de ensayo D244 es de 100 s o menos a 25 ° C, realice la prueba a temperatura ambiente.
2. Determinar el peso del tamiz con tapa puesta al 0,1 g y grabar esta masa como su masa inicial sin muestra.
3. Se determina la masa del recipiente de la muestra que contiene la emulsión asfáltica a 0,1 g. Anotar esta masa, derramar 800-1000 g de la emulsión asfáltica a través del tamiz (si el contenedor de muestra contiene 800-1000 g de muestra , verter todo el contenido) . Determinar la masa del recipiente de la muestra que contiene previamente la emulsión asfáltica a 0,1 g, registrar esta masa . Lavar el residuo en el tamiz con agua destilada agua o agua desionizada hasta que los lavados salgan claros.
4. Colocar el recipiente en e horno de secado calentar durante 2 h a una temperatura de 110 ± 5 ° C horno de secado. Enfriar en un desecador. Determinar la masa del tamiz con tapa y residuo al 0,1 g más cercano. Anotar esta masa.

D.9 PRUEBA DE DESNUDAMIENTO POR HUMEDAD ISSA 114.

1. Se debe obtener una muestra de 10 ± 1 gramos de mezcla de slurry seal curado, representativa del espécimen completo, de los especímenes de ensayo de consistencia (ISSA TB N° 106) o los especímenes de prueba de diseño (ISSA TB N° 113).
2. Se agregan 400 ml de agua del grifo o agua destilada al beaker de 600 ml colocado sobre el calentador y sometida a una ebullición vigorosa.
3. Los 10 gramos del espécimen curado de slurry se añaden dentro del agua hirviendo y se deja hervir en el agua por 3 minutos.

4. Hacia el final de los 3 minutos del periodo de ebullición, el beaker con su contenido es removido del calentador y seguidamente se deja enfriar.
5. Cuando cesa la ebullición, se debe dejar correr agua fría del grifo sobre la superficie de agua caliente hasta que el asfalto libre en la superficie del agua fluya sobre el lado del beaker.
6. Después, el agua es decantada y el contenido se saca del beaker y se coloca sobre toallas de papel absorbente.
7. Después de que la mezcla se ha secado, se examinan las áreas sin revestir y se estima el área de agregado restante recubierto con asfalto.

ANEXOS

ANEXO 1. CARACTERIZACIÓN DE LA EMULSIÓN ASFÁLTICA DE ROMPIMIENTO LENTO, EMULSIÓN ELABORADA EN LA PLANTA PILOTO A UNA VELOCIDAD DE AGITACIÓN DE 2700 RPM PARA EL MOLINO COLOIDAL Y 1800 RPM PARA LA BOMBA CENTRÍFUGA, CON UN PH DE 1,9 PARA SOLUCIÓN JABONOSA.



Laboratorio El Alto
Informe de Pruebas de Laboratorio
AS-08-06-008

No. 1228A13

Rige a partir de
2007-04-19
Versión 7

Solicitado por: Producto Negro

Procedencia: Planta Emulsiones

Lote No.: 01-I y D13

No. registro: 2204

Fecha Muestreo: 2013-06-04

Tanque No.: —

Tipo de muestra: Emulsión Asfáltica CSS-1

Fecha de Recepción: 2013-06-04

Volumen (en m³): —

Método de ensayo	Prueba	Resultado	Límites de especificación	Analista y Fecha	
**ASTM D-6937	Densidad a 25 °C	1013,2 kg/m ³	Reportar	JS	2013-06-04
**ASTM D-7496	Viscosidad Saybolt Furol a 25 °C	(40,7 ± 0,5) SSF	(20.0 a 100.0) SSF	JS	2013-06-04
**ASTM D-6997	Fracción de masa de asfalto. Residuo por Destilación	65,9 %	Mínimo 57.0 %	JMT	2013-06-05
*ASTM D-5	Penetración al residuo a 25 °C, 100 g, 5 s.	(152 ± 2) 1/10 mm	(100 a 250) 1/10 mm	JMS	2013-06-05
**ASTM D-6933	Fracción de masa de asfalto retenido malla N° 20	0,2 %	Máximo 0.1 %	JMT	2013-06-04
**ASTM D-6930	Estabilidad 24 horas, como fracción de masa de asfalto	0,7 %	Máximo 1.0 %	JMS	2013-06-05
*ASTM D-4057	Muestreo (apartado 6.3 del instructivo AS-08-03-003)	N.A	No Aplica	N.A	2013-06-04

REGULACION: Reglamento Técnico RTCA 75.01.22.04. Decreto N° 32812-COMEX-MINAE-MEIC.

Este producto NO CUMPLE con las regulaciones centroamericanas por fracción de masa de asfalto retenido en malla No.20 fuera de especificación

OBSERVACIONES: *Ensayo acreditado. **Ensayo no acreditado. Acreditación de acuerdo con la norma INTE-ISO/IEC 17025:2005. Ver alcance de acreditación en www.eca.or.cr.

***Referencia: Emulsión Asfáltica. Gustavo Rivera. pag 53-54.



ANEXO 2. CARACTERIZACIÓN DE LA EMULSIÓN ASFÁLTICA CATIONICA DE ROMPIMIENTO LENTO ELABORADA POR RECOPE

Método de ensayo	Prueba	Resultado	Límites de especificación	Analista y Fecha	
**ASTM D-6937	Densidad a 25 °C	1033,5 kg/m ³	Reportar	AG	2013-07-16
**ASTM D-7496	Viscosidad Saybolt Furol a 25 °C	(34,7 ± 0,5) SSF	(20.0 a 100.0) SSF	JS	2013-07-16
**ASTM D-6997	Fracción de masa de asfalto. Residuo por Destilación	65,9 %	Mínimo 57,0 %	AG	2013-07-16
*ASTM D-5	Penetración al residuo a 25 °C, 100 g, 5 s.	(128 ± 2) 1/10 mm	(100 a 250) 1/10 mm	AG	2013-07-16
**ASTM D-6933	Fracción de masa de asfalto retenido malla N° 20	0,0 %	Máximo 0.1 %	JS	2013-07-17
**ASTM D-6930	Estabilidad 24 horas, como fracción de masa de asfalto	0,6 %	Máximo 1.0 %	JS	2013-07-17
*ASTM D-4057	Muestreo (apartado 6.3 del instructivo AS-08-03-003)	No aplica	No Aplica	LS	2013-07-16

REGULACIÓN: Regalmento Técnico RTCA 75.01.22.04. Decreto N° 32812--COMEX-MINAE-MEIC.
 Este producto CUMPLE con las regulaciones centroamericanas.
 OBSERVACIONES: *Ensayo acreditado. **Ensayo no acreditado. Acreditación de acuerdo con la norma INTE-ISO/IEC 17025:2005. Ver alcance de acreditación en www.recope.com

ANEXO 3. FICHA TÉCNICA DEL EMULSIFICANTE CATIONICO DE ROMPIMIENTO LENTO, REDICOTE E-4868.



Technical Information

Asphalt Applications

REDICOTE® E-4868

Application	Emulsifier for cationic slow-setting asphalt emulsions.															
Advantages	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Solvent-Free Dense-Graded Mixes:</i> Emulsions prepared with Redicote E-4868 provide extended workability time to dense mixes based on crushed aggregate, reclaimed asphalt pavement or soils. Emulsions can be combined with cement or lime for improved strength and water resistance. • <i>Slurry Seal:</i> Emulsions prepared using Redicote E-4868 allow adequate mix time with the most difficult aggregates and at high temperatures, without the need for additives. • <i>Handling and Storage:</i> Redicote E-4868 does not contain flammable solvent, has little tendency to separate during storage and dissolves easily in the soap phase without a tendency to cause odors. 															
Typical Emulsion Formulation	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%;">Asphalt</td> <td style="text-align: right;">CSS -1h</td> </tr> <tr> <td>Redicote E-4868</td> <td style="text-align: right;">57+</td> </tr> <tr> <td>Hydrochloric acid*</td> <td style="text-align: right;">0.8 - 1.2</td> </tr> <tr> <td>pH soap</td> <td style="text-align: right;">0.1 - 0.25</td> </tr> <tr> <td>Calcium chloride</td> <td style="text-align: right;">1.7 - 2.5</td> </tr> <tr> <td>Water</td> <td style="text-align: right;">0 - 0.1</td> </tr> <tr> <td></td> <td style="text-align: right;">to 100</td> </tr> </table>	Asphalt	CSS -1h	Redicote E-4868	57+	Hydrochloric acid*	0.8 - 1.2	pH soap	0.1 - 0.25	Calcium chloride	1.7 - 2.5	Water	0 - 0.1		to 100	
Asphalt	CSS -1h															
Redicote E-4868	57+															
Hydrochloric acid*	0.8 - 1.2															
pH soap	0.1 - 0.25															
Calcium chloride	1.7 - 2.5															
Water	0 - 0.1															
	to 100															
	<p style="font-size: small; margin: 0;">*22°Baume or 35% wt % Alternative acids such as sulfuric or phosphoric may be used.</p>															

Physical Properties	Appearance at 25°C	dark viscous liquid				
	Pour point, °C	<5 (<41°F)				
	Flash point, °C	>100 (>212°F)				
		10	20	30	40	°C
		50	68	86	104	°F
	Viscosity, mPa.s (cP)	4810	1900	1100	600	
	Density, g/cc	1.12	1.10	1.08	1.06	
	Density, lbs./gal	9.31	9.15	8.99	8.85	

See reverse for additional data

Storage and Handling

Redicote E-4868 may be stored in carbon or stainless steel tanks. Bulk storage should be maintained at 20-40°C (68-104°F).

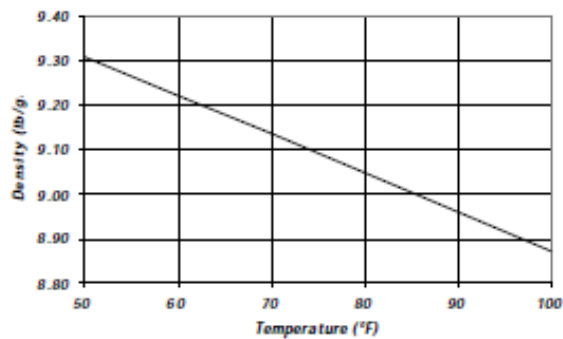
Redicote E-4868 is alkaline and may cause severe irritation or burns to skin and eyes. Protective goggles and gloves must be worn when handling this product. For further information consult the Material

Akzo Nobel Surface Chemistry LLC, 7101 Adams Street, Unit #7, Willowbrook, Illinois 60527 Tel (630) 789-2494, Fax (630) 789-2506
Domestic U.S. Order Desk (800) 906-9977, Export Order Desk (312) 906-7837, Canada Order Desk (905) 273-5959

Safety Data Sheet.

**Packaging
Information**

Redicote E-4868 is available in bulk shipments or in 55-gallon tight head drums of 450 lbs. (205kg) net weight.

Density vs Temperature*Viscosity vs. Temperature*