



**UNIVERSIDAD LAICA VICENTE ROCAFUERTE
DE GUAYAQUIL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA, INDUSTRIA Y
CONSTRUCCIÓN**

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**PROYECTO DE INVESTIGACIÓN
PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL**

TEMA

**PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MEZCLA ASFÁLTICA
RECICLADA CON ACEITE DE MOTOR RECICLADO**

TUTOR

PHD. MSc. JAVIER NICOLÁS ARECHE GARCÍA

AUTORES

STALIN ABIMAEEL CASTILLO CARPIO

RENATO ANDRES YAMASQUI FREIRE

GUAYAQUIL

AÑO

2022

REPOSITARIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA	
FICHA DE REGISTRO DE TESIS	
TÍTULO Y SUBTÍTULO: PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MEZCLA ASFÁLTICA RECICLADA CON ACEITE DE MOTOR RECICLADO	
AUTOR/ES: Castillo Carpio Stalin Abimael Yamasqui Freire Renato Andres	REVISORES O TUTORES: PHD. MSc. Javier Nicolás Areche García
INSTITUCIÓN: UNIVERSIDAD LAICA VICENTE ROCAFUERTE DE GUAYAQUIL	GRADO OBTENIDO: Tercer Nivel de Grado
FACULTAD: INGENIERÍA, INDUSTRIA Y CONSTRUCCIÓN	CARRERA: INGENIERÍA CIVIL
FECHA DE PUBLICACIÓN: 2022	N. DE PAGS: 155
ÁREAS TEMÁTICAS: Arquitectura y Construcción	
PALABRAS CLAVE: Hormigón asfáltico, asfalto, reciclaje, aceite de motor usado, mezcla asfáltica reciclada	
RESUMEN: El presente proyecto está encaminado a reutilizar la mezcla asfáltica reciclada que cumplió su periodo de vida útil y es reemplazado por otro nuevo, este actuara como agregado y el aceite de motor reciclado debido al incremento de automotores en el país, se ha generado un aumento descomunal de los residuos de aceite de motor y esta funcionara como ligante en el diseño de la mezcla asfáltica reciclada con el aceite de motor reciclado con el objetivo de evaluar sus propiedades mecánicas, mediante ensayos de laboratorio se determinó las propiedades físicas y químicas de las mezclas asfálticas recicladas: tipo de asfalto reciclado es AC-6 y con relación al aceite de motor reciclado se identificó el grado de viscosidad en SAE es 15W o ASTM D 2422 ISO VG 32. Para el diseño de la mezcla asfáltica reciclada con el aceite de motor reciclado, se realizaron 4 dosificaciones con el 0%, 0.50%, 1.00% y el 1.50% de incorporación de aceite de motor reciclado, después de haber sido ensayadas con el método de Marshall concluimos que la mezcla optima es de 0.42% aceite de motor reciclado, 4.58% asfalto resultante (3.50% asfalto virgen +1.08% asfalto reciclado), 95% mezcla asfáltica reciclada, Estabilidad 2304 lbs y Flujo 8.68, finalmente podemos concluir que las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica reciclada y aceite de motor reciclado cumplen con lo establecido en la norma técnica MOP-001-F 2002 de especificaciones generales para la construcción de caminos y puentes de Ecuador, permitiendo su uso en vías secundarias o caminos vecinales.	

N. DE REGISTRO (en base de datos):	N. DE CLASIFICACIÓN:	
DIRECCIÓN URL (tesis en la web):		
ADJUNTO PDF:	SI <input checked="" type="checkbox"/>	NO <input type="checkbox"/>
CONTACTO CON AUTOR/ES: Castillo Carpio Stalin Abimael Yamasqui Freire Renato Andres	Teléfono: 0939336275 0982976084	E-mail: scastilloc@ulvr.edu.ec ryamasquif@ulvr.edu.ec
CONTACTO EN LA INSTITUCIÓN:	MSC. Ing. Milton Gabriel Andrade Laborde, Decano de la Facultad de Ingeniería, Industria y Construcción Teléfono: (04) 259 6500 Ext. 241 E-mail: mandradel@ulvr.edu.ec	

CERTIFICADO DE ANTIPLAGIO ACADÉMICO

TESIS CASTILLO / YAMASQUI / ARECHE

INFORME DE ORIGINALIDAD

2%

INDICE DE SIMILITUD

2%

FUENTES DE INTERNET

0%

PUBLICACIONES

0%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1

repositorio.ulvr.edu.ec

Fuente de Internet

2%

Excluir citas Activo

Excluir bibliografía Activo

Excluir coincidencias < 2%

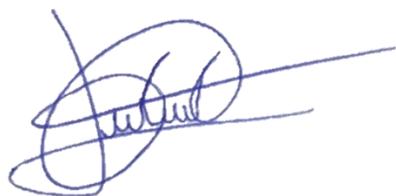


DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS PATRIMONIALES

Los estudiantes egresado Stalin Abimael Castillo Carpio y Renato Andres Yamasqui Freire declaramos bajo juramento, que la autoría del presente proyecto de investigación, “PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MEZCLA ASFÁLTICA RECICLADA CON ACEITE DE MOTOR RECICLADO”, corresponde totalmente a los suscritos y nos responsabilizamos con los criterios y opiniones científicas que en el mismo se declaran, como producto de la investigación realizada.

De la misma forma, cedemos los derechos patrimoniales y de titularidad a la Universidad Laica VICENTE ROCAFUERTE de Guayaquil, según lo establece la normativa vigente.

Autores



STALIN ABIMAEEL CASTILLO CARPIO
C.I. 0705798114



RENATO ANDRES YAMASQUI FREIRE
C.I. 0920627924

CERTIFICACIÓN DE ACEPTACIÓN DEL TUTOR

En mi calidad de Tutor del Proyecto de Investigación “PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MEZCLA ASFÁLTICA RECICLADA CON ACEITE DE MOTOR RECICLADO”, designado(a) por el Consejo Directivo de la Facultad de Ingeniería, Industria y Construcción, de la Universidad Laica VICENTE ROCAFUERTE de Guayaquil.

CERTIFICO:

Haber dirigido, revisado y aprobado en todas sus partes el Proyecto de Investigación titulado: “PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MEZCLA ASFÁLTICA RECICLADA CON ACEITE DE MOTOR RECICLADO”, presentado por los estudiantes Stalin Abimael Castillo Carpio y Renato Andres Yamasqui Freire como requisito previo, para optar al Título de **INGENIERO CIVIL**, encontrándose apto para su sustentación.



PHD. MSC. JAVIER NICOLÁS ARECHE GARCÍA

C.I.: 0962174165

AGRADECIMIENTO

Primeramente quiero expresar mi gratitud con Dios por todas sus bendiciones y la fuerza de voluntad que me otorga para afrontar los obstáculos en el transcurso de mi vida.

Quiero agradecer a toda mi familia, a mis padres Luis Castillo y Rosa Carpio, y a mi hermana Katherine Castillo, a mis Tías(os), especialmente a mi tía Nelly Castillo y a mis abuelos, ustedes han sido el motor de mi vida que impulsan mis sueños hasta lograr cumplirlos, quienes estuvieron a mi lado en los malos y buenos momentos durante mi estudio, gracias por el apoyo incondicional de ustedes.

Al PHD. MSc. Javier Nicolas Areche García, quien con su experiencia, conocimiento y motivación me oriento culminar mi proyecto de titulación.

Stalin Abimael Castillo Carpio

En primer lugar, agradezco a Dios infinitamente por guiarme en mi camino y darme sabiduría aún en los momentos que parecía todo tormentoso, gracias a él culmine la carrera con éxito como una parte fundamental de mi vida.

Agradezco a mi madre por la confianza que me brindo y su apoyo incondicional para seguir adelante y no rendirme, ya que ella supo corregir cada uno de mis erros y celebrar cada uno de mis triunfos obtenidos.

A mi tutor y compañero, porque sin su ayuda y colaboración brindada no se hubiera podido culminar dicho proyecto. Debo de agradecer a cada una de las personas que de forma directa o indirectamente me han sabido ayudar teniéndome paciencia a lo largo de mi vida, mi carrera y la elaboración de dicho proyecto como una fase importante de mi vida.

Renato Andres Yamasqui Freire

DEDICATORIA

Mi trabajo de titulación se la dedico de todo corazón a Dios por permitir que este sueño se haga realidad,

Dedico este primer gran paso de mi vida como profesional en especial a mis padres y hermana, por haberme permitido culminar esta etapa de mi vida, porque estuvieron conmigo cuando quise darme por vencido, quienes me alentaron para continuar y sentirme dichoso de este sacrificio.

A toda mi familia (tías(os), abuelos) por haberme acompañado durante todo mi trayecto estudiantil y en mi vida.

Stalin Abimael Castillo Carpio

Dedico mi proyecto con mucho cariño a Dios, por permitirme llegar hasta aquí un momento especial de mi vida, a mi familia que estuvo en cada paso que doy, forjándome como la persona que actualmente soy, muchos de los logros que he obtenido han sido gracias a su apoyo incondicional, gracias por la confianza puesta en mi y la amplia paciencia que me brindaron, ya que nada de esto hubiera sido posible sin ustedes.

Su comprensión y ayuda fue un pilar fundamental, ya que estuvieron desde el principio hasta la actualidad de mi formación profesional, siempre empujándome a seguir adelante, ya que el camino no fue fácil, pero supieron estar ahí sin desfallecer, dedicándome parte de su tiempo aconsejándome, compartiendo así mismo su sabiduría y experiencia, a todos ustedes esta dedicatoria les pertenece.

Gracias Dios.

Gracias Madre.

Renato Andres Yamasqui Freire

ÍNDICE GENERAL

DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS PATRIMONIALES.....	V
CERTIFICACIÓN DE ACEPTACIÓN DEL TUTOR	VI
AGRADECIMIENTO	VII
DEDICATORIA	VIII
ÍNDICE GENERAL	IX
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I	3
DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN	3
1.1 Tema	3
1.2 Planteamiento de problema	3
1.3 Formulación del problema.....	6
1.4 Sistematización del problema.....	6
1.5 Objetivos de la investigación.....	6
1.5.1 Objetivo General	6
1.5.2 Objetivos específicos.....	6
1.6 Justificación de la investigación.....	6
1.7 Delimitación o alcance de la investigación	8
1.8 Hipótesis	8
1.9 Línea de Investigación	8
CAPÍTULO II.....	9
2.1 Antecedentes de la investigación.....	9
2.2 Marco teórico.....	13
2.2.1 Propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica	13

2.2.2	Mezclas con asfalto reciclado	19
2.2.3	Mezclas con aceite de motor reciclado	36
2.3	Marco conceptual	48
2.4	Marco legal.....	56
2.4.1	Constitución de la República del Ecuador (Asamblea Legislativa , 2008).....	56
2.4.2	Ley orgánica del ambiente (Asamblea Nacional, 2018)	56
2.4.3	Ley de hidrocarburos (Asamblea Nacional, 2018).....	57
2.4.4	Acuerdo ministerial 042 (Ministerio del Ambiente, 2013).....	57
2.4.5	Ley Orgánica de Empresas Públicas	58
2.4.6	Ley de Minería (Art. 1).	58
2.4.7	Ley Orgánica de Educación Superior (LOES).....	58
2.4.8	Universidad Laica Vicente Rocafuerte	59
2.4.9	Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador- MOP-001-F-2002 - Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos y Puentes	61
2.4.10	STP1412. Contribución agregada al rendimiento del asfalto de mezcla en caliente (HMA) (White, Johnson, & Yzenas, 2001).....	62
2.4.11	STP1079. Emulsiones asfálticas (Muncy, 1990).....	62
2.4.12	Evaluaciones de fatiga y rigidez del pavimento de asfalto recuperado en mezclas de asfalto de mezcla caliente (Xiao, Amirkhasian, & Wu, 2011).....	63
2.4.13	Norma Técnica Ecuatoriana (Instituto Ecuatoriano de Normalización)	63
CAPÍTULO III.....		69
3.1	Metodología de la investigación.....	69
3.2	Tipo de investigación.....	69
3.3	Enfoque.....	70
3.4	Técnicas e instrumentos.....	70

3.4.1	Técnica.....	70
3.4.2	Instrumentos.....	71
3.5	Población.....	71
3.6	Muestra.....	75
3.7	Validez y Confiabilidad.....	76
3.8	Análisis de Resultados.....	76
3.8.1	Obtención de los materiales.....	76
3.8.2	Metodología para la obtención de resultados del proyecto.....	75
Capítulo IV	77
INFORME FINAL	77
4.1	Origen del planteamiento.....	77
4.2	Detalle del planteamiento.....	77
4.3	Análisis de resultados.....	77
4.4	Calculo del contenido de asfalto óptimo teórico para el diseño de la mezcla entre el hormigón asfáltico reciclado y el aceite de motor reciclado.....	83
4.5	Elaboración de las briquetas de la combinación de la mezcla asfáltica reciclada con el aceite de motor reciclado.....	84
4.5.1	Elaboración de 3 briquetas “BASE” de 1.08% asfalto reciclado y 3.92% asfalto virgen y el 95% de Mezcla asfáltica reciclada y el 0% de aceite de motor reciclado.	87
4.5.2	Elaboración de 9 briquetas con el (0,5%, 1,0%, 1,5%) de aceite de motor reciclado, 1.08% asfalto reciclado, (3.42%, 2.92%, 2.42) asfalto virgen y el 95% de Mezcla asfáltica reciclada	89
4.5.3	Ejecución del Ensayo del método Marshall.....	92
4.6	Detalle de resultados obtenidos de estabilidad y flujo por el ensayo del método de Marshall (ASTM D1559).....	94

4.7	Determinación del porcentaje óptimo de asfalto de las mezclas de diseño con mezcla asfáltica reciclada y aceite de motor reciclado.	96
4.8	Efectos del aceite de motor en el diseño de las mezclas asfálticas recicladas.....	102
4.9	Evaluación de los Resultados.	104
4.10	Datos referenciales con respecto al costo entre la mezcla asfáltica tradicional y la mezcla asfáltica reciclada con aceite de motor reciclado.	106
	CONCLUSIONES	107
	RECOMENDACIONES	109
	BIBLIOGRAFÍA	110
	ANEXOS	115

ÍNDICE DE FIGURAS

	Figura 1 Costos relacionados con el material del reciclaje de mezcla en caliente,.....	15
	Figura 2. (a) Configuración de prueba BBR (b) Configuración del dispositivo de prueba SCB.	17
	Figura 3. Capa de aplicación típica de mezcla reciclada en frío.	20
	Figura 4. Imágenes SEM: (a) y (b) curado de 7 días, (c) y (d) curado completamente a 60 °C, y (E) y (F) HMA.	24
	Figura 5. Método de extracción por dispersión de solución (SSEM).....	30
	Figura 6. Resultados de penetración de capas imaginarias en pavimento asfáltico recuperado (RAP) y RAP rejuvenecido.....	32
	Figura 7. Proceso de extracción de etapas.....	32
	Figura 8. Valores G* de capas imaginarias de betún	33
	Figura 9. Prueba de envejecimiento del cilindro giratorio (RCAT).....	34
	Figura 10. Resultados de penetración a 25 °C y puntos de ablandamiento (T _{R&B}) de aglutinantes envejecidos con RCAT a 163 °C.	34
	Figura 11. Curvas maestras DSR a 20 °C sobre el envejecimiento RCAT de 70/100 de betún.	35
	Figura 12. Curvas maestras DSR a 20 °C sobre el envejecimiento RCAT de 40/60 de betún. 35	
	Figura 13. Uso típico de aceite de motor de desecho junto con materiales asfálticos.	38

Figura 14. Aceite de motor base (A) y aceite de motor usado (B).....	40
Figura 15. Metodología adoptada al combinar aceite de motor de desecho (WEO) con aglutinante asfáltico	45
Figura 16. Variación De Ablandamiento Punto De El Asfalto Carpeta Con Residuos Motor Aceite (WEO) Contenido.....	46
Figura 17. Recolección de Mezcla asfáltica reciclada (Calles Jose Antepara y Av. Jose Vicente Trujillo).....	76
Figura 18. Recolección de aceite de motor reciclado (Enrique Ortega Moreira, Cdl. Quisquis)	76
Figura 19. Ensayo de Análisis Termogravimetrico de la mezcla asfáltica reciclada.....	78
Figura 20. Ensayo Granulométrico del agregado de la mezcla asfáltica reciclada	79
Figura 21. Compactación de la mezcla asfáltica reciclada	85
Figura 22. Briquetas de la mezcla asfáltica reciclada se evidencia falta de cohesión.....	85
Figura 23. Añadiendo gasolina a la mezcla asfáltica reciclada	86
Figura 24. Extractor centrifugo de asfalto	86
Figura 25. Dosificación base para realizar la mezcla asfáltica reciclada con el cemento asfaltico nuevo.....	88
Figura 26. Combinación entre la mezcla asfáltica reciclada reciclado con el porcentaje de cemento asfaltico nuevo a temperatura de diseño.....	88
Figura 27. Medición de temperatura de la combinación entra mezcla asfáltica reciclada con el porcentaje de cemento asfaltico nuevo.	88
Figura 28. Colocación de la combinación entra mezcla asfáltica reciclada con el porcentaje de cemento asfaltico nuevo en el molde para realizar la compactación.	88
Figura 29. Extrayendo el cemento asfaltico nuevo del envase.....	90
Figura 30. Pesaje del cemento asfaltico nuevo.	90
Figura 31. Pesaje de la mezcla asfáltica reciclada.....	90
Figura 32. Pesaje del aceite de motor reciclado.	90
Figura 33. Incorporación del aceite de motor reciclado en la mezcla asfáltica reciclada.	91
Figura 34. Combinación entre la mezcla asfáltica reciclada con el aceite de motor reciclado.	91

<i>Figura 35.</i> Briquetas elaboradas por la mezcla asfáltica reciclada con el aceite de motor reciclado.....	91
<i>Figura 36.</i> Determinando el peso en el agua de las briquetas para determinar Densidad Bulk.....	92
<i>Figura 37.</i> Determinando el peso superficialmente saturado seco de las briquetas para determinar Densidad Bulk.	92
<i>Figura 38.</i> Reposo de las briquetas en el baño maría dentro de un lapso de 35 minutos	93
<i>Figura 39.</i> Colocación de la briqueta en las mordazas de la Prensa Marshall	93
<i>Figura 40.</i> Briqueta siendo deformada por la Prensa Mecánica Marshall	93
<i>Figura 41.</i> Porcentaje de vacíos V_v vs. % Total de asfalto Resultante	97
<i>Figura 42.</i> Peso unitario vs. % Total de asfalto resultante.	98
<i>Figura 43.</i> Porcentaje de vacíos de agregado mineral VMA vs. % Total de asfalto resultante	98
<i>Figura 44.</i> Porcentaje de vacíos llenos de asfalto VFA vs. % Total de asfalto resultante	99
<i>Figura 45.</i> Estabilidad vs. % Total de asfalto resultante.....	100
<i>Figura 46.</i> Flujo vs. % Total de asfalto resultante.....	100
<i>Figura 47.</i> Estabilidad vs. % Aceite de motor reciclado.....	101
<i>Figura 48.</i> Flujo vs. % Aceite de motor reciclado.....	102
<i>Figura 49.</i> Porcentaje de aceite de motor reciclado vs propiedades de la mezcla asfáltica reciclada con aceite de motor reciclado	103

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Línea de Investigación Institucional/Facultad ULVR.	8
Tabla 2. Mezclas de asfalto.....	15
Tabla 3. Análisis del espectro energético.....	25
Tabla 4. Comparación de las curvas maestras G^* (a 20 ° C) antes y después de la extracción de SSEM.....	31
Tabla 5. Disminución de los valores de G^* después de la extracción después de SSEM	31
Tabla 6. Resumen de propiedades físicas	41
Tabla 7. Resumen de la composición elemental del aceite del motor de desecho.....	43
Tabla 8. Porcentajes que pasa a través de los tamices	62
Tabla 9. Características fisicoquímicas.....	64

Tabla 10. Clasificación para los tipos comprendidos de 200 dmm a 20 dmm de penetración.	65
Tabla 11. Clasificación para los tipos comprendidos de 220 dmm a 40 dmm de penetración.	65
Tabla 12. Clasificación basada en el residuo del ensayo de película fina en horno rotatorio..	66
Tabla 13. Requisitos de cementos asfálticos, para los tipos comprendidosde 200 dmm a 20 dmm de penetración.....	66
Tabla 14. Requisitos de cementos asfálticos, para los tipos comprendidosde 220 dmm a 40 dmm de penetración.	67
Tabla 15. Dosificación de briquetas.....	75
Tabla 16. Ensayos a realizar para determinar las propiedades de la mezcla asfáltica reciclada y aceite de motor reciclado.	75
Tabla 17. Resultados de ensayos de punto de inflamación y punto de combustión de la mezcla asfáltica reciclada y el aceite de motor reciclado.....	77
Tabla 18. Resultados de ensayos de viscosidad de la mezcla asfáltica reciclada.	78
Tabla 19. Ensayo Granulométrico del agregado de la mezcla asfáltica reciclada	79
Tabla 20. Determinación de la densidad, Densidad relativa (Gravedad específica) y absorción de agregado grueso y fino de la mezcla asfáltica reciclada	80
Tabla 21. Resumen de resultados de caracterización de la mezcla asfáltica reciclada	81
Tabla 22. Resultados de ensayos de punto de inflamación y punto de combustión de la mezcla asfáltica reciclada y el aceite de motor reciclado.....	81
Tabla 23. Resultados de ensayos de viscosidad del aceite de motor reciclado.....	82
Tabla 24 Resumen de resultados de caracterización del aceite de motor reciclado.....	82
Tabla 25. Valores de K.....	83
Tabla 26. Valores de F.	83
Tabla 27. Calculo del Porcentaje de asfalto teórico.	84
Tabla 28. Ensayo de extracción de asfalto en la mezcla asfáltica reciclada	86
Tabla 29. Dosificación reajustada para la elaboración de briquetas entre la mezcla asfáltica reciclada y el aceite de motor reciclado.....	87
Tabla 30. Dosificación de la mezcla asfáltica reciclada con el uso del aceite de motor reciclado	89
Tabla 31. Valores de Porcentajes de Agregados, gravedad específica y Absorción.....	94

Tabla 32. Resultados de las propiedades de los diseños de las mezclas asfálticas recicladas con el aceite de motor reciclado.	95
Tabla 33. Resumen de resultados obtenidos de los diseños de las mezclas asfálticas recicladas con el aceite de motor reciclado.....	96
Tabla 34. Tabla de parámetros óptimos obtenidos en relación al porcentaje de total de asfalto resultante.....	102
Tabla 35. Parámetros de las propiedades mecánicas para mezclas asfálticas establecidos por el MOP.....	104
Tabla 36. Evaluación de resultados de los parámetros obtenidos de la combinación entre la mezcla asfáltica reciclada con el aceite de motor reciclado	105
Tabla 37. Calculo de materiales de la mezcla asfáltica reciclada con aceite de motor reciclado	106
Tabla 38. Cuadro comparativo de costos entre la mezcla asfáltica tradicional y la mezcla asfáltica reciclada con el aceite de motor reciclado.....	106

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1. Código de muestras de ensayos laboratorio	115
ANEXO 2. Resultados del análisis termogravimétrico.....	116
ANEXO 3. Resultados del Ensayo de punto de inflamación y combustión	117
ANEXO 4. Resultados del Ensayo de punto de inflamación y combustión	117
ANEXO 5. Resultados del Ensayo de punto de inflamación y combustión	118
ANEXO 6. NORMA ASTM D1559-89.....	119
ANEXO 7. ESPESOR MINIMO DE CONCRETO ASFALTICO	125
ANEXO 8. NORMA NTE INEN 2515 Enmienda 1.	126
ANEXO 9. NORMA DIN 51519.....	128
ANEXO 10. NORMA ASTM D 2422.....	132
ANEXO 11. NORMA ASTM D3381:2020.....	134
ANEXO 12. ANALISIS DE PRECIOS UNITARIOS	139

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, debido a la importancia que tiene el uso de recursos no renovables y/o sus derivados, así como el propio impacto que causa al ecosistema. Por lo tanto, se ha tenido la necesidad de orientar hacia nuevas tecnologías y metodologías de trabajo el empleo de materiales reutilizables, pues el uso de estos puede reducir costos desde una perspectiva ambiental y económica.

Siendo la mezcla asfáltica una opción invaluable, con las nuevas técnicas que se implementan hoy en día es posible mejorar las propiedades mecánicas e incluso químicas de estas. En base a ello, es importante mencionar que todo lo relacionado con tecnologías innovadoras, involucra un estudio interesante sobre comportamiento, puesto que es necesario que se evalúe si estos pueden tener la misma capacidad al ser comparado con las mezclas tradicionales.

De esta manera se puede determinar rasgos, como lo es el soporte de carga y el efecto ante agentes ambientales; si bien es cierto, el uso de mezclas trae ventajas para crear redes viales que permitan acortar o establecer un espacio determinado para el tránsito de vehículos, es importante que estas se encuentran condicionadas a las situaciones del suelo, pues es necesario que el servicio a prestar sea bajo óptimas condiciones.

Siendo la infraestructura vial un indicio de desarrollo a nivel económico y de comunicación dentro de una nación, la calidad de estas es muy importante por lo que su mantenimiento es vital y este debe ser constante, pues es importante que se pueda hacer uso eficiente de los materiales empleados o recursos, de manera que también se pueda cooperar con la preservación de los recursos naturales de todo el entorno.

El desarrollo de esta investigación se encuentra estructurada por capítulos, cada uno de ellos tiene como propósito abarcar un conjunto de apartados que le proporcionaran a este estudio la información necesaria para comprender y darle solución al principal objetivo, bajo la siguiente estructura:

Capítulo 1: Se conforma por 7 apartados, de los cuales se describe el problema y su formulación, la sistematización y los objetivos de la propia investigación tanto general como específicos, posterior a ello se podrá observar la justificación de este estudio, su delimitación y por supuesto la hipótesis.

Capítulo 2: Este capítulo registra toda la información que se vincula a investigaciones similares con el tema de estudio, siendo este los antecedentes de la investigación, seguido de ello las bases teóricas que brindaran mayor conocimiento sobre el tema en cuestión, dentro de este espacio se describirá información teórica y seguido de ello el marco conceptual, por último, se ubica el marco legal, dentro de él se desglosaran las diferentes leyes que se involucraran a la investigación.

Capítulo 3: Este es el capítulo con mayor interés, pues dentro de este se describe el diseño y tipo de investigación a la cual pertenece el estudio, el enfoque y las técnicas que se emplearan para llevar a cabo dicho estudio, culminando así con la población y muestra a utilizar.

Capítulo 4: Informe Final, se presentan todos los resultados obtenidos de la investigación.

Capítulo I

DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 Tema

Propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica reciclada con aceite de motor reciclado

1.2 Planteamiento de problema

La creación de mezclas asfálticas debido a los diferentes componentes que posee, puede ocasionar contaminación al ambiente, ya que son productos derivados del petróleo y pasan por un proceso obligatorio que permite obtener la materia prima, es aquí donde se centra la mayor importancia ya que el proceso de extracción de materia prima causa un gran impacto ambiental, así como el proceso para producir el derivado del petróleo, este es un efecto adicional a dicho impacto ecológico, sin contar con el gasto económico y tiempo necesario.

Siendo este, un producto que en conjunto con otros materiales o sustancias se puede utilizar en la pavimentación de vías, es posible aplicarlo sobre suelo sin ocasionar mayor daño al ecosistema, pues para ello se diseña, para el sometimiento a cargas constantes y por ello debe ser removido cada cierto tiempo y reemplazado por otro nuevo, cuando la remoción de la capa asfáltica ocurre, esta es desechada o solo en algunas ocasiones reciclada.

Posterior a la remoción, es ahí donde se puede estudiar que sustancia mejora sus propiedades mecánicas, hecho que según sea el caso puede evitar la remoción del mismo. Ahora bien, existen variadas sustancias que pueden utilizarse en las mezclas asfálticas recicladas con el objetivo de reutilizar el pavimento capaz de resistir las diferentes cargas a la cual es sometida y también los agentes ambientales, pues con ello se puede crear vías de segundo y tercer orden que comuniquen ciudades y/o sectores.

Por otra parte, se tiene que el aceite de motor reciclado es una sustancia comúnmente desechada, sin embargo, desde hace muchos años en varios continentes y países se ha establecido la reutilización de un porcentaje del aceite reciclado, o en su defecto la mayor cantidad posible, en el caso de Europa en el año 2000, el porcentaje de recolección de aceite de motor usado corresponde entre el 70% a un 75%, lo que representa un 1'730.000 Tm recolectadas así lo indica la Comisión Europea (2001) y según GEIR (Groupement Européen de l'Industrie de la Régénération) en el año 2018 en Europa se han recolectado 2'100.000 toneladas de aceite usado.

En España la recolección de aceite de motor reciclado en el año 1999 fue de 214799 Toneladas anualmente, así lo indica Arner, Barberán, & Mur (2007) y en el año 2019 según SIGAUS (Sistema Integrado de Gestión de aceites usados de España) han recolectado 184844.767 Toneladas de Aceite Usado.

En Italia la entidad responsable de la recogida y tratamiento de los aceites de motor usados es el “Consorzio obbligatorio degli oli usati (CONOU)”. Según los datos manifestados por el CONOU, en 1999 se recogieron unos 189.000 Tm de aceite usado, lo que representaba el 90% de la generación de aceite usado en Italia y en el año 2019 recogió 191000 Tm de aceite de motor usado con un porcentaje de aceites usados enviados para regeneración al 91%.

En Francia el organismo responsable del sector de los aceites usados es el ADEME (Agence de l’environnement et de la maîtrise de l’énergie), según los datos facilitados por dicho organismo, en 1999 se recolectaron 247.700 Tm de aceite usado y en el 2017 se recolectaron 379943 Tm de aceite usado, mientras que en el continente americano en Estados Unidos según Teintze (1991) los 770.000.000 gal/año ingresan al sistema de gestión de aceite usado, a diferencia de países de América del Sur, como Brasil quien recicla al año 270.000.000 lts de acuerdo a lo que señala Repamar, Cepis, GTZ (2002), para Colombia el aceite reciclado corresponde al 60% de aceite usado al año así lo indica Martínez, Rojas, & Bernal (2018).

Para el caso del Ecuador de los datos obtenidos de INEC - Información Económica Ambiental en Empresas ENESEM 2018, ha generado 14’439.056,07 de litros de aceite usado, este producto debe cumplir con un tratamiento específico luego de ser utilizado, así lo sostiene el boletín N.º 219 del Ministerio del Ambiente y agua (2020), donde explica según el comunicado que el 63% de aceites lubricantes usados son desechados al ambiente sin algún tratamiento previo o control.

En la ciudad de Guayaquil según los datos obtenidos “De Guayaquil, M. I. M. (2006). FACTIBILIDAD DEL MANEJO AMBIENTALMENTE CORRECTO (MAC) DE LOS RESIDUOS ACEITOSOS EN GUAYAQUIL”, en el año 2005 se recolectó 1’234.902 galones de aceite usado y en la actualidad debido a la falta de información existente relacionado con la recolección de aceites usados en Guayaquil, se tomó como referencia la cantidad de vehículos matriculados en Guayaquil en el año 2018 que proporciona la ATM (AUTORIDAD MUNICIPAL DE GUAYAQUIL) de 484049 vehículos, teniendo en cuenta, que en promedio un auto recibe 4

cambios de aceite por año, y que en cada cambio requiere en promedio de 1 galón de aceite, entonces tenemos que al año en Guayaquil, aproximadamente se generan 1'936196 galones de aceite lubricante usado.

Con respecto a la mezcla asfáltica reciclada se conoce que los países europeos según EAPA (EUROPEAN ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION "Asphalt in figures". 2009), que lideran en cantidades de toneladas de reciclaje de pavimento asfáltico en el año 2009 son Alemania con 14'000000 Tn , Italia con 12'000.000, Francia con 7'053.000, Países Bajos con 4'500.000 , Reino Unido 4'000000 pero para el año 2019 según EAPA "Asphalt in figures". 2019, es Alemania que recicla 13'400.000 Tn, Italia 12'000.000, Francia 8'074.000 Tn, Inglaterra 6'050.000 Tn, Republica Checa 2'800.000 Tn.

Con respecto a Estados Unidos se obtuvo datos por medio de la fuente (United States. Federal Highway Administration, 2000), que en el año 2000 recicló 33'000.000 Tn de mezcla asfáltica y en el año 2019 según NAPA (National Asphalt Pavement Association), (2020), recicló 97'000.000 Tn de mezcla asfáltica.

Actualmente en Ecuador no se encontró información debido a que no existen entidades que recaben o administren datos relacionados con el reciclaje de pavimento de asfalto.

Adicionalmente, existe el Acuerdo Ministerial N° 042 que manifiesta como debe ser el uso de los lubricantes reciclados y las responsabilidades de distribuidores y toda persona natural o jurídica que manipule lubricantes, pues en vista que anualmente se utiliza 31 millones de galones de aceites y que de este solo el 20% es reciclado se logró crear dicho acuerdo, por ello es necesario conocer que aportes puede brindar esta sustancia, a las mezclas asfálticas pues no solo es cuestión de reducir la contaminación al ambiente que es imprescindible sino también reducir el egreso de divisas que posee el Ecuador.

En vista que la creación de ambos componentes son derivados del petróleo, su obtención recae en procesos que causan impacto contaminante al ambiente y por ende a los seres vivos, es así que el uso de aceite y asfalto reciclado permitirá crear una alternativa beneficiosa para ambos recursos, el primero para disminuir el costo económico que implica crearlos y el segundo para dar mayor durabilidad a cada uno, de modo que se emplee los residuos utilizados en conjunto proporcionando una mezcla óptima de mayor duración, con menor impacto al ambiente y por ende menos costo

económico, de esta manera el consumo anual de aceite reciclado aumentará y la contaminación por mezcla asfáltica se verá reducida.

1.3 Formulación del problema

¿Cómo se comportan las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica reciclada con aceite de motor reciclado?

1.4 Sistematización del problema

- ¿Cuáles son las propiedades físicas y químicas de las mezclas asfálticas recicladas?
- ¿Cuáles son las propiedades físicas y químicas del aceite de motor reciclado?
- ¿Cuál es el diseño de la mezcla asfáltica optima en caliente usando la mezcla asfáltica reciclada y aceite de motor reciclado?
- ¿Cuáles son las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas en caliente usando mezcla asfáltica reciclado y el aceite de motor reciclado?

1.5 Objetivos de la investigación

1.5.1 Objetivo General

Evaluar las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica reciclada con aceite de motor reciclado.

1.5.2 Objetivos específicos

- Identificar las propiedades físicas y químicas de las mezclas asfálticas recicladas
- Identificar las propiedades físicas y químicas del aceite de motor reciclado.
- Diseñar una mezcla asfáltica en caliente usando mezcla asfáltica reciclada y aceite de motor reciclado.
- Determinar las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica en caliente usando mezcla asfáltica reciclada y aceite de motor reciclado.

1.6 Justificación de la investigación

El desarrollo de esta investigación resulta relevante desde la perspectiva teórica, por lo que brindará una construcción teórica de acuerdo a las variables que corresponde a este estudio, siendo estas las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas, la mezcla asfáltica reciclada y el aceite

de motor reciclado, esto permitirá identificar, conocer y a la vez examinar las diferentes características, beneficios y efectos que pueden derivarse de estos elementos.

Con base en la justificación metodológica, esta se ejecutará bajo un marco cuantitativo orientado al uso de la estructura de la mezcla asfáltica, la misma que se encuentra compuesta de materiales reciclados, como es el caso del aceite y el pavimento.

En cuanto a la justificación práctica, es preciso decir que esta investigación servirá como una guía a futuros estudios que se relacionen con el uso de mezcla asfáltica y aceite reciclado, específicamente a las propiedades que aporta y la versatilidad en cuanto a su uso, por lo que será posible evaluarlas en lo que respecta a la elaboración de carpetas asfálticas, especialmente las empleadas en vías de segundo orden y/o vías de vecinales.

Por último, esta investigación brindará una opción para la disposición final adecuada del descarte de materiales provenientes de mezclas asfálticas en caliente y de lubricantes, por lo cual reducirá el impacto ambiental de desecho los materiales provenientes de mezclas asfálticas.

Dado a los altos índices de contaminación de las últimas décadas, ha existido la necesidad de orientar mejoras en diferentes áreas de la ingeniería, tal es el caso de las mezclas asfálticas, pues siendo estas obtenidas de un recurso no renovable y que además de esto, para obtenerlo debe sufrir un proceso que produce mayor contaminación, es imperioso buscar alternativas positivas que permitan orientar dichas mejoras.

1.7 Delimitación o alcance de la investigación

- **Campo:** Educación superior, Tercer Nivel Grado
- **Área:** Ingeniería Civil.
- **Aspecto:** Investigación experimental.
- **Tema:** Propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica reciclada con aceite de motor reciclado.
- **Delimitación espacial:** Ecuador, Provincia del Guayas, Guayaquil, Tarqui, Laboratorio Universidad Laica Vicente Rocafuerte.
- **Delimitación temporal:** 6 meses.

1.8 Hipótesis

- Las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica en caliente usando mezcla asfáltica reciclada y aceite de motor reciclado cumplirán con lo establecido en la norma técnica MOP-001-F 2002 de especificaciones generales para la construcción de caminos y puentes de Ecuador, permitiendo su uso en vías secundarias o caminos vecinales.

1.9 Línea de Investigación

Tabla 1. Línea de Investigación Institucional/Facultad ULVR.

Dominio	Línea institucional	Línea de Facultad
Urbanismo y ordenamiento territorial aplicando tecnología de la construcción eco-amigable, industria y desarrollo de energías renovables.	Territorio, medio ambiente y materiales innovadores para la construcción.	Materiales de construcción

Fuente: (Universidad Laica Vicente Rocafuerte de Guayaquil, 2021)

Capítulo II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes de la investigación

Dentro de la ingeniería hay gran cantidad de variables intervinientes en el ámbito de la construcción de vías (carreteras) para el transporte de personas y bienes; sin embargo, para este caso en particular se estudiará los aspectos relacionados las variables de la mezcla asfáltica reciclada, aceite de motor reciclado y sus propiedades mecánicas. En relación a la mezcla asfáltica reciclada, el estudio titulado “Evaluación del comportamiento físico mecánico de mezclas en frío para vías de bajo volumen de tránsito de Colombia utilizando 100% de pavimento asfáltico reciclado” (Arias Fuya & Rivera Camacho, 2019), Universidad Católica de Colombia, Título a obtener Especialista en Ingeniería de Pavimentos, teniendo como objetivo general de evaluar el comportamiento físico y mecánico de mezclas asfálticas en frío estabilizadas con emulsión asfáltica para su empleo en vías de bajo volumen de tránsito de Colombia utilizando el cien por ciento de pavimento asfáltico reciclado y cemento Portland como filler. Los resultados obtenidos en este estudio evidencian que la mezcla asfáltica reciclada tendría un mejor comportamiento frente a las solicitudes de carga, donde la misma resultaría de la mezcla del asfalto reciclado con el tres por ciento de emulsión asfáltica, la cual genera una variación de resistencia a la tracción indirecta; con lo que se demuestra que el módulo resiliente tiene un incremento de variación más alta. Además, los valores hallados de las mezclas ensayadas no cumplen con en el Artículo 461-13 de la Norma INVIAS de Colombia, razón por la cual no podrían ser utilizadas en el mejoramiento de las vías de bajos volúmenes de tránsito; con lo que se deduce que este estudio aportará significativamente con sus bases teoricas a la presente investigación.

Por otra parte el estudio sobre el tema “Aplicación de mezcla asfáltica reciclada con emulsión para mejorar la superficie de la carpeta de rodadura en la Av. Principal-Carapongo-Lima 2019”, (Peve Chipana, 2019) realizado en Perú, en la Universidad César Vallejo, con título a obtener de Ingeniero Civil, cuyo objetivo general es “Determinar como la aplicación de la mezcla asfáltica reciclada con emulsión mejora la superficie de la carpeta de rodadura en la Av. Principal-Carapongo-Lima 2019”, en este proyecto de investigación refleja los siguientes resultados que en la aplicación de la mezclas asfálticas recicladas con emulsión perfeccionan la superficie de la

carpeta de rodadura que al utilizar el 100% del material de mezcla asfáltica reciclada cumplió con todos los parámetros requeridos en la sección 437 del “Manual de Carreteras. Especificaciones Técnicas Generales Para Construcción” (EG-2013) relacionado al uso del pavimento con mezcla reciclada en frío, resultando que la aplicación del RAP es viable porque cumple con una estabilidad de 270.80 kg y lo mínimo que indica en la sección 437 es de 227 kg; de igual manera en el porcentaje de pérdida de estabilidad arrojó el 15.9%. Además, del ensayo de Abrasión de los Ángeles se obtuvo que posee un desgaste de 25.2%; y del ensayo de partículas fracturadas del agregado grueso se obtuvo un 92.8 % y 87.8%. En el ensayo de partículas planas y alargadas se alcanzó un máximo de 8.80%; y en el ensayo de equivalente de arena los resultados también son adecuados, ya que presentan 63.60% donde exige un mínimo de 30%; y finalmente, en el ensayo de sales solubles totales se determinó un 0.139 %. Todos estos resultados cumplen con la normativa del Manual de Carreteras EG-2013 en sus tablas 437-01 y 437-02, lo cual permite inferir que las bases teóricas utilizadas en este estudio contribuirá considerablemente a esta investigación.

Del mismo modo en el estudio sobre el “Diseño de una mezcla asfáltica en caliente mediante la metodología Superpave con la incorporación de 25% de pavimento asfáltico reciclado (RAP), más ensayos de rueda de Hamburgo y módulo de rigidez”, (Rivero Droguett, 2018) de la Universidad Técnica Federico Santa María de Chile, con título a obtener de Constructor Civil tuvo como objetivo general de “Realizar el diseño volumétrico de una MAC por la metodología SUPERPAVE según el manual MS-2, Asphalt Mix Design Methods para el proyecto "Conservación mayor pista 17R/35L Aeropuerto Arturo Merino Benítez 2017-2018", cumpliendo con sus especificaciones técnicas”. Este proyecto tuvo como resultado el cumplimiento de los parámetros de los ensayos para el diseño con RAP (Pavimento asfáltico reciclado), donde se utilizó el ensayo de rueda de Hamburgo, cuyos resultados son categóricos al determinar que las deformaciones permanentes medidas promedio son de 1,39[mm], siendo esta una deformación leve al no superar 20[mm] a las 20.000 pasadas; y, adicionalmente, aplicando el ensayo de módulo de rigidez se obtuvo un resultado positivo, siendo el promedio de 8.781[MPa], y el ajustado de 8.840 [MPa]; resultados que superan el mínimo especificado de 4000[MPa], lo cual evidencia el aporte teórico significativo para el presente estudio en su relación con la variable de mezcla asfáltica.

En relación al aceite de motor reciclado, el proyecto de investigación sobre “Mejoramiento de suelo con fines de cimentación con afirmado y aceite reciclado de motores en la Avenida Víctor Raúl Haya de la Torre 220-Chimbote” (2018), (Osorio Arellano & Elías, 2018) de la Universidad César Vallejo de Perú, con título a obtener a Ingeniero Civil, dicho estudio tiene como objetivo general “Explicar la influencia en el resultado del mejoramiento del suelo con fines de cimentación en la mezcla de afirmado y aceite reciclado de motores, en la avenida Víctor Raúl Haya de la Torre 220-Chimbote”, donde se comprobó el mejoramiento del terreno al mezclar el afirmado con el aceite reciclado de motores a un 4% del peso del afirmado, con lo cual se cumple la norma técnica de suelos y cimentaciones del reglamento nacional de edificaciones del Perú, debido a que los componentes químicos que posee el aceite reciclado contiene el 62% de carbono, el cual entrelazadas químicamente con los carbonatos de calcio (CAL) del afirmado, aumentan las propiedades cementantes de la propuesta de mejoramiento de suelo para la cimentación; lo cual aporta significativamente a las bases teóricas del proyecto de investigación presente.

Asimismo, el “Estudio del comportamiento energético del aceite de motor reciclado como fluido de trabajo en un sistema de panel solar de placa plana en zonas de alta exposición solar en Colombia.” (Vera Castellanos & Benitez Guevara, 2020) de la Universidad distrital Francisco José de Caldas en Colombia, con título a obtener de Tecnólogo en mecánica, con objetivo general “Determinar la viabilidad del uso de aceite quemado reciclado de motor como almacenador térmico en la aplicación de un sistema solar de placa plana”, muestran en el modelo en TRNSYS (Transient System Simulation Tool) que el aceite de motor reciclado presenta pérdidas considerables debido a su calor específico, al disminuir el rendimiento de su fluido en un 30% para almacenar energía en comparación con el agua. Consecuentemente, el aceite de motor usado es viable en sistemas de mediana-alta temperatura de (80-140°C), lo cual aporta teóricamente a la presente investigación.

En cambio el estudio de tema sobre el “Obtención de la mezcla combustible diésel con aceites lubricantes reciclados del automóvil en concentraciones de 5 %, 10 %, 15 %, 20 % y 30 % y determinación de los parámetros característicos del motor (Altamirano Baño & Pabón Quito, 2016) de la Universidad de las Fuerzas Armadas de Ecuador, con título a obtener de Ingeniero automotriz, tiene como objetivo general de “Obtener la mezcla combustible diésel con aceites lubricantes reciclados del automóvil en concentraciones de 5 %, 10 %, 15 %, 20 % y 30 % para determinar los parámetros característicos del motor”, donde se utilizaron las mezclas de

combustibles en concentraciones de 5 %, 10 %, 15 %, 20 % y 25 % en un laboratorio certificado, arrojando como resultado que el índice de cetano, densidad API, viscosidad cinemática, cantidad de azufre y el poder calorífico aumentan proporcionalmente a la cantidad de aceite destilado contenido en la mezcla, y el índice de cetano aumentó en un máximo de tres puntos con respecto al diésel normal. El punto más alto de cetano es de 55 encontrándose en la mezcla de concentración del 25%; lo cual aporta teóricamente a esta investigación.

Finalmente, en relación a las propiedades mecánicas, el estudio titulado “Estudio de las propiedades mecánicas del asfalto modificado con polvo de caucho reciclado incorporado por vía húmeda y por vía seca frente al asfalto flexible sin modificación” (2017), (Chamarro Molina & Chancusi Ortega, 2017) Universidad Central del Ecuador, con título a obtener de Ingeniero Civil, cuyo objetivo general es “Ejecutar el estudio de las propiedades mecánicas del asfalto modificado con polvo de caucho reciclado incorporado por vía húmeda y por vía seca frente al asfalto flexible sin modificación, mediante ensayos de laboratorio para obtener una mezcla óptima que sirva en proyectos viales ecológicos”. Este estudio obtuvo como resultado el 6.2% de porcentaje óptimo de cemento asfáltico necesario para el diseño de la mezcla, realizado por el método Marshall. Se descubrió que no se puede adicionar más del 1% de polvo de caucho reciclado porque los resultados de los ensayos dinámicos empiezan a descender si se aumenta dicho porcentaje; además obtuvieron el porcentaje óptimo de polvo de caucho que es de 16% cuando la viscosidad de la mezcla modificada (asfalto-caucho) está dentro del rango de la norma INEN 2680; lo cual apoyará con las bases teóricas en la presente investigación.

Por otra parte el trabajo de investigación “Evaluación de las propiedades mecánicas de las carpetas asfálticas utilizando tratamiento rejuvenecedor, aplicado para la vía Princesa Toa-Conocoto en la ciudad de Quito” (Jurado Rivera & Palacios Ledesma, 2018) de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, con título a obtener de Ingeniero Civil, tiene como objetivo general “Determinar si al aplicar el producto rejuvenecedor WD2000 en una carpeta asfáltica usada se mejoran sus propiedades mecánicas a fin que llegue a cumplir su vida útil en óptimas condiciones”, en el cual lograron determinar que en las diferentes dosificaciones asignadas 150 cc/m², 246 cc/m² en el ensayo del péndulo de fricción con diferentes temperaturas, el coeficiente de fricción de la briquea con el producto rejuvenecedor es menor con respecto a la briquea sin el producto rejuvenecedor; y, adicionalmente lograron determinar que efectivamente el producto

rejuvenecedor WD2000 modifica las características en el ensayo de gravedad específica Bulk para cada concentración y punto analizado de la vía, que mientras más aumenta el valor de la gravedad específica Bulk, más producto rejuvenecedor a ingresado al pavimento también en el ensayo de estabilidad y flujo refleja que el pavimento sin el producto tiene un valor de 3118 lbf 16, y que colocando el producto en el pavimento obtienen valores de estabilidad y flujo de hasta 3533 lbf 18 que concluyen que acorde se incrementa la adición del producto rejuvenecedor WD2000 la estabilidad y el flujo aumentan haciéndole al hormigón asfáltico más resistente y flexible; el cual generara un aporte teórico importante para el presente estudio relacionada con la variable de propiedades mecánicas.

Por último la investigación sobre “Propiedades Mecánicas del Asfalto en caliente adicionando 1.5% de Caucho Reciclado Granular, Chimbote - 2019” (Farfan Canchis & Romero Dextre, 2019), Universidad Cesar Vallejo de Perú, con título a obtener de Ingeniero Civil, teniendo como objetivo general “Determinar el comportamiento de las propiedades mecánicas del asfalto en caliente adicionando 1.5% de caucho reciclado granular, Chimbote2019.”, determinaron el contenido óptimo de cemento asfáltico para la mezcla modificada con 1.5% de caucho reciclado granular es de 5.3%, aclararon que la incorporación de 1.5% de caucho reciclado granular mejora las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas, esto se verificó mediante el ensayo de Marshall aplicado a las briquetas asfálticas, obteniendo que para la mezcla asfáltica convencional una estabilidad de 2013 Kg y flujo de 3.5mm, mientras que para la mezcla asfáltica modificada se obtuvo una estabilidad de 2064 Kg y un flujo de 3.8mm, y también mejora incrementando la estabilidad en 2.53% y el flujo 8.57%, en comparación con la muestra convencional, lo cual permite deducir que las bases teóricas utilizadas en este estudio aportara considerablemente a esta investigación.

2.2 Marco teórico

2.2.1 Propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica

Para el análisis de la variable dependiente correspondiente a las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas a partir de materiales reciclados, se utilizará el texto “Proceedings of the 5th International Symposium on Asphalt Pavements & Environment (APE)”, dentro del cual se encuentra el apartado titulado “Experimental Investigation of Performance Properties of Asphalt Mixture Designed with the Re-recycled RAP and EAFSS” de los autores: Wang, Di, Cannone,

Augusto; Hoon, Ki; Riccardi, Chiara and Wistuba, Michael; presentado en el año 2020, donde se expone entre otras cosas las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas a partir de pavimento de asfalto reciclado (RAP), sobre lo cual se puede comentar:

Tomando en consideración los aspectos económicos y sobre todo ambientales, los materiales a partir de subproductos reciclados e industriales, se han visto en la actualidad cada vez más utilizados en el sector de la construcción de pavimentos, esto se da tanto por las autoridades viales, así como por las instituciones de investigación. Esto incluye además la utilización de pavimento de asfalto recuperado (RAP), tejas de asfalto reciclado (RAS), residuos de construcciones y demoliciones (CDW), residuos de caucho, escorias de acero, entre otros. Dentro de esta lista de materiales, la utilización de RAP, así como de subproductos, tales como las escorias han experimentado un incremento significativo en los últimos años. Sobre lo antes acotado, los autores (Poulikakos, et al., 2017), comentan los resultados de su investigación sobre el RAP y afirman:

El pavimento a partir de pavimento de asfalto recuperado (RAP) proporciona agregados y aglutinantes de alta calidad y se puede reciclar hasta en un 100% en carreteras nuevas (Fig. 1), existen ahorros considerables en los costos relacionados con los materiales, incluso si se utilizan agentes rejuvenecedores para restaurar las propiedades del aglomerante asfáltico antiguo. De acuerdo con las estadísticas registradas, 47Mt de RAP se reciclan en Europa, pero la tasa de reciclaje en Europa varía mucho con Alemania en 97% y Suiza en 24%, se ha demostrado que el hormigón asfáltico que contiene cantidades muy altas de RAP puede tener un rendimiento mecánico similar al de una mezcla hecha de todos los componentes vírgenes (Poulikakos, et al., 2017, p. 34).

Preparación del material

Para este tipo de adecuación, se selecciona un elemento aglutinante de asfalto que no tenga modificaciones y que posea un grado determinado de rendimiento, así como de piedra caliza para preparar una mezcla para utilizar en la capa superficial de acuerdo con el diseño de mezcla convencional a usar. Este material se identifica como referencia. Luego, los materiales frescos se envejecen de forma artificial, dentro de un entorno de laboratorio, para luego triturarlo y así obtener la primera mezcla de RAP y así producir las primeras mezclas recicladas con la misma graduación.

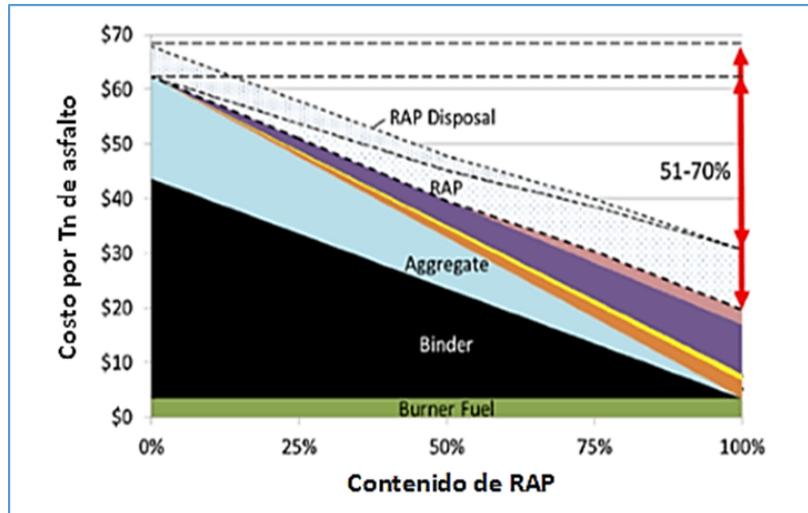


Figura 1 Costos relacionados con el material del reciclaje de mezcla en caliente, Fuente: (Poulikakos, et al., 2017).

De manera similar estos materiales se trituran y envejecen para posteriormente diseñar el RAP reciclado, el cual se incluye en las mezclas recicladas de segunda generación. En esta etapa, los materiales son preparados con un 20% de RAP y se los definen como fuente B de RAP, luego que el producido con 40% de RAP se designa como fuente de RAP C. Sin embargo, debido al aglutinante en el RAP, las partículas pequeñas se agrupan, por lo tanto, los agregados finos y las cargas son difíciles de evaluar y tamizar. Por tanto, el RAP se sustituye directamente por el peso. En la Tabla 2, se resumen las mezclas asfálticas utilizadas.

Tabla 2. Mezclas de asfalto

ID	Nivel de Reciclaje	Material reciclado (%)	Fuente RAP
A	Virgen	0	-
B	RAP reciclado	20	A
C	RAP reciclado	40	A
D	Virgen	0	-
E	Virgen	0	-
F	RAP re-reciclado	20	B
G	RAP re-reciclado	40	B
H	RAP re-reciclado	10	B
I	RAP re-reciclado	20	B
J	RAP re-reciclado	20	C
K	RAP re-reciclado	40	C
L	RAP re-reciclado	10	C
M	RAP re-reciclado	20	C

Fuente: (Poulikakos, et al., 2017).

Pruebas de fatiga

Las propiedades de fatiga realizadas a las mezclas asfálticas son evaluadas mediante el ensayo de tracción indirecta cilíndrica (CIDT). La carga cíclica es aplicada a la muestra de mezcla de asfalto a una temperatura de 20 ° C con una frecuencia de 10 Hz. Durante este ensayo se puede observar un módulo de rigidez decreciente, debido principalmente a fenómenos relacionados a la fatiga y a la evolución de la relación de energía. El número admisible de ciclos de carga y la de fatiga correspondiente están determinado por el pico de la curva ER, debido a que está asociado con el comienzo de la macro fisuración. Sobre el rendimiento de agrietamiento por fatiga, los autores (Foroutan, Amid, Hoff, Dessouky, & Ho, 2019), argumentan:

El agrietamiento por fatiga es un problema considerable en los pavimentos de asfalto, que se produce como resultado de la falla del material bajo cargas de tráfico repetidas. Cada pasada de rueda se considera como un ciclo de carga que reduce la rigidez y resistencia del material. Esta disminución de la rigidez conduce hasta el inicio del agrietamiento y en última instancia, la falla prematura. El módulo de rigidez es un parámetro importante en el análisis de pavimentos asfálticos, muestra la capacidad de la mezcla para resistir el estrés y la deformación originados por la carga del tráfico, y luego juega un papel importante en el comportamiento de fatiga de las mezclas asfálticas (Foroutan, Amid, Hoff, Dessouky, & Ho, 2019, p. 5).

Pruebas de fluencia y fractura a baja temperatura

Las pruebas de fluencia a baja temperatura se realizan en vigas pequeñas de mezcla de asfalto, con un reómetro de viga de flexión (BBR), en el cual se usa aire como un medio de enfriamiento (Fig. 2a). Las pruebas de fractura a baja temperatura se realizan con la configuración de Viga Semi-Circular Bend (SCB). Esta prueba se realiza con una muestra de diámetro de 150 mm, un espesor de 25 mm y una muesca recta de 15 mm de largo y 1,5 mm de ancho (Fig. 2b). Un desplazamiento de la línea de carga (LLD) y un Desplazamiento de apertura de boca de grieta (CMOD) se utilizan juntos para las mediciones de desplazamiento. Sobre estas características de las mezclas asfálticas y cómo influye en su desempeño, los autores (Cannone, Moon, Wang, Riccardi, & Wistuba, 2018), acotan lo siguiente:

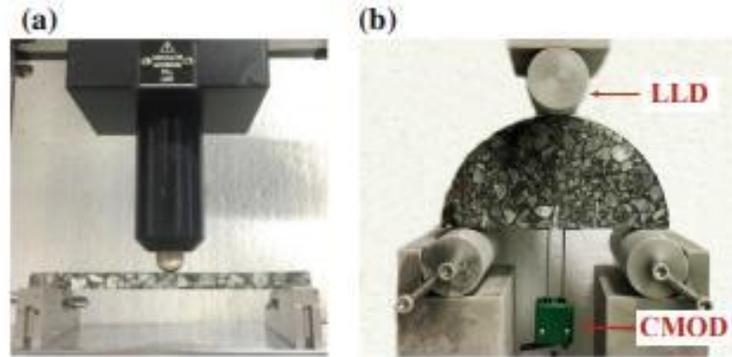


Figura 2. (a) Configuración de prueba BBR (b) Configuración del dispositivo de prueba SCB.

Fuente: (Wang, Cannone, Hoon, Riccardi, & Wistuba, 2020).

Los pavimentos de asfalto que experimentan climas extremadamente fríos pueden sufrir eventos de agrietamiento térmico que pueden afectar drásticamente el desempeño estructural y funcional de las infraestructuras viales, reduciendo potencialmente la vida útil general del pavimento. Por lo tanto, una buena comprensión de las características de falla de la mezcla asfáltica es fundamental para construir pavimentos asfálticos. La configuración de tracción indirecta (IDT) se utiliza convencionalmente para obtener la rigidez a la fluencia y la resistencia nominal a baja temperatura. Sin embargo, este método no proporciona suficiente información sobre los mecanismos de fractura de los pavimentos asfálticos (Cannone, Moon, Wang, Riccardi, & Wistuba, 2018, p. 1).

Comportamiento de fatiga

En este tipo de estudio, la tracción indirecta cilíndrica (CIDT) se utiliza para poder evaluar la respuesta a la fatiga del material, todas las muestras se someten a esta prueba bajo una carga de control de tensión a una temperatura constante, que puede ser de 20 °C. Con la finalidad de determinar las líneas de fatiga en la estructura, se registra además el número de ciclos de carga hasta la falla por fatiga o vida útil a la fatiga. Se puede encontrar una ligera mejora en la fatiga cuando se preparan mezclas con materiales frescos y escorias con respecto al material de referencia virgen. Las mezclas preparadas con la primera generación de RAP artificial presentan un mejor comportamiento a la fatiga en todo el conjunto de mezclas, seguidas de la mezcla preparada con RAP reciclado y con o sin escorias.

Esto indicaría que las mezclas preparadas a partir de RAP reciclado, ya sea con o sin escorias presentan una respuesta a la fatiga que se puede comparar a la temperatura de prueba de referencia (20 ° C). Esta tendencia no es del todo novedosa, debido a que se puede esperar un comportamiento opuesto del material para las pruebas de fatiga realizadas a temperaturas más bajas. Con referencia a esto los autores (Hugener & Kawakami, 2017)

En general, las propiedades de las mezclas de reciclaje no cambiaron mucho, el rendimiento a la fatiga disminuyó ligeramente y la sensibilidad al agua mejoró incluso en pequeña medida. Sin embargo, la temperatura del RAP y la forma de adición mostraron un gran impacto en la calidad de la mezcla de reciclaje final (Hugener & Kawakami, 2017, p. 77).

Pruebas de fluencia y fractura a baja temperatura

Los resultados obtenidos de las pruebas de fluencia BBR, generalmente indican un aumento de la rigidez asociado con un mayor porcentaje de RAP y RAP reciclado, los materiales preparados con una combinación de escorias y RAP reciclado muestran una rigidez aún mayor. Esto sugiere una capacidad de relajación más leve. Sin embargo, el estrés térmico observado es consistente y puede considerarse aceptable. Esto parece fomentar la premisa de combinar RAP reciclado para la construcción de pavimentos. El efecto combinado del RAP reciclado sobre las propiedades de fractura a baja temperatura de la mezcla de asfalto se puede verificar con una prueba de fractura SCB simple. Respecto a los resultados que se pueden esperar de este tipo de experimentos, los autores (Wang, Cannone, Hoon, Riccardi, & Wistuba, 2020) concluyen al respecto y afirman sobre las pruebas con RAP:

Se pueden encontrar comportamientos de fractura a baja temperatura relativamente similares para la mezcla preparada con RAP reciclado en comparación con la mezcla fresca convencional cuando se utiliza una mayor cantidad de RAP. De manera similar a las pruebas de fluencia, se obtiene un mejor rendimiento cuando se utilizan escorias. Esto está en desacuerdo parcial con los resultados de las pruebas de fluencia (Wang, Cannone, Hoon, Riccardi, & Wistuba, 2020, p. 171).

2.2.2 Mezclas con asfalto reciclado

2.2.2.1 Mezclas asfálticas recicladas en frío

Para el análisis de la de las mezclas asfálticas recicladas, se va a utilizar el texto “Materiales de construcción de pavimentos ecoeficientes”, específicamente del capítulo Microestructura y Rendimiento característicos de mezclas asfálticas recicladas frías, de la autoría de (Lin & Xiao, 2020), donde proponen un amplio estudio sobre las mezclas asfálticas y entre otras cosas denotan:

Introducción

Con el auge de la industria vial, se han producido en la actualidad a nivel mundial una considerable cantidad de mezclas asfálticas a partir de desechos. Estas mezclas de asfalto de desecho no solo han adquirido un posicionamiento dentro del mercado, sino que también colaboran con el medio ambiente. Por otro parte, la falta de áridos crudos de buena calidad y energía han limitado drásticamente la construcción y el mantenimiento del pavimento. Por otra parte, el reciclaje de pavimento asfáltico se ha convertido actualmente un tema relevante en los últimos años. En la actualidad, el reciclaje en frío del pavimento asfáltico es una de las técnicas más efectivas de reducir el impacto ambiental, así como la escasez de recursos naturales, respecto a esto los autores (Xiao, Yao, Wang, Xinghai, & Amirkhanian, 2018) afirman:

Debido a la influencia directa del RAP en la vida útil y rendimiento del pavimento reciclado, las características de RAP deben evaluarse los materiales. En general, los materiales RAP se reciclan del pavimento existente mediante el proceso de molienda y trituración y luego se mezcla con una mezcla de asfalto fresco y otros aditivos, por ejemplo, rejuvenecedor. Los factores típicos que influyen en la calidad del material RAP incluyen el contenido de humedad del RAP, la condición y el contenido de betún en el RAP, las fuentes de RAP y la gradación del agregado en el RAP. (Xiao, Yao, Wang, Xinghai, & Amirkhanian, 2018, p. 586).

Las técnicas de reciclaje en frío se han desarrollado de manera vertiginosa en países como Estados Unidos, China, Italia y Sudáfrica, donde el reciclaje en frío de pavimento asfáltico reciclado (RAP) es un tipo de técnica de rehabilitación que se utiliza generalmente para las carreteras que poseen un volumen de tráfico moderado en los países industrializados. La mezcla reciclada en frío se utiliza generalmente en la capa interior de la carretera, debido principalmente

a su alto nivel de vacío y su bajo rendimiento. En la actualidad se ha demostrado que el reciclaje reciclado en frío resulta rentable para la rehabilitación de carreteras con mucho tráfico. Así como el reciclaje en frío de RAP por medio de asfalto emulsionado se ha utilizado con éxito en autopistas con tráfico pesado durante la rehabilitación de pavimentos de asfalto en estos países.

Adicionalmente, se puede comentar que no existe un estándar globalmente aceptado que este orientado hacia el diseño de estructuras de mezclas recicladas en frío, pero se han propuesto algunos métodos de diseño estructural para mezclas recicladas en frío, que incluyen el método del número estructural estadounidense, el método sudafricano y el método de diseño de la relación de esfuerzos del desviador sugerido en Alemania para niveles de tráfico pesado. En la Fig. 3 se muestra una capa de aplicación de mezcla reciclada en frío en carreteras a nivel mundial. Se puede observar que la mezcla reciclada en frío se utiliza generalmente en las capas inferiores de la carretera, y la capa de aplicación de la mezcla reciclada en frío no es igual en todo el mundo.

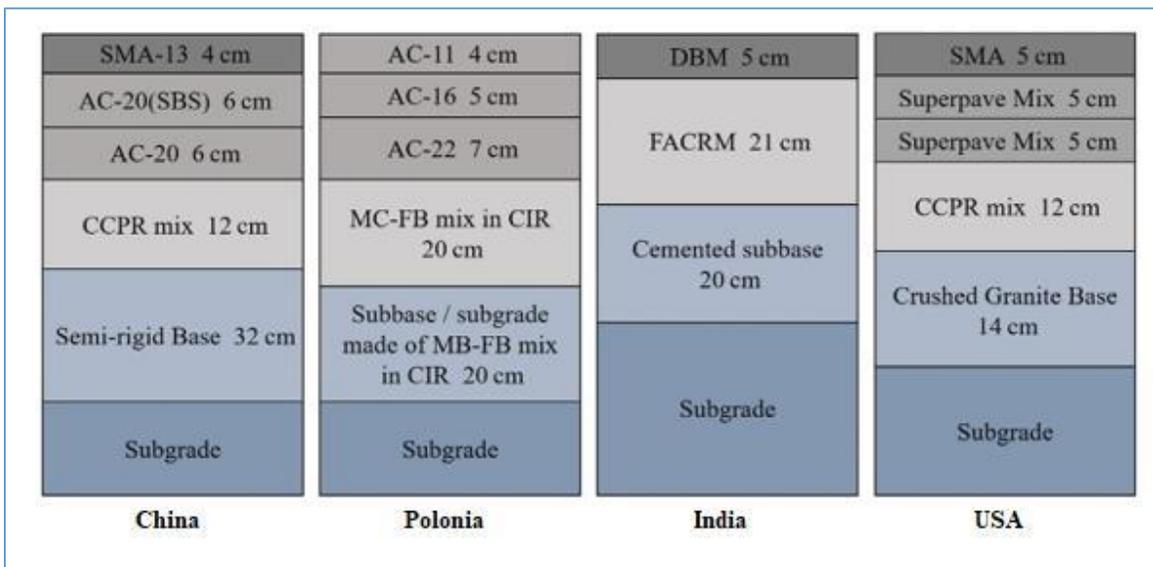


Figura 3. Capa de aplicación típica de mezcla reciclada en frío.

Fuente: (Lin & Xiao, 2020)

Loa autores (Ali, Mehta, Nolan, Purdy, & Bennert, 2018), justifican el uso del RAP para el diseño de nuevas mezclas asfálticas y afirman:

Se utilizan porcentajes bajos de RAP en la producción de pavimentos asfálticos debido al aglomerante envejecido que contiene en los materiales de RAP. Este produce un alto porcentaje de RAP mezclas altamente susceptibles a la fatiga, térmica y reflexión agrietamiento ya que es más frágil que el aglutinante de asfalto virgen (Ali, Mehta, Nolan, Purdy, & Bennert, 2018, p. 211).

Composición del material del asfalto reciclado en frío

Definición

En términos generales, el reciclaje de la mezcla de asfalto residual se puede dividir en dos métodos: en frío y en caliente. El reciclaje realizado en frío, utilizando el pavimento asfáltico utiliza una emulsión asfáltica o asfalto espumado (FA) para mezclar el RAP a una temperatura ambiente, el cual puede absorber del 60% al el 90% del RAP y utilizarse en la estructura del pavimento asfáltico. Sobre este material, los autores (Sangiorgi, et al., 2017), comentan sobre las mezclas asfálticas en frío y afirman:

En los últimos años, se han estudiado y aplicado ampliamente diferentes técnicas y enfoques para incorporar cantidades crecientes de RAP en la producción de concretos asfálticos. Entre ellos, el reciclaje de asfalto de mezcla en frío (CMA) es ahora popular debido a sus propiedades versátiles y ventajas medioambientales comprobadas. Desde un punto de vista económico y medioambiental, la posibilidad de producir mezclas bituminosas sin la adición de calor se traduce en una reducción significativa del consumo de energía y de las emisiones durante los procesos de producción y colocación en planta. Estudios más recientes también evaluaron la posibilidad de incorporar hasta el 100% de RAP en mezclas totalmente recicladas (Sangiorgi, et al., 2017, p. 233).

Composición del material

Generalmente la mezcla de asfalto reciclado en frío se compone de una emulsión asfáltica emulsionada (FA), un agregado RAP, nuevos materiales, agua y otros componentes inorgánicos. El FA, así como los aditivos inorgánicos son los componentes principales de carácter activo en la mezcla reciclada en frío, que influyen de manera significativa sobre el rendimiento de la mezcla reciclada en frío. Para el asfalto, la emulsión catiónica de asfalto de fraguado lento (CSS) se usa normalmente en la técnica de reciclaje en frío, la cual puede mejorar la aplicabilidad de la mezcla fría después de su preparación y así prolongar la duración de la construcción, especialmente en temporadas de altas temperaturas. Sin embargo, las CSS pueden provocar inconvenientes en la resistencia y la sensibilidad a la humedad en las primeras etapas, debido a que necesita mucho tiempo para separar el agua del asfalto. En el caso de AF, el tiempo de descanso, así como el parámetro de expansión son los principales parámetros a tener en cuenta.

Los aditivos de tipo inorgánicos se utilizan de forma amplia en mezclas asfálticas que son recicladas en frío, lo que le atribuye un beneficio en lo referente a la resistencia y a la durabilidad de la mezcla reciclada en frío. El cemento es el material comúnmente utilizado en mezclas frías, su dosificación esta entre el 1% al 4% en peso de mezclas frías. Se puede decir que el cemento puede mejorar de forma significativa la resistencia en las etapas de inicio, a la formación de surcos y a la fatiga de las mezclas frías. Materiales como la cal también se usan para mejorar el rendimiento de mezclas frías. Así como algunas puzolanas, entre las cuales se incluyen a los desechos de carbón, las cenizas de los desechos de carbón, las cenizas volantes y a la escoria de alto horno granulada triturada, todas estas se pueden utilizar en mezclas en frío. Respecto al reciclaje de mezclas de asfalto frías, el autor (Ayar, 2018), comenta:

La tecnología de reciclaje en frío como método de rehabilitación se puede utilizar para modificar las fallas que involucran tanto las capas de la superficie como de la base en un sistema de pavimento. Además, colocar y pavimentar mezclas frías a temperatura ambiente podría reducir los efectos de endurecimiento originados por el envejecimiento inicial y también el trabajo a temperaturas más bajas se considera como la principal ventaja de emplear esta tecnología en proyectos de rehabilitación. Además, se ha informado anteriormente de la superioridad de la rentabilidad y la sostenibilidad de la tecnología de reciclaje en frío en comparación con los métodos de rehabilitación tradicionales (Ayar, 2018, p. 552).

Los agregados RAP obtenidos a partir del pavimento asfáltico también influyen en el rendimiento de la mezcla asfáltica reciclada en frío. El contenido de la humedad presente en las RAP, así como el nivel de envejecimiento, el contenido de asfalto en las RAP, las fuentes de RAP y la gradación de los agregados en RAP; constituyen además factores de importancia al momento de diseñar una buena mezcla reciclada. También debe tenerse en consideración la influencia del tamaño de las partículas. El agua es uno de los componentes de importancia en las mezclas frías, esta se utiliza para humedecer a los agregados, así mejorar la mezcla y la envoltura del asfalto emulsionado. La microestructura, así como la durabilidad de las mezclas frías son afectadas por la cantidad de agua presente.

Diseño de la mezcla

En la actualidad no existe un estándar aceptado en el mundo, que considere el diseño de mezclas recicladas en frío, sin embargo, existen algunos manuales, así como pautas, tal es el caso del Manual de reciclaje en frío de Wirtgen, ARRA y JTJ F41 en China. El método denominado Marshall modificado y que es ampliamente utilizado en China se compone de varios procesos, el primero, donde el contenido de agua óptimo en la mezcla reciclada fría es determinado por medio de la densidad de las muestras preparadas con un martillo, luego, se determina el contenido óptimo de emulsión asfáltica mediante la resistencia a la tracción indirecta (ITS) de muestras preparadas por el método Marshall con contenido óptimo de agua. Por último, se examinó el rendimiento de la mezcla por emulsión reciclada en frío (CRME) mediante ITS y la resistencia al daño por humedad. Respecto a estas técnicas los autores (Lee, Brayton, Mueller, & Singh, 2016), se pronuncian sobre los alcances de estas y afirman:

Sin embargo, con todos los avances recientes, algunos proyectos no se han desempeñado tan bien como se esperaba, lo que puede deberse a la amplia variación en los procedimientos de diseño de mezcla, pruebas, criterios y control de calidad del proceso en general. Esto sugiere que se debe desarrollar un diseño de mezcla estándar para obtener resultados más consistentes en el campo, así como para promover el uso de esta tecnología. Además, una vez que se produce un diseño de mezcla estándar, la tecnología CIR se puede utilizar de forma más regular (Lee, Brayton, Mueller, & Singh, 2016, p. 1).

Microestructura en mezclas asfálticas recicladas en frío

Metodologías de análisis

Las mezclas de asfalto recicladas en frío constituyen un material complejo, el cual se compone de emulsión asfáltica, cemento y agua. La estructura interna de esta mezcla reciclada en frío determina el rendimiento en las carreteras. En la actualidad, la microestructura de las mezclas recicladas en frío suscita atención y se ha determinado que existe una correlación existente con sus propiedades mecánicas. La microestructura de las mezclas recicladas en frío se las analiza mediante microscopía electrónica de barrido (SEM), así como por la microscopía electrónica de barrido ambiental (ESEM) y tomografía computarizada de rayos X (TC).

Morfología de la interfaz

La morfología de interfaz normalmente se la analiza por medio de SEM, el rendimiento generado por las mezclas recicladas en frío tiene una correlación con la morfología a nivel micro. Estudios realizados sobre la microestructura de CRME, realizada con polvos minerales activos, han arrojado que los polvos minerales producen más material de hidratación en el curado, lo que resulta en un módulo más alto de CRME. Se ha utilizado técnicas de SEM para observar la microestructura de la interfaz agregado-mortero y el mortero de asfalto emulsionado con cemento y se ha concluido que el mortero asfáltico emulsionado con cemento mejoró la microestructura y la deformación interfacial de las mezclas y formando una red con los agregados, lo que resulta beneficioso para la transmisión y dispersión de los esfuerzos externos, frenando así la aparición de grietas, mejorando así la vida útil de la carretera a la fatiga.

Estudios realizados sobre la morfología de la interfase, desde su etapa inicial, así como en la etapa de curado a largo plazo para la mezcla reciclada en frío, todo esto mediante un análisis SEM, obtuvieron imágenes de CRME en diferentes tiempos de curado. La interfaz existente entre la emulsión de cemento y asfalto está en estado rugoso, que indica que los productos hidratados se producen en una etapa temprana (Fig. 4).

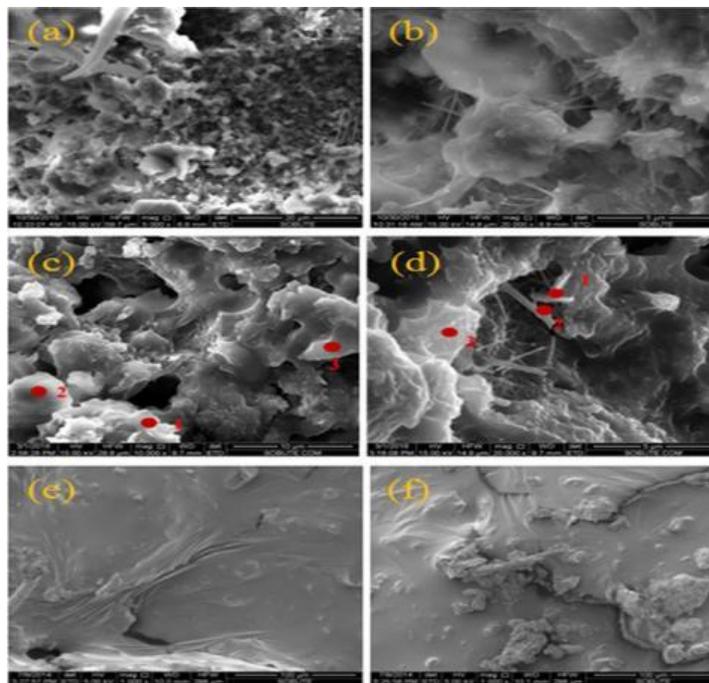


Figura 4. Imágenes SEM: (a) y (b) curado de 7 días, (c) y (d) curado completamente a 60 °C, y (E) y (F) HMA.

Fuente: (Lin & Xiao, 2020).

En la Figuras 6c y 6d muestran que los productos de hidratación tienen una cobertura de asfalto emulsionado con el aumento del tiempo de curado. Mediante espectroscopía de dispersión de energía, se puede analizar los elementos de la interfaz en la mezcla reciclada en frío. La Tabla 4.1 resumen la proporción atómica en la interfaz de CRME.

Tabla 3. Análisis del espectro energético

Elementos	Fig. 6c			Fig. 6d		
	Lugar 1	Lugar 2	Lugar 3	Lugar 1	Lugar 2	Lugar 3
	% átomo					
C	64.21	51.96	60.84	67.97	76.12	71.13
O	20.68	18.43	30.4	24.19	17.85	20.59
Al	0.34	0.47	0.57	0.38	0.59	0.45
Si	1.64	0.65	0.39	0.35	0.23	0.35
S	3.05	2.37	1.25	2.16	0.34	2.08
Ca	10.07	5.82	1.44	1.83	0.62	2.02

Fuente: (Lin & Xiao, 2020).

Rendimiento de laboratorio de mezclas asfálticas recicladas en frío

Metodologías de análisis

Entender el rendimiento de las mezclas recicladas en frío, es la clave para poder diseñar mezclas de asfalto reciclado en frío de manera duradera y así predecir su rendimiento. La resistencia en las etapas iniciales, así como el módulo dinámico, la resistencia a la formación de surcos en la mezcla, la sensibilidad a la humedad y la durabilidad a la fatiga se analizan en profundidad con el desarrollo de la tecnología de reciclaje en frío.

Fuerza en etapa temprana

La resistencia de la etapa inicial de CRME, constituye de mucha importancia en lo que tiene que ver con el ahorro de tiempo en la construcción y con la reducción del daño temprano de la carretera, lo que se vuelve en una preocupación para el uso de mezclas recicladas en frío lugares con bajas temperaturas. Las mezclas recicladas en frío necesitan de 3 a 7 días de tiempo de curado y mucho más tiempo en invierno, esto a causa a la baja resistencia inicial del CRME, lo que alarga el tiempo de construcción y esto aumenta la dificultad para la organización del tránsito.

Algunos análisis se enfocan en la resistencia de las etapas iniciales en las mezclas recicladas en frío. Una amplia investigación demostró que el cemento aumenta la velocidad de ruptura de la emulsión bituminosa y el fraguado de la mezcla, lo que incrementa la resistencia de la etapa inicial de CRME.

Módulo dinámico

El módulo dinámico constituye uno de los parámetros de la estructura más relevante al momento de diseñar las vías, por lo cual ha sido analizado por muchos investigadores. La viscoelasticidad del reciclado en frío de la mezcla está dictaminada principalmente por el módulo dinámico a diferentes temperaturas y valores de frecuencia. Los análisis indican que las mezclas de asfalto reciclado en frío muestran más independencia de la temperatura y la frecuencia que el HMA, sin embargo, deberían clasificarse como materiales termo viscoelásticos. Se ha determinado además que las mezclas recicladas en frío con 3% de cemento llegaron a valores significativamente más altos del componente del módulo del complejo elástico en bajas frecuencias y altas temperaturas, y el cemento causa que el comportamiento de la mezcla reciclada en frío tiende a ser un material elástico.

Resistencia al surco

Análisis de la resistencia a la deformación permanente en mezclas de CIR, las cuales contienen elevados porcentajes de asfalto recuperado, demostraron que estas mezclas presentan mejor resistencia a la deformación permanente que la mezcla AC. Adicionalmente la adición de cemento, cal o polímero SBS disminuye la deformación permanente y mejora la resistencia a la formación de surcos de la mezcla reciclada en frío. Se sabe además que no hay una diferencia significativa en las deformaciones de alta temperatura entre la estructura del pavimento rehabilitado CIR y el pavimento original de carretera recién construido. La mezcla CCPR-FA demostró la mayor resistencia a la formación de surcos, mientras que las mezclas de asfalto emulsionado con CCPR, espumado con CIR y emulsionado con CIR presentaron menos resistencia a la formación de surcos que el HMA. En comparación con las mezclas de asfalto CIR, las mezclas de asfalto CCPR mostraron menos probabilidad a la formación de surcos. Esto podría deberse a que las mezclas de asfalto CCPR tenían gradaciones más gruesas que las mezclas de asfalto CIR (Fig. 7).

2.2.2.2 Mezclas asfálticas recicladas en caliente

Para el análisis de las mezclas asfálticas recicladas en caliente, se tomará como referencia el texto: Mezcla de betún virgen y aglutinante de AR en mezclas con altas cantidades de AR, de los autores (Mohajeri, Molenaar, & Van de Ven, 2015), el cual es un subcapítulo del libro: Avances en materiales asfálticos: construcción de carreteras y pavimentos de la autoría Huang, S; Di Benedetto, H. en el año 2015.

Introducción

En los Países Bajos, la mezcla de asfalto en caliente (HMA) que contiene altos porcentajes de asfalto recuperado (RA) se produce en plantas de lotes a la que se conecta un tambor paralelo para precalentar el RA a aproximadamente 130 ° C o mediante un tambor doble. En el tambor de doble barril, los agregados vírgenes (VA) se precalientan en el tambor interior y luego se mezclan con RA húmedo a temperatura ambiente, en un tambor exterior que se dobla alrededor del tambor interior. En el tambor exterior también se añaden los finos vírgenes (relleno) y el betún. Debido a que la temperatura de mezcla está entre 160 y 180 ° C, los VA deben precalentarse a temperaturas altas, especialmente cuando se utilizan altos porcentajes de AR.

En los Países Bajos, el uso de 50% de AR es una práctica común para todas las mezclas de base, aglutinante y capas de uso. No se permite RA en asfalto poroso. No es raro precalentar los VA a 320 ° C y más en el mezclador de doble tambor para obtener una temperatura de mezcla de 160 ° C. Especialmente cuando el RA está húmedo, los contenidos de humedad del 5% no son infrecuentes; también en este tipo de plantas de lotes, los VA se calientan a temperaturas bastante altas incluso cuando el RA se precalienta en un tambor paralelo a 130 ° C. Los VA deben calentarse a temperaturas más altas cuando se utilizan cantidades mayores de AR.

Por lo tanto, es esencial estudiar el efecto de este tipo de transferencia de calor fuerte sobre las propiedades del aglutinante. La temperatura objetivo de la mezcla (160–180 ° C) generalmente se logra ajustando la temperatura de precalentamiento de los agregados tanto en la planta dosificadora como en la mezcladora de doble tambor. Sin embargo, la primera pregunta es si el sobrecalentamiento de los AV ablandará el aglutinante RA lo suficiente como para que el RA cubra los AV antes de que se agregue el VB.

Enfoque de investigación

La mayor dificultad para estudiar la interacción entre el aglutinante de RA y VB es la separación de los agregados de RA de VA en la mezcla reciclada, ya que cada partícula de agregado está recubierta con aglutinante negro y la forma de las partículas de RA y VA es similar. Debido a que la distinción por diferencias de color entre los agregados no era aplicable, el análisis abordado consiste en la incorporación un método mediante el uso de perlas de vidrio de un solo tamaño (GB) como agregados artificiales en lugar de agregados reales.

Entonces, RA podría separarse de VA debido a diferentes formas y tamaños. Se explicarán en detalle en una de las siguientes secciones. Además, se propone un método de envejecimiento para

crear un aglutinante AR artificial. Este método utiliza la prueba de envejecimiento del cilindro giratorio (RCAT). En primer lugar, se envejecieron dos grados de betún utilizando diferentes períodos de envejecimiento. En segundo lugar, se determinaron sus propiedades químicas y físicas. Las propiedades del aglutinante envejecido se compararon con las del aglutinante RA real. Luego, se elige el protocolo de envejecimiento.

Una vez que los agregados artificiales de AR se separan de los AV, sus aglutinantes deben extraerse para su posterior análisis. En el caso de mezclas reales, se utiliza un método de extracción centrífuga junto con una configuración de evaporación rotatoria para obtener una cantidad suficiente de aglutinante para el análisis. Sin embargo, las configuraciones actuales de extracción y recuperación no son adecuadas si se deben recuperar pequeñas cantidades de betún.

Por lo tanto, se tuvo que adaptar el método de extracción y recuperación comúnmente utilizado. Se ideó un método simple de extracción y recuperación basado en extracción con solvente y evaporación en cabina. También se analiza la eficiencia de la extracción y recuperación. Se supone que estaban presentes diferentes capas de aglutinantes alrededor de los agregados. Esta suposición se basó en los resultados informados por Noureldin y Wood (1989) y Huang et al. (1929), se examinó la eficacia de separar el revestimiento bituminoso de partículas de agregados en diferentes capas. Si realmente parece existir un sistema en capas, entonces se debe determinar cómo la mezcla de agregados sobrecalentados con AR frío afecta las propiedades aglutinantes de las diferentes capas, y si está afectando la eficiencia de la mezcla. Por tanto, se llevaron a cabo las siguientes acciones:

- Adoptar un protocolo de envejecimiento.
- Desarrollar un método de extracción y recuperación.
- Evaluar la efectividad y utilidad de un método de extracción por etapas basado en remojo en solvente.
- Producir varios tipos de mezclas.
- Comparar las propiedades reológicas y químicas de los aglutinantes.

Materiales y procesos

Para la utilización de la técnica se recomienda la utilización de materiales artificiales (GB y betún envejecido) para simular agregados reales y aglutinante de AR. Las propiedades del material y el procedimiento de preparación se discutirán en esta sección. Se requirieron varios estudios preliminares antes de realizar el estudio principal sobre el efecto del sobrecalentamiento. Como se señaló anteriormente, en el primero se investiga la efectividad y utilidad de la extracción por etapas sumergiendo material bituminoso en un solvente. En segundo lugar, desarrolla un método conveniente de extracción y recuperación de aglutinantes. Es necesario establecer un protocolo de envejecimiento adecuado para obtener un aglutinante envejecido artificial que tenga propiedades lo más cercanas posible a las de un aglutinante de AR real. Se revisará además el desarrollo de estos tres procesos, así como en otras técnicas de preparación de materiales. Los diseños de mezcla, el proceso de mezcla y la preparación de la muestra.

Desarrollo del método de extracción y recuperación.

En los estudios de reciclaje de HMA, la extracción y recuperación de aglutinantes son procesos esenciales para recuperar el aglutinante de la AR. El aglutinante se necesita principalmente para el análisis reológico antes de diseñar una mezcla. Además, la composición química del aglutinante RA o cualquier aglomerante envejecido sería necesaria para estudiar el efecto del envejecimiento sobre el aglutinante original. La extracción se realizó primero sumergiendo una mezcla de CA en un disolvente, diclorometano CH_2Cl_2 , a temperatura ambiente para separar el agregado, la arena y el relleno del aglutinante.

En segundo lugar, la fracción mineral se separó de la solución aglutinante en una centrífuga. Estos dos pasos de extracción se practican comúnmente en los Países Bajos de acuerdo con NEN 3971 (1991): Recuperación de betún del asfalto con fines de pruebas cualitativas. La solución de betún generalmente se lleva a un sistema de evaporación rotatoria para separar el solvente a una temperatura bastante alta de acuerdo con EN12697-3. Estas configuraciones de extracción y recuperación no son adecuadas cuando se deben recuperar pequeñas cantidades de betún, como es el caso de este estudio.

Por lo tanto, se tuvo que desarrollar otro método de extracción y recuperación. El método recientemente desarrollado se basa en la extracción con solvente y la evaporación en cabina. También se investigó la eficiencia de extracción y recuperación. El método utilizado aquí se

conoce como el método de extracción por dispersión de solución (SSEM), tal como se muestra a continuación en la figura:

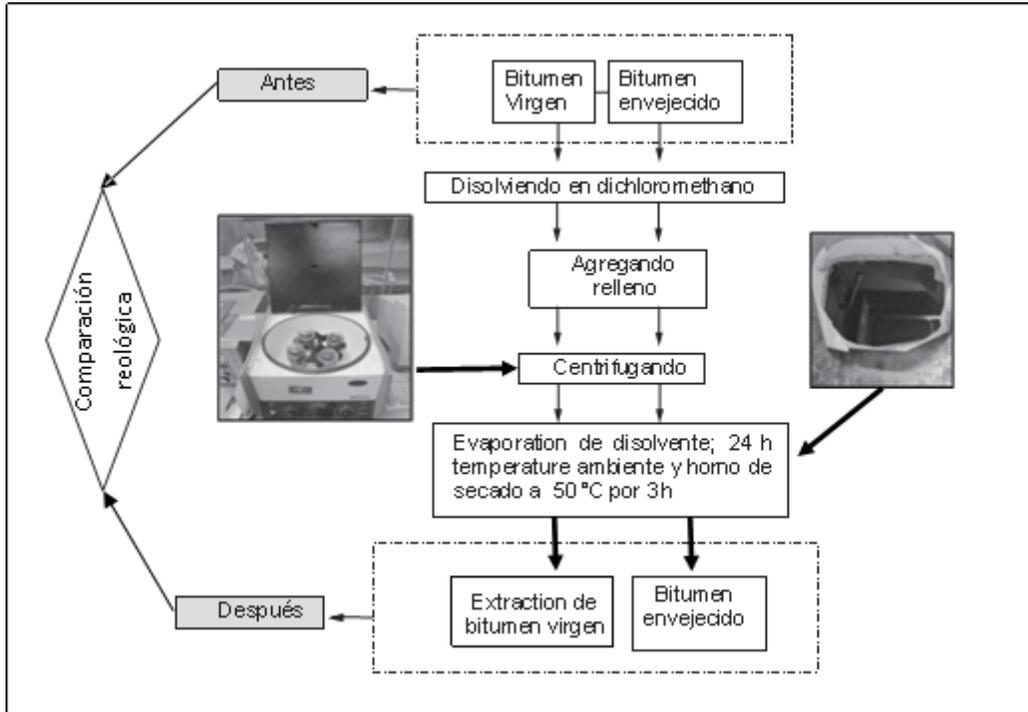
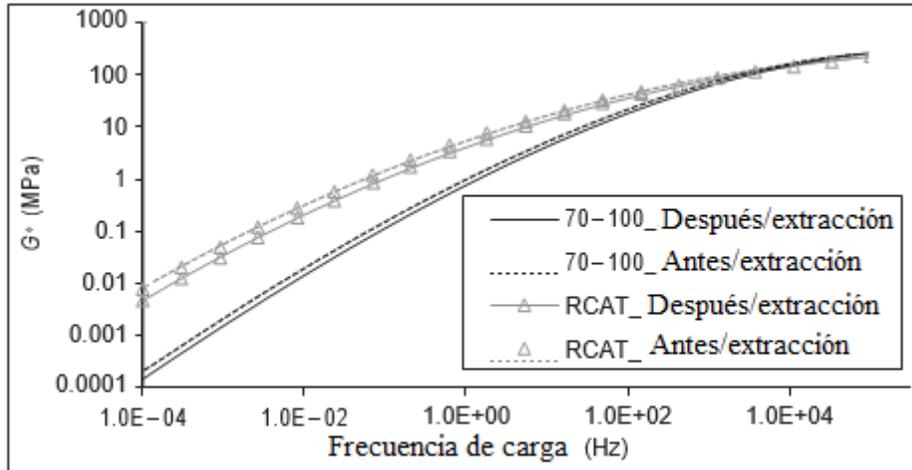


Figura 5. Método de extracción por dispersión de solución (SSEM)
Fuente: (Mohajeri, Molenaar, & Van de Ven, 2015).

Después de la recuperación del ligante, se comprobó en un DSR para verificar las propiedades del ligante extraído (de SSEM) con las propiedades del betún original. La DSR se realizó con una geometría de placa paralela, utilizando placas con un diámetro de 25 mm y una capa de aglutinante de 1 mm de espesor en el medio. Se desarrollaron curvas maestras para el módulo de corte complejo G^* , que se muestran en la Figura 6; También se muestran los valores G^* a 20°C y varias frecuencias.

En la Tabla 4. se resumen los resultados del módulo de cizallamiento del ligante extraído por SSEM, que está de acuerdo con el del ligante original. Sin embargo, los valores de G^* son ligeramente más bajos después de SSEM. Esta reducción puede deberse a que todavía quedan pequeñas cantidades de disolvente en el aglutinante. La reducción del 10-20% en los valores de G^* parece ser válida tanto para los envejecidos como para los VB.

Tabla 4. Comparación de las curvas maestras G^* (a 20 ° C) antes y después de la extracción de SSEM.



Fuente: (Mohajeri, Molenaar, & Van de Ven, 2015).

Tabla 5. Disminución de los valores de G^* después de la extracción después de SSEM

Frecuencia	0.1 Hz	1 Hz	10 Hz	20 Hz	100 Hz
RCAT_Antes de la extracción (GPa)	1.46	5.47	16.52	22.13	40.76
RCAT_Después de la extracción (GPa)	1.10	4.42	14.27	19.46	37.20
Disminución del valor G^*	-25%	-19%	-14%	-12%	-9%
70/100_Antes de la extracción (GPa)	0.15	1.01	5.37	8.43	21.75
70/100_Después de la extracción (GPa)	0.11	0.78	4.33	6.89	18.36
Disminución del valor G^*	-24%	-22%	-19%	-18%	-16%

Fuente: (Mohajeri, Molenaar, & Van de Ven, 2015).

Extracción por etapas

La extracción por etapas ha sido practicada desde 1980 por varios investigadores. Es un proceso de extracción de aglutinante de partículas de AR, capa por capa. Se asume repetidamente que, si un agregado de AR se empapa en un solvente por períodos dados, el aglutinante recuperado correspondiente a cada tiempo de remojo representa una capa de betún. Trabajos previos realizaron una prueba en una mezcla reciclada aplicando un rejuvenecedor en agregados de AR. Empaparon agregados de RA en un solvente y tomaron cuatro soluciones de aglutinante. Después de recuperar el aglutinante de cada solución, midieron su penetración y viscosidad. Los resultados de la prueba de penetración de las cuatro capas imaginarias se muestran en la Figura 7. Concluyeron que las micro capas externas alrededor de los agregados de AR son más rígidas que las capas internas debido a la exposición a la oxidación. Creían que la capa interior es un poco más dura debido a la absorción de fracciones ligeras por la piedra. Después de tratar la AR con un producto rejuvenecedor, las capas externas se volvieron significativamente más suaves. Un concepto similar

fue utilizado por otros autores para extraer cuatro capas de aglutinante (Figura 8). Después de realizar pruebas de DSR, afirmaron que las capas internas son más rígidas que las capas externas (Figura 10), lo que implica que las capas internas son aglutinantes de RA que no están completamente mezclados con el VB agregado.

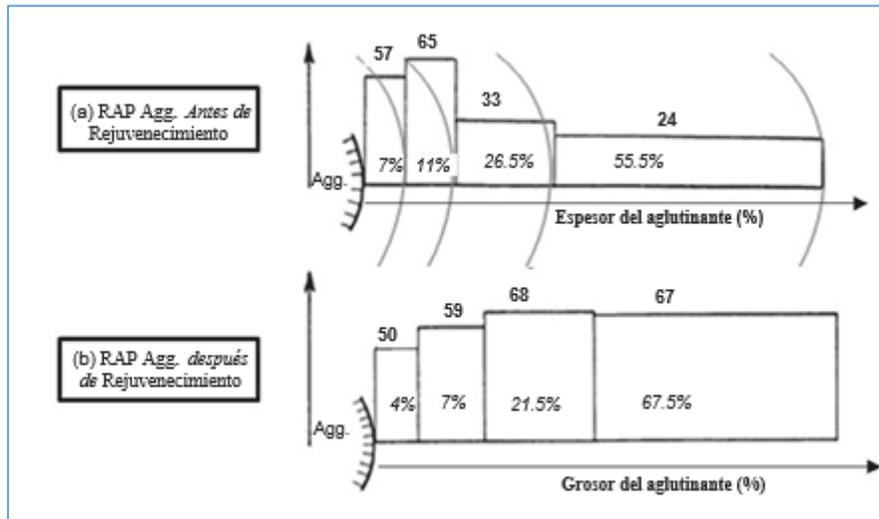


Figura 6. Resultados de penetración de capas imaginarias en pavimento asfáltico recuperado (RAP) y RAP rejuvenecido

Fuente: (Mohajeri, Molenaar, & Van de Ven, 2015)

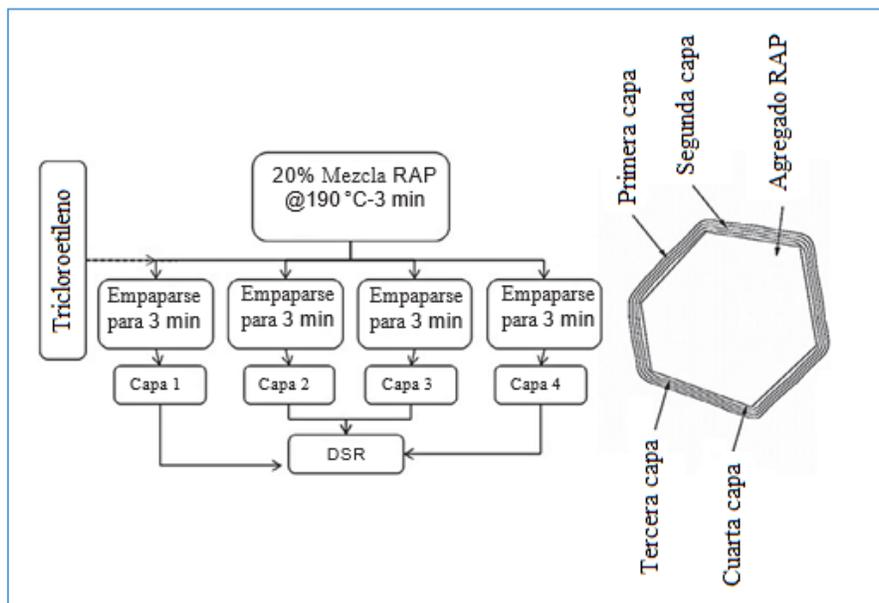


Figura 7. Proceso de extracción de etapas

Fuente: (Mohajeri, Molenaar, & Van de Ven, 2015)

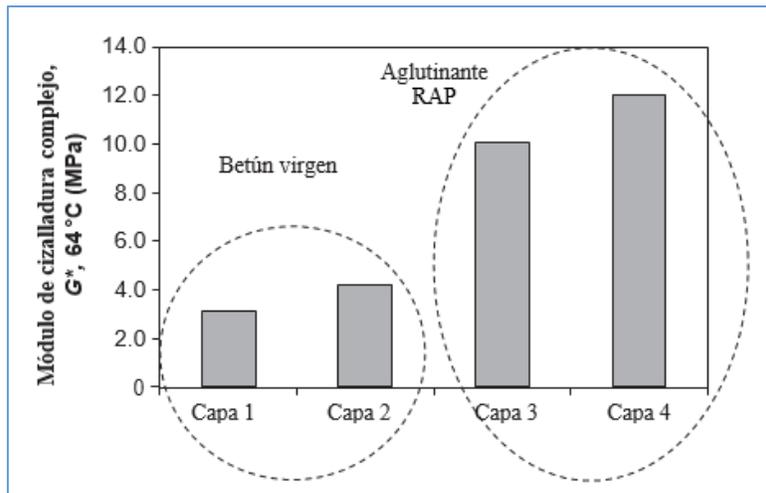


Figura 8. Valores G^* de capas imaginarias de betún

Fuente: (Mohajeri, Molenaar, & Van de Ven, 2015)

Aglutinante artificial RA

Para hacer aglutinante artificial de AR (para recubrimiento GB), se tuvo que adoptar un método STA y un método de envejecimiento a largo plazo (LTA). Según la norma europea, existen principalmente tres métodos disponibles para el envejecimiento acelerado del betún: RTFOT,1 PAV,2 y RCAT.3 Un resumen de estos métodos de ensayo de envejecimiento es realizado por Hagos (2008) se muestra a continuación:

Prueba de envejecimiento del cilindro giratorio.

El método de envejecimiento acelerado RCAT fue desarrollado por el Centro belga de investigación vial (BRRC) para simular STA y LTA de betún. Este método es adecuado para envejecer cantidades considerables de betún (500 g) que se utilizarán en estudios posteriores. El método consiste en un horno para el control de temperatura, un cilindro de acero y un sistema de rotación para mantener la rotación constante del cilindro colocado horizontalmente. Un rodillo de acero inoxidable también gira libremente dentro del cilindro para mantener el espesor de la película constante. Un flujo constante de aire u oxígeno se sopla en el cilindro giratorio para acrecentar el proceso de envejecimiento (véase la Figura 10).

- 1.- Prueba de horno de película delgada enrollable.
- 2.- Recipiente para el envejecimiento a presión [EN 14769].
- 3.- Prueba de envejecimiento del cilindro giratorio [EN 15325].

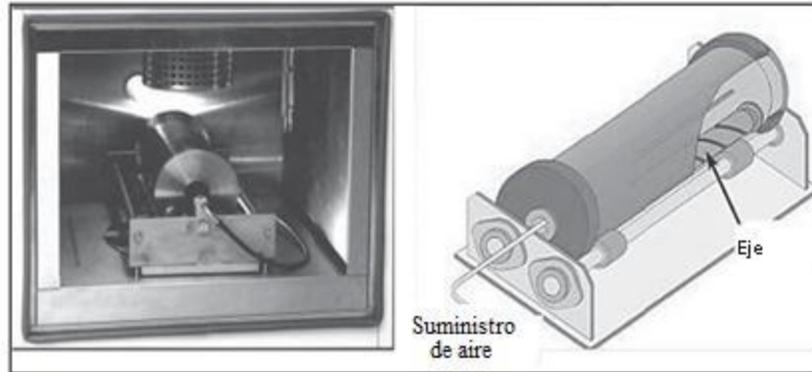


Figura 9. Prueba de envejecimiento del cilindro giratorio (RCAT)

Fuente: (Mohajeri, Molenaar, & Van de Ven, 2015)

Evaluación reológica de aglutinantes envejecidos

Como se mencionó anteriormente, se llevaron a cabo pruebas de penetración y punto de ablandamiento para disuadir el cambio de estos parámetros reológicos en función del envejecimiento del tiempo. Los resultados se muestran en la Figura 11. Un DSR (AR2000ex) se utilizó en la investigación para medir el complejo módulo de cizallado (G^*) y el ángulo de fase (δ) entre el estrés de cizalla y la tensión de cizallador. La máquina tiene una capacidad de par de 0,2 Nm y está equipada con una cámara de prueba ambiental. Los valores G^* y δ se miden a diferentes temperaturas y frecuencias de carga. Los resultados se utilizaron para crear curvas maestras del módulo de cizalla (G^*) y el ángulo de fase (δ).

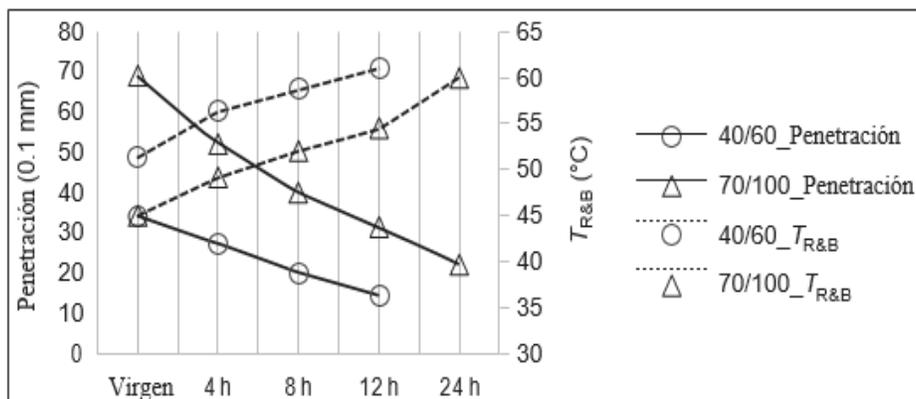


Figura 10. Resultados de penetración a 25 °C y puntos de ablandamiento ($T_{R\&B}$) de aglutinantes envejecidos con RCAT a 163 °C.

Fuente: (Mohajeri, Molenaar, & Van de Ven, 2015)

Las curvas maestras de los aglutinantes envejecidos junto con el VB se ilustran en las figuras 12 y 13, respectivamente. Los resultados de medición DSR de una carpeta RA real se ilustran en ambos gráficos para facilitar la comparación de aglutinantes un verdadero aglutinante RA. Resultó

que el envejecimiento RCAT de 70/100 betún a 163 °C y 24 h produce un aglutinante que está más cerca del aglutinante RA real.

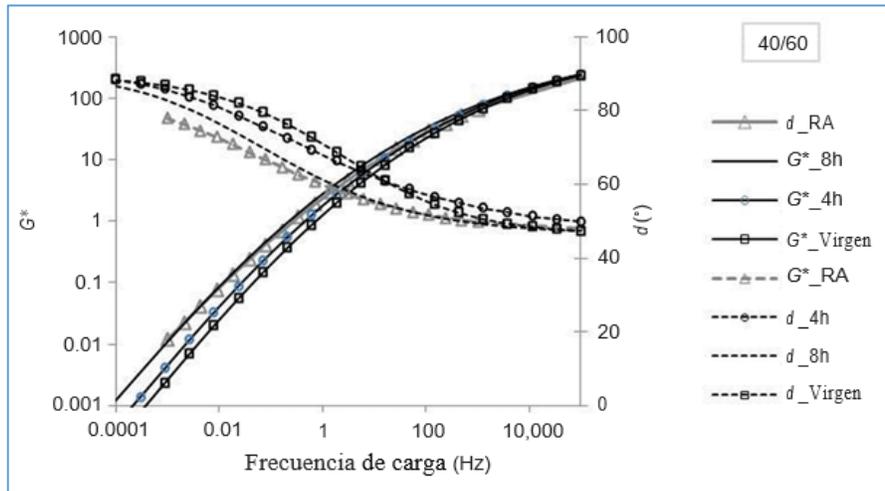


Figura 11. Curvas maestras DSR a 20 °C sobre el envejecimiento RCAT de 70/100 de betún.

Fuente: (Mohajeri, Molenaar, & Van de Ven, 2015)

Los GBs son ampliamente utilizados en la industria y la investigación. En la industria, se utilizan principalmente para la voladura de superficies. En la investigación, se utilizan en la simulación del flujo de partículas en procesos industriales. Están disponibles en diferentes tamaños e incluso en microescalas. Sus tamaños son muy precisos. Como se mencionó anteriormente, el tamaño y la forma regulares de los GBs fueron la razón para usarlos en este estudio. Sin embargo, la superficie lisa de los GBs es un inconveniente crítico en comparación con la superficie natural, generalmente rugosa, de los agregados normales.

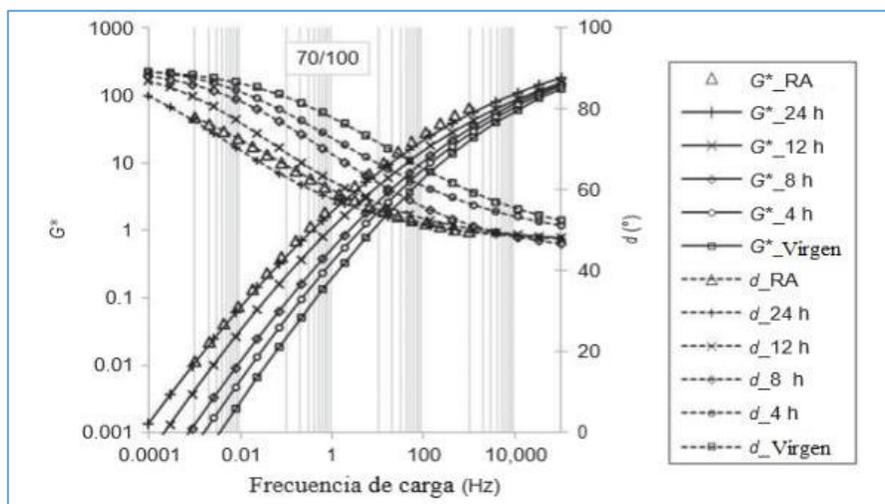


Figura 12. Curvas maestras DSR a 20 °C sobre el envejecimiento RCAT de 40/60 de betún.

Fuente: (Mohajeri, Molenaar, & Van de Ven, 2015)

2.2.3 Mezclas con aceite de motor reciclado

Para el análisis de la variable independiente correspondiente a la mezcla asfáltica con aceite de motor reciclado, se utilizará el capítulo titulado “Uso de aceite de motor usado en materiales que contienen componentes asfálticos” de los autores (Eleyedath & Krishna, 2020), mismo que está incluido en el texto Materiales de construcción de pavimento ecoeficiente, cuyos editores son Fernando Pacheco-Torgal, Serji Amirkhanian y Erik Schlangen. De donde se procederá a analizar la variable antes comentada.

Introducción

En la actualidad es bien conocida la utilización de derivados de petróleo en automóviles con motores de combustión. Entre estos se encuentran los aceites de motor que se utiliza comúnmente como lubricantes, aceite de cilindro, aceite de motor, entre otros. Durante su vida útil dentro del automotor, este aceite de motor sufre cambios significativos en sus propiedades, cambio en su composición química. Estos cambios obedecen principalmente al cambio de temperatura dentro del motor, reacciones químicas, además de cambios dentro de su estructura molecular.

Después de su utilización, este aceite de motor se sustituye por uno nuevo, la duración de su uso depende de factores tales como la distancia recorrida por el vehículo, el tipo de aceite, el tipo de motor, la humedad, el hollín, entre otros, este aceite que es retirado del motor se denomina generalmente como residuos de aceite de motor (waste engine oil) (WEO). Las industrias tales como la aviación, así como en la marina, constituyen fuentes de WEO. Sobre esto los autores (Eleyedath & Krishna, 2020), acotan:

Unos 3.500 millones de litros de aceite de motor se desperdician en EE. UU. cada año, se sabe además que aproximadamente 24 millones de métricas toneladas de WEO se generan anualmente en China. Aproximadamente 12, 16, 39.9, 71 y 250 millones de litros de aceite usado se genera anualmente en Manitoba, Saskatchewan, Columbia, Alberta y Ontario, respectivamente. Un total de 1,7 y 3,5 millones de toneladas de aceite lubricante de residuos se recoge anualmente en Europa y los EE. UU. En 2014, alrededor de 451,8 millones de litros de aceite lubricante usado se recogieron en Brasil. En 2015, 291 KTon de aceite usado se generó en España (Eleyedath & Krishna, 2020, p. 33).

“La práctica normal ha consistido en deshacerse del WEO por medio de la quema o del desecho, un estudio informó que aproximadamente el 60% de la WEO se generó anualmente en Malasia y se elimina como vertedero sin el tratamiento adecuado (Teoh, Noor, & Swee, 2018). Por ejemplo, el desechar en vertederos produce una contaminación inmediata, mientras más volumen de WEO se riegue en el suelo, mas ingresará a las fuentes de agua dentro del subsuelo. La capa de WEO que se encuentran en la superficie del agua no permite la circulación del oxígeno a los entornos acuáticos, mientras que la quema directa de WEO origina la liberación de gases contaminantes a la atmósfera y por consiguiente a la degradación de la calidad del aire. Es, por tanto, necesario encontrar una solución para la manipulación del WEO.

Últimamente los países industrializados, así como diferentes organismos han impulsado la implementación del diseño de pavimento por medio de prácticas amigables con el medio ambiente. Entre estas se encuentra la utilización de materiales reciclados y alternativos. La utilización de pavimento asfáltico reciclado (RAP) es una de las prácticas más populares en la actualidad para aumentar la reutilización de materiales, así como la reducción del consumo de materiales vírgenes. Pese a esto, el aglutinante dentro de RAP generalmente posee una mayor viscosidad, la cual es originada por el envejecimiento de componentes de hidrocarburos. Este aumento en la viscosidad puede ocasionar problemas en la capacidad de trabajo durante la construcción, problemas de rendimiento y la fatiga durante su vida útil. Es por esto, que materiales como agentes reductores de viscosidad y rejuvenecedores se utilizan para compensar la variación en las propiedades que se producen en el envejecimiento.

Debido a su estructura de componentes individuales (como hidrocarburos, aromáticos, saturados y asfaltos) de WEO que es muy parecida a la carpeta asfáltica. Esta similitud hace que el WEO sea un material adecuado que se puede utilizar junto con el aglutinante asfáltico. Inclusive, la utilización parcial de WEO junto con la carpeta asfáltica puede producir ahorros significativos, conservación de recursos naturales y la reducción del consumo de energía. El diagrama esquemático que muestra el ciclo de vida de WEO se presenta en la figura 15.

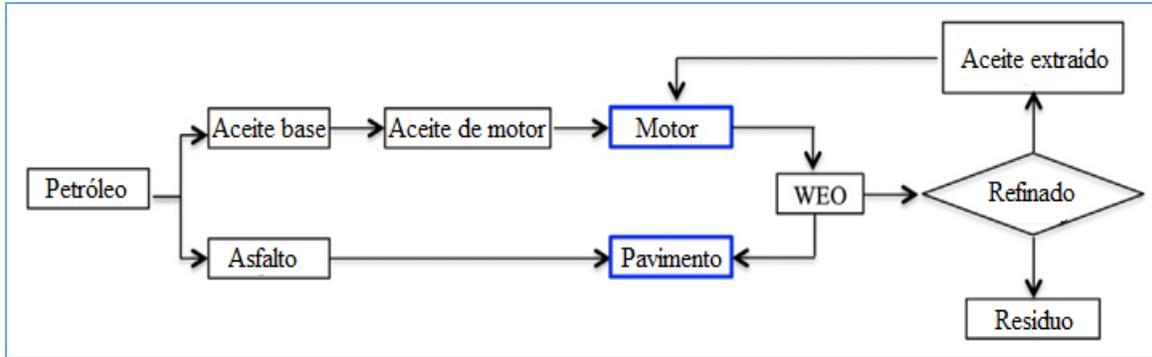


Figura 13. Uso típico de aceite de motor de desecho junto con materiales asfálticos.

Fuente: (Eleyedath & Krishna, 2020).

Proceso de refinación del aceite del motor de desecho

El WEO contiene una cantidad considerable de contaminantes, que incluyen metales pesados, así como productos químicos. Con la finalidad de ser reutilizado junto con el asfalto, es necesario asegurarse que los contaminantes en el WEO cumplen límites de seguridad. Países como EE UU y Malasia. Por medio de sus departamentos de protección del medio ambiente han establecido especificaciones para los límites permisibles de contaminantes en WEO y que deberán ser utilizados en pavimentos asfálticos. El proceso de modificación al que son sometidos el WEO antes de ser reutilizados se denomina refinación.

El proceso de refinación se puede clasificar como procesos de extracción química, física y solvente. Se estima que de 1 L de aceite fresco se puede extraer de 1,6 L de WEO mediante un tratamiento adecuado. El proceso de refinación física les permite a las moléculas de mayor masa establecerse, mientras se vaporizan las porciones moleculares livianas bajo el efecto de temperatura y presión, todo esto sin el uso de productos químicos. Procesos como la destilación, elimina el agua y los hidrocarburos ligeros. Este proceso separa los componentes volátiles. Generalmente se espera que el proceso sea amigable con el medio ambiente, pero puede ocurrir contaminación de los equipos, además el proceso puede resultar complejo y costoso.

Debido a estos costos que se derivan de esta técnica, muchos han recurrido al proceso de separación basado en productos químicos. Generalmente, el producto químico utilizado en el refinado se selecciona de tal forma que reaccione con los contaminantes en las fracciones WEO. Muchos de estos procesos químicos comúnmente utilizados incluyen el refinado por medio de ácidos, los tratamientos con ácido sulfúrico y ácido acético, el tratamiento ácido-arcilla y la hidrogenación. Los investigadores han determinado que el tratamiento de WEO con ácido acético

brinda una solución económica y amigable con el medio ambiente en comparación con el ácido sulfúrico.

La hidrogenación elimina los heteroátomos del WEO, tales como el azufre, el nitrógeno y algunos de los componentes envejecidos. El proceso químico causa produce contaminación durante la refinación y no resulta apropiado para la eliminación de grandes contenidos de asfaltenos. La extracción por medio de disolventes se considera más ecológica, debido a que se extrae aceite útil del WEO sin generar la expulsión de ningún componente tóxico con vapor o productos químicos. El solvente disuelve los aromáticos moleculares pesados y los asfaltenos mientras retiene los saturados.

Estudios recomiendan la utilización de mezclas de tolueno, butanol, metanol, etanol, isopropanol, n-hexano, éter de petróleo, 1-hexanol, tetracloruro de carbono y acetona (extracción con disolvente) para la eliminación de impurezas físicas, químicas y mecánicas. Se ha demostrado que la adsorción con cáscara de almendra, cáscara de nuez, cáscara de huevo y arcilla activada con ácido resulta útil. El proceso de extracción por medio de solventes comienza con la filtración. El aceite se extrae a partir de la mezcla de aceite transparente y disolvente en un evaporador rotatorio y la alúmina activada se mezcla para obtener el nuevo aceite.

Propiedades del aceite de motor usado

Debido al desgaste continuo de las piezas del motor, así como de la oxidación en presencia de alta temperatura, se pueden observar cambios significativos en el aceite del motor. A causa de las reacciones químicas y cambios físicos, el WEO luce de color negro. La diferencia de color entre el aceite de motor base y WEO se muestra en la Fig. 15. Las propiedades de WEO pueden evaluarse mediante técnicas físicas y químicas. Por lo general, las propiedades del WEO son afectadas por sus propiedades físico/químicas, así como por las condiciones que experimenta este aceite su vida útil. Respecto a las propiedades del WEO, los autores (Deef-Allah, Abdelrahman, Fitch, Ragab, & Bose, 2019), detallan:

El envejecimiento y la oxidación del pavimento se acumulan con los años debido a la pérdida de componentes aromáticos y de bajo peso molecular, lo que conduce a un aumento de la rigidez y una reducción tanto de la durabilidad como de la velocidad de relajación del estrés. Por lo tanto, los investigadores se han interesado en la restauración del aglutinante de asfalto a sus componentes y comportamiento originales.

Los rejuvenecedores, en combinación con otros tipos de modificadores, han sido clave para abordar este problema (Deef-Allah, Abdelrahman, Fitch, Ragab, & Bose, 2019, p. 1).

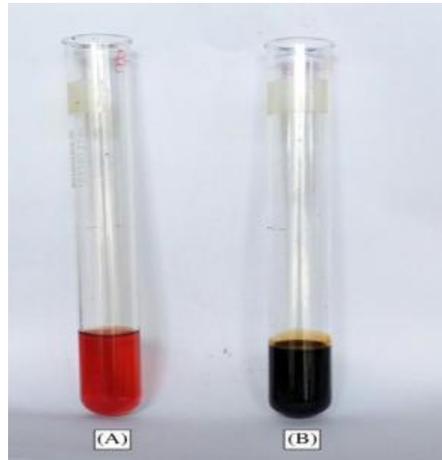


Figura 14. Aceite de motor base (A) y aceite de motor usado (B).
Fuente: (Eleyedath & Krishna, 2020).

Propiedades físicas

Dependiendo de la temperatura, el WEO puede parecer entre un estado semisólido a líquido. Es por esto, que se utiliza un punto de fluidez para poder identificar su estado físico. Debido a que el WEO es más liviano que el agua, se puede observar valores de densidad y gravedad específica más bajos. Es por su composición de hidrocarburos, que se utilizan puntos de inflamación y fuego para cuantificar su naturaleza combustible. El porcentaje de pérdida por calentamiento se utiliza como un indicador del porcentaje de volatilidad. Sobre el parámetro de la rigidez, los autores (Khalid & Omar, 2020), comentan al respecto:

La rigidez excesiva de la mezcla requiere además una cantidad excesiva de aceite usado. En la mezcla fría, se mencionó una vez que la promulgación general solía verse afectada, como la estabilidad, la fuerza y el debilitamiento de la conexión entre la mezcla y el betún. pero, en mezcla de asfalto caliente donde el aceite se incorporó al rap, proporcionó una reducción de la rigidez y, en consecuencia, una mayor resistencia al agrietamiento hacia adelante. La cantidad de aceite usado, la temperatura y el RAP son excelentes para presentar y tienen un impacto en las propiedades de rendimiento general (Khalid & Omar, 2020, p. 4).

Debido a su dependencia a la temperatura, el WEO demuestra un comportamiento viscoelástico, pareciendo en estado de fluido por encima de la temperatura bajo cero, la viscosidad se la usa como un indicador de sus propiedades generales. Los valores numéricos de diversas propiedades físicas informados por varios investigadores se resumen en la Tabla 5.

Composición química

Debido a su origen por ser un derivado de petróleo, el WEO está compuesto principalmente en hidrocarburos. Entre los hidrocarburos predominan los compuestos alifáticos y aromáticos. Estudios demuestran que parámetros tales como la gravedad específica tienen valores acrecientes, sin embargo, se ha podido observar una tendencia opuesta cuando aumenta el contenido alifático saturado. Debido a la utilización de los componentes del motor, así como la alta temperatura, el WEO contiene partículas muy finas de metales pesados e impurezas. El nivel de impurezas, en porcentaje de peso puede variar entre 0,362 y 0,49. Se ha encontrado además que el contenido de cenizas presentes en el WEO puede ser inferior al 1%.

Tabla 6. Resumen de propiedades físicas

Propiedad	Valor reportado
Punto de fluidez, °C	—5 120
Punto de inflamación, °C	158 193 220
Punto de fuego, °C	210
Pérdida por calentamiento, °C	4.45
Gravedad específica	0.85 0.8697 0.92 0.93
Densidad a 15 °C, g / cm ³	0.756 0.8816 0.9116
Viscosidad a 40 °C, centistokes	29.6 107.48 136.6
Viscosidad a 60 °C, cP	33.25
Viscosidad a 100 °C, centistokes	4.2 12.93 13.5
Índice de viscosidad	89.11
Índice de refracción	1.4763

Fuente: (Eleyedath & Krishna, 2020).

En vista del desarrollo, en lo referente a diseño de carreteras, así como el incremento del volumen de tráfico y la implementación de especificaciones en torno al clima, en ciertos países se plantean requisitos cada vez más estrictos en lo que tiene que ver con las propiedades de los pavimentos asfálticos. Sobre estas propiedades químicas, los autores (Wanga, et al., 2020) afirman:

WEO es un copolímero sólido-líquido formado por el aceite del motor que sufre procesos de oxidación, consumo de sustancias orgánicas en él y la mezcla con algunos contaminantes. Después de la destilación al vacío, la ultrafiltración y la separación centrífuga de WEO, se puede obtener el fondo de aceite de motor de desecho (WEOB) recolectando las impurezas en la parte inferior del dispositivo de preparación. Debido a los componentes similares del asfalto y su valor reciclable, WEO y sus extractos se han considerado modificadores favorables del asfalto durante los últimos años (Wanga, et al., 2020, p. 1).

Análisis de nivel elemental

Debido a su origen derivado de petróleo crudo, el WEO contiene una cantidad representativa de hidrógeno y carbono. Estudios al respecto han encontrado elementos tales como: P, Ca, Fe, Mn, Cu, Zn, Pb, Mg, Cr, Sn, Cd y Mb. Para esto se han utilizado técnicas como el análisis de fluorescencia de rayos X, la espectrometría de absorción atómica y la espectroscopia de emisión atómica de plasma acoplado inductivamente. Se encontró que el arsénico, el cadmio y el bifenilo policlorado se encuentran dentro de los límites permitidos. La composición elemental de WEO según lo informado por varios investigadores se resume en la Tabla 6.

Análisis de nivel molecular

Estudios han demostrado que la estructura molecular influye en las propiedades físicas y químicas del aglutinante. Con procesos como el envejecimiento, la estructura molecular dentro del asfalto sufre cambios drásticos. Los componentes químicos reaccionan entre sí para dar paso a nuevos componentes de mayor peso molecular. Los maltenos se transforman en asfaltenos, por ejemplo. Adicional a esto, la estructura molecular polar formada durante proceso del envejecimiento es mayor en comparación con el tamaño molecular de WEO. Estas moléculas de cadena larga, a su vez, proporcionan mayor resistencia contra cualquier movimiento y producen que el ligante sea más rígido. El WEO ayuda al aglutinante a compensar estos maltenos. Se observó que la disposición molecular de los saturados varía con la adición de WEO.

Tabla 7. Resumen de la composición elemental del aceite del motor de desecho.

Elemento	Valor reportado
Nitrógeno, %	0.28
	30.68
Carbono, %	12.9
	83.14
Hidrógeno, %	0
	13.67
Azufre, %	0
	1.03
Oxígeno, %	56.42
	1.88

Fuente: (Eleyedath & Krishna, 2020).

El WEO altera el equilibrio entre las interacciones moleculares que determinan las propiedades físicas del ligante. Las moléculas polares contribuyen a la viscosidad del aglutinante. El componente elástico del aglutinante está relacionado a las moléculas polares y, por su naturaleza viscosa, el aglutinante se caracteriza por las moléculas apolares. Trabajos previos han utilizado la cromatografía de permeación en gel (GPC) para analizar la estructura molecular de WEO. Los aromáticos saturados y de nafteno en WEO comparten una fracción de tamaño molecular similar con el asfalto. WEO contiene una amplia gama de hidrocarburos ramificados y aromáticos, compuestos de nitrógeno y sulfato e hidrocarburos aromáticos policíclicos.

Métodos analíticos

Varias son las técnicas analíticas que se han implementado para evaluar la idoneidad del WEO, Algunas de estos métodos están al nivel del componente de la mezcla, mientras que otros están a nivel de mezcla global. Algunos de estos métodos analíticos son la espectrometría de infrarrojos por transformada de Fourier (FTIR), la microscopía electrónica de barrido ambiental (ESEM), la GPC y la calorimetría de barrido diferencial modulada (MDSC). La espectrometría FTIR explica los grupos funcionales y el peso molecular de los constituyentes presentes en el aglutinante. Es decir, FTIR demuestra la estructura macromolecular de los materiales. El análisis por medio del FTIR proporciona un análisis cualitativo y cuantitativo de los componentes del aceite.

Los grupos funcionales absorben diferentes longitudes de onda en los espectros infrarrojos mientras oscilan a una frecuencia determinada. A causa de la oxidación, los grupos funcionales en

WEO varían a grupos carbonilo y sulfóxido y esto puede ser detectado por FTIR como una medida del envejecimiento. Esto también indica la conversión de maltenos de bajo peso molecular en asfaltenos de alto peso molecular. Análisis han determinado además que los resultados de FTIR se pueden utilizar para calcular el número de ácido total y el número de base total. Estos números se han utilizado para cuantificar la calidad del aceite.

Utilización de aceite de motor usado

El hormigón asfáltico es uno de los componentes básicos del pavimento flexible, actúa como agente aglutinante, mientras que el asfalto mantiene unidas las partículas agregadas. Pese a esto cuando se expone al medio ambiente, el aglutinante asfáltico varía sus propiedades físico/químicas. A este proceso se le denomina envejecimiento; debido al envejecimiento, los maltenos se transforman en asfaltenos y el aglutinante adquiere dureza y se vuelve quebradizo. Esto produce que el aglutinante en RAP tenga una viscosidad más alta.

Esto necesita el uso de agentes / rejuvenecedores reductores de viscosidad para poder mejorar las propiedades del aglutinante RAP. Como el asfalto y el WEO provienen de la misma fuente, el WEO se ha utilizado para tomar el lugar de una proporción del aglutinante o los aditivos químicos. El contenido aromático y los maltenos de bajo peso molecular que están presentes en el WEO pueden utilizarse para reemplazar a estos componentes presentes en RAP que se eliminan durante la oxidación. La composición química y la cantidad de WEO añadida al aglutinante influyen significativamente el rendimiento del aglutinante y la mezcla. La metodología adoptada al mezclar WEO con aglutinante asfáltico se describe en la Fig. 15.

Incorporación de aceite de motor usado en el ligante asfáltico

Varios estudios sobre el WEO, específicamente sobre las propiedades del aglutinante RAP, el WEO se puede mezclar fácilmente con aglutinante asfáltico. La adición de WEO al ligante asfáltico aumenta el valor de penetración y disminuye el punto de ablandamiento y la ductilidad del ligante. La disminución del punto de ablandamiento en el aglomerante no envejecido de corta duración se muestra en la Fig. 16.

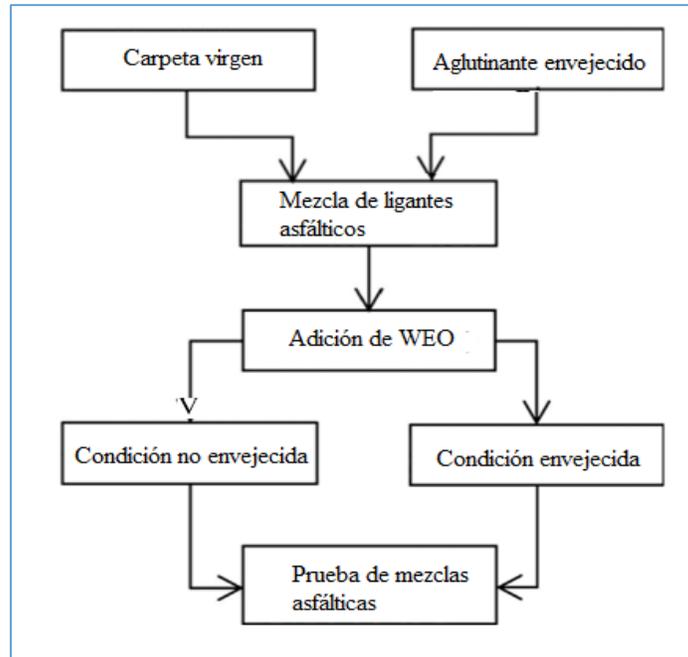


Figura 15. Metodología adoptada al combinar aceite de motor de desecho (WEO) con aglutinante asfáltico
Fuente: (Eleyedath & Krishna, 2020).

La pérdida de los componentes moleculares de menor peso en el aglutinante hace que la mezcla sea más propensa al agrietamiento a baja temperatura y la fragilidad. El rendimiento de la carpeta a bajas temperaturas registra mejoría cuando se adiciona aceite lubricante. El aglutinante ha demostrado una mayor resistencia al agrietamiento térmico. El daño provocado por la humedad en la carpeta asfáltica, diseñada con WEO muestra una mayor resistencia. Además, la adición de WEO origina a una reducción de la susceptibilidad a la temperatura. Sobre estas observaciones, los autores (Liu, Meng, Xu, & Zhou, 2018) encontraron que:

Los aglutinantes modificados con WEO tienen un módulo de complejo más bajo y un ángulo de fase más alto que los aglutinantes de control, lo que significa que el WEO podría reducir la parte elástica del aglutinante asfáltico. El WEO no cambia de forma obvia la característica viscoelástica y las propiedades de flujo de las curvas maestras de viscosidad compleja. Sin embargo, la adición de WEO disminuye la resistencia a la formación de surcos, mientras que la resistencia a la fatiga y la sensibilidad a la temperatura aumentan significativamente. En general, WEO reduce la parte elástica del asfalto y la resistencia a la formación de surcos, pero mejora la resistencia a la fatiga y la sensibilidad a la temperatura (Liu, Meng, Xu, & Zhou, 2018, p. 479).

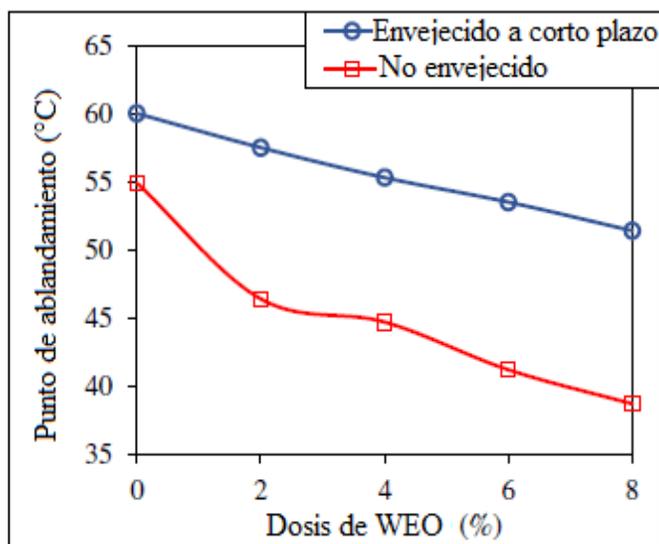


Figura 16. Variación De Ablandamiento Punto De El Asfalto Carpeta Con Residuos Motor Aceite (WEO) Contenido

Fuente: (Eleyedath & Krishna, 2020).

Incorporación de aceite de motor usado mezcla asfáltica

Para la incorporación de aceite en la mezcla asfáltica se hace uso de varias pruebas tales como diseño de mezcla Marshall, así como la prueba de resistencia a la tracción indirecta (ITS), la prueba de módulo resiliente (MR), prueba de durabilidad, prueba de fluencia y la prueba de fatiga, la ITS proporciona una idea sobre el comportamiento de agrietamiento por fatiga y baja temperatura del pavimento. La prueba de RM indica la recuperación elástica o el comportamiento de formación de surcos. Se realizan pruebas, tales como la prueba del analizador de pavimento asfáltico y la prueba de seguimiento de ruedas para medir el comportamiento de formación de surcos de la mezcla. Se utiliza la prueba de flexión de cuatro puntos conforme a las especificaciones en un estudio para investigar el rendimiento a la fatiga (EN 12697-24) y el módulo de rigidez (EN 12697-26) de la mezcla asfáltica.

La mezcla de WEO en aglutinante RAP está relacionada a diversos procesos que muchas veces son poco prácticos. Es por esto, por lo que los investigadores han intentado mezclar WEO directamente en una mezcla de RAP. Varios analistas han determinado que la adición de WEO facilita la producción de asfalto al disminuir la temperatura de compactación y mezcla. La adición de WEO en una mezcla fría o caliente la vuelve más vulnerable a la formación de surcos. Esto se atribuye a:

- 1.- Una unión reducida entre el aglutinante y el agregado, y

2.- Una menor densidad de la mezcla compactada.

Con la finalidad de mejorar la adhesión entre el agregado y el aglutinante y por ende la resistencia a la humedad, se utilizan agentes antideslizantes junto con WEO. Los trabajos al respecto han descubierto que WEO aumenta la trabajabilidad de la mezcla de asfalto con RAP. Se sabe además que la reducción de la estabilidad de Marshall y la resistencia a la tracción se logra con la adición de WEO. Un aumento en WEO produce una reducción en la rigidez de la mezcla de asfalto mezclado en caliente. Pero, a su vez, aumenta la resistencia de la mezcla contra el agrietamiento, mientras que otros investigadores afirman que el WEO provoca un endurecimiento físico y químico y una tolerancia reducida a la deformación en estado dúctil.

Consecuentemente, la capacidad de formación de surcos aumenta y la resistencia a la fatiga y al congelamiento-descongelamiento de la mezcla se reduce. Adicional a esto, la incorporación de WEO hace que la mezcla sea más frágil. En consecuencia, se observa una reducción en el módulo resiliente de la mezcla. La presencia de WEO resultó en una mayor tasa de formación de surcos y un rendimiento inferior a fluencia estática o dinámica (deformación elástica y plástica) y bajar la resistencia a la fatiga. Sin embargo, los investigadores han descubierto que WEO mejora la resistencia a la fatiga y el agrietamiento a baja temperatura de la mezcla asfáltica que contiene RAP. Sobre los resultados finales encontrados mediante esta técnica de mezcla de asfalto, los autores (Qurashi & Krishna, 2018), concluyen:

La adición de WEO condujo a la correspondiente disminución en la viscosidad y el punto de ablandamiento de la mezcla de asfalto. La función exponencial negativa puede describir razonablemente la relación viscosidad-temperatura. De manera similar, la función exponencial negativa puede ajustarse bien al punto de ablandamiento frente al contenido WEO. En general, a cualquier temperatura dada, la adición de WEO condujo a (i) disminución del módulo complejo, (ii) aumento de los valores del ángulo de fase en todas las frecuencias reducidas. Las curvas maestras de módulo complejo y ángulo de fase obtenida con la adición de WEO al 2% fueron cercanas a las curvas maestras obtenidas con aglutinante de control en condiciones de envejecimiento a corto plazo. Esto indica que un 2% de WEO podría ser suficiente para superar el aumento de rigidez inducido por la adición de RAP (Qurashi & Krishna, 2018, p. 1000).

2.3 Marco conceptual

Aceites lubricantes para motores: Su función principal es evitar que las piezas metálicas entren en fricción entre sí, para que así no se produzca rozamiento o desgaste dentro del motor o de las piezas que se encuentran en movimiento. Así mismo, su función es disipar el calor que se produce por la fricción, y transferirlo fuera del ciclo de la combustión.

Aceite lubricante usado de motores: El aceite lubricante utilizado en los vehículos, conocido también como aceite quemado, se origina a partir del reemplazo obligado del aceite de motor que se lo aplica a los vehículos, el cual se lo hace periódicamente. En la mayoría de los casos el aceite usado de motores que se reemplaza es desechado, de ellos el que mejor estado presenta, pasa a ser recolectado por empresas dedicadas a administrar desechos que terminan haciendo uso de esto con un fin redituable.

Adhesión: Es la capacidad que posee el asfalto para adherirse de forma efectiva a los agregados pétreos.

Asfáltenos: Son sólidos amorfos de coloración negra o marrón, tienen solubilidad en heptano y además contienen carbón, hidrógeno, algo de nitrógeno, azufre y oxígeno. Los asfáltenos son generalmente considerados materiales aromáticos complejos de alta polaridad y con gran peso molecular.

Asfalto: Según la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM) por sus siglas en inglés, denomina al asfalto como un material ligante de color marrón oscuro a negro, constituido principalmente por betunes que pueden ser naturales y obtenidos por refinación del petróleo. El asfalto se produce en una varios tipos y grados, los cuales van desde sólidos duros y quebradizos hasta líquidos casi diluidos en agua. La forma semisólida, conocida como cemento asfáltico, es el material básico utilizado en los pavimentos de hormigón asfáltico.

Asfalto AC-20: Este tipo de asfalto es uno de los utilizados y se recomienda su aplicación cuando se aplica en lugares con climas templado, es decir con temperaturas entre 7 y 24° C, este material asfáltico presenta una desventaja frente a la temperatura, es decir cuando esta se calienta entre 130

a 150 ° C no puede ser mezclado con materiales de origen pétreos con humedad, además si sobrepasan estos límites de temperaturas puede perder propiedades propias del material.

Asfalto AC-30: Son fabricados a partir de un material asfáltico originarios de los crudos producidos por la dilatación, además poseen una densidad viscosa la cual alcanza desde 2400 hasta 3600 poises en una temperatura de 60 ° C, este material asfáltico es utilizado para la construcción de carreteras y prever la conservación de las mismas, de igual forma para este tipo de asfalto se debe tomar en cuenta la situación climática en donde será implementado.

Asfaltos Espumados: Son asfaltos que también se denominan asfaltos celulares, a partir de una tecnología utilizada para estabilización de granulares no tratados o para la fabricación de mezclas en frío y recicladas. Esto consiste en agregar agua fría y aire a presión, todo esto dentro de una cámara de expansión, a un cemento asfáltico, el cual se encuentra a alta temperatura, entre 160°-180°, todo esto con la finalidad de espumarlo, de esta forma se logra incrementar su volumen de forma acelerada, reduciendo la viscosidad del ligante e incrementando la adherencia entre el asfalto y el agregado pétreo.

Asfalto Natural: Se denominan así a los materiales bituminosos en estado sólido, y que están compuestos por hidrocarburos de alta masa molecular en estratos, cuyo espesor puede medir de centímetros a decenas de metros, presentan una variedad en referencia a su rigidez, debido a esto su punto de fusión va desde los 100 °C hasta los 300 °C, esto se produce cuando el material en crudo sube hacia la capa superficial y debido a la intemperie en la que se encuentran expuestos sus componentes, estos se evaporan, formando el asfalto.

Asfalto Rebajado, líquidos o cut-back: Es el asfalto que se produce cuando se diluye cemento asfáltico con algún solvente que sea derivado del petróleo, normalmente este puede ser gasolina o bencina. Este se utiliza para la fabricación en frío de carpetas, así como para la impregnación de subbases y bases hidráulicas. Constituye un cemento asfáltico, el cual está en estado líquido a temperatura ambiente, se obtiene por medio de la refinación del petróleo calentado y por la dilución de un cemento asfáltico, aumentando una destilación volátil del mismo petróleo en forma de: nafta, gasolina, kerosén, aceites combustibles, aceites diésel o combustibles para la propulsión a chorro.

Aromáticos: Comprenden los compuestos nafteno – aromáticos de menor peso molecular en el asfalto. Constituyen entre el 40 y 65 % del total del asfalto y son líquidos viscosos de color marrón oscuro.

Briquetas: Se denomina como la pieza la cual se emplea para someterlas a ensayos mecánicos y así conocer la resistencia del material del cual está hecho el producto.

Cohesión: Es la capacidad que poseen los materiales, la cual les permite mantener firmes o en su lugar las partículas que lo componen, más comúnmente en los agregados, donde se requiere que mantengan esta propiedad.

Contenido de Asfalto efectivo: Es el resultado del volumen total del asfalto, del cual se resta el asfalto que se pierde a causa de la absorción producida en el agregado.

Curado: Es un proceso en el cual se aplica al concreto con la finalidad de preservar el contenido de humedad y de temperatura, que son aceptables para su aplicación.

Densidad: La densidad de la mezcla asfáltica es el resultado de la fracción entre la masa de un volumen determinado de mezcla asfáltica. Es el resultado de la división entre la masa y el volumen que el aceite, tiene una densidad inferior a la del agua. Los aceites de origen aromático son los que tienen mayor densidad, los nafténicos se consideran de densidad media y los de origen parafínico poseen la menor densidad.

Durabilidad: Es la capacidad física que posee el asfalto y que le permite conservar a lo largo del tiempo sus características de forma original.

Endurecimiento: Es la propiedad que poseen los materiales que consiste en el aumento en la rigidez de un pavimento, causado por el proceso natural de la oxidación, esto se presenta con mayor facilidad en presencia de altas temperaturas y cuando las películas de cubrimiento son

delgadas, esto se da comúnmente durante la fabricación de mezclas asfálticas y continua este proceso después de la construcción del pavimento asfáltico.

Fluencia: Es la deformación que se produce en un período de tiempo cuando un material está sometido a un esfuerzo constante a temperatura constante.

Índice de viscosidad: El índice de viscosidad es un número que mide la variación de la viscosidad con la temperatura, a mayor índice de viscosidad menor es la variación de la viscosidad con la temperatura.

Mezcla: Se denomina a la combinación de dos o más componentes que se pueden unir independientemente del estado en el que se encuentre la materia.

Mezcla asfáltica: Las mezclas asfálticas son la combinación de agregados pétreos y de ligantes asfálticos. Las mezclas son elaboradas generalmente en las industrias cementeras o en plantas mezcladoras, en ciertos casos pueden elaborarse en el lugar de aplicación.

Mezcla asfáltica drenante: Las mezclas asfálticas drenantes, constituyen aquellas cuyo porcentaje de vacíos es necesariamente elevado, es decir entre 20%-25%, esto permite que pueda haber la filtración del agua de lluvia con una rapidez necesaria, así poder evacuarla con dirección de las obras de drenaje de la vía, evitando de esta manera el fenómeno de hidropelano.

Mezcla asfáltica en caliente: Es la mezcla del asfalto y la grava a una temperatura de 150°C, se tiene que realizar para que a esta temperatura disminuya la viscosidad. De esta forma se facilita el proceso de mezcla y se elimina la humedad del asfalto haciendo que la mezcla sea mucho más resistente, son de uso más corriente, usadas en todo tipo de carreteras donde la calidad exigida es alta.

Mezcla asfáltica en frío: Es la mezcla de la emulsión del asfalto con el agua y el agregado pétreo a temperatura de ambiente. De esta manera se excluye la necesidad de calentar la mezcla, esto

causa que el asfalto tenga menos vida útil y resistencia, se aplica en vías de poco tránsito y para bacheos.

Mezclas asfálticas micro aglomeradas: Estas mezclas producen sobre el pavimento una capa de rodadura, la cual posee un espesor reducido, estas mezclas pretenden mejorar la resistencia al deslizamiento de un pavimento previo. Además, son mezclas que se utilizan para mejorar las irregularidades y deterioros superficiales que puede sufrir el pavimento.

Mezclas asfálticas recicladas en caliente: Son mezclas con propiedades similares a las RAP en frío, pero con la salvedad que el ligante es el cemento asfáltico y por lo tanto estas deben ser extendidas y compactadas en altas temperaturas. Estas mezclas se producen por medio del método Marshall (AASHTO T 245) y los criterios de diseño relacionados a esta, son similares a los que se especifican para las mezclas de concreto asfáltico.

Mezclas asfálticas recicladas en frío: Son mezclas resultantes de la mejora en las propiedades de mezclas obtenidas en el transcurso del procesamiento del fresado o retiro de las capas asfálticas antiguas, que están deterioradas o envejecidas por medio de la adición de un agregado pétreo y/o de un ligante asfáltico nuevo, que puede ser generalmente emulsión asfáltica. Son mezclas de tipo frío, se extienden y se compactan en presencia de temperatura ambiente.

Mezcla asfáltica templada: Es la mezcla asfáltica producida en temperaturas entre 60°C a 100 °C sin alterar mucho la calidad de la mezcla asfáltica resultante, es más cuidadosa con el medio ambiente ya que requiere menor consumo de carburantes.

Pavimento: Se denomina pavimento a las capas necesarias para conformar la estructura de una carretera, siendo estas la capa de rodadura, la base y la subbase, el principal objetivo de estas capas es soportar y transmitir las cargas de tránsito entre sus capas de forma uniforme hacia el terreno natural.

Pavimento con Superficie de Adoquines: Para este pavimento la capa de rodadura está constituida por adoquines, estos son bloques sólidos prefabricados pueden estar elaborados en

formas de polígonos de material de hormigón hidráulico, arcilla, entre otros, estos se instalan sobre una cama de arena.

Pavimentos con superficie de tierra: No tienen capa de rodadura de asfalto o hormigón hidráulico, principalmente por razones económicas, dado que estas no cumplen con el parámetro de diseño de TPDA para ser una vía de primer orden, se pueden nominar por el tipo de material con el cual el tráfico circula: de superficie natural o estabilizada y material pétreo.

Pavimentos de concreto o rígidos: Se denomina así cuando está compuesto por una capa de rodadura de hormigón de cemento hidráulico y por una capa de base o sub-base que están constituidas por agregados pétreos de acuerdo con la capacidad del diseño de la vía.

Pavimentos flexibles o de asfalto: Los pavimentos flexibles se combinan por una capa delgada de hormigón asfáltico montada sobre una capa de base y subbase, las cuales están formadas por material granular selecto. Estas estructuras de pavimento del tipo flexible pueden ser definidas como estructuras viales compuestas por una capa asfáltica sobre capas de menor rigidez, conformada por materiales granulares no tratados o ligados, que se apoyan sobre el terreno subrasante.

Punto de congelación: Se produce cuando un aceite pierde su capacidad de fluir a cierta temperatura, este punto además tiene que ser de un valor mínimamente posible, lo cual dependiendo del ambiente en que se lo utiliza, el punto de congelación se mejora mediante la utilización de los aditivos.

Punto de enturbiamiento: El punto de enturbiamiento es la temperatura en la cual las parafinas que se encuentran presentes empiezan a separarse entre sí en forma de cristales, esto es debido principalmente a que se obstaculiza el circuito de lubricación.

Punto de fluidez: Es una propiedad de las más utilizadas al momento de analizar los ambientes que presentan temperaturas extremadamente bajas, esto es debido al efecto que tiene el punto de fluidez de un lubricante, la cual es la capacidad de fluir sin ser perturbado. Las temperaturas bajas

forman cristales dentro de los aceites, los cuales se encadenan y forman una estructura rígida, esto evita la fluidez del aceite. El movimiento mecánico efectuado es el encargado de fragmentar las estructuras de ceras que se forman a causa de las bajas temperaturas, en los aceites que no tienen ceras, esto depende de la viscosidad y por ende del punto de fluidez, esto dependiendo mucho del país, así como de sus estaciones.

Punto de inflamación: El punto de inflamación de un aceite, constituye el punto en el cual la temperatura mínima en donde los vapores que se desprenden de este y proceden a formar con el aire que se encuentra alrededor del aceite, una mezcla la cual se inflama, todo esto en presencia de una flama.

RAP: Es el nombre que recibe la mezcla asfáltica de pavimentos.

Reciclaje de pavimentos flexibles: Pavimento asfáltico reciclado (RAP, por sus siglas en inglés) es el término que se da a los materiales del pavimento removidos y/o reprocesados que contienen asfalto y agregados. Estos materiales se generan cuando los pavimentos asfálticos son removidos para reconstrucción o rehabilitación. Cuando se tritura y tamiza apropiadamente, el RAP consiste en agregados de alta calidad, bien distribuidos recubiertos por asfalto.

Regeneración de aceite: La regeneración de aceite usado propone de reintegrar las propiedades físicas y químicas de los aceites a por medio de diversas técnicas, para luego volver a comercializarse y obtener réditos económicos. El inconveniente que se presenta y que tienen este tipo de aceite regenerado es la mínima oportunidad para medirse con otras marcas posicionadas y establecidas en el mercado, esto se debe principalmente a que la mayoría de los consumidores de este producto tienen la idea preconcebida de que el aceite regenerado es de calidad inferior y por lo tanto dañara la maquinaria en la que este aceite ha sido aplicado. El aceite refinado es aquel que se le aplica un proceso de filtrado para poder eliminar las impurezas tanto solubles como insolubles.

Resinas: Son sustancias que tienen una elevada proporción de hidrógeno y carbón, además contienen pequeñas cantidades de oxígeno, azufre y nitrógeno, son sólidos y semisólidos de color marrón oscuro, su naturaleza es polar y son altamente adhesivos.

Saturados: Consisten en el grupo de hidrocarburos del tipo alifáticos, los cuales poseen cadenas lineales abiertas y ramificadas. Se denomina con este concepto a los aceites viscosos de coloración amarillo claro o blanco.

Susceptibilidad térmica: Capacidad de variar sus propiedades en función de la variación de la temperatura, en el caso de los asfaltos son termosensibles, es decir que se vuelven más rígidos a medida que la temperatura desciende y más blandos cuando la temperatura se incrementa.

Vacíos de aire: Es el volumen total existente en una bolsa de aire, que está situada entre las partículas cubiertas del agregado dentro de una mezcla de pavimento compactado, se expresa además como el porcentaje del volumen neto de la mezcla del pavimento compactado.

Vacíos en agregado mineral: Constituye el volumen correspondiente al espacio vacío intergranular existente entre las partículas del agregado que está presente en una mezcla asfáltica compactada, este material incluye además los espacios vacíos de aire, así como la cantidad de asfalto, representado en porcentaje de volumen total de la mezcla.

Vacíos llenados con asfalto: Es la proporción del porcentaje de volumen correspondiente al espacio vacío intergranular existente entre las partículas del agregado, el cual es ocupado por la masa de asfalto efectivo. Se lo representa como la porción de $(VAM-VA) / VAM$.

Viscosidad: La viscosidad es una propiedad primordial para la selección de aceite lubricante en una determinada aplicación, se la define como la fuerza que opone a un líquido al movimiento que es relativo entre sus partes. Es decir, la magnitud de esta fuerza está directamente relacionada con la fricción interna a nivel molecular en el líquido. La selección del aceite de lubricación dentro del contexto de la viscosidad adecuada es importante para la determinación de la aplicación en la seguridad de la maquinaria al momento de lubricar.

2.4 Marco legal

Dentro de este apartado, se podrá observar las diferentes leyes y normativas que se relacionan con esta investigación, tal como se evidenciará a continuación:

2.4.1 Constitución de la República del Ecuador (Asamblea Legislativa , 2008)

Título V: Organización territorial de estado

Capítulo primero: principios generales

En este apartado se hace alusión sobre los artículos establecidos en la constitución y que se relacionan de forma directa con el desarrollo del trabajo de investigación, es decir como se fundamenta desde el punto de vista legal el desarrollo de la tesis. Por ejemplo, en el Artículo 262, se establece que los gobiernos regionales autónomos tienen competencias exclusivas, independiente de otras para: Planificar, construir y mantener el sistema vial de ámbito regional, así mismo en el Art. 263, los gobiernos provinciales tendrán las competencias exclusivas, para planificar, construir y mantener el sistema vial de ámbito provincial, que no incluya las zonas urbanas.

En los artículos 264 y 267 se determina la competencias exclusivas de Los gobiernos municipales tendrán las siguientes sin perjuicio de otras que determine la ley a nivel provincial la competencia de la vialidad rural, mientras que en el Artículo 314, se refiere a la responsabilidad del Estado sobre la vialidad en general.

2.4.2 Ley orgánica del ambiente (Asamblea Nacional, 2018)

En el artículo 9 de la Ley Orgánica del ambiente (LOA), se estipulan **los principios ambientales**, que están en concordancia con lo establecido en la Constitución y en los instrumentos internacionales ratificados por el Estado, que tiene que ver con las decisiones que se relacionan con el impacto ambiental y el manejo sostenible en la sociedad, se relaciona por medio del literal 2, el cual comenta sobre la mejor tecnología disponible y mejores prácticas ambientales y el papel del Estado en la promoción de estas políticas, en el artículo 216 de esta misma ley se establece la responsabilidad solidaria de los operadores en la gestión integral de sustancias químicas del importador, exportador, fabricante y acondicionador de sustancias químicas.

Finalmente, en el artículo 238 se destaca las responsabilidades del generador de residuos y desechos peligrosos y especiales, es el titular y responsable del manejo ambiental de estos, de su responsabilidad de forma solidaria sobre la gestión de los residuos y desechos peligrosos y especiales, en el caso que produzcan contaminación y daño ambiental. La citación de estos

artículos se relaciona de forma directa con la redacción de la tesis debido principalmente al enfoque de este, debido a que el contexto dentro del cual se desarrolla esta direccionado a la utilización de materiales reciclados para de esta forma reducir el impacto ambiental.

2.4.3 Ley de hidrocarburos (Asamblea Nacional, 2018)

La Ley de Hidrocarburos en su artículo 9, el ministerio sectorial es el funcionario encargado de formular la política de hidrocarburos aprobados por la Presidencia de la República, así como de la aplicación de la presente Ley. Esta normatividad comprenderá lo concerniente a la prospección, exploración, explotación, refinación, industrialización, almacenamiento, transporte y comercialización de los hidrocarburos y de sus derivados. En el artículo 68 se menciona el almacenamiento, distribución y venta al público en el país, o una de estas actividades, de los derivados de los hidrocarburos será realizada por PETROECUADOR o por personas naturales o por empresas nacionales o extranjeras, para lo cual podrán adquirir tales derivados ya sea en plantas refinadoras establecidas en el país o importarlos.

Estos artículos se relacionan con la presente tesis, debido a que la materia prima utilizada para el diseño de la propuesta está vinculada a la regulación de derivados de petróleo. Debido a esto se considera la importancia de su inclusión dentro del marco legal descrito.

2.4.4 Acuerdo ministerial 042 (Ministerio del Ambiente, 2013)

El artículo 7 de este acuerdo regula la normativa ambiental aplicable, así como su responsabilidad de los prestadores de servicio y gestores ambientales para la recolección almacenamiento, transporte, tratamiento/eliminación de residuos o desechos peligrosos entre los cuales se encuentran los aceites lubricantes usados y envases vacíos; en su literal 5 se describe el almacenamiento y transportación de aceites lubricantes usados según la norma ecuatoriana INEN 2266.

El literal 7 describe la implementación de personal idóneo y capacitado para el manejo de aceites lubricantes usados y envases vacíos en base a las normativas que tienen que ver con la gestión aplicadas por el gestor de residuos y desechos peligrosos. En el artículo 8 se describe la eliminación de aceites lubricantes y envases vacíos se realizará bajo el principio de jerarquización.

La inclusión de los artículos antes citados se relaciona con el desarrollo de la tesis debido a que constituye un fundamento legal para la elaboración de la propuesta debido a que manifiesta de forma expresa la manipulación de los materiales que en la tesis se utilizan, la reutilización de estos mediante las normativas aplicables.

2.4.5 Ley Orgánica de Empresas Públicas

La Ley Orgánica de Empresas Públicas en su literal 3 expresa la actuación con racionalidad, rentabilidad y control social sobre la exploración, explotación e industrialización de los recursos naturales renovables y no renovables y en la comercialización de sus productos derivados en interés del ambiente. Mientras que el literal 4 propicia la obligatoriedad, generalidad, uniformidad, eficiencia, universalidad, accesibilidad, regularidad, calidad, continuidad, seguridad, precios equitativos y responsabilidad en la prestación de los servicios público, donde se presenta la fundamentación y los principios que regirán en el nuevo modelo de gestión de la planta asfáltica del GAD provincial, con la finalidad de preservar el medio ambiente.

Los literales anteriormente citados se incluyen en el marco legal presente debido principalmente a la vinculación del contexto con el anejo, manipulación y de la gestión de la elaboración del asfalto, el mismo que es considerado como variable independiente, de ahí su relevancia para su revisión y redacción dentro de este apartado.

2.4.6 Ley de Minería (Art. 1).

La presente Ley de Minería regula el ejercicio de los derechos soberanos del Estado Ecuatoriano, para administrar, controlar y gestionar el sector minero, de conformidad con los principios de sostenibilidad, precaución, prevención y eficiencia. Se expresa además que el Estado podrá delegar su participación en el sector minero, a empresas mixtas mineras en las cuales tenga mayoría accionaria, o a la iniciativa privada para la prospección, exploración y explotación, o el beneficio y refinación, si fuere el caso sobre las competencias y la explotación de los materiales pétreos de las riberas de ríos. La redacción de este artículo se enmarca dentro de la base legal del presente trabajo de titulación debido principalmente a su relación con la extracción de materiales que tiene que ver con la fabricación de pavimento.

2.4.7 Ley Orgánica de Educación Superior (LOES)

La Ley Orgánica de Educación Superior en su artículo 95, describe los criterios y más instrumentos para el aseguramiento de la calidad, así como su establecimiento, la modalidad, el proceso de acceso y relación con el sistema nacional de educación, las acciones para la permanencia, movilidad y titulación. En el artículo 127 de este mismo reglamento se establecen además la realización dentro del marco de la vinculación con la colectividad, cursos de educación continua y expedir los correspondientes certificados.

En el artículo 133, la LOES establece el funcionamiento de programas académicos de universidades extranjeras, por medio de convenios que deben ser sometido a la aprobación y supervisión del Consejo de Educación Superior, mientras que el artículo 144 de esta misma ley hace alusión al medio electrónico de la entrega del trabajo de titulación y de su integración al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.

El reglamento de la LOES, se relaciona con el desarrollo de la tesis, debido a que proporciona lineamientos legales sobre la elaboración de los trabajos de titulación en las instituciones de educación superior del Ecuador.

2.4.8 Universidad Laica Vicente Rocafuerte

REGLAMENTO DE TITULACIÓN

CAPÍTULO I

DE LOS CONCEPTOS Y GENERALIDADES

En el capítulo I del reglamento de titulación de la Universidad Laica Vicente Rocafuerte (ULVR), en su artículo 2, relacionada a la Unidad de Titulación, se establece la validación de la malla curricular y de las habilidades y desempeños adquiridos en la carrera para la resolución de problemas, dilemas o desafíos de la profesión, mientras que en su artículo 3 y 4, establecen los objetivos y los fines de la Unidad de Titulación respectivamente.

CAPÍTULO II

DE LA UNIDAD DE TITULACIÓN

En este capítulo se describe a la Unidad de Titulación Especial (UTE), así como las asignaturas que ella incluye, de sus acciones y vigencia en el proceso de titulación, la UTE incluye las asignaturas y cursos que posibilitan la preparación teórica, práctica y profesional. Su resultado final es el desarrollo de su opción de trabajo de titulación. La UTE tendrá vigencia y se procederá de acuerdo con el presente reglamento.

En el artículo 7 se establece la Unidad de Titulación (UT), de su desempeño dentro de la organización curricular en la validación académica de los conocimientos, habilidades y desempeños adquiridos en la carrera. Mientras que en el artículo 8 de este mismo capítulo se redacta el proceso a seguir por parte del estudiante al inicio del proceso de titulación, así como de los requisitos exigidos en el mismo.

CAPÍTULO III

TRABAJO DE TITULACIÓN

En el capítulo III, aborda el trabajo de titulación, específicamente en su artículo 12, reseña la obtención del título de tercer nivel, de grado en la ULVR, sus requisitos y cumplimientos con lo establecido en la Ley Orgánica de Educación Superior, el Reglamento de Régimen Académico, las normativas de la Universidad y de la realización del trabajo de titulación.

Mientras que en el artículo 13, del mismo capítulo describe al trabajo de titulación, de su evaluación dentro del proceso de la unidad de titulación y las prácticas pre-profesionales, en este mismo inciso en el artículo 14, describe el contenido y características del Trabajo de Titulación, de su consistencia, de la base conceptual, conclusiones y fuentes de consulta.

Finalmente, en el artículo 15, de este capítulo se establece la evaluación del trabajo de titulación y de cómo deberá ser su desarrollo; además expresa como debe ser llevada a cabo la sustentación de este y del plazo de la culminación de este.

CAPÍTULO IV

OPCIONES DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

En el artículo 16, que describe las Opciones de Trabajo de Titulación, la ULVR considera en su planificación e implementación curricular para todas sus carreras al Proyecto de Investigación y el Examen de grado de carácter complejo, mientras que en el artículo 17, referido al Proyecto de Investigación indica los lineamientos de este.

En los artículos 18 y 19 de este mismo capítulo, este reglamento establece las fases del Proyecto de Investigación, por medio de la ejecución de tres talleres y el examen complejo, el cual es un examen articulado al perfil de egreso de la carrera, es decir, una evaluación general sobre los contenidos de la carrera, que permita demostrar que el estudiante posee la preparación teórica-práctica- axiológica en el ejercicio de la profesión, respectivamente.

CAPÍTULO VI

TRABAJO DE TITULACIÓN

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

En el artículo 25 del proceso para elaborar el trabajo de titulación, la institución de educación superior expresa la conformación del trabajo de titulación, así como de los talleres que lo componen, en estos incisos se determina el número de sesiones que componen cada uno de los talleres, así como el desarrollo de este y la duración

En el artículo 26, se describe la inscripción al Taller, por medio de la documentación exigida, en el artículo 27 se refiere a la revisión del plan de Trabajo, donde expresan de forma precisa el plazo para la entrega el lugar donde se receptan los documentos y el trámite a seguir para culminar con el proceso de titulación y en el artículo 28 se comenta el trámite realizado por parte de la secretaria general y el informe extendido por este.

La redacción de estos artículos redactados en este literal y que corresponden a la reglamentación de la ULVR, se relaciona con el marco legal establecido por cuando direccionan de forma correcta el procesos de titulación que acompaña a la elaboración del trabajo de titulación acá redactado, que va desde la selección de la modalidad de titulación, del tema propuesto, los plazos establecidos por la universidad, así como de los requisitos a seguir.

2.4.9 Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador- MOP-001-F-2002 - Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos y Puentes

Este reglamento establece las políticas, criterios, procedimientos y metodología a seguir en los proyectos viales para posibilitar los estudios de planificación, diseño y evaluación de proyectos viales, así como asegurar la calidad y sostenibilidad de los proyectos viales que impactan al medio ambiente. Y optimizar el mantenimiento del tráfico durante las fases de suministro, construcción y operación.

SECCION 401 SUPERFICIES DE RODADURA

405-5. Hormigón Asfáltico Mezclado en Planta.

405-5.01. Descripción.- Consiste en la construcción de capas de rodadura de mortero asfáltico constituido por agregados de granulometría especificada y cemento asfáltico, mezclados en caliente

405.5.02 Materiales.- El tipo cemento asfáltico estará definido en el contrato y estará entre cemento asfáltico con un grado de penetración 60 – 70 y 85 – 100.

En el contrato se definirá la gradación de los agregados, de acuerdo con las condiciones de empleo y utilización que se previene para la capa de rodadura.

Tabla 8. Porcentajes que pasa a través de los tamices

TAMIZ	Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada			
	¾"	½"	3/8"	Nº4
1" (25.4 mm.)	100	--	--	--
¾" (19.0 mm.)	90 - 100	100	--	--
½" (12.7 mm.)	--	90 - 100	100	--
3/8" (9.50 mm.)	56 - 80	--	90 - 100	100
Nº 4 (4.75 mm.)	35 - 65	44 - 74	55 - 85	80 - 100
Nº 8 (2.36 mm.)	23 - 49	28 - 58	32 - 67	65 - 100
Nº 16 (1.18 mm.)	--	--	--	40 - 80
Nº 30 (0.60 mm.)	--	--	--	25 - 65
Nº 50 (0.30 mm.)	5 - 19	5 - 21	7 - 23	7 - 40
Nº 100 (0.15 mm.)	--	--	--	3 - 20
Nº 200 (0.075 mm.)	2 - 8	2 - 10	2 - 10	2 - 10

Fuente: Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos y Puentes MOP-001-F-2002, tabla 405.5.1

405-5.05.2. Dosificación y Mezclado.- Los agregados deberán secarse en horno hasta reducir la humedad a un máximo de 1%;

La temperatura del asfalto, durante la mezcla, estará entre los 135 °C y 160 °C, y la temperatura de los agregados, en el instante de recibir el cemento asfáltico, deberá estar entre 120 °C y 160 °C.

2.4.10 STP1412. Contribución agregada al rendimiento del asfalto de mezcla en caliente (HMA) (White, Johnson, & Yzenas, 2001)

Esta normativa tiene como objetivo conocer el efecto de las propiedades de los agregados en el rendimiento de HMA, así como las diferentes características que poseen los agregados, dentro de los cuales se tiene el pulido de agregados, la resistencia a la formación de surcos, el tamaño máximo de agregados, la forma de las partículas y la cantidad en polvo. Esta normativa se incluye de forma expresa en el marco legal, debido a que dentro del análisis de mezclas asfálticas de las cuales pueden ser calientes y se analizan de forma expresa en el marco teórico.

2.4.11 STP1079. Emulsiones asfálticas (Muncy, 1990)

Esta norma comprende todo lo que se relacione con las emulsiones asfálticas, así como sus tecnologías, métodos de laboratorio, diseños de mezcla y aplicación de materiales. Esta normativa se relaciona con los ensayos a los cuales deben ser sometidos las mezclas asfálticas y cuya finalidad tiene que ver con la observación de las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas recicladas con RAP.

2.4.12 Evaluaciones de fatiga y rigidez del pavimento de asfalto recuperado en mezclas de asfalto de mezcla caliente (Xiao, Amirkhasian, & Wu, 2011)

Esta norma se deriva de un artículo científico sobre el reciclaje de materiales de pavimentos de asfalto existentes, de los cuales es posible producir pavimentos nuevos, de los cuales se conoce que estos no originan variación en los valores de rigidez y resistencia a la fatiga. Esta normativa tiene influencia directa sobre los ensayos en materiales reciclados específicamente de asfalto reciclado, la influencia de su conformación en los parámetros físicos de rigidez y resistencia a la fatiga.

2.4.13 Norma Técnica Ecuatoriana (Instituto Ecuatoriano de Normalización) NTE INEN 2029:1995 Derivados del petróleo. Bases lubricantes para uso automotor.

Esta norma se emplea en bases lubricantes de origen mineral, especialmente cuando son componente principal de los aceites y grasas lubricantes para aplicaciones automotores, dentro esta se describe el tipo de base sea lubricante virgen, re-refinada y parafínica y además con clasificación de acuerdo con la base lubricante parafínica virgen o re-refinada, de las cuales se maneja el tipo I: liviana, la tipo II media, el tipo III: pesada y el tipo IV: cilindro parafínico.

Su inclusión dentro del marco legal se justifica de forma determinante, debido a su relevancia al momento de analizar la utilización de aceite reciclado y analizar su influencia en las propiedades mecánicas del asfalto.

NTE INEN 2266 TRANSPORTE, ALMACENAMIENTO Y MANEJO DE PRODUCTOS QUÍMICOS PELIGROSOS

Esta norma tiene por objetivo indicar los requisitos y las debidas precauciones que se debe considerar para el transporte, almacenamiento, comercialización y eliminación de los productos químicos de naturaleza peligrosa, también se consideran todas las que se involucren de una u otra manera con las siguientes definiciones: conductor, comercializador, daño a la salud, detonador, dinamita, etiqueta, etiquetado, explosivo, gas, gas combustible, entre otras; su vinculación al desarrollo del marco legal se fundamenta en la manipulación de materiales como el asfalto y del aceite de motor para el desarrollo del marco metodológico, específicamente en la implementación de los diversos ensayos, de ahí la justificación de su inclusión.

NTE INEN 2060:2002

PRODUCTOS DERIVADOS DEL PETRÓLEO. CEMENTOS ASFÁLTICOS (ASFALTOS DE PENETRACIÓN). REQUISITOS.

En los incisos pertenecientes a estos artículos, se conceptualiza entre otras, las definiciones que intervienen en el marco teórico y que responden de manera exclusiva al desarrollo de la temática abordada, estos conceptos corresponden al asfalto, al cemento asfáltico (asfaltos de penetración), lote y muestra. En el apartado 4, se especifican las clasificaciones de los cementos asfálticos según esta norma, los cuales pueden ser de: Grado I, penetración 40/50; Grado II, penetración 60/70 Grado III, penetración 85/100 o Grado IV, penetración 120/150.

En el quinto apartado se describen las disposiciones generales contempladas en esta norma, respecto a la homogeneidad de la mezcla y su temperatura respectiva (175 °C), la temperatura del cemento asfáltico, utilizado para riegos, debe estar comprendida entre 140°C y 175°C o que todo vehículo que transporte cementos asfálticos debe sujetarse al Reglamento de Seguridad y Operación para el Transporte de Combustibles en el Ecuador. El sexto apartado comenta los requisitos específicos de los asfaltos, los cuales se resumen en la Tabla 8, en el octavo apartado se redacta el envasado de los cementos asfálticos

Tabla 9. Características fisicoquímicas.

REQUISITOS	UNIDA	GRADO DE PENETRACIÓN										METODO DE ENSAYO NTE INEN
		D	I		II		III		IV		V	
		Min	Max	Min.	Max	Min.	Max	Min.	Max	Min.	Max	
Penetración a25°C, 1/10mm 100g,5s		40	50	60	70	85	100	120	150	200	300	917
Viscosidad a135°C: SSF Saybolt-Furol		120	--	100	--	85	--	70	--	50	--	1981
Cinemática	cSt	240	--	200	--	170	--	140	--	100*	--	810
Punto de inflamación	°C	232	--	232	--	232	--	218	--	177	--	808
Ductilidad a25°C y 5 cm/min	Cm	100	--	100	--	100	--	100	--	100*	--	916
Solubilidad en tricloroetileno	% m/m	99	--	99	--	99	--	99	--	99	--	915
Pérdida demasa por Calentamiento	% m/m	--	0,8	--	0,8	--	1,0	--	1,3	--	1,5	924
Ensayos en el residuo: Penetración (% del original)	% m/m	58	--	54	--	50	--	46	--	40	--	918
Ductilidad a25°C, 5cm/min	Cm	--	--	50	--	75	--	100	--	100*	--	916

* Si la ductilidad a 25°C es menor a 100 cm el material será aceptado.

Fuente: NTE INEN 2060:2002

La inclusión de esta norma corresponde al desarrollo de la tesis debido a que detalla de forma específica las definiciones acá revisadas, así como su transportación y especificaciones técnicas que son necesario observar para efectos prácticos, de ahí su relevancia al momento de estar compiladas en el presente marco.

NTE INEN 2515:2010

PRODUCTOS DERIVADOS DEL PETRÓLEO. CEMENTO ASFÁLTICO (CLASIFICACIÓN POR VISCOSIDAD).REQUISITOS.

En el primer apartado de esta norma se establece los objetivos de esta, seguidamente del alcance y las definiciones relativas a ella, donde se abordan los conceptos de cemento asfáltico (clasificación por viscosidad), viscosidad, viscosidad cinemática, betún, lote y muestra. En el cuarto inciso se observa la clasificación de los cementos respecto a su viscosidad, los cuales se resumen en la Tabla 9.

Tabla 10. Clasificación para los tipos comprendidos de 200 dmm a 20 dmm de penetración.

Tipo	Viscosidad a 60 °C, Pascal segundo (Pa s)⁽¹⁾
AC-2,5	25± 5
AC-5	50 ± 10
AC-10	100 ± 20
AC-20	200 ± 40
AC-40	400 ± 80

⁽¹⁾ 1 Pa s(Pascal segundo) = 10 P (Poise). Ver NTE INEN 53

Fuente: NTE INEN 2515:2010

En el artículo 4.1.2 se detalla la clasificación basada en los ensayos realizados al asfalto original, para los tipos comprendidosde 220 dmm a 40 dmm de penetración, se presentan en la tabla 10.

Tabla 11. Clasificación para los tipos comprendidos de 220 dmm a 40 dmm de penetración.

Tipo	Viscosidad a 60 °C, Pascal segundo (Pa s)⁽²⁾
AC-2.5	25 ± 5
AC-5	50 ± 10
AC-10	100 ± 20
AC-20	200 ± 40
AC-30	300 ± 60
AC-40	400 ± 80

Fuente: NTE INEN 2515:2010

La clasificación basada en las pruebas realizadas al residuo del ensayo de película fina en horno

rotatorio, se presentan en la tabla 11.

Tabla 12. Clasificación basada en el residuo del ensayo de película fina en horno rotatorio

Tipo	Viscosidad a 60 °C,
	Pascal segundo (Pa s) ⁽³⁾
AR-100	100 ± 25
AR-200	200 ± 50
AR-400	400 ± 100
AR-800	800 ± 200
AR-1600	1 600 ± 400

⁽³⁾ 1 Pa s (Pascal segundo) = 10 P (Poise). Ver NTE INEN 53

Fuente: NTE INEN 2515:2010

En el quinto apartado se redactan las disposiciones generales de esta norma y la utilización del equipo de seguridad para su respectiva manipulación, en el sexto inciso se redactan los requisitos específicos para cemento asfáltico de viscosidad a 60 °C, basada en el asfalto original (ver Tabla 12).

Tabla 13. Requisitos de cementos asfálticos, para los tipos comprendidos de 200 dmm a 20 dmm de penetración.

Ensayo	Unidad	AC-2.5		AC-5		AC-10		AC-20		AC-40		Norma de ensayo
		Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	
Viscosidad absoluta a 60 °C	Pa s ⁽⁴⁾	25 ± 5		50 ± 10		100 ± 20		200 ± 40		400 ± 80		ASTMD2171
Viscosidad cinemática a 135 °C	mm ² s ⁻¹ ⁽⁵⁾	80	--	110	--	150	--	210	--	300	--	ASTMD2170
Penetración a 25°C, 100 g, 5 s	Dmm	200	--	120	--	70	--	40	--	20	--	NTE INEN917
Punto de inflamación	°C	163	--	177	--	219	--	232	--	232	--	NTE INEN808
w Solubilidad en tricloroetileno	%	99,0	--	99,0	--	99,0	--	99,0	--	99,0	--	NTE INEN915
Pruebas realizadas al residuo del ensayo de película delgada al horno												ASTMD1754
Viscosidad absoluta a 60°C	Pa s ⁽⁴⁾	--	125	--	250	--	500	--	1 000	--	2 000	ASTMD2171
Ductilidad a 25°C, 5 cm/min	Cm	100 ⁽⁶⁾	-	100	--	50	--	20	--	10	--	NTE INEN916

⁽⁴⁾ 1 Pa s (Pascal segundo) = 10 P (Poise).

⁽⁵⁾ Ver NTE INEN 53,

⁽⁶⁾ Si la ductilidad es menor a 100, el material debe ser aceptado, solo si la ductilidad a 15,5 °C es mínimo 100 a una velocidad de tiro de 5cm/min.

Fuente: NTE INEN 2515:2010

Los requisitos para cemento asfáltico de viscosidad a 60 °C, basada en el asfalto original (ver tabla 12). Los asfaltos especificados en la tabla 12, son menos susceptibles a la temperatura que los especificados en la tabla 11. Los asfaltos que cumplen los requisitos de la tabla 12

también cumplen los requisitos de la tabla 13 del mismo tipo.

Tabla 14. Requisitos de cementos asfálticos, para los tipos comprendidos de 220 dmm a 40 dmm de penetración.

Ensayo	Unidad	AC-2.5		AC-5		AC-10		AC-20		AC-30		AC-40		Norma de Ensayo
		Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	
Viscosidad absoluta a 60 °C	Pa s ⁽⁷⁾	25 ± 5		50 ± 10		100 ± 20		200 ± 40		300 ± 60		400 ± 80		ASTMD2171
Viscosidad cinemática a 135 °C.	mm ² s ⁻¹ ⁽⁸⁾	125	--	175	--	250	--	300	--	350	--	400	--	ASTMD2170
Penetración a 25 °C, 100 g, 5 s	Dmm	220	--	140	--	80	--	60	--	50	--	40	--	NTEINEN917
Punto de inflamación	°C	163	--	177	--	219	--	232	--	232	--	232	--	NTEINEN808
w Solubilidad en tricloroetileno	%	99,0	--	99,0	--	99,0	--	99,0	--	99,0	--	99,0	--	NTEINEN915
Pruebas realizadas al residuo del ensayo de película delgada al horno														ASTMD1754
Viscosidad absoluta a 60°C	Pa s ⁽⁷⁾	--	125	--	250	--	500	--	1 000	--	1 500	--	2 000	ASTMD2171
Ductilidad a 25°C, 5 cm/min	Cm	100 ⁽⁹⁾	--	100	--	75	--	50	--	40	--	25	--	NTEINEN916

⁽⁷⁾ 1 Pa s (Pascal segundo) = 10 P (Poise).

⁽⁸⁾ Ver NTE INEN 53,

⁽⁹⁾ Si la ductilidad es menor a 100, el material debe ser aceptado, solo si la ductilidad a 15,5 °C es mínimo 100 a una velocidad de tiro de 5cm/min.

Fuente: NTE INEN 2515:2010

En los artículos del apartado sexto se redactan los requisitos complementarios sobre la comercialización de los cementos asfálticos, según lo dispuesto en la Ley 2007-76 del Sistema Ecuatoriano de la Calidad, así como el almacenamiento y transporte del producto debe estar de acuerdo a la NTE INEN 2 266, al Reglamento de Seguridad y Operación para el transporte de combustibles en el Ecuador, y al Reglamento para la autorización de actividades de comercialización de productos derivados de los hidrocarburos no comprendidos en el Decreto Ejecutivo N° 2024, además del cumplimiento del productor como el comercializador con lo establecido en el Reglamento Sustitutivo al Reglamento Ambiental para Operaciones Hidrocarburíferas en el Ecuador (RAOHE, Decreto Ejecutivo 1215) y a lo establecido en el Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria (TULAS).

En el séptimo inciso se analiza la inspección de calidad para estas muestras según lo dispuesto en la NTE INEN 2 336, del muestreo y recepción debe realizarse de acuerdo con la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 922, de la aceptación o rechazo, sobre la determinación de las características del producto establecidas en el numeral 6 de requisitos de esta norma, entre otras.

En el octavo inciso se describe la distribución del cemento asfáltico, mientras que en el noveno corresponde al envasado de este, describe las características del contenedor y los datos necesarios en el envase para su despacho. Una vez revisada la norma se observa la necesidad de incluir lo antes redactado, en vista a la relación de estas con el tema propuesto, específicamente en lo concerniente a el traslado, envasado y requisitos del cemento asfáltico.

Capítulo III

MARCO METODOLÓGICO

3.1 Metodología de la investigación

Dentro de la metodología adoptada en la investigación y con la finalidad de aplicar las técnicas e instrumentos en cuestión, para poder cumplir con los objetivos propuestos al inicio de la tesis, se puede comentar que el trabajo de titulación se enmarca en lo que corresponde al método deductivo, con respecto a la aplicación de la lógica adoptada, los autores (Hernández, Fernández, & Baptista, 2014), comentan: “Se aplica la lógica deductiva. De lo general a lo particular (de las leyes y teoría a los datos)”.

Lo antes acotado se relaciona con el presente trabajo de titulación, debido a que la metodología dentro de la cual se enmarca, parte de teorías y postulados hacia los datos, que serán obtenidos como resultados (cuantitativos) de la experimentación a realizar (ensayos de laboratorio) y que permitirá establecer el comportamiento de las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas por medio de la manipulación de las variables correspondiente a la composición de las mezclas bituminosas.

Todo esto con la finalidad de evaluar la hipótesis formulada sobre las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica en caliente usando mezcla asfáltica reciclada y aceite de motor reciclado y su cumplimiento con lo establecido en la norma técnica permitiendo su uso en vías secundarias o caminos vecinales.

3.2 Tipo de investigación

En lo referente al tipo de investigación, necesario para poder llegar a resultados concluyentes y con esto redactar recomendaciones pertinentes, se puede afirmar que el tipo de investigación adoptado corresponde al experimental, determinado principalmente por la aplicación de técnicas con la finalidad de obtener de forma cuantitativa los parámetros que se necesitan para poder determinar las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas las cuales son objeto de estudio en la tesis. Sobre el tipo de investigación experimental, los autores (Hernández, Fernández, & Baptista, 2014) comentan: “En un estudio experimental se construye el contexto y se manipula de

manera intencional a la variable independiente, después se observa el efecto de esta manipulación sobre la variable dependiente” (p. 150).

Lo antes redactado, se relaciona con el formato propuesto, en el tipo de investigación adoptado, debido a que por medio de los ensayos de laboratorio se procederá a manipular la variable independiente (aceite de motor reciclado), para luego observar el efecto del ensayo sobre las variables dependientes (propiedades mecánicas y mezcla asfáltica reciclada).

3.3 Enfoque

Debido al tipo de la investigación, el presente estudio se lo puede definir como un enfoque cuantitativo, debido principalmente a que su desarrollo se centra en la aplicación de ensayos de laboratorios aplicado a briquetas o muestras de ensayo que se crean de las mezclas dosificadas de diferentes compuestos. Sobre lo antes expuesto los autores Hernández, Fernández, & Baptista (2014), señalan: “Utiliza la recolección de datos para probar hipótesis con base en la medición numérica y el análisis estadístico, con el fin establecer pautas de comportamiento y probar teorías” (pág. p. 4). Este enfoque permitirá interpretar los valores numéricos que resulten de las pruebas aplicadas, así como la influencia de la aplicación de aceite de motor reciclado en las mezclas de asfalto reciclado.

3.4 Técnicas e instrumentos

Para definir en que consiste la técnica, se hace referencia a lo expuesto por los autores (Hernández, Fernández, & Baptista, 2014), que comentan: “Las técnicas de recolección de los datos pueden ser múltiples. Por ejemplo, en la investigación cuantitativa: cuestionarios cerrados, registros de datos estadísticos, pruebas estandarizadas, sistemas de mediciones fisiológicas, entre otras” (p. 16).

3.4.1 Técnica.

De lo antes expuesto y que se enmarca en lo propuesto en el trabajo de titulación, se puede acotar que las técnicas concebidas para la recolección de información consisten en varios ensayos de laboratorio, mediante las cuales se manipulará las mezclas asfálticas, para poder establecer el comportamiento de las propiedades mecánicas en las mezclas asfálticas

recicladas con aceite de motor reciclado, todo esto de manera cuantitativa; entre los ensayos propuestos se tienen:

- Método de ensayo normalizado para determinar la densidad, la densidad relativa (gravedad específica), y la absorción de agregados grueso. (ASTM C127)
- Método de ensayo normalizado para determinar la densidad, la densidad relativa (gravedad específica), y la absorción de agregados finos (ASTM C128)
- Método estándar para la extracción cuantitativa de materiales bituminosos en mezcla de pavimento asfáltico (ASTM D 2172) o AASHTO T308/164
- Ensayo Estabilidad y Flujo de Mezclas Asfálticas en Caliente Empleando el Aparato de Marshall (ASTM D1559 o AASHTO T 225)
- Ensayo para determinación de la gravedad específica “BULK” (ASTM D2726)

3.4.2 Instrumentos

En lo referente a los instrumentos los cuales serán utilizados mediante la aplicación de las técnicas propuestas para la obtención de resultados se tienen:

- Equipo para fabricación de briquetas
- Moldes de acero
- Balanza
- Horno
- Termómetro
- Baño de maría
- Medidor de deformaciones
- Extractor centrifugo de asfalto
- Equipo de prensa hidráulica (ensayo a Marshall)
- Pirómetro
- martillo Marshall
- Formatos de laboratorio
- Fichas de observación

3.5 Población

Se define comúnmente como un total de casos y/o personas que poseen características y rasgos similares, a los cuales es posible aplicar ciertos instrumentos de investigación. Hernández, Fernández, & Baptista (2014), comentan sobre la población e indican: “Es un conjunto de todos los casos que concuerdan con determinadas especificaciones” (pág. p. 174). Para efectos de la investigación, la población en cuestión estará referida al diseño de 12 briquetas de mezcla asfáltica con diferentes porcentajes de aceite de motor reciclado, y presumiblemente diferentes propiedades mecánicas relacionadas. Dichas briquetas se utilizarán para la aplicación de ensayos de laboratorio, por tratarse de una investigación experimental la muestra a emplear será la totalidad de la población.

3.6 Muestra

Para el presente estudio no se contempla la determinación de una muestra, debido a que por tratarse de una población reducida (menor a 50), la muestra es igual a la población. Sobre este tipo de estudio que no poseen muestra calculada estadísticamente, los autores (Hernández, Fernández, & Baptista, 2014), explican:

Sólo cuando queremos realizar un censo debemos incluir en el estudio a todos los casos (personas, animales, plantas, objetos) del universo o la población. Por ejemplo, los estudios motivacionales en empresas suelen abarcar a todos sus empleados para evitar que los excluidos piensen que su opinión no se toma en cuenta. Las muestras se utilizan por economía de tiempo y recursos (p. 172).

Según Hernández, Fernández, & Baptista (2014) indican que: “En las muestras no probabilísticas, la elección de los elementos no depende de la probabilidad, sino de causas relacionadas con las características de la investigación o los propósitos del investigador”, se seleccionó como muestra no probabilística para conseguir el porcentaje óptimo de la variable independiente de la investigación porque se designa diferentes porcentajes de aceite de motor reciclado con 3 repeticiones como lo especifica la norma ASTM D1559, por cada porcentaje para disminuir el error de los parámetros, con el objetivo de obtener la mezcla asfáltica con los parámetros que cumplan con la norma MOP-001-F 2002 Ecuatoriana.

Es decir, como se trata de establecer el comportamiento de las propiedades mecánicas de todas las mezclas asfálticas recicladas con aceite de motor reciclado intencionalmente diseñadas para el efecto, se tomará en cuenta a toda la población como muestra, es decir la 12 briquetas a analizar, por lo que, para este caso, no se ha procedido a calcular la muestra. La composición de las briquetas diseñadas para los diferentes ensayos, que contienen diferente porcentaje de mezcla asfáltica reciclada, así como de aceite de motor reciclado se propone a continuación:

Tabla 15. Dosificación de briquetas

Mezcla asfáltica reciclada	Aceite de motor reciclado	Numero de Briquetas	Peso de Briquetas (gr)	Peso de Aceite de motor reciclado añadir (gr)	Observación
98.50%	1.50%	3	1200	18	en peso
99.00%	1.00%	3	1200	12	en peso
99.50%	0.50%	3	1200	6	en peso
100%	0.00%	3	1200	0	en peso

Elaborado por: Castillo & Yamasqui (2022)

3.7 Validez y Confiabilidad

Dentro de una investigación científica, uno de los aspectos inherentes al aspecto metodológico del mismo es la determinación de la validez y confiabilidad de los instrumentos y procedimientos necesarios para realizar las mediciones en este contexto. Para Hernández, Fernández, & Baptista (2014): “La validez, en términos generales, se refiere al grado en que un instrumento mide realmente la variable que pretende medir”; y “la confiabilidad de un instrumento de medición se refiere al grado en que su aplicación repetida al mismo individuo u objeto produce resultados iguales” (Hernández, Fernández, & Baptista, 2014, p. 200).

En este sentido, en la presente investigación la confiabilidad y la validez de los instrumentos de laboratorio empleados en los ensayos son del 100%, debido a que los equipos del laboratorio donde se remitieron las muestras obtenidas se encontraban debidamente calibradas.

3.8 Análisis de Resultados

3.8.1 Obtención de los materiales

El material de mezcla de asfáltica reciclada se lo recolecto en la ciudad de Guayaquil, en la Av. José Antepara entre Av. José Vicente Trujillo y Av. Quito, recogiendo 22 kg de muestra y el aceite de motor reciclado se lo recolecto en la lubricadora “Lubricantes Omar” ubicado en la ciudad de Guayaquil, Enrique Ortega Moreira, Cdma. Quisquis, obteniendo 1 galón de aceite de motor reciclado.



Figura 17. Recolección de Mezcla asfáltica reciclada (Calles Jose Antepara y Av. Jose Vicente Trujillo)
Elaborado por: Castillo & Yamasqui (2022)



Figura 18. Recolección de aceite de motor reciclado (Enrique Ortega Moreira, Cdma. Quisquis)
Elaborado por: Castillo & Yamasqui (2022)

3.8.2 Metodología para la obtención de resultados del proyecto.

Se procederá a realizar los siguientes los ensayos físico-químicos para conocer las propiedades de las muestras de la mezcla asfáltica reciclada y del aceite de motor reciclado.

Tabla 16. Ensayos a realizar para determinar las propiedades de la mezcla asfáltica reciclada y aceite de motor reciclado.

ENSAYOS O PROPIEDADES	TIPO DE MUESTRA			NORMA
	ACEITE DE MOTOR REICLADO	ASFALTO REICLADO	MEZCLA ASFALTICA REICLADA	
Punto de Inflamación	✓	✓		ASTM D92:01
Punto de Combustión	✓	✓		ASTM D92:01
Viscosidad Cinemática 20 °C (cSt)	✓			ASTM D445:01
Viscosidad Dinámica 20°C (Pa.s)	✓			ASTM D445:01
Viscosidad Brookfield 23 °C ± 15°C		✓		ASTM D445:01
Viscosidad Brookfield 135 °C ± 15°C		✓		ASTM D445:01
Análisis termogravimétrico			✓	ISO 11357- 3:11
Ensayo de Granulometría			✓	INEN 696
Ensayo para la Determinación de la densidad, Densidad relativa y absorción de agregado grueso y fino de la mezcla asfáltica reciclada			✓	INEN 856 Y 857

Elaborado por: Castillo & Yamasqui (2022)

Previamente se procederá a realizar el ensayo de Método estándar para la extracción cuantitativa de materiales bituminosos en mezcla de pavimento asfáltico (ASTM D 2172) o AASHTO T308/164, para así determinar el contenido de asfalto que contiene la mezcla asfáltica reciclada y este resultado define si o no necesitara añadir asfalto virgen para realizar la mezcla, debido que en Ecuador no existe una norma en la cual regula sobre el uso de las mezclas asfálticas recicladas se tomó como referencia del Manual de Carreteras de Chile, Volumen N° 5 (MOP-DGOP-Dirección de Vialidad Chile, 2018) SECCIÓN 5.423.203 Material Recuperado (RAP) “Si el porcentaje de cemento asfáltico que posee el RAP es menor a un 3,0%, el material recuperado (RAP) deberá considerarse sólo como un árido más dentro de la mezcla asfáltica. Si el porcentaje de asfalto en el RAP es mayor que 3%, el % de asfalto a agregar será el óptimo teórico menos el % de asfalto del RAP.”

Luego se procede a realizar el ensayo granulométrico de la mezcla asfáltica reciclada y posteriormente con los datos obtenidos se realiza el cálculo del contenido de asfalto óptimo teórico que servirá para elaborar la dosificación de las briquetas.

Después se procede a elaborar las briquetas de acuerdo a la dosificación para el diseño de la mezcla asfáltica reciclada con el aceite de motor reciclado como lo indica la tabla 14.

Antes de efectuar el ensayo del método de Marshall a las briquetas fabricadas se toma las medidas de las alturas de las briquetas, los pesos saturado superficialmente seco, en aire y en agua de las briquetas para determinar las densidades de bulk de las briquetas de acuerdo como lo establece la norma ASTM D2726.

Y posteriormente se realizara el ensayo del método de Marshall para determinar la estabilidad y flujo de las briquetas de acuerdo a la norma ASTM D 1559.

Luego ya tabulados los datos obtenidos se realizara las gráficas de las siguientes curvas.

- a) Peso unitario vs. Contenido de asfalto.
- b) Estabilidad vs. Contenido de asfalto.
- c) Flujo vs. Contenido de asfalto.
- d) Porcentaje de vacíos V_a vs. Contenido de asfalto.
- e) Porcentaje de vacíos de agregado mineral VMA vs. Contenido de asfalto
- f) Estabilidad vs. Porcentaje de Aceite de motor reciclado.
- g) Flujo vs. Porcentaje de Aceite de motor reciclado.
- h) Porcentaje de Aceite de motor reciclado vs propiedades de la mezcla asfáltica reciclada con aceite de motor reciclado.

Por medio de las gráficas se calcula el asfalto óptimo entre la mezcla asfáltica reciclada y el aceite de motor reciclado.

Capítulo IV

INFORME FINAL

4.1 Origen del planteamiento

- Identificar las propiedades físicas y químicas de las mezclas asfálticas recicladas
- Identificar las propiedades físicas y químicas del aceite de motor reciclado.
- Diseñar una mezcla asfáltica en caliente usando mezcla asfáltica reciclada y aceite de motor reciclado.
- Determinar las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica en caliente usando mezcla asfáltica reciclada y aceite de motor reciclado.

4.2 Detalle del planteamiento

Para elaborar el diseño de las briquetas se utilizaron los materiales como la mezcla asfáltica reciclada que conformara como agregado y el aceite de motor reciclado que actuará como ligante del diseño de la mezcla asfáltica resultante.

4.3 Análisis de resultados

En relación al primer objetivo que es la de identificar las propiedades físicas y químicas de la mezcla asfáltica reciclada, para realizar los ensayos se necesitó 1 Kg de muestra de material y a continuación se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 17. Resultados de ensayos de punto de inflamación y punto de combustión de la mezcla asfáltica reciclada y el aceite de motor reciclado.

ENSAYO DE PUNTO DE INFLAMACIÓN Y PUNTO DE COMBUSTIÓN						
Código de muestra	Parámetro	Resultado (°C)	Desviación estándar	Norma de Ensayo	Temperatura ambiente promedio	Humedad relativa promedio
Mezcla asfáltica reciclada	Punto de inflamación	219	0.5	ASTM D92:01	28 °C	63%
	Punto de Combustión	240	0.5			

Elaborado por: Castillo & Yamasqui (2022)

Tabla 18. Resultados de ensayos de viscosidad de la mezcla asfáltica reciclada.

ENSAYO DE VISCOSIDAD						
Código de muestra	Parámetro	Resultado (cP)	Método de análisis	Norma de Ensayo	Temperatura ambiente promedio	Humedad relativa promedio
21-6376 - Mezcla asfáltica reciclada	Viscosidad Brookfield 23 °C ± 15°C	20400	Espiga N°7	ASTM D445	23 °C	63%
	Viscosidad Brookfield 135 °C ± 15°C	7200-6800	Espiga N°7			

Elaborado por: Castillo & Yamasqui (2022)

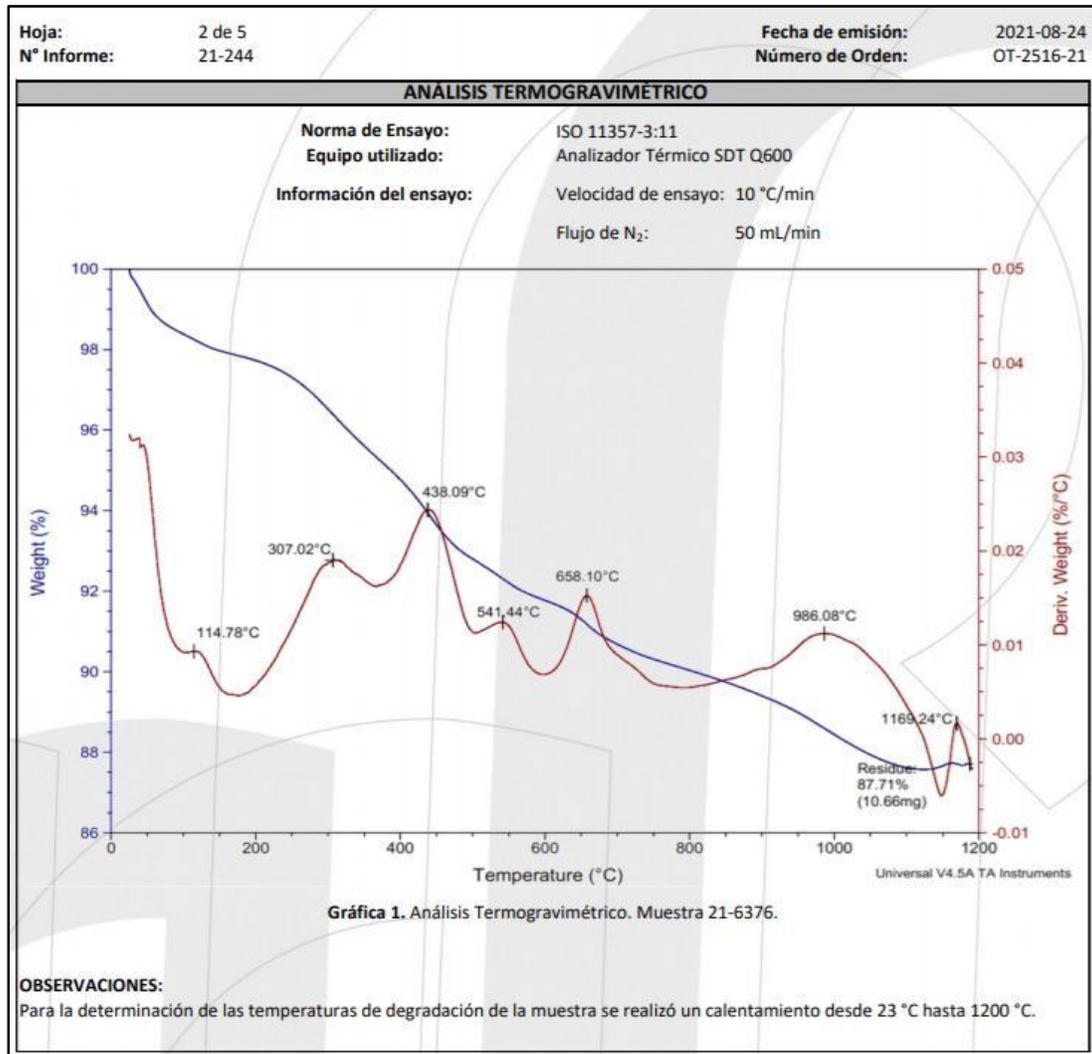


Figura 19. Ensayo de Análisis Termogravimétrico de la mezcla asfáltica reciclada
Elaborado por: Castillo & Yamasqui (2022)

Tabla 19. Ensayo Granulométrico del agregado de la mezcla asfáltica reciclada

ENSAYO DE GRANULOMETRÍA							
PROYECTO: PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MEZCLA ASFÁLTICA RECICLADA CON ACEITE DE MOTOR RECICLADO							
REALIZADA POR: STALIN CASTILLO CARPIO Y RENATO YAMASQUI FREIRE							
Norma: INEN 696							
Fecha: 14/08/2021							
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DEL AGREGADO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA RECICLADA							
Tamiz		Peso Parcial	% Retenido	% Retenido	% Pasante	% Especificaciones - Tabla 405-5.1. MOP - 001-F 2002 ESPECIFICACIONES GENERALES PARA LA CONSTRUCCION DE CAMINOS Y	
N°	mm			Acumulado	Acumulado	Limite Inferior	Limite Superior
1"	25	0.00	0.00	0.00	100	-	-
3/4 "	19	0.00	0.00	0.00	100	100	100
1/2"	12.7	43.08	4.40	4.40	95.60	90	100
3/8"	9.5	159.58	16.30	20.70	79.30	-	-
No.4	4.75	131.19	13.40	34.10	65.90	44	74
No.8	2.36	349.50	35.70	69.80	30.20	28	58
No.16	1.18	43.08	4.40	74.20	25.80	-	-
No.30	0.6	81.26	8.30	82.50	17.50	-	-
No.50	0.3	110.63	11.30	93.80	6.20	5	21
No.100	0.15	16.64	1.70	95.50	4.50	-	-
No.200	0.075	7.83	0.80	96.30	3.70	2	10
FONDO		36.22	3.70	100.00	0.00	-	-
TOTAL		979.00	100.00	100.00		-	-
					Cumple especificación		

Elaborado por: Castillo & Yamasqui (2022)

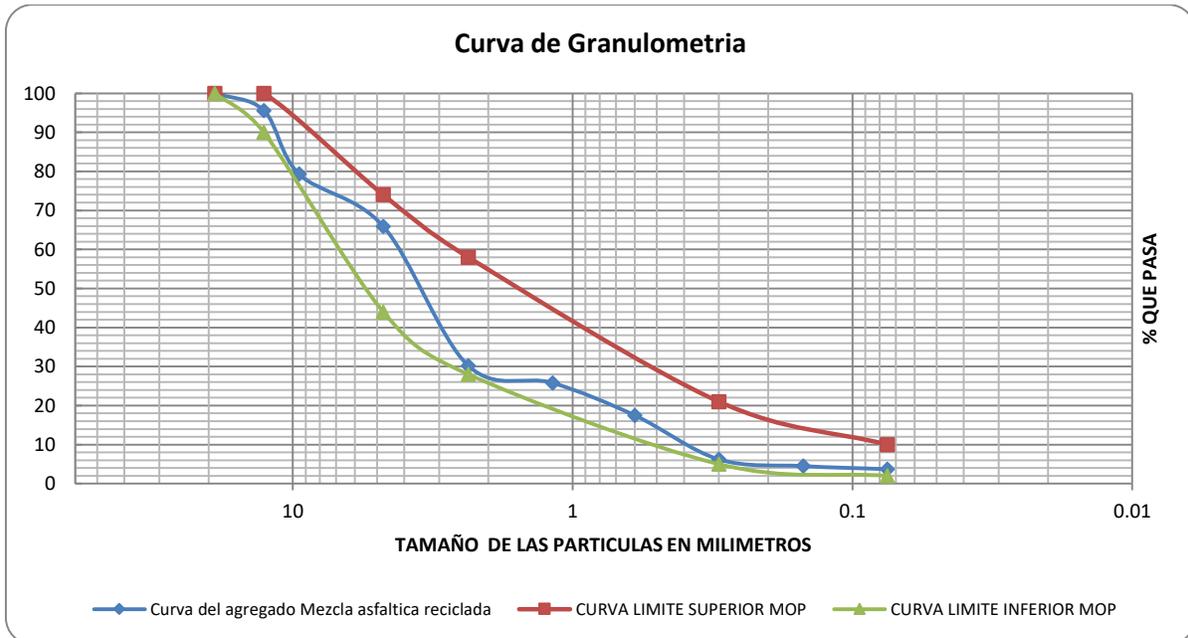


Figura 20. Ensayo Granulométrico del agregado de la mezcla asfáltica reciclada

Elaborado por: Castillo & Yamasqui (2022)

Tabla 20. Determinación de la densidad, Densidad relativa (Gravedad específica) y absorción de agregado grueso y fino de la mezcla asfáltica reciclada

DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD, DENSIDAD RELATIVA (GRAVEDAD ESPECÍFICA) Y ABSORCIÓN DEL ÁRIDO GRUESO Y FINO			
PROYECTO: PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MEZCLA ASFÁLTICA RECICLADA CON ACEITE DE MOTOR RECICLADO			
ELABORADO POR: STALIN CASTILLO CARPIO Y RENATO YAMASQUI FREIRE			
PESO ESPECIFICO DEL AGREGADO GRUESO			
NORMA NTE INEN 857			
DATOS		VALORES	
Tamaño nominal maximo		Tamiz 1/2"	Tamiz No.4
NOMENCLATURA	DESCRIPCION	pasa tamiz No. 3/4" y se retiene en el tamiz No. 4	pasa tamiz No. 3/8" y se retiene en el tamiz No. 8
A	Peso en el aire del agregado seco al horno	1971.95 gr.	1987.8
B	Peso en el aire del agregado saturado superficialmente seco	2000.00 gr.	2000
C	Peso aparente del agregado saturado superficialmente seco sumergido en agua	1279.90 gr.	1258.2
CALCULOS			
Densidad relativa (gravedad específica) (SH)	Densidad SH= $\frac{A}{B-C}$	2.738 gr/cm ³	2.680 gr/cm ³
Densidad relativa (gravedad específica) (SSS)	Densidad SSS= $\frac{B}{B-C}$	2.777 gr/cm ³	2.696 gr/cm ³
Densidad relativa aparente (gravedad específica aparente)	Densidad Aparente= $\frac{A}{A-C}$	2.849 gr/cm ³	2.725 gr/cm ³
Absorción	ABS= $\frac{B-A}{A} * 100\%$	1.42 %	0.61 %
PESO ESPECIFICO DEL AGREGADO FINO			
NORMA NTE INEN 856			
Pasa el tamiz No. 4 y es retenido en el integral			
DATOS		VALORES	
NOMENCLATURA	DESCRIPCION		
A	masa de la muestra seca al horno	497.99 gr.	
B	masa del picnómetro lleno con agua	629.88 gr.	
C	masa del picnómetro lleno con muestra y agua	931.10 gr.	
S	masa de la muestra saturada superficialmente seca	500.00 gr.	
CALCULOS			
Densidad relativa (gravedad específica) (SH)	Densidad SH= $\frac{A}{B+S-C}$	2.505 gr/cm ³	
Densidad relativa superficie seca (gravedad específica) (SSS)	Densidad SSS= $\frac{S}{B+S-C}$	2.541 gr/cm ³	
Densidad relativa aparente (gravedad específica aparente)	Densidad Aparente= $\frac{A}{B+A-C}$	2.531 gr/cm ³	
Absorción	ABS= $\frac{S-A}{A} * 100\%$	0.40 %	

Elaborado por: Castillo & Yamasqui (2022)

Tabla 21. Resumen de resultados de caracterización de la mezcla asfáltica reciclada

Resumen de resultados de caracterización de la mezcla asfáltica reciclada					
Ensayos de mezcla asfáltica reciclada	Rangos		RESULTADOS		
	Norma: NTE INEN 2515 2014, tabla 7 o ASTM D3381-2				
	Min	Max			
Viscosidad absoluta, 60°C	60 ± 20		Viscosidad absoluta	16,04 Pa*s	Cumple para Tipo de asfalto AC-6
Punto de inflamación	177°C		Punto de inflamación	219 °C	Cumple
Punto de Combustión			Punto de Combustión	240 °C	
Ensayo termogravimétrico			Cambio de masa (% w/w)	Perdida de masa 2% a 150 °C	
Granulometría	Cumple con las especificaciones del MOP-001-F-2002 tabla 405.5.1				

Elaborado por: Castillo & Yamasqui (2022)

En concordancia al segundo objetivo que es la de identificar las propiedades físicas y químicas del aceite de motor reciclado, para realizar los ensayos se requirió 3 litros de aceite de motor reciclado y se obtuvieron los siguientes datos:

Tabla 22. Resultados de ensayos de punto de inflamación y punto de combustión de la mezcla asfáltica reciclada y el aceite de motor reciclado.

ENSAYO DE PUNTO DE INFLAMACIÓN Y PUNTO DE COMBUSTIÓN						
Código de muestra	Parámetro	Resultado (°C)	Desviación estándar	Norma de Ensayo	Temperatura ambiente promedio	Humedad relativa promedio
Aceite de motor reciclado	Punto de inflamación	210.6	0.5	ASTM D92:01	28 °C	63%
	Punto de Combustión	270.3	0.5			

Elaborado por: Castillo & Yamasqui (2022)

Tabla 23. Resultados de ensayos de viscosidad del aceite de motor reciclado.

ENSAYO DE VISCOSIDAD						
Código de muestra	Parámetro	Resultado	Desviación estándar	Norma de Ensayo	Temperatura ambiente promedio	Humedad relativa promedio
21-6375 - Aceite de motor reciclado	Viscosidad Cinemática 20 °C (cSt)	90.65	0.1	ASTM D445	28 °C	63%
	Viscosidad Dinámica 20°C (Pa.s)	0.068	0.005			

Elaborado por: Castillo & Yamasqui (2022)

Es importante conocer estas propiedades para poder realizar la combinación entre la mezcla asfáltica reciclada y aceite de motor reciclado sin exceder el rango de temperatura que arroja los resultados de los ensayos de punto de inflamación y combustión; y las fuerzas de cohesión en la mezcla de los materiales.

Tabla 24 Resumen de resultados de caracterización del aceite de motor reciclado

RESUMEN DE RESULTADOS DE CARACTERIZACIÓN DEL ACEITE DE MOTOR RECICLADO						
ENSAYOS ACEITE DE MOTOR RECICLADO	RANGOS		RESULTADOS			
	NORMA					
	DIN 51519 o ASTM D 2422					
	Min.	Max.		Temperatura		Condición
Viscosidad Cinemática 40°C. mm ² /s (cSt)	28.8	35.2	Viscosidad Cinemática mm ² /s (cSt)	20 °C	40 °C	Cumple, se obtuvo la clasificación del aceite de motor reciclado usando la tabla A.1, de la norma DIN 5151 en función de la viscosidad cinemática la cual es de grado ISO VG 32 o según la norma SAE J300 es de grado 15W.
				90.65	32	
Viscosidad Dinámica 20°C (Pa.s)	-	-	Viscosidad Dinámica 20°C (Pa.s)	0.068		-
NORMA NTE INEN 2030:2011, tabla 5			RESULTADOS			
Punto de inflamación	190	-	Punto de inflamación	210.6		Cumple
Punto de Combustión	-		Punto de Combustión	270.3		-

Elaborado por: Castillo & Yamasqui (2022)

4.4 Cálculo del contenido de asfalto óptimo teórico para el diseño de la mezcla entre el hormigón asfáltico reciclado y el aceite de motor reciclado.

Una vez obtenido los datos del ensayo granulométrico se procede a realizar el cálculo del porcentaje de asfalto teórico en la mezcla mediante el uso de la fórmula empírica que establece el (Asphalt Institute, 1986, pág. 12) de USA:

$$P = 0.035a + 0.045b + Kc + F \quad (1)$$

P: Cantidad Total de asfalto teórico necesario para la mezcla.

a: Porcentaje de agregado mineral retenido en el tamiz 2.36 mm (Nº 8).

b: Porcentaje de agregado mineral que pasa en el tamiz 2.36 mm (Nº 8) y retenido en el tamiz 0.075 mm (No. 200).

c: Porcentaje de agregado mineral que pasa el tamiz 0.075 mm (No. 200).

K: El valor se designa con la siguiente tabla.

Tabla 25. Valores de K.

Valor de K	
0.15	Si el porcentaje de agregado mineral que pasa del tamiz 0.075 mm (No. 200) se encuentra entre el 11% al 15%
0.18	Si el porcentaje de agregado mineral que pasa del tamiz 0.075 mm (No. 200) se encuentra entre el 6% al 10%.
0.2	Si el porcentaje de agregado mineral que pasa del tamiz 0.075 mm (No. 200) es menor al 5%

Fuente: (Asphalt Institute, 1986, pág. 12)

F= Del 0 al 2%. Está en función de la absorción de los agregados.

Tabla 26. Valores de F.

VALOR DE F	
TIPO DE MATERIAL	F
Gravas o arenas de río de baja absorción.	0.55
Gravas angulosas, redondeadas, trituradas de baja absorción.	0.6
Gravas angulosas o redondeadas de alta absorción y roca triturada de absorción media.	0.7
Rocas trituradas de alta absorción.	0.8

Fuente: (Asphalt Institute, 1986, pág. 12)

Tabla 27. Calculo del Porcentaje de asfalto teórico.

CALCULO DEL PORCENTAJE DE ASFALTO TEORICO		
VARIABLES	Formula	Resultado
a	Porcentaje retenido acumulado en el tamiz 2.36 mm (Nº 8)	69.8
b	Es la diferencia entre el % pasante acumulado del tamiz 2.36 mm (Nº 8) y el % pasante acumulado del tamiz 0.075 mm (No. 200)	26.5
c	Porcentaje de agregado mineral que pasa el tamiz 0.075 mm (No. 200)	3.7
k	El porcentaje de agregado mineral que pasa del tamiz 0.075 mm (No. 200) es menor al 5%	0.2
F	Gravas angulosas, redondeadas, trituradas de baja absorción.	0.6
P	$P=0.035a+0.045b+K*c +F$	4.976

Elaborado por: Castillo & Yamasqui (2022)

Reemplazando valores de las variables en la formula (1) tenemos:

$$P = 0.035 (69.8\%) + 0.045(26.5\%) + 0.20(3.7\%) + 0.6\%$$

$$P=4.976\% \approx 5\%$$

Cemento asfáltico óptimo Teórico en gramos: 1200gr. * 0.05= 60gr.

A partir de este valor se procede a realizar la tabla de dosificación para la creación de las briquetas con diferentes porcentajes de asfalto y de aceite de motor reciclado.

4.5 Elaboración de las briquetas de la combinación de la mezcla asfáltica reciclada con el aceite de motor reciclado.

Para cada variación de porcentaje de aceite de motor reciclado se fabricaran 3 briquetas las cuales son el 0%, 0,5%, 1,00% y el 1,50% y en total son 12 briquetas.

De acuerdo a la tabla dosificación anteriormente planteada se procedió a elaborar las briquetas base con la mezcla asfáltica reciclada de acuerdo como lo establece la norma ASTM D1559 utilizando el peso de 1200 gr. de mezcla asfáltica reciclada, al momento de extraer la briqueta del molde de compactación se observó que no se formó esta por la falta de cohesión entre la mezcla debido por el bajo contenido de asfalto en la mezcla asfáltica reciclada.



Figura 21. Compactación de la mezcla asfáltica reciclada
Elaborado por: Castillo & Yamasqui (2022)



Figura 22. Briquetas de la mezcla asfáltica reciclada se evidencia falta de cohesión
Elaborado por: Castillo & Yamasqui (2022)

Evidenciándose disgregación en la formación de las briquetas se procedió a realizar el ensayo de extracción cuantitativa de materiales bituminosos en mezcla de pavimento asfáltico (ASTM D 2172) para determinar el contenido de asfalto que tiene la mezcla asfáltica reciclada; esta es sumergida en gasolina durante 24 horas para separar el asfalto del agregado y posteriormente se hace 5 lavados en la centrifugadora con gasolina y se obtiene entre la diferencia de pesos y así completar añadiendo asfalto nuevo hasta obtener el 5% de asfalto óptimo teórico en la mezcla reciclada de acuerdo como lo establece el Manual de Carreteras de Chile, Volumen N° 5 (MOP-DGOP-Dirección de Vialidad Chile, 2018) SECCIÓN 5.423.203 Material Recuperado (RAP).



Figura 23. Añadiendo gasolina a la mezcla asfáltica reciclada
Elaborado por: Castillo & Yamasqui (2022)



Figura 24. Extractor centrifugo de asfalto
Elaborado por: Castillo & Yamasqui (2022)

El ensayo de contenido de asfalto reflejo el valor de 1.08% (10.8 gr.) de asfalto en la mezcla asfáltica reciclada, y se reajusto la tabla 16 de dosificación para el diseño de las mezcla asfáltica y el aceite de motor añadiendo asfalto nuevo a la mezcla.

Tabla 28. Ensayo de extracción de asfalto en la mezcla asfáltica reciclada

PROYECTO: PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MEZCLA ASFÁLTICA REICLADA CON ACEITE DE MOTOR REICLADO	
ELABORADO POR: STALIN CASTILLO CARPIO Y RENATO YAMASQUI FREIRE	
ENSAYO DE EXTRACCION DE ASFALTO EN LA MEZCLA ASFALTICA REICLADA (ASTM D 2172)	
DESCRIPCIÓN	VALORES
A = PESO MUESTRA ANTES DE LA EXTRACCIÓN	1000.00 gr.
B = PESO DE FILTRO ANTES DEL LAVADO	21.70 gr.
C = PESO FILTRO DESPUES DEL LAVADO	22.40 gr.
D = PESO DEL DISOLVENTE	3.50 gr.
E= PESO DE LA MUESTRA DESPUES DE LA EXTRACCIÓN	985.00 gr.
F = PESO RETENIDO EN FILTRO	0.70 gr.
$\% \text{ ASFALTO} = \frac{A - (D + E + F)}{A} * 100\%$	1.08%

Elaborado por: Castillo & Yamasqui (2022)

Tabla 29. Dosificación reajustada para la elaboración de briquetas entre la mezcla asfáltica reciclada y el aceite de motor reciclado.

DOSIFICACION PARA LA ELABORACION DE BRIQUETAS ENTRE LA MEZCLA ASFALTICA RECICLADA Y EL ACEITE DE MOTOR RECICLADO													
Nombre De Mezcla	Cantidad de Briquetas	% Asfalto Optimo Teorico	Peso de Mezcla asfáltica reciclada	% Mezcla asfáltica reciclada	Peso de asfalto reciclado	% contenido de asfalto reciclado	Peso de Asfalto Virgen	% de Asfalto Virgen	Peso de asfalto resultante	% Total de Asfalto Resultante	Peso de aceite de motor reciclado	% de aceite de motor reciclado	Peso Total de las Briquetas
BASE (MEZCLA RECICLADA)	3	5.00%	1152.96 gr.	95%	12.96 gr.	1.08%	47.04 gr.	3.92%	60.00 gr.	5.00%	0.00 gr.	0%	1200.00 gr.
CON EL 0.5 % ACEITE DE MOTOR RECICLADO	3	5.00%	1152.96 gr.	95%	12.96 gr.	1.08%	41.04 gr.	3.42%	54.00 gr.	4.50%	6.00 gr.	0.50%	1200.00 gr.
CON EL 1 % ACEITE DE MOTOR RECICLADO	3	5.00%	1152.96 gr.	95%	12.96 gr.	1.08%	35.04 gr.	2.92%	48.00 gr.	4.00%	12.00 gr.	1.00%	1200.00 gr.
CON EL 1.5 % ACEITE DE MOTOR RECICLADO	3	5.00%	1152.96 gr.	95%	12.96 gr.	1.08%	29.04 gr.	2.42%	42.00 gr.	3.50%	18.00 gr.	1.50%	1200.00 gr.
Cantidad total de Material utilizado	12	-	13.84 Kg	-	155.52 gr.	-	456.48 gr.	-	612.00 gr.	-	108.00 gr.	-	-

Elaborado por: Castillo & Yamasqui (2022)

Obtenidos los valores de la dosificación se procede a fabricar las briquetas como lo establece la norma ASTM D 1559, se necesitó 13.84 kg. de mezcla asfáltica reciclada, 456.48 gramos de asfalto virgen y 108 gramos de aceite de motor reciclado.

4.5.1 Elaboración de 3 briquetas “BASE” de 1.08% asfalto reciclado y 3.92% asfalto virgen y el 95% de Mezcla asfáltica reciclada y el 0% de aceite de motor reciclado.

Estas briquetas fabricadas sin añadir el aceite de motor reciclado será el punto de partida en el cual se evaluarán los datos obtenidos con los resultados de los ensayos de las briquetas fabricadas con el aceite de motor reciclado. Para la fabricación de cada briqueta se combinara en una bandeja la 1152.96 gr. de mezcla asfáltica reciclada (el peso del asfalto reciclado está sumando con la mezcla asfáltica reciclada) y el 3.92% de asfalto virgen (AC-20) en porciones ya trazadas como lo indica la tabla 22 y hasta alcanzar un peso de 1200 gr. como lo establece la norma ASTM D1559 y con una temperatura de 135°C a 160 °C según lo indicado en las Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos y Puentes del MOP-001-F-2002, Sub-secciones 405-5.05.2. Literal b.



Figura 25. Dosificación base para realizar la mezcla asfáltica reciclada con el cemento asfáltico nuevo.
Elaborado por: Castillo & Yamasqui (2022)



Figura 26. Combinación entre la mezcla asfáltica reciclada con el porcentaje de cemento asfáltico nuevo a temperatura de diseño
Elaborado por: Castillo & Yamasqui (2022)



Figura 27. Medición de temperatura de la combinación entre mezcla asfáltica reciclada con el porcentaje de cemento asfáltico nuevo.
Elaborado por: Castillo & Yamasqui (2022)



Figura 28. Colocación de la combinación entre mezcla asfáltica reciclada con el porcentaje de cemento asfáltico nuevo en el molde para realizar la compactación.
Elaborado por: Castillo & Yamasqui (2022)

Después cuando la mezcla esta homogénea se procede a colocar en el molde de compactación realizando 75 golpes en cada cara (superior e inferior) de la briqueta con el martillo de Marshall según lo indicado en la TABLA 405.5.4 Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos y Puentes del MOP-001-F-2002 y luego se desmolda la briqueta y se deja reposar las briquetas a temperatura ambiente durante 24 horas.

4.5.2 Elaboración de 9 briquetas con el (0,5%, 1,0%, 1,5%) de aceite de motor reciclado, 1.08% asfalto reciclado, (3.42%, 2.92%, 2.42) asfalto virgen y el 95% de Mezcla asfáltica reciclada

Las briquetas que tienen incorporado el aceite de motor se las fabricaron de acuerdo a las dosificaciones como indican la siguiente tabla.

Tabla 30. Dosificación de la mezcla asfáltica reciclada con el uso del aceite de motor reciclado

Nombre De Mezcla	Cantidad de Briquetas	% Asfalto Optimo Teorico	Peso de Mezcla asfáltica reciclada	Agregado	Ligante								Peso Total de las Briquetas
				% Mezcla asfáltica reciclada	Peso de asfalto reciclado	% contenido de asfalto reciclado	Peso de Asfalto Virgen	% de Asfalto Virgen	Peso de asfalto resultante	% Total de Asfalto Resultante	Peso de aceite de motor reciclado	% de aceite de motor reciclado	
CON EL 0.5 % ACEITE DE MOTOR RECICLADO	3	5.00%	1152.96 gr.	95%	12.96 gr.	1.08%	41.04 gr.	3.42%	54.00 gr.	4.50%	6.00 gr.	0.50%	1200.00 gr.
CON EL 1 % ACEITE DE MOTOR RECICLADO	3	5.00%	1152.96 gr.	95%	12.96 gr.	1.08%	35.04 gr.	2.92%	48.00 gr.	4.00%	12.00 gr.	1.00%	1200.00 gr.
CON EL 1.5 % ACEITE DE MOTOR RECICLADO	3	5.00%	1152.96 gr.	95%	12.96 gr.	1.08%	29.04 gr.	2.42%	42.00 gr.	3.50%	18.00 gr.	1.50%	1200.00 gr.
Cantidad total de Material utilizado	9	-	10.38 Kg	-	116.64 gr.	-	315.36 gr.	-	432.00 gr.	-	108.00 gr.	-	-

Elaborado por: Castillo & Yamasqui (2022)

Para la fabricación de estas briquetas se realiza individualmente el pesaje de la mezcla asfáltica reciclada, asfalto virgen (AC-20) y del aceite de motor reciclado, con el uso de una estufa a gas primero se calentó el material de la mezcla asfáltica reciclada mezclado con el asfalto virgen a una temperatura de entre 135°C a 160°C, cuando la mezcla se observa que esta uniforme se procedió incorporar el aceite de motor reciclado, luego se colocó la mezcla en el molde de compactación de Marshall (el molde fue lubricado con diésel para que el material de la briqueta no se adhiera) y se

procedió a realizar los 75 golpes en cada cara (superior e inferior) de la briqueta, y luego se deja en reposo hasta que el molde se iguale con la temperatura ambiente y proceder a extraer la briqueta. Este procedimiento se aplicó para cada una de briquetas que contienen diferentes porcentajes de aceite de motor reciclado.



Figura 29. Extrayendo el cemento asfáltico nuevo del envase

Elaborado por: Castillo & Yamasqui (2022)



Figura 31. Pesaje de la mezcla asfáltica reciclada

Elaborado por: Castillo & Yamasqui (2022)



Figura 30. Pesaje del cemento asfáltico nuevo.

Elaborado por: Castillo & Yamasqui (2022)



Figura 32. Pesaje del aceite de motor reciclado.

Elaborado por: Castillo & Yamasqui (2022)



Figura 33. Incorporación del aceite de motor reciclado en la mezcla asfáltica reciclada.
Elaborado por: Castillo & Yamasqui (2022)



Figura 34. Combinación entre la mezcla asfáltica reciclada con el aceite de motor reciclado.
Elaborado por: Castillo & Yamasqui (2022)



Figura 35. Briquetas elaboradas por la mezcla asfáltica reciclada con el aceite de motor reciclado
Elaborado por: Castillo & Yamasqui (2022)

4.5.3 Ejecución del Ensayo del método Marshall

Antes de efectuar el ensayo del método de Marshall a las briquetas fabricadas se tomó las medidas de las alturas, el peso saturado superficialmente seco, en aire y en agua de las briquetas para determinar las densidades de Bulk de las briquetas se realizó como lo indica la norma ASTM D 2726.



Figura 36. Determinando el peso en el agua de las briquetas para determinar Densidad Bulk.

Elaborado por: Castillo & Yamasqui (2022)



Figura 37. Determinando el peso superficialmente saturado seco de las briquetas para determinar Densidad Bulk.

Elaborado por: Castillo & Yamasqui (2022)

Después se sumergen las briquetas en un baño maría entre 30 a 40 minutos, pero en este caso se sumergió a un tiempo de 35 minutos a una temperatura de 60 °C (140 °F) de acuerdo a lo indicado en la norma ASTM D1559, para posteriormente proceder a deformar las briquetas de una en una en la prensa de Marshall para determinar la estabilidad y el flujo, se colocaron los deformímetros en la presa y se aplicó carga hasta que la aguja del anillo dinamométrico que mide la estabilidad comienza a retroceder y en el mismo momento también se detiene la aguja del deformímetro que mide el valor del flujo y se toma las lecturas.

Los datos de estabilidad y flujo obtenidos del ensayo de marshall en las briquetas serán evaluados mediante los parámetros de la norma Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos y Puentes del MOP-001-F-2002.



Figura 38. Reposo de las briquetas en el baño maría dentro de un lapso de 35 minutos

Elaborado por: Castillo & Yamasqui (2022)



Figura 39. Colocación de la briqueta en las mordazas de la Prensa Marshall

Elaborado por: Castillo & Yamasqui (2022)



Figura 40. Briqueta siendo deformada por la Prensa Mecánica Marshall

Elaborado por: Castillo & Yamasqui (2022)

4.6 Detalle de resultados obtenidos de estabilidad y flujo por el ensayo del método de Marshall (ASTM D1559).

Antes de empezar a realizar la tabulación de los datos que arrojo el ensayo de Estabilidad y Flujo, se necesita conocer el valor de la Gravedad específica bulk promedio de los agregados y el promedio de porcentaje de absorción de los agregados gruesos, intermedios y finos, estos servirán para determinar los valores de porcentajes de vacíos y porcentaje de absorción del asfalto entre otros.

Gsb promedio agreg.: Gravedad específica bulk promedio de los agregado:

PG, PI, PF: Porcentaje en peso de agregado grueso, intermedio y fino respectivamente.

Gg, Gi, Gf: Gravedad específica de cada agregado (Grueso, intermedio y fino)

$$Gsb \text{ promedio agreg.} = \frac{100}{\frac{PG}{Gg} + \frac{PI}{Gi} + \frac{PF}{Gf}}$$

Tabla 31. Valores de Porcentajes de Agregados, gravedad específica y Absorción

AGREGADO	PORCENTAJE		GRAVEDAD ESPECIFICA		ABSORCIÓN	
GRUESO	PG	34.10%	Gg	2.738 gr/cm ³	Abs. G	1.42%
INTERMEDIO	PI	35.70%	Gi	2.680 gr/cm ³	Abs. I	0.61%
FINOS	PF	30.20%	Gf	2.505 gr/cm ³	Abs. f	0.40%

Elaborado por: Castillo & Yamasqui (2022)

Reemplazando valores tenemos:

$$Gsb \text{ promedio agreg.} = \frac{100}{\frac{34.10\%}{2.738 \text{ gr/cm}^3} + \frac{35.70\%}{2.680 \text{ gr/cm}^3} + \frac{30.20\%}{2.505 \text{ gr/cm}^3}}$$

$$Gsb \text{ promedio agreg.} = 2.643 \text{ gr/cm}^3.$$

Promedio del porcentaje de absorción de los agregados:

Abs. g, Abs. i, Abs. f: Porcentaje de absorción de cada agregado (Grueso, intermedio y fino)

$$Absorción \text{ promedio agreg.} = \frac{100}{\frac{PG}{Abs. g} + \frac{PI}{Abs. i} + \frac{PF}{Abs. f}}$$

Reemplazando valores tenemos:

$$Absorción \text{ promedio agreg.} = \frac{100}{\frac{34.10\%}{1.42\%} + \frac{35.70\%}{0.61\%} + \frac{30.20\%}{0.40\%}}$$

$$Absorción \text{ promedio agreg.} = 0.6327$$

Tabla 32. Resultados de las propiedades de los diseños de las mezclas asfálticas recicladas con el aceite de motor reciclado.

PROYECTO: PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MEZCLA ASFÁLTICA RECICLADA CON ACEITE DE MOTOR RECICLADO										ELABORADO POR: STALIN CASTILLO CARPIO Y RENATO YAMASQUI FREIRE															
ABSORCION :										0.6327															
Gravedad Especifica del cemento asfáltico (C.A)										1.015 gr/cm3 USO: BASE ASFALTICA CONSTANTE DEL ANILLO: 4.45+27,22															
Gravedad Especifica Bulk Promedio de los agregados:										2.643 gr/cm3 4.45 27.22															
ENSAYO METODO MARSHALL DE ESTABILIDAD Y FLUJO DE LA MEZCLA ASFALTICA ASFALTICA RECICLADA Y ACEITE DE MOTOR RECICLADO																									
Muestra	% asfalto reciclado	% de Asfalto Virgen	% de aceite de motor reciclado	% Total de Asfalto Resultante	Altura de la Briqueta (mm)	Factor de Correc.	Peso Muestra (gr.)			Volum. (cm3).	Densidad Bulk Kg/m3	Peso de asfalto Gr.	volumen de asfalto Cm3.	%asfalto absorcion	%asf. Efectivo	% Agregado	%vacio	V.A.M %	V.F.A %	PESO UNITARIO DE LA MUESTRA (lib*pie ³)	ESTABILIDAD (Lbs.)		Flujo 0,1''		
							S.S.S.	Aire	Agua												Dial	Correg.			
1	1.08%	3.92%	0.00%	5	64	0.975	1178.00	1176.00	679.00	499.00	2.36									146.92	500	2195.91	7.75		
2					64.5	0.9875	1195.00	1192.00	690.00	505.00	2.36											147.15	538	2391.05	7.4
3					64.5	0.9875	1195.00	1190.00	680.00	515.00	2.31												144.05	565	2509.70
				5.00			1189.33	1186.00	683.00	506.33	2.34	11.713	11.540	1.429	10.111	84.202	5.687	15.798	64.001	146.04		2365.56	8		
4	1.08%	3.42%	0.50%	4.50	63.00	1.013	1191.00	1188.00	693.00	498.00	2.39									148.71	492	2245.44	8.7		
5					63.50	1.00	1191.00	1189.00	696.00	495.00	2.40											149.74	554	2492.52	9.55
6					63.50	1.00	1187.00	1179.00	688.00	499.00	2.36												147.29	464	2092.02
				4.50			1189.67	1185.33	692.33	497.33	2.38	10.725	10.567	1.462	9.105	86.121	4.774	13.879	65.604	148.58		2276.66	9		
7	1.08%	2.92%	1.00%	4.00	63.00	1.013	1184.00	1182.00	674.00	510.00	2.32									144.48	415	1898.33	14.55		
8					62.50	1.025	1179.00	1175.00	667.00	512.00	2.29											143.07	413	1911.70	13.25
9					63.00	1.013	1183.00	1180.00	677.00	506.00	2.33												145.38	429	1961.44
				4.00			1182.00	1179.00	672.67	509.33	2.31	9.259	9.123	1.427	7.695	84.081	8.223	15.919	48.342	144.31		1923.82	14		
10	1.08%	2.42%	1.50%	3.50	62.80	1.018	1180.00	1177.00	684.00	496.00	2.37									147.93	263	1219.13	20.15		
11					62.80	1.018	1173.00	1172.00	686.00	487.00	2.41											150.03	219	1019.80	22.45
12					63.00	1.013	1187.00	1179.00	687.00	500.00	2.36												147.00	282	1298.79
				3.50			1180.00	1176.00	685.67	494.33	2.38	8.327	8.204	1.474	6.730	86.868	6.403	13.132	51.245	148.32		1179.24	21		
Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos y Puentes MOP-001-F-2002 tabla 405.5.4																3% - 5%	min. 13%	55% a 75%		min 1800 Lbr	8--14				

Elaborado por: Castillo & Yamasqui (2022)

4.7 Determinación del porcentaje óptimo de asfalto de las mezclas de diseño con mezcla asfáltica reciclada y aceite de motor reciclado.

Se realizó una tabla de resumen de los datos obtenidos con los cuales se graficaran las siguientes curvas:

Tabla 33. Resumen de resultados obtenidos de los diseños de las mezclas asfálticas recicladas con el aceite de motor reciclado.

TABLA DE RESUMEN DE DATOS OBTENIDOS DEL DISEÑO MEZCLA ASFALTICA RECICLADA CON EL ACEITE DE MOTOR RECICLADO								
(Agregado) % Mezcla asfáltica Reciclada	% de aceite de motor reciclado	% Total de Asfalto Resultante	Peso Unitario de la Muestra (lib*pie³)	Vacíos (Va) (%)	V.A.M. (%)	V.F.A (%)	Estabilidad Corregida (lbs)	Flujo
95%	0.00%	5.00	146.04	5.69	15.80	64.00	2366	7.58
95%	0.50%	4.50	148.58	4.77	13.88	65.60	2277	9.17
95%	1.00%	4.00	144.31	8.22	15.92	48.34	1924	13.88
95%	1.50%	3.50	148.32	6.40	13.13	51.25	1179	21.12
Especificación MOP-001-F-2002 tabla 405.5.4				3%-5%	Min. 13%	65%- 75%	Min. 1800lbs	8-14

Elaborado por: Castillo & Yamasqui (2022)

Para determinar el valor del porcentaje óptimo de asfalto resultante, se lo realiza en la gráfica de “Porcentaje de vacíos Va vs. % Total de asfalto Resultante”, de acuerdo a la norma “Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos y Puentes MOP-001-F-2002 tabla 405.5.” establece el rango permitido entre el 3% y el 5% de porcentaje de vacíos en mezcla, de esta se escoge el promedio que es el 4% y en la gráfica desde eje de las ordenadas se traza una recta perpendicular hasta intersectar con la curva de tendencia de “Porcentaje de vacíos Va vs. % Total de asfalto Resultante” y luego determinar el valor del porcentaje optimo del asfalto resultante en el eje de las abscisas. Ya conociendo el valor del porcentaje optimo, este valor sirve para conocer los demás datos de las curvas que faltan en el eje de las ordenadas. Cabe indicar que, para Granados Noa (2017)

La durabilidad de un pavimento asfáltico es función del contenido de vacíos. La razón de esto es que entre menor sea la cantidad de vacíos, menor va a ser la permeabilidad de la mezcla. Un contenido demasiado alto de vacíos proporciona pasajes, a través de la mezcla, por los cuales puede entrar el agua y el aire, y causar deterioro. Por otro lado, un contenido demasiado bajo de vacíos puede producir exudación de asfalto; una condición en donde el exceso de asfalto es exprimido fuera de la mezcla hacia la superficie. (pág. 18)

Para este caso el valor óptimo del porcentaje de vacíos de la gráfica “Porcentaje de vacíos V_a vs. % Total de asfalto Resultante” está por encima del valor promedio de vacíos (4%). Se eligió el punto mínimo absoluto de la curva (4.65, 4.58) que es valor del 4.65% en el eje de la ordenada de porcentaje de vacíos y 4.58 % de porcentaje total de asfalto resultante en el eje de las abscisas y este sería el porcentaje óptimo del diseño de la mezcla.

Las siguientes líneas de tendencia de los gráficos permitirán definir el comportamiento de las propiedades mecánicas del diseño de la mezcla en función del incremento o disminución del porcentaje de asfalto, y de la incorporación del aceite de motor reciclado se logró interpretar los siguientes comportamientos en las mezclas:

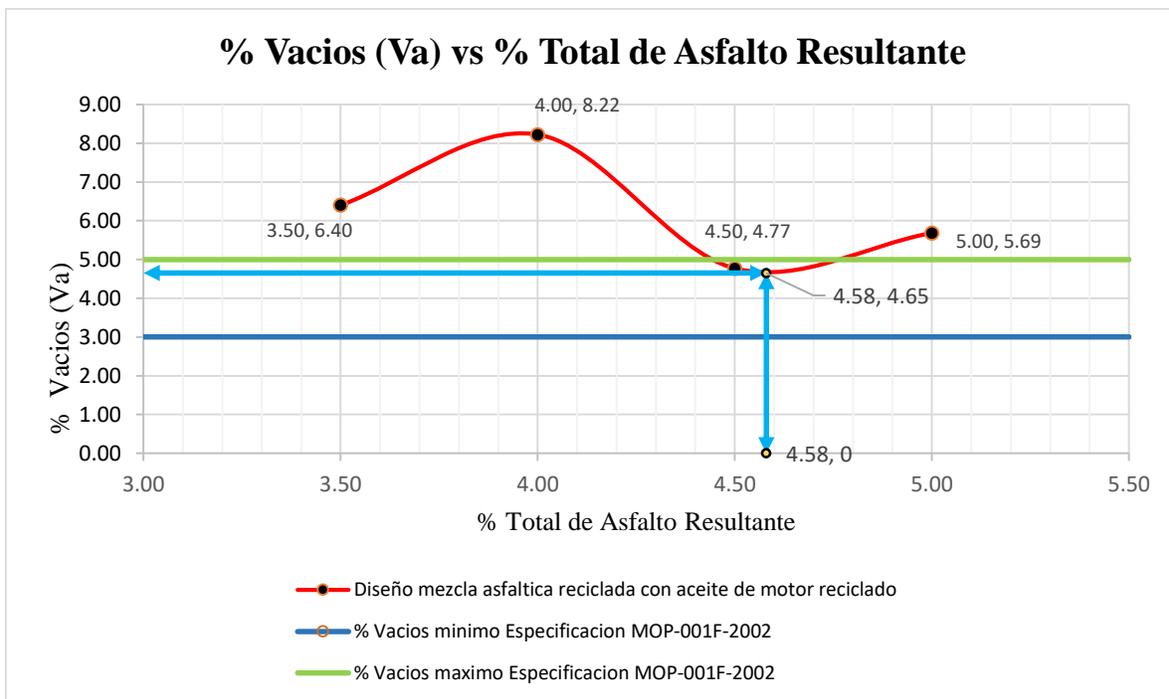


Figura 41. Porcentaje de vacíos V_a vs. % Total de asfalto Resultante

Elaborado por: Castillo & Yamasqui (2022)

En la figura 41 “porcentajes de vacíos vs el porcentaje del total asfalto resultante”, donde tenemos como el valor óptimo del porcentaje del asfalto total el 4.58%; y con respecto al porcentaje de vacíos que es el 4.65% así mismo podemos observar que por la forma de la gráfica se presume la existencia de una inestabilidad en la mezcla mencionada, sin embargo a pesar de aquellos datos una parte de la región de la curva se encuentran dentro del rango establecidos por la norma MOP-001-F-2002, tabla 405.5.4.

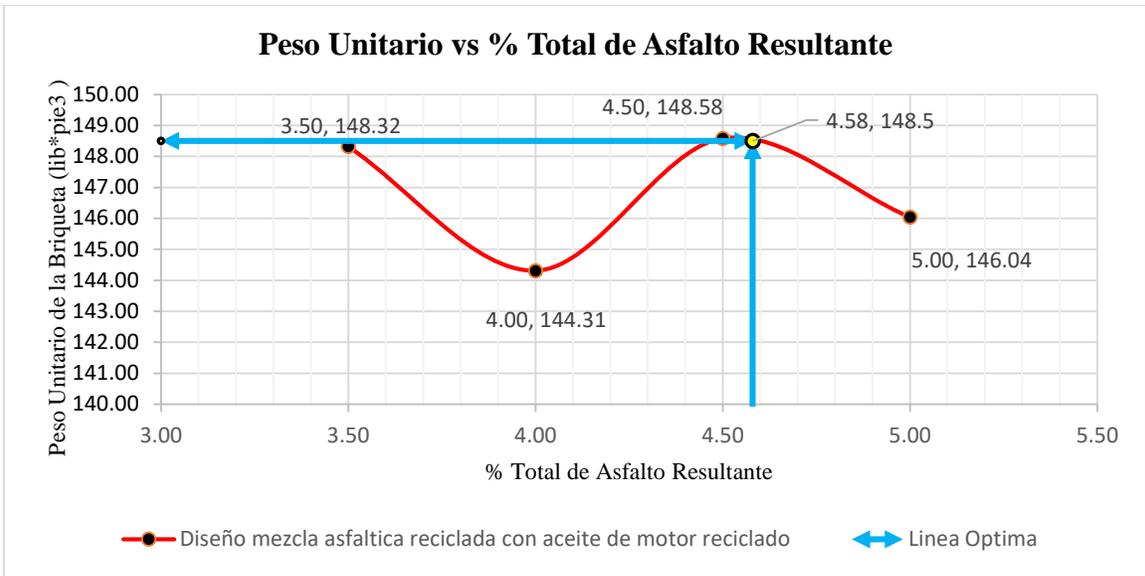


Figura 42. Peso unitario vs. % Total de asfalto resultante.

Elaborado por: Castillo & Yamasqui (2022)

En la figura 42, podemos observar la gráfica “peso unitario vs el porcentaje del total asfalto resultante”, refleja el valor del peso unitario óptimo de 148.5 lb*ft³ la gráfica representa de forma irregular mostrando puntos máximos y mínimos por cada variación de porcentaje de aceite de motor reciclado.

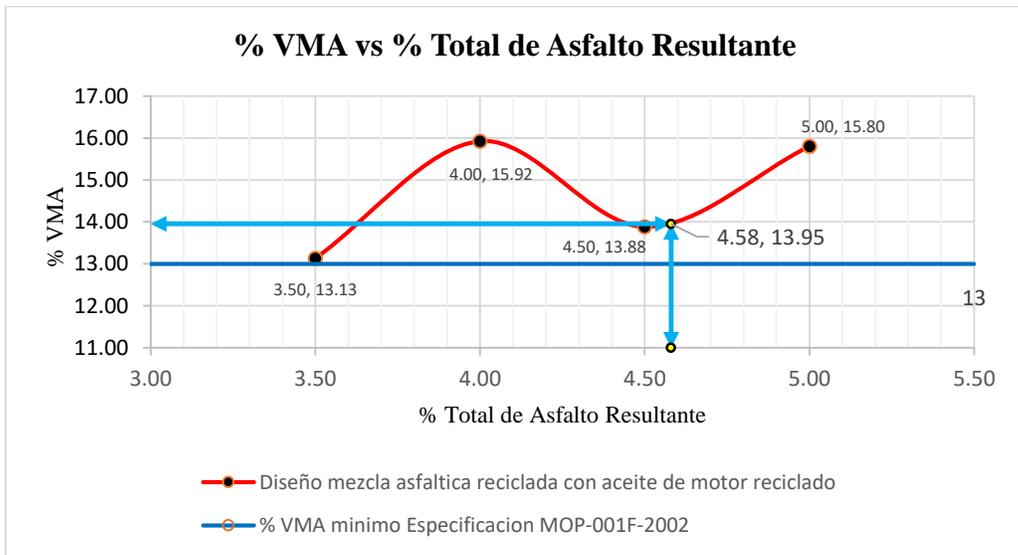


Figura 43. Porcentaje de vacíos de agregado mineral VMA vs. % Total de asfalto resultante

Elaborado por: Castillo & Yamasqui (2022)

En la figura 43, se determina el porcentaje óptimo VMA (Vacíos en el agregado mineral) es de 13.95% y a la vez se estipula que por las oscilaciones que exhibe la curva, demuestra fluctuación

por la incorporación del aceite de motor reciclado pero los valores están por encima de límite mínimo como lo establece la norma MOP-001-F-2002, tabla 405.5.4.

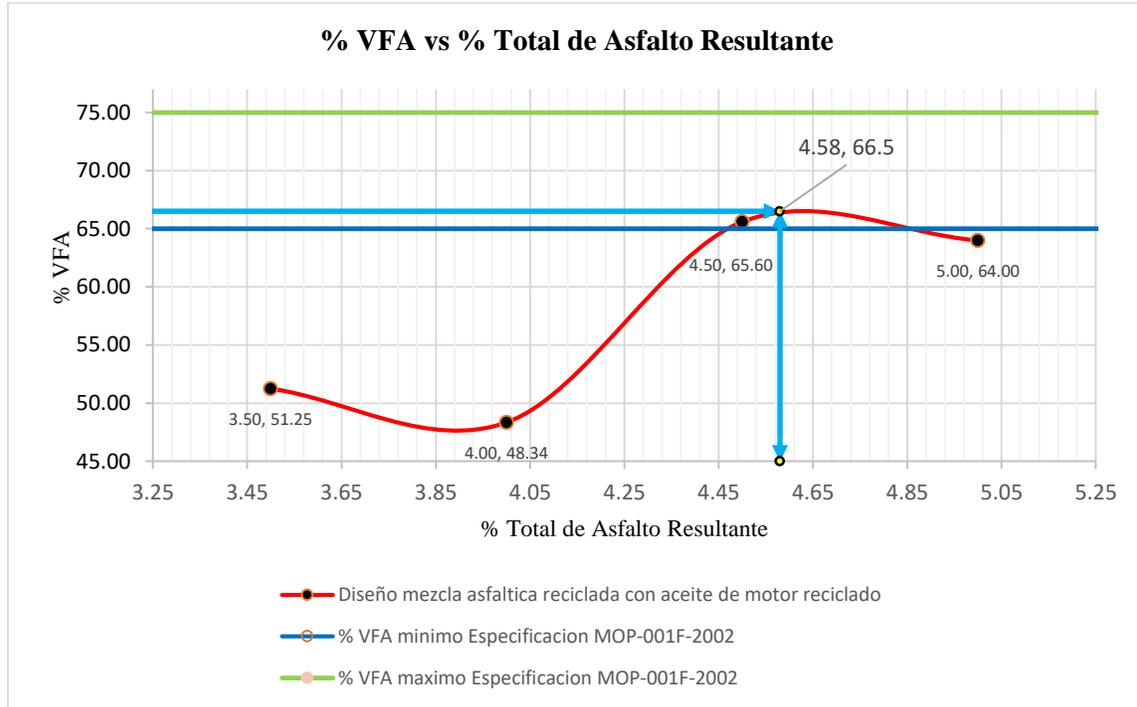


Figura 44. Porcentaje de vacíos llenos de asfalto VFA vs. % Total de asfalto resultante
Elaborado por: Castillo & Yamasqui (2022)

En la figura 44, tenemos el valor de 66.5% como valor óptimo del porcentaje de VFA (vacíos llenos de asfalto) y se observa en la gráfica que la incorporación del aceite de motor reciclado genera pendientes positivas y negativas creando inestabilidad en este parámetro.

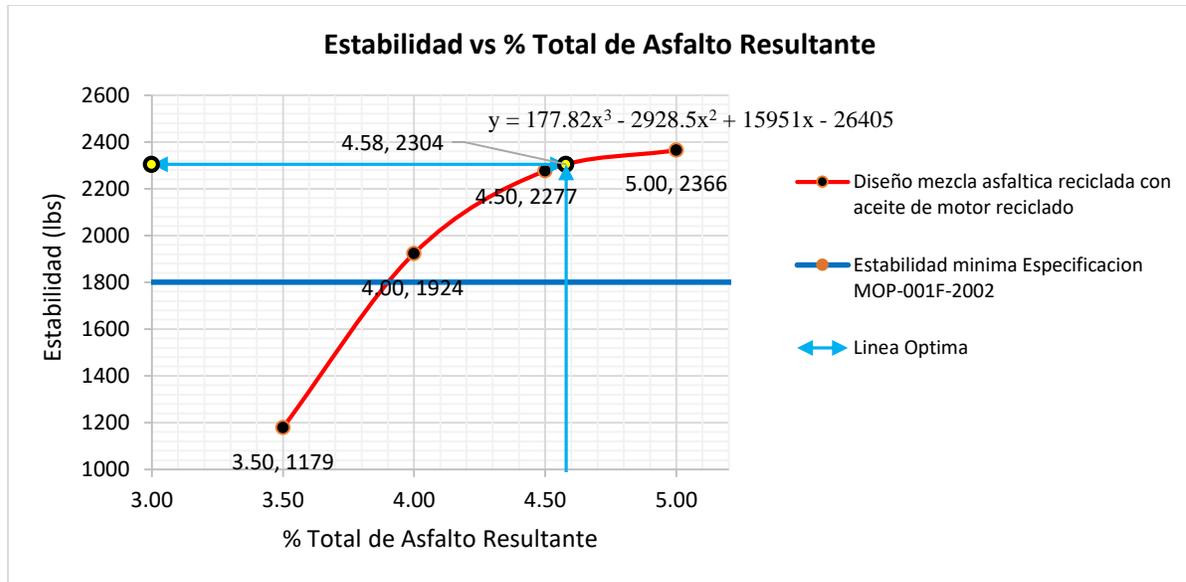


Figura 45. Estabilidad vs. % Total de asfalto resultante.

Elaborado por: Castillo & Yamasqui (2022)

Mientras que la curva de “Estabilidad vs % Total de Asfalto Resultante” el comportamiento de esta refleja una tendencia en relación de incremento entre las dos variables, es decir mientras se aumente el % Total de asfalto Resultante también aumentara el valor de la Estabilidad del Diseño y está representada por la siguiente ecuación:

$$y = 177.82x^3 - 2928.5x^2 + 15951x - 26405$$

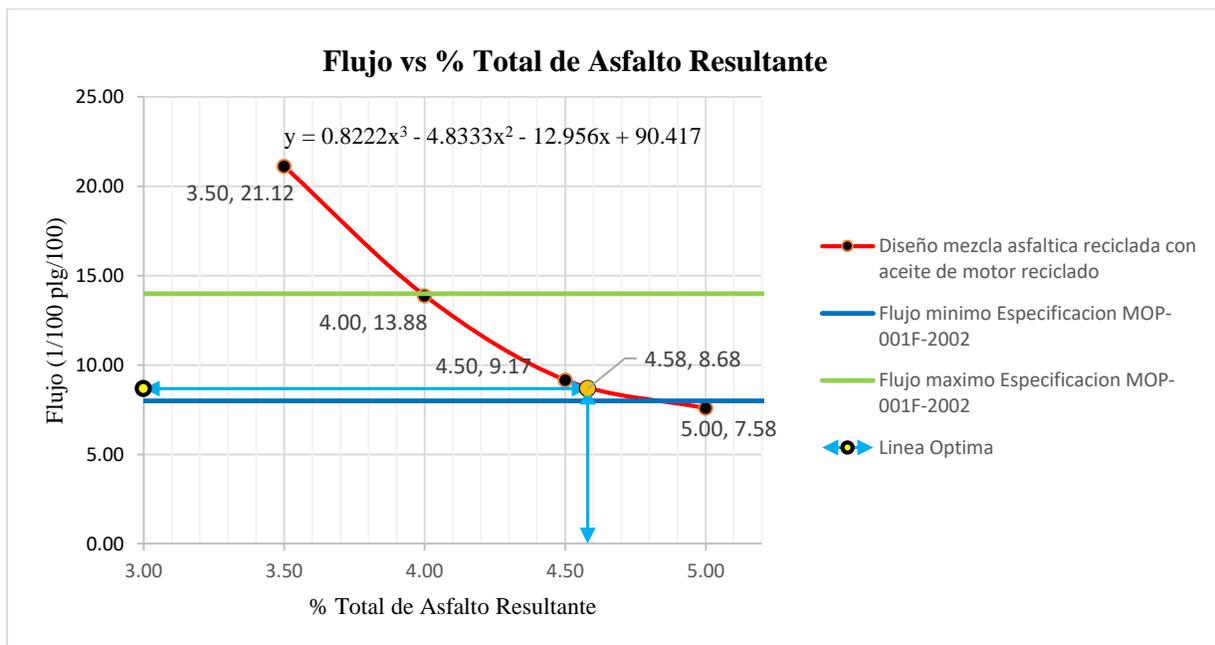


Figura 46. Flujo vs. % Total de asfalto resultante.

Elaborado por: Castillo & Yamasqui (2022)

En la curva de “Flujo vs. % Total de asfalto resultante” se observa lo opuesto a la figura 42 “Estabilidad vs % Total de Asfalto Resultante”, pues mientras se reduce el % Total de asfalto Resultante aumenta el valor del flujo, cuya ecuación es:

$$y = 0.8222x^3 - 4.8333x^2 - 12.956x + 90.417$$

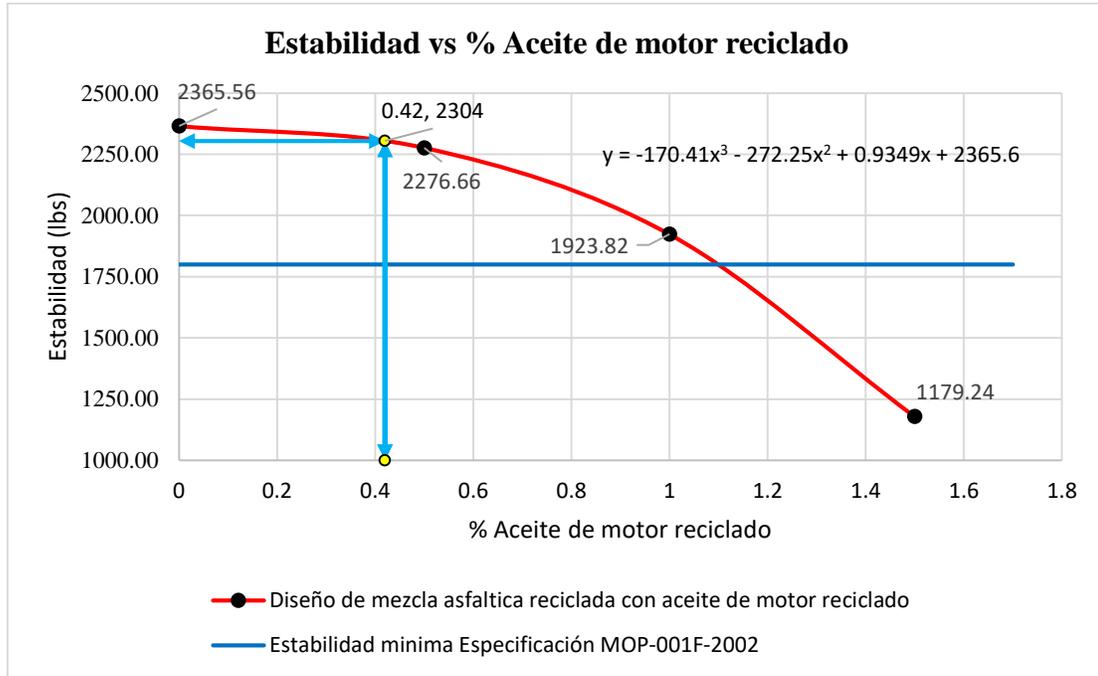


Figura 47. Estabilidad vs. % Aceite de motor reciclado.

Elaborado por: Castillo & Yamasqui (2022)

Con respecto a la curva de “Estabilidad vs % Aceite de motor reciclado” se verifica que al incrementar la incorporación de aceite de motor reciclado a la mezcla de diseño el valor de la Estabilidad disminuye también existe un importante decrecimiento de la estabilidad de $\Delta y = 750.14$ lbs al incorporar el aceite de motor reciclado entre el rango del 1% al 1,50% en el cual el valor de la Estabilidad interseca la línea límite mínimo para tráfico pesado de 1800 lbs cuando el porcentaje de aceite de motor reciclado es el 1.108% de la norma MOP-001-F-2002, tabla 405.5.4, está representada mediante la siguiente ecuación:

$$y = -177.82x^3 - 261.14x^2 - 2.7699x + 2365.6$$

A continuación tenemos la tabla de los parámetros óptimos para el diseño de la mezcla asfáltica reciclada con el aceite de motor reciclado y los cuales cumplen con las especificaciones del MOP-001-F-2002 tabla 405.5.4

Tabla 34. Tabla de parámetros óptimos obtenidos en relación al porcentaje de total de asfalto resultante

PARAMETROS DE DISEÑO OPTIMO ENTRE LA MEZCLA ASFALTICA RECICLADA Y ACEITE DE MOTOR RECICLADA ENCONTRADOS EN LAS CURVAS											
MUESTRA	(Agregado) % Mezcla asfáltica Reciclada	% de aceite motor reciclado	% de asfalto virgen	% de asfalto reciclado	% Total de Asfalto Resultante	Peso Unitario (lib*pie3)	Vacíos (Va) (%)	VMA (%)	VFA (%)	Estabilidad Corregida (lbs)	Flujo
OPTIMA	95%	0.42%	3.50	1.08	4.58%	148.50	4.65	13.95	66.5	2304	8.68
Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos y Puentes MOP-001-F-2002 tabla 405.5.4							3% -5%	Min. 13%	65% - 75%	Min. 1800lbs	8-14

Elaborado por: Castillo & Yamasqui (2022)

4.8 Efectos del aceite de motor en el diseño de las mezclas asfálticas recicladas.

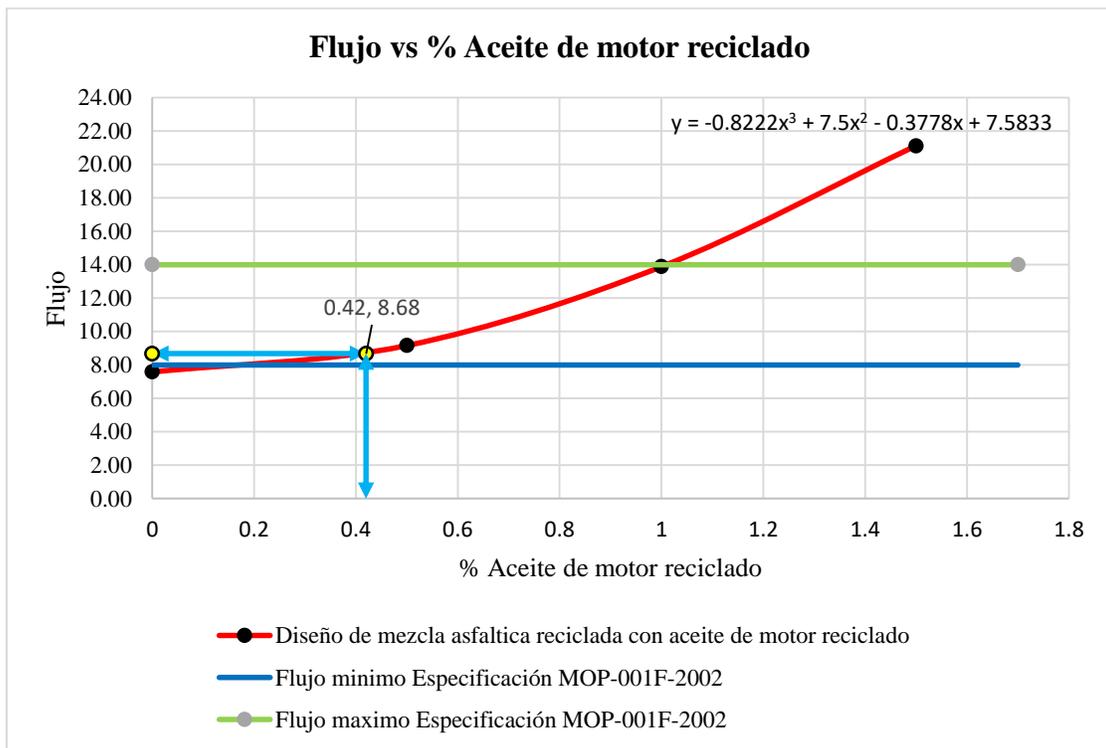


Figura 48. Flujo vs. % Aceite de motor reciclado.

Elaborado por: Castillo & Yamasqui (2022)

En la figura 47, Flujo vs. % Aceite de motor reciclado, se observa que al incrementar el porcentaje de incorporación del aceite de motor reciclado el valor del flujo también aumenta y esta representa por la siguiente ecuación:

$$y = -0.8222x^3 + 7.5x^2 - 0.3778x + 7.5833$$

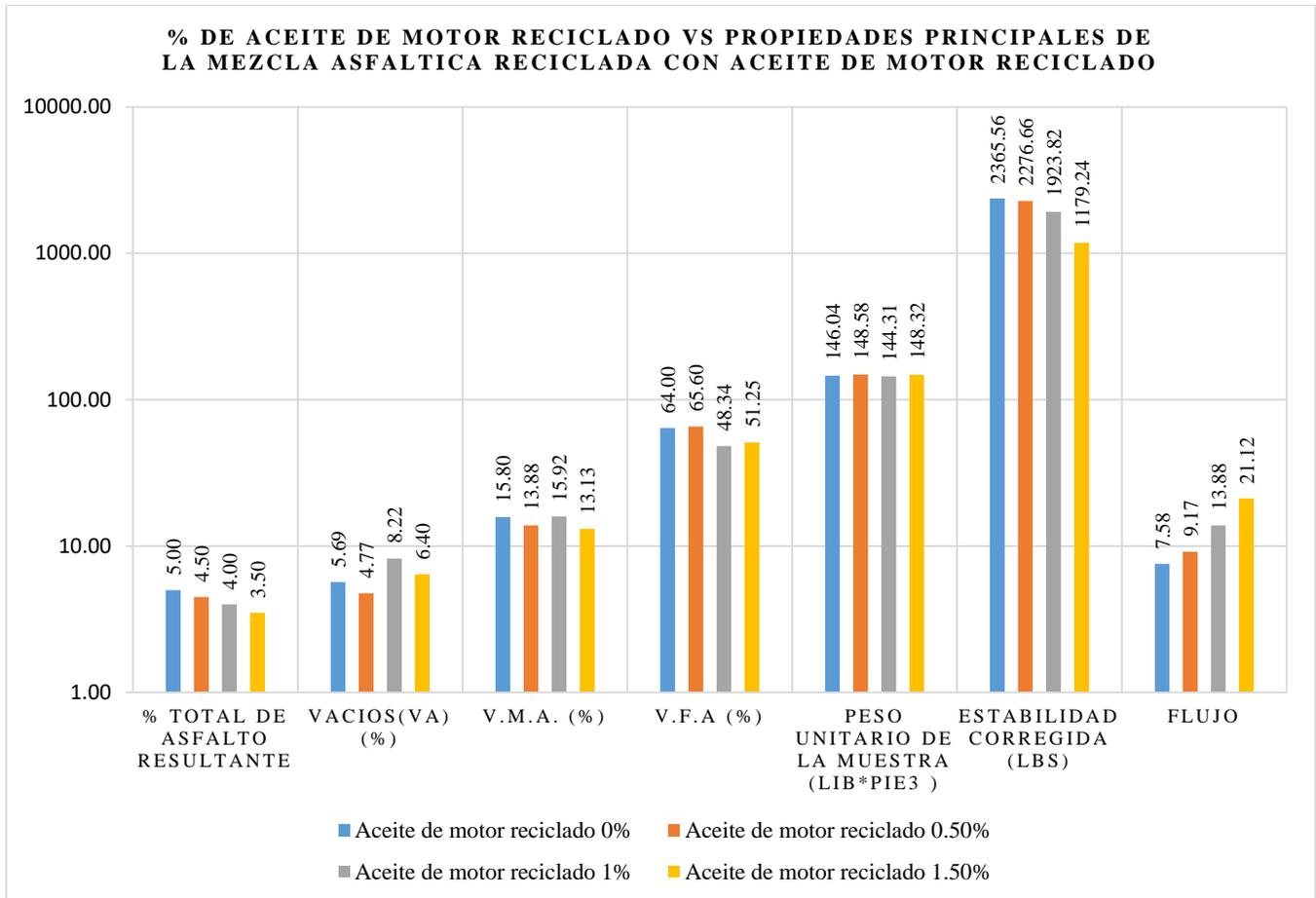


Figura 49. Porcentaje de aceite de motor reciclado vs propiedades de la mezcla asfáltica reciclada con aceite de motor reciclado

Elaborado por: Castillo & Yamasqui (2022)

La incorporación de aceite de motor reciclado provocó disminución de sus propiedades y un comportamiento oscilante u inestable en los parámetros de las características del diseño de mezcla asfáltica reciclada como son: el porcentaje de vacíos (VA (0% Aceite de motor Reciclado) 5.69% ▲ (incremento) VA (1.50% Aceite de motor Reciclado) 6.40%), Vacíos en el agregado mineral (V.M.A (0% Aceite de motor Reciclado) 15.80% ▼ (disminución) V.M.A (1.50% Aceite de motor Reciclado) 13.13%), Vacíos Llenos de Asfalto (V.F.A (0% Aceite de motor Reciclado) 64% ▼ (disminución) V.F.A (1.50% Aceite de motor Reciclado) 51.25%), visualizándose sucesivamente en las gráficas puntos altos y bajos por cada incremento de porcentaje de aceite de motor reciclado a partir de la incorporación del 1% de aceite de motor reciclado en las mezclas de diseño. Los únicos parámetros que presentaron curvas con puntos estables fue la (Estabilidad (0% Aceite de motor Reciclado) 2365.56 ▼ (disminución) Estabilidad (1.50% Aceite de motor Reciclado) 1179.24), y el (Flujo (0% Aceite de motor Reciclado) 7.58 ▲ (incremento) Flujo (1.50% Aceite de motor Reciclado) 21.12) en la cual se evidenció que conforme fue aumentando la incorporación de aceite de motor reciclado en la mezcla asfáltica

reciclada, el valor de la estabilidad fue descendiendo hasta un punto crítico que sobrepasa el límite mínimo de estabilidad y no cumplir con la especificación del MOP y con relación al Flujo sucedió a lo opuesto a la estabilidad, en la cual se constató que el incremento del aceite de motor reciclado en las mezclas de diseño causó su aumento.

4.9 Evaluación de los Resultados.

Se realizó la siguiente tabla para evaluar si las propiedades de los diseños de las mezcla asfálticas recicladas con la incorporación de diferentes porcentajes de aceite de motor reciclado de cumplen con los parámetros indicados por la norma Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos y Puentes MOP-001-F-2002.

Tabla 35. Parámetros de las propiedades mecánicas para mezclas asfálticas establecidos por el MOP

TIPO DE TRAFICO	Muy Pesado		Pesado		Medio		Liviano	
	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
CRITERIOS MARSHALL								
No. De Golpes/Cara	75		75		50		50	
Estabilidad (libras)	2200	----	1800	----	1200	----	1000	2400
Flujo (pulgada/100)	8	14	8	14	8	16	8	16
% de vacíos en mezcla								
- Capa de Rodadura	3	5	3	5	3	5	3	5
- Capa Intermedia	3	8	3	8	3	8	3	8
- Capa de Base	3	9	3	9	3	9	3	9
% Vacíos agregados	VER TABLA 405-5.5							
Relación filler/betún	0.8	1.2	0.8	1.2				
% Estabilidad retenida luego 7 días en agua temperatura ambiente								
- Capa de Rodadura	70	----	70	----				
- Intermedia o base	60	----	60	----				

Fuente: Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos y Puentes MOP-001-F-2002, tabla 405.5.4

Tabla 36. Evaluación de resultados de los parámetros obtenidos de la combinación entre la mezcla asfáltica reciclada con el aceite de motor reciclado

TABLA DE RESUMEN DE DATOS OBTENIDOS DEL DISEÑO MEZCLA ASFALTICA RECICLADA CON EL ACEITE DE MOTOR RECICLADO								
MUESTRA	% de aceite de motor reciclado	% Total de Asfalto Resultante	Peso Unitario de la Muestra (lib*pie3)	Vacios (Va) (%)	V.A.M. (%)	V.F.A (%)	Estabilidad Correjada (lbs)	Flujo
BASE (0% de aceite de motor reciclado)	0.00%	5.00%	146.04	5.69	15.80	64.00	2366	7.58
Condición				No cumple	Cumple	No cumple	Cumple	Cumple
Observación: En este diseño de mezcla los parámetros de % Va. y el % V.F.A. no cumplen con las especificaciones técnicas del MOP								
OPTIMA Con el 0,42% de aceite de motor reciclado	0.42%	4.58%	148.50	4.65	13.95	66.50	2304	8.68
Condición				Todas cumplen				
Observación: Todos los parámetros de este diseño óptimo de mezcla cumple con toda las especificaciones del MOP.								
Con el 0,50% de aceite de motor reciclado	0.50%	4.50%	148.58	4.77	13.88	65.60	2277	9.17
Condición				Todas cumplen				
Observación: Todos los parámetros de este diseño de mezcla cumple con toda las especificaciones del MOP.								
Con el 1,00% de aceite de motor reciclado	1.00%	4.00%	144.31	8.22	15.92	48.34	1924	13.88
Condición				No cumple	Cumple	No cumple	Cumple	Cumple
Observación: En este diseño de mezcla los parámetros de % Va. y el % V.F.A. no cumplen con las especificaciones técnicas del MOP								
Con el 1,50% de aceite de motor reciclado	1.50%	3.50%	148.32	6.40	13.13	51.25	1179	21.12
Condición				No cumple	Cumple	No cumple	No cumple	No cumple
Observación: En este diseño de mezcla los parámetros de % Va., el % V.F.A., Estabilidad y el Flujo no cumplen con las especificaciones técnicas del MOP.								
Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos y Puentes MOP-001-F-2002 tabla 405.5.4				3%-5%	Min. 13%	65%-75%	Min. 1800lbs	8-14

Elaborado por: Castillo & Yamasqui (2022)

4.10 Datos referenciales con respecto al costo entre la mezcla asfáltica tradicional y la mezcla asfáltica reciclada con aceite de motor reciclado.

Tabla 37. Calculo de materiales de la mezcla asfáltica reciclada con aceite de motor reciclado

CALCULO DE MATERIAL DE LA MEZCLA ASFÁLTICA REICLADA CON ACEITE DE MOTOR REICLADO			
DESCRIPCIÓN	Por m2, e= 7,50 cm.	Por Tonelada	PORCENTAJE DE REICLAJE
Mezcla asfáltica Reciclada	0.064 m3 (169.49 kg)	0.36 m ³ (950.00 kg)	96.50%
Aceite motor reciclado	0.749 kg (0.223 gal.)	4.20 kg (1.25 gal.)	
Asfalto Resultante	8.171 kg (2.127 gal.)	45.80 kg (11.92 gal.)	
Asfalto reciclado	1.927 kg (0.501 gal.)	10.80 kg (2.81 gal.)	
Asfalto Virgen	6.993 kg (1.820 gal.)	39.20 kg (10.20 gal.)	

Elaborado por: Castillo & Yamasqui (2022)

Tabla 38. Cuadro comparativo de costos entre la mezcla asfáltica tradicional y la mezcla asfáltica reciclada con el aceite de motor reciclado

CUADRO COMPARATIVO DE COSTOS					
TIPO DE MEZCLA ASFALTICA	COSTO POR m² (\$)	DIFERENCIA (\$)	COSTO POR TONELADA (\$)	DIFERENCIA (\$)	PORCENTAJE DE AHORRO EN COSTO POR REICLAJE
MEZCLA ASFALTICA TRADICIONAL	10.10	1.76	56.61	9.87	17.43%
MEZCLA ASFÁLTICA REICLADA CON ACEITE DE MOTOR REICLADO	8.34		46.75		

Elaborado por: Castillo & Yamasqui (2022)

Se determinó que el porcentaje de reciclaje de materiales en la mezcla asfáltica reciclada con aceite de motor reciclado es del 96.5% y existe una diferencia económica entre la mezcla asfáltica tradicional y la reciclada con aceite de motor reciclado que representa un ahorro en costo por reciclaje del 17.43% con respecto a la mezcla asfáltica tradicional.

CONCLUSIONES

Se realizó la evaluación del diseño de la mezcla asfáltica reciclada con el aceite de motor reciclado realizando diferentes variaciones de porcentajes de incorporación del aceite de motor reciclado, en dichas mezclas el aceite de motor reciclado interviene como ligante en la mezcla realizando en proporciones de sustitución con el asfalto y la mezcla asfáltica reciclada interviene como agregado en la mezcla de diseño, con el propósito de conocer los resultados de las propiedades mecánicas que generan entre la combinación entre la mezcla asfáltica reciclada con el aceite de motor reciclado.

Para cumplir con el primer objetivo se realizaron los siguientes ensayos como: Viscosidad Absoluta (Broockfield), Punto de inflamación, Ensayo de granulometría y el Ensayo de contenido de asfalto en la mezcla, según los resultados encontrados se concluye que el estado actual del asfalto de la mezcla asfáltica reciclada presenta un alto grado de envejecimiento, debido a que tiene un valor de contenido de asfalto por debajo del 5% óptimo y también el grado de viscosidad es muy bajo o blando, lo cual nos indica que es un asfalto del tipo AC-6, en consecuencia no cumple con las especificaciones técnicas del MOP-001-F-2002, que nos indica los tipos de asfaltos a usar esta entre el AC-20 y el AC-40, en la construcción de mezclas asfálticas, la gradación del agregado en la curva granulométrica presento una tendencia al límite mínimo de las especificaciones del MOP-001-F-2002, esto se debe al desgaste por el sometimiento al fresado y así como lo demuestra el ensayo termogravimétrico, la cual nos indica que la mezcla asfáltica reciclada pierde el 2% de su composición en peso a una temperatura de 150 °C.

Para alcanzar el segundo objetivo se ejecutaron los siguientes ensayos: Viscosidad Cinemática, que indica que el aceite de motor reciclado corresponde al grado de 15W o ISO VG 32 y su punto de inflamación es de 210.6 °C, la cual cumple con la normativa NTE INEN 2030:2011, basado en los resultados obtenidos se concluye que el aceite de motor reciclado demuestra degradación en sus propiedades, ya que su viscosidad es baja en comparación con los aceites nuevos de iguales características, esto se debe por su anterior uso en la cual fue sometido al desgaste con elementos mecánicos pero por otra parte es apta para incorporarla en la mezcla porque la temperatura del punto de inflamación está por encima de los 160°C de lo que especifica el MOP-001-F-2002, Subsecciones 405-5.05.2. Literal b., para la elaboración de la mezcla asfáltica reciclada.

Con relación al tercer objetivo se realizaron 4 dosificaciones con el 0%, 0.50%, 1.00% y el 1.50% de incorporación de aceite de motor reciclado de las cuales después de haber sido ensayadas

con el método de Marshall concluimos que la mezcla optima es de 0.42% de aceite de motor reciclado, 4.58% de asfalto resultante (3.50% de asfalto virgen +1.08% de asfalto reciclado), 95% de mezcla asfáltica reciclada, 2378.74 kg/m³ de peso específico, 4.65 % porcentaje de vacíos, 13.95% Vacíos en el agregado mineral (V.M.A), 66,50% Vacíos Llenos de Asfalto (V.F.A), con una Estabilidad de 2304 lbs y con un Flujo de 8.68.

Para el cuarto objetivo después de conocer la dosificación óptima entre la mezcla asfáltica reciclada y el aceite de motor reciclado, concluimos que esta fue donde se obtuvieron los mejores resultados del comportamiento mecánico de este tipo de mezclas asfálticas en donde obtuvieron la estabilidad de 2304 lbs la cual está por encima de las 1800 lbs como lo especifica “Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos y Puentes” MOP-001-F-2002 tabla 405.5.4 pero resaltamos que de acuerdo a los resultados obtenidos muestra que al incrementar más del 0.42% en la incorporación de aceite resulta perjudicial para la mezcla asfáltica reciclada debido a que disminuyen los valores de sus propiedades mecánicas como la estabilidad y el flujo.

Mediante el cálculo de material por 1 m² de capa de rodadura con espesor de 7.50 cm usando la dosificación óptima de la mezcla asfáltica reciclada con el aceite de motor reciclado se concluye que por cada m² de mezcla asfáltica reciclada se reutilizaría 0.749 kg (0.223 gal.) de aceite de motor reciclado y 0.064 m³ (169.49 kg) de mezcla asfáltica reciclada

Mediante el cálculo de material en una tonelada de mezcla para capa de rodadura usando la dosificación óptima de la mezcla asfáltica reciclada con el aceite de motor reciclado podemos concluir que por cada tonelada de mezcla asfáltica reciclada se reutilizaría 4.20 kg (1.25 gal.) de aceite de motor reciclado y 950 kg (0.36 m³) de mezcla asfáltica reciclada además el porcentaje de reciclaje de materiales en la construcción de la carpeta asfáltica es del 96.5%.

Se concluye que el ahorro en costo por reciclaje es del 17.43% con respecto a la mezcla asfáltica tradicional.

Finalmente podemos concluir que la hipótesis de esta tesis se cumple debido a que las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica en caliente usando mezcla asfáltica reciclada y aceite de motor reciclado cumplen con lo establecido en la norma técnica MOP-001-F 2002 de especificaciones generales para la construcción de caminos y puentes de Ecuador, permitiendo su uso en vías secundarias o caminos vecinales.

RECOMENDACIONES

Se recomienda a los futuros investigadores realizar ensayos de mezclas asfálticas recicladas que posean diferentes tipos de granulometrías, contenido de asfalto reciclado, porcentajes de aceite de motor reciclado, combinarlos con agregados vírgenes o añadir aditivos de adherencia.

Se recomienda a los próximos investigadores recolectar mezclas asfálticas recicladas que tengan el contenido de asfalto reciclado como mínimo el 3% en relación al peso de la muestra.

Se recomienda a la entidad de Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTO), implementar un manual relacionado al diseño y control de Mezclas asfálticas recicladas en caliente.

Se recomienda a los GAD'S Provinciales, Cantonales y al MOTP, de crear centros de acopio específicamente para el reciclaje de pavimentos asfálticos.

Se recomienda al ministerio del medio ambiente recopilar y publicar datos estadísticos sobre la recolección del aceite de motor reciclado en cantones, provincias y a nivel nacional.

Bibliografía

- Ali, A., Mehta, Y., Nolan, A., Purdy, C., & Bennert, T. (2018). Investigación de los impactos del envejecimiento y los porcentajes de RAP sobre la eficacia de los rejuvenecedores de aglutinantes de asfalto. *Construction and Building Materials*, 211.
- Altamirano Baño, A., & Pabón Quito, H. (2016). Obtención de la mezcla combustible diésel con aceites lubricantes reciclados del automóvil en concentraciones de 5 %, 10 %, 15 %, 20 % y 30 % y determinación de los parámetros característicos del motor. Latacunga, Ecuador: Universidad de las Fuerzas Armadas.
- Arias Fuya, R., & Rivera Camacho, B. (2019). Evaluar el comportamiento físico y mecánico de mezclas asfálticas en frío estabilizadas con emulsión asfáltica para su empleo en vías de bajo volumen de tránsito de Colombia utilizando 100 por ciento de pavimento asfáltico reciclado y cemento Portland com. Bogotá, Colombia: Universidad Católica de Colombia.
- Arner, A., Barberán, R., & Mur, J. (2007). *La Política de gestión de residuos: los aceites usados*. Zaragoza: Universidad de Zaragoza.
- Asamblea Legislativa . (2008, Octubre 20). *www.oas.org*. Retrieved from Constitución de la República del Ecuador 2008: https://www.oas.org/juridico/pdfs/mesicic4_ecu_const.pdf
- Asamblea Nacional. (2018). *Código orgánico del ambiente*. Quito: Presidencia de la Republica.
- Asamblea Nacional. (2018). *Ley de hidrocarburos*. Quito.
- Asphalt Institute. (1986). Manual Asphalt hot-mix recycling SERIES NO. 20 (MS20). *Second Edition*. Kentucky, Lexington, USA. Retrieved 08 25, 2021, from <https://p2infohouse.org/ref/33/32444.pdf>
- Ayar, P. (2018). Efectos de los aditivos sobre el rendimiento mecánico en mezclas recicladas con emulsión bituminosa: una visión general. *Construction and Building Materials*, 552.
- Cannone, A., Moon, K., Wang, D., Riccardi, C., & Wistuba, M. (2018). Comparison of low-temperature fracture and strength properties of asphalt mixture obtained from IDT and SCB under different testing configurations. *Road Materials and Pavement Design*, 1.
- Chamarro Molina, M., & Chancusi Ortega, P. (2017). ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ASFALTO MODIFICADO CON POLVO DE CAUCHO RECICLADO INCORPORADO POR VÍA HÚMEDA Y POR VÍA SECA FRENTE AL ASFALTO FLEXIBLE SIN MODIFICACIÓN. Quito, Ecuador.

- Deef-Allah, E., Abdelrahman, M., Fitch, M., Ragab, M., & Bose, M. (2019). Equilibrar el rendimiento y las preocupaciones ambientales del aceite de motor usado como rejuvenecedor en mezclas asfálticas. *Recyclig*, 1.
- Eleyedath, A., & Krishna, A. (2020). Uso de aceite de motor usado en materiales que contienen componentes asfálticos. In F. Pacheco-Torgal, S. Amirkhanian, H. Wang, & E. Schlangen, *Eco-efficient pavement construction materials* (pp. 33-50). Woodhead Publishing.
- European Commission. (2001). *Critical Review of Existing Studies and Life Cycle Analysis on the Regeneration and Incineration of Waste Oils*. European Commission.
- Farfan Canchis, D., & Romero Dextre, Z. (2019). Propiedades Mecánicas del Asfalto en caliente adicionando 1.5% de Caucho Reciclado Granular, Chimbote - 2019. Chimbote, Perú.
- Foroutan, A., Amid, S., Hoff, I., Dessouky, S., & Ho, C.-H. (2019). Performance evaluation of asphalt mixtures containing high-RAP binder content and bio-oil rejuvenator. *Construction and Building Materials*, 5.
- Granados Noa, J. L. (2017). Comportamiento mecánico de la mezcla asfáltica en caliente modificada con caucho mediante proceso por vía seca respecto a la mezcla asfáltica convencional. Lima, Peru: Unirversidad Ricardo Palma.
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, M. (2014). *Metodología de la investigación*. Caracas: Mc Graw Hill.
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, M. (2014). *Metodología de la investigación*. México: McGraw-Hill.
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, M. (2014). *Metodología de la investigación*.
- Hugener, M., & Kawakami, A. (2017). Simulating repeated recycling of hot mix asphalt. *Road Materials and Pavement Design*, 77.
- Instituto del asfalto. (1991, Febrero). *Diseño de espesores de pavimentos asfálticos para carreteras y calles (MS-1)*.
- Jurado Rivera, E., & Palacios Ledesma, J. (2018). Evaluación de las propiedades mecánicas de las carpetas asfálticas utilizando tratamiento rejuvenecedor, aplicado para la vía Princesa Toa-Conocoto en la ciudad de Quito. Quito, Ecuador: Pontificia Universidad Católica.
- Khalid, A., & Omar, M. (2020). Efecto del uso de residuos de aceite de motor sobre las características del aglutinante asfáltico. *Materials Science and Engineering*, 4.

- Lee, W., Brayton, T., Mueller, M., & Singh, A. (2016). Procedimiento de diseño de mezcla racional para mezclas de asfalto de reciclaje en frío en el lugar y predicción del rendimiento. *American Society of Civil Engineers.*, 1.
- Lin, J., & Xiao, Y. (2020). *Características de microestructura y rendimiento de mezclas asfálticas recicladas en frío*. Wuhan: Woodhead Publishing.
- Liu, S., Meng, H., Xu, Y., & Zhou, S. (2018). Evaluación de las características reológicas del asfalto modificado con aceite de motor usado (WEO). *Petroleum Science and Technology*, 479.
- Martinez, J., Rojas, A., & Bernal, K. (2018). *Estudio de mezclas asfálticas recicladas (reclaimed asphalt pavement) modificado con diferentes porcentajes de WEO (Waste engine oil)*. Ibagué: Universidad Cooperativa de Colombia.
- Ministerio del Ambiente. (2013). Acuerdo Ministerial N. 042.
- Ministerio del ambiente y agua. (2020, Septiembre 25). *www.ambiente.gob.ec*. Retrieved from Por primera vez Ecuador reciclará el 100% de lubricantes usados: <https://www.ambiente.gob.ec/por-primera-vez-ecuador-reciclara-el-100-de-lubricantes-usados/>
- Mohajeri, M., Molenaar, A., & Van de Ven, M. (2015). Mezcla de betún virgen y aglutinante de AR en mezclas con altas cantidades de AR. In S. Huang, & H. Di Benedetto, *Advances in Asphalt Materials: Road and Pavement Construction* (pp. 363-392). Laramie: Elsevier B.V.
- MOP-DGOP-Dirección de Vialidad Chile. (2018, Enero). Manual de Carreteras Volumen N°5. *Manual de Carreteras Volumen N°5 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS GENERALES DE CONSTRUCCIÓN, 2018. Chile. Retrieved 2021, from https://portal.ondac.com/601/articles-59864_doc_pdf.*
- Muncy, H. (1990). *Emulsiones de asfalto*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- NAPA (National Asphalt Pavement Association). (2020, Septiembre). Asphalt Pavement Industry Survey on Recycled Materials and Warm-Mix Asphalt Usage. 9th edition.
- Osorio Arellano, G., & Elías, Y. C. (2018). Mejoramiento de suelo con fines de cimentación con afirmado y aceite reciclado de motores en la Avenida Víctor Raúl Haya de la Torre 220-Chimbote. Chimbote, Perú.

- Peve Chipana, O. (2019). Aplicación de mezcla asfáltica reciclada con emulsión para mejorar la superficie de la carpeta de rodadura en la Av. Principal-Carapongo-Lima 2019. Lima, Perú.
- Poulikakos, L., Papadaskalopoulou, C., Hofko, B., Gschosser, F., Cannone, A., Bueno, M., . . . Partl, M. (2017). Harvesting the unexplored potential of European waste materials for road construction. *Resources, Conservation and Recycling*, 34.
- Qurashi, I., & Krishna, A. (2018). Propiedades viscoelásticas del aglutinante de asfalto reciclado que contiene aceite de motor usado. *Journal of Cleaner Production*, 1000.
- Repamar, Cepis, GTZ. (2002). *Revisión y análisis de las experiencias de Argentina, Brasil, Colombia, Ecuador y Méjico respecto a los cinco elementos claves para el manejo ambiental de lubricantes usados*. Repamar, Cepis, GTZ.
- Rivero Droguett, M. (2018). Diseño de una mezcla asfáltica en caliente mediante la metodología Superpave con la incorporación de 25% de pavimento asfáltico reciclado (RAP), más ensayos de rueda de Hamburgo y módulo de rigidez. Valparaiso, Chile.
- Sangiorgi, C., Tataranni, P., Simone, A., Vignali, V., Lantieri, C., & Dondi, G. (2017). Un laboratorio y una evaluación archivada de la mezcla reciclada en frío para la capa base hecha enteramente con pavimento asfáltico recuperado. *Construction and Building Materials*, 233.
- Teintze, L. (1991). *Used Oil Issues and Opportunities*,. Estados Unidos: Texaco Inc.
- Teoh, W., Noor, Z., & Swee, Y. (2018). Catalyzed waste engine oil as alternative binder of roofing tiles . *J. Clean. prod*, 988.
- United States. Federal Highway Administration. (2000). Recycled materials in European highway environments uses, technologies, and policies. EEUU: DIANE Publishing.
- Universidad Laica VICENTE ROCAFUERTE de Guayaquil. (2021, 03 20). *Universidad Laica Vicente Rocafuerte de Guayaquil*. Retrieved from <http://www.ulvr.edu.ec/academico/unidad-de-titulacion/proyecto-de-investigacion>
- Vera Castellanos, J., & Benitez Guevara, E. (2020). Estudio del comportamiento energético del aceite de motor reciclado como fluido de trabajo en un sistema de panel solar de placa plana en zonas de alta exposición solar en Colombia. Bogotá, Colombia.
- Wang, D., Cannone, A., Hoon, K., Riccardi, C., & Wistuba, M. (2020). Experimental Investigation of Performance Properties of Asphalt Mixture Designed with the Re-recycled RAP and

- EAFASS. In M. Pasetto, M. Partl, & G. Tebaldi, *Proceedings of the 5th International Symposium on Asphalt Pavements & Environment (APE)* (p. 168). Cham: Springer.
- Wanga, W., Jia, M., Jiang, W., Baowen, L., Jiao, W., & Yuan, X. D. (2020). Propiedades de alta temperatura y mecanismo de modificación del asfalto que contiene el fondo de aceite de motor de desecho. *Construction and Building Materials*, 1.
- White, T., Johnson, S., & Yzenas, J. (2001). *Contribución agregada al rendimiento del asfalto de mezcla en caliente (HMA)*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- Xiao, F., Amirkhasian, S., & Wu, B. (2011). Evaluaciones de fatiga y rigidez del pavimento de asfalto recuperado en mezclas de asfalto de mezcla caliente. *Revista de pruebas y evaluación* , 50-58.
- Xiao, F., Yao, S., Wang, J., Xinghai, L., & Amirkhanian, S. (2018). Una revisión de la literatura sobre la tecnología de reciclaje en frío de pavimentos asfálticos. *Construction and Building Materials*, 586.

ANEXOS

ANEXO 1. Código de muestras de ensayos laboratorio

Hoja: 1 de 5
N° Informe: 21-244

Fecha de emisión: 2021-08-24
Número de Orden: OT-2516-21

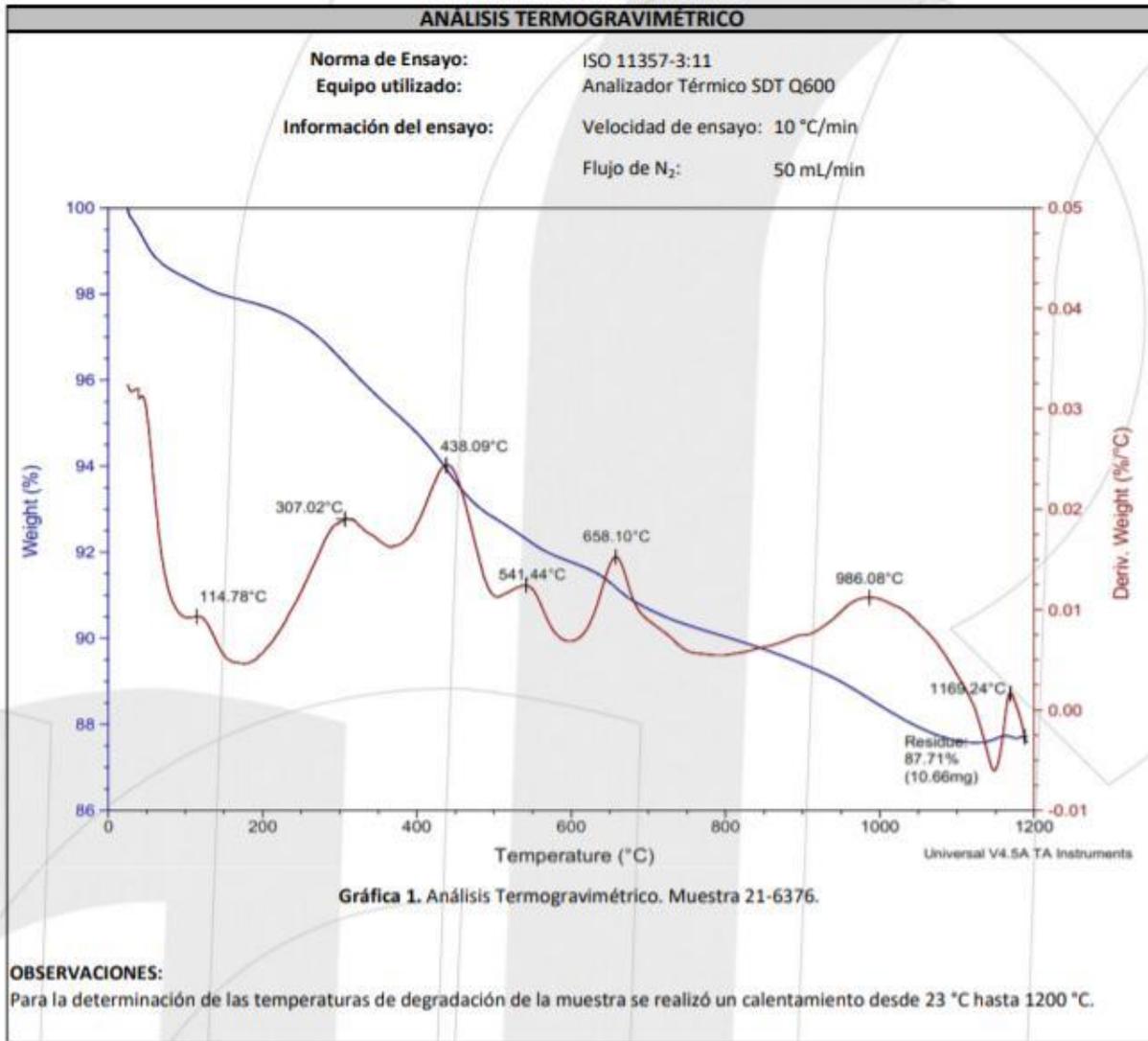
DATOS GENERALES DEL CLIENTE						
Nombre: Ing. Max Almeida						
Dirección: Universidad Laica Vicente Rocafuerte						
Teléfono: 0996568341		Correo electrónico: estalin_original2992@outlook.com				
Persona de Contacto: Sr. Stalin Castillo Carpio Sr. Renato Yamasquí Freire						
DATOS DE LA MUESTRA						
Código de Muestra LEMAT	Descripción de la muestra proporcionada por el cliente	Fecha de Recepción	Muestreo realizado por	Preparación de muestra realizada por	Condición de entrega de la muestra previo al ensayo	Fecha de Ensayo
21-6375	Aceite	2021-06-25	<input checked="" type="checkbox"/> Cliente <input type="checkbox"/> Otros <input type="checkbox"/> No aplica	<input type="checkbox"/> Cliente <input type="checkbox"/> LEMAT <input checked="" type="checkbox"/> No aplica	<input checked="" type="checkbox"/> Acorde a norma <input type="checkbox"/> No acorde a norma <input type="checkbox"/> No aplica	Desde 2021-07-09 hasta 2021-08-03
21-6376	Asfalto	2021-06-25	<input checked="" type="checkbox"/> Cliente <input type="checkbox"/> Otros <input type="checkbox"/> No aplica	<input type="checkbox"/> Cliente <input checked="" type="checkbox"/> LEMAT <input type="checkbox"/> No aplica	<input checked="" type="checkbox"/> Acorde a norma <input type="checkbox"/> No acorde a norma <input type="checkbox"/> No aplica	Desde 2021-07-09 hasta 2021-08-03

MC2203-02

ANEXO 2. Resultados del análisis termogravimétrico

Hoja: 2 de 5
N° Informe: 21-244

Fecha de emisión: 2021-08-24
Número de Orden: OT-2516-21



ANEXO 3. Resultados del Ensayo de punto de inflamación y combustión



Laboratorio de
Evaluación de Materiales

INFORME DE ENSAYOS /
CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN

Hoja: 3 de 5
N° Informe: 21-244

Fecha de emisión: 2021-08-24
Número de Orden: OT-2516-21

ENSAYO DE PUNTO DE INFLAMACIÓN Y PUNTO DE COMBUSTIÓN			
INFORMACIÓN DEL ENSAYO			
Norma de ensayo:		ASTM D92:01	
Temperatura ambiente promedio:		28 °C	
Humedad relativa promedio:		63%	
Tabla 1. Resultados de punto de inflamación y de combustión.			
Código de muestra	Parámetro	Resultado (°C)	Desviación estándar (°C)
21-6375	Punto de Inflamación	210.6	0.5
	Punto de Combustión	270.3	0.5
21-6376	Punto de Inflamación	219.0	0.5
	Punto de Combustión	240.0	0.5
OBSERVACIONES:			
-Las muestras ensayadas y la información de las mismas fueron proporcionadas por el cliente.			
-Para la determinación de los parámetros de en la muestra 21-6376 fue necesaria una mezcla 70:30 de asfalto y aceite, respectivamente.			

ANEXO 4. Resultados del Ensayo de punto de inflamación y combustión



Laboratorio de
Evaluación de Materiales

INFORME DE ENSAYOS /
CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN

Hoja: 4 de 5
N° Informe: 21-244

Fecha de emisión: 2021-08-24
Número de Orden: OT-2516-21

ENSAYO DE VISCOSIDAD			
INFORMACIÓN DEL ENSAYO			
Norma de ensayo:		ASTM D445:01	
Temperatura ambiente promedio:		28 °C	
Humedad relativa promedio:		63%	
Tabla 2. Resultados de viscosidad.			
Código de muestra	Parámetro	Resultado	Desviación estándar
21-6375	Viscosidad Cinemática 20 °C (cSt)	90.65	0.10
	Viscosidad Dinámica 20°C (Pa.s)	0.068	0.005
OBSERVACIONES:			
-Las muestras ensayadas y la información de las mismas fueron proporcionadas por el cliente.			

ANEXO 5. Resultados del Ensayo de punto de inflamación y combustión

Hoja: 5 de 5
N° Informe: 21-244

Fecha de emisión: 2021-08-24
Número de Orden: OT-2516-21

ENSAYO DE VISCOSIDAD

INFORMACIÓN DEL ENSAYO

Norma de ensayo: ASTM D445:01
Temperatura ambiente promedio: 23 °C
Humedad relativa promedio: 60%

Tabla 3. Resultados de viscosidad.

Código de muestra	Parámetro	Resultado (cP)	Método de análisis
21-6376	Viscosidad Brookfield 23 °C ± 15°C	20400	Espiga N°7
	Viscosidad Brookfield 135 °C ± 15°C	7200-6800	Espiga N°7

OBSERVACIONES:

-Las muestras ensayadas y la información de las mismas fueron proporcionadas por el cliente.
-Es preciso indicar, que los ensayos de viscosidad fueron realizados en la muestra sin considerar agregados finos ni gruesos debido que alteran la homogeneidad de la muestra. Fueron realizados considerando únicamente el agente que actúa como ligante, el cual presenta un comportamiento homogéneo a temperatura ambiente. Sin embargo, al incrementar la temperatura a los valores solicitados por el cliente no es posible obtener un resultado estable debido a la pérdida constante de elementos en su composición. Por este motivo se reporta el rango en los que oscila el equipo al incrementar la temperatura.



Firmado digitalmente por:
**JOSE MIGUEL
BRUQUE
ALMEIDA**

Departamento Técnico



Firmado digitalmente por:
**MARIA JOSE
BASTIDAS
RONQUILLO**

Departamento de Calidad

ANEXO 6. NORMA ASTM D1559-89



Designation: D 1559 - 89

Standard Test Method for Resistance to Plastic Flow of Bituminous Mixtures Using Marshall Apparatus¹

This standard is issued under the fixed designation D 1559; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reappraisal. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reappraisal.

This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense. Consult the DoD Index of Specifications and Standards for the specific year of issue which has been adopted by the Department of Defense.

1. Scope

1.1 This test method covers the measurement of the resistance to plastic flow of cylindrical specimens of bituminous paving mixture loaded on the lateral surface by means of the Marshall apparatus. This test method is for use with mixtures containing asphalt cement, asphalt cut-back or tar, and aggregate up to 1-in. (25.4-mm) maximum size.

1.2 *This standard may involve hazardous materials, operations, and equipment. This standard does not purport to address all of the safety problems associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. Significance and Use

2.1 This test method is used in the laboratory mix design of bituminous mixtures. Specimens are prepared in accordance with the method and tested for maximum load and flow. Density and voids properties may also be determined on specimens prepared in accordance with the test method. The testing section of this method can also be used to obtain maximum load and flow for bituminous paving specimens cored from pavements or prepared by other methods. These results may differ from values obtained on specimens prepared by this test method.

3. Apparatus

3.1 *Specimen Mold Assembly*—Mold cylinders 4 in. (101.6 mm) in diameter by 3 in. (76.2 mm) in height, base plates, and extension collars shall conform to the details shown in Fig. 1. Three mold cylinders are recommended.

3.2 *Specimen Extractor*, steel, in the form of a disk with a diameter not less than 3.95 in. (100 mm) and 1/2 in. (13 mm) thick for extracting the compacted specimen from the specimen mold with the use of the mold collar. A suitable bar is required to transfer the load from the ring dynamometer adapter to the extension collar while extracting the specimen.

3.3 *Compaction Hammer*—The compaction hammer (Fig. 2) shall have a flat, circular tamping face and a 10-lb (4536-g) sliding weight with a free fall of 18 in. (457.2 mm).

Two compaction hammers are recommended.

NOTE 1—The compaction hammer may be equipped with a finger safety guard as shown in Fig. 2.

3.4 *Compaction Pedestal*—The compaction pedestal shall consist of an 8 by 8 by 18-in. (203.2 by 203.2 by 457.2-mm) wooden post capped with a 12 by 12 by 1-in. (304.8 by 304.8 by 25.4-mm) steel plate. The wooden post shall be oak, pine, or other wood having an average dry weight of 42 to 48 lb/ft³ (0.67 to 0.77 g/cm³). The wooden post shall be secured by four angle brackets to a solid concrete slab. The steel cap shall be firmly fastened to the post. The pedestal assembly shall be installed so that the post is plumb and the cap is level.

3.5 *Specimen Mold Holder*, mounted on the compaction pedestal so as to center the compaction mold over the center of the post. It shall hold the compaction mold, collar, and base plate securely in position during compaction of the specimen.

3.6 *Breaking Head*—The breaking head (Fig. 3) shall consist of upper and lower cylindrical segments or test heads having an inside radius of curvature of 2 in. (50.8 mm) accurately machined. The lower segment shall be mounted on a base having two perpendicular guide rods or posts extending upward. Guide sleeves in the upper segment shall be in such a position as to direct the two segments together without appreciable binding or loose motion on the guide rods.

3.7 *Loading Jack*—The loading jack (Fig. 4) shall consist of a screw jack mounted in a testing frame and shall produce a uniform vertical movement of 2 in. (50.8 mm)/min. An electric motor may be attached to the jacking mechanism.

NOTE 2—Instead of the loading jack, a mechanical or hydraulic testing machine may be used provided the rate of movement can be maintained at 2 in. (50.8 mm)/min while the load is applied.

3.8 *Ring Dynamometer Assembly*—One ring dynamometer (Fig. 4) of 5000-lb (2267-kg) capacity and sensitivity of 10 lb (4.536 kg) up to 1000 lb (453.6 kg) and 25 lb (11.340 kg) between 1000 and 5000 lb (453.6 and 2267 kg) shall be equipped with a micrometer dial. The micrometer dial shall be graduated in 0.0001 in. (0.0025 mm). Upper and lower ring dynamometer attachments are required for fastening the ring dynamometer to the testing frame and transmitting the load to the breaking head.

NOTE 3—Instead of the ring dynamometer assembly, any suitable load-measuring device may be used provided the capacity and sensitivity meet the above requirements.

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee D-4 on Road and Paving Materials and is the direct responsibility of Subcommittee D04.20 on Mechanical Tests of Bituminous Mixes.
Current edition approved Oct. 18, 1989. Published December 1989. Originally published as D 1559 - 58. Last previous edition D 1559 - 82.

D 1559

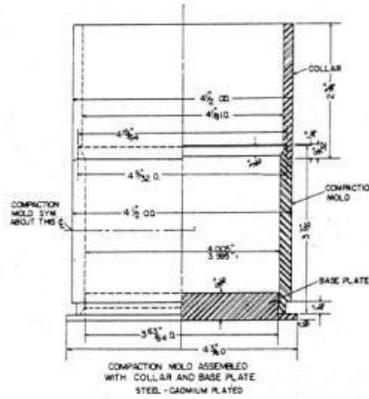


Table of Equivalents for Figs. 1 and 3

Inch-Pound Units, in.	Metric Equivalents, mm	Inch-Pound Units, in.	Metric Equivalents, mm	Inch-Pound Units, in.	Metric Equivalents, mm	Inch-Pound Units, in.	Metric Equivalents, mm
0.005	0.11	¹¹ / ₁₆	17.5	²⁹ / ₁₆	58.7	⁴ / ₈	104.8
¹ / ₃₂	0.8	³ / ₈	19.0	²¹ / ₂	63.5	⁴⁹ / ₃₂	108.7
¹ / ₁₆	1.6	⁷ / ₈	22.2	²³ / ₄	69.8	⁴¹⁹ / ₆₄	109.1
¹ / ₈	3.2	¹⁵ / ₁₆	23.8	²⁷ / ₈	73.0	⁴¹ / ₂	114.3
³ / ₁₆	4.8	1	25.4	3	76.2	⁴⁵ / ₈	117.5
¹ / ₄	6.4	¹⁷ / ₈	28.6	³¹ / ₄	82.6	⁴³ / ₄	120.6
⁹ / ₃₂	7.1	¹¹ / ₄	31.8	³⁷ / ₁₆	87.3	⁵¹ / ₁₆	128.6
³ / ₈	9.5	¹³ / ₈	34.9	³⁷ / ₈	98.4	⁵¹ / ₈	130.2
0.496	12.6	¹¹ / ₂	38.1	³⁶³ / ₆₄	101.2	⁵³ / ₄	146.0
0.499	12.67	¹⁵ / ₈	41.3	3.990	101.35	6	152.4
¹ / ₂	12.7	¹³ / ₄	44.4	3.995	101.47	⁶¹ / ₄	158.8
⁹ / ₁₆	14.3	2	50.8	4	101.6	⁷⁵ / ₈	193.7
⁵ / ₈	15.9	²¹ / ₄	57.2	4.005	101.73	27	685.8

FIG. 1 Compaction Mold

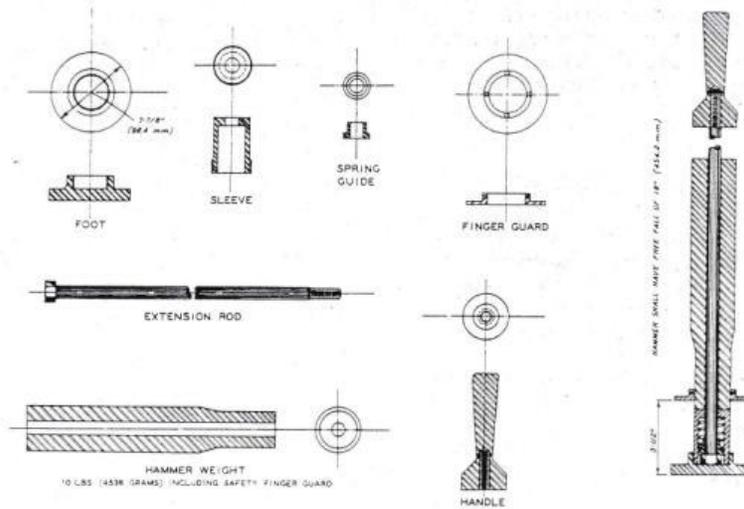
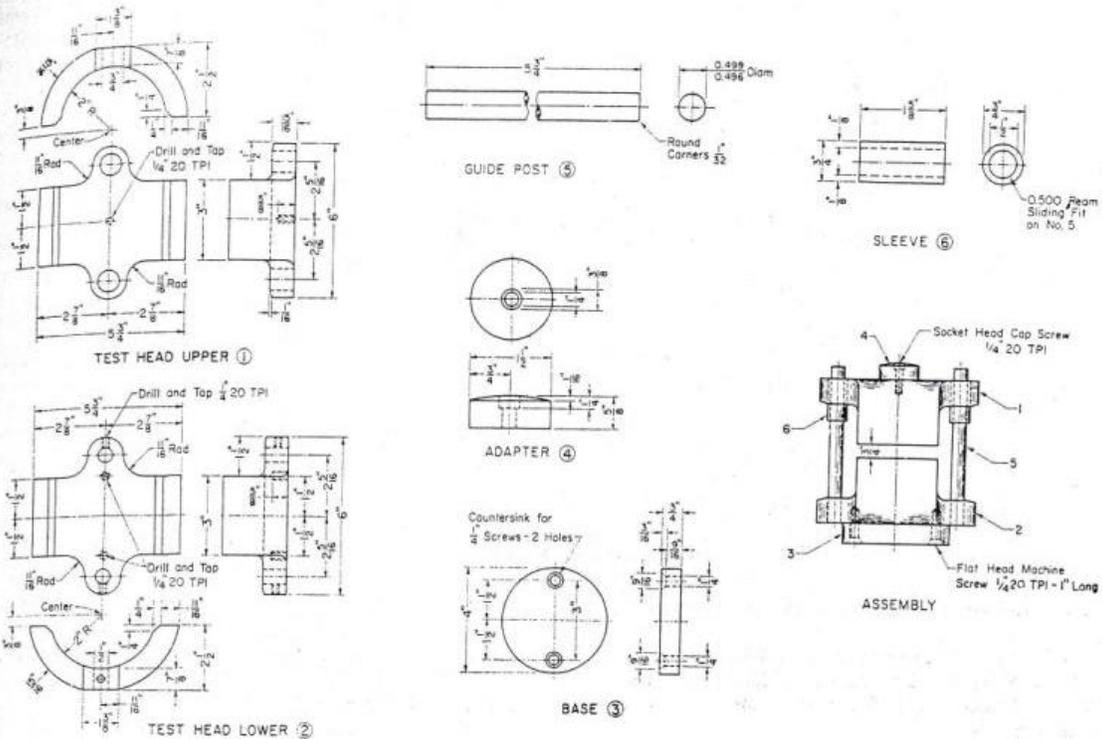


FIG. 2 Compaction Hammer

3.9 *Flowmeter*—The flowmeter shall consist of a guide sleeve and a gage. The activating pin of the gage shall slide inside the guide sleeve with a slight amount of frictional

resistance. The guide sleeve shall slide freely over the guide rod of the breaking head. The flowmeter gage shall be adjusted to zero when placed in position on the breaking



(Table of Equivalents same as for Fig. 1.)

FIG. 3 Breaking Head

head when each individual test specimen is inserted between the breaking head segments. Graduations of the flowmeter gage shall be in 0.01-in. (0.25-mm) divisions.

NOTE 4—Instead of the flowmeter, a micrometer dial or stress-strain recorder graduated in 0.001 in. (0.025 mm) may be used to measure flow.

3.10 *Ovens or Hot Plates*—Ovens or hot plates shall be provided for heating aggregates, bituminous material, specimen molds, compaction hammers, and other equipment to the required mixing and molding temperatures. It is recommended that the heating units be thermostatically controlled so as to maintain the required temperature within 5°F (2.8°C). Suitable shields, baffle plates or sand baths shall be used on the surfaces of the hot plates to minimize localized overheating.

3.11 *Mixing Apparatus*—Mechanical mixing is recommended. Any type of mechanical mixer may be used provided it can be maintained at the required mixing temperature and will provide a well-coated, homogeneous mixture of the required amount in the allowable time, and further provided that essentially all of the batch can be covered. A metal pan or bowl of sufficient capacity and and mixing may also be used.

3.12 *Water Bath*—The water bath shall be at least 6 in. (152.4 mm) deep and shall be thermostatically controlled so to maintain the bath at $140 \pm 1.8^\circ\text{F}$ ($60 \pm 1.0^\circ\text{C}$) or $100 \pm$

1.8°F ($37.8 \pm 1^\circ\text{C}$). The tank shall have a perforated false bottom or be equipped with a shelf for supporting specimens 2 in. (50.8 mm) above the bottom of the bath.

3.13 *Air Bath*—The air bath for asphalt cut-back mixtures shall be thermostatically controlled and shall maintain the air temperature at $77^\circ\text{F} \pm 1.8^\circ\text{F}$ ($25 \pm 1.0^\circ\text{C}$).

3.14 *Miscellaneous Equipment:*

3.14.1 *Containers* for heating aggregates, flat-bottom metal pans or other suitable containers.

3.14.2 *Containers* for heating bituminous material, either gill-type tins, beakers, pouring pots, or saucepans may be used.

3.14.3 *Mixing Tool*, either a steel trowel (garden type) or spatula, for spading and hand mixing.

3.14.4 *Thermometers* for determining temperatures of aggregates, bitumen, and bituminous mixtures. Armored-glass or dial-type thermometers with metal stems are recommended. A range from 50 to 400°F (9.9 to 204°C), with sensitivity of 5°F (2.8°C) is required.

3.14.5 *Thermometers* for water and air baths with a range from 68 to 158°F (20 to 70°C) sensitive to 0.4°F (0.2°C).

3.14.6 *Balance*, 2-kg capacity, sensitive to 0.1 g, for weighing molded specimens.

3.14.7 *Balance*, 5-kg capacity, sensitive to 1.0 g, for batching mixtures.

3.14.8 *Gloves* for handling hot equipment.

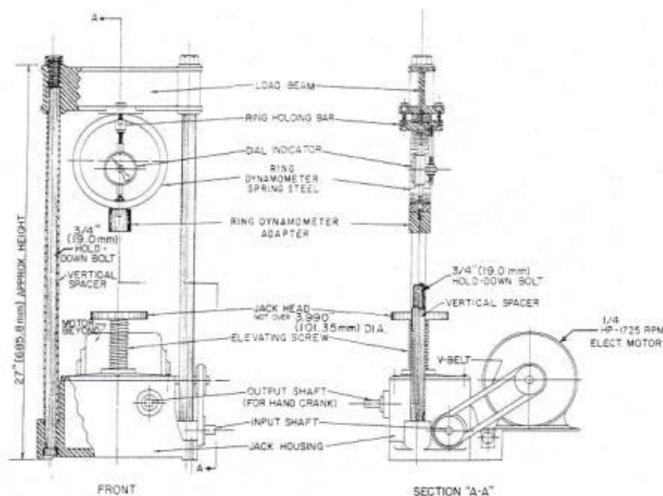


FIG. 4 Compression Testing Machine

3.14.9 *Rubber Gloves* for removing specimens from water bath.

3.14.10 *Marking Crayons* for identifying specimens.

3.14.11 *Scoop*, flat bottom, for batching aggregates.

3.14.12 *Spoon*, large, for placing the mixture in the specimen molds.

4. Test Specimens

4.1 *Number of Specimens*—Prepare at least three specimens for each combination of aggregates and bitumen content.

4.2 *Preparation of Aggregates*—Dry aggregates to constant weight at 221 to 230°F (105 to 110°C) and separate the aggregates to dry-sieving into the desired size fractions.² The following size fractions are recommended:

- 1 to 3/4 in. (25.0 to 19.0 mm)
- 3/4 to 3/8 in. (19.0 to 9.5 mm)
- 3/8 in. to No. 4 (9.5 mm to 4.75 mm)
- No. 4 to No. 8 (4.75 mm to 2.36 mm)
- Passing No. 8 (2.36 mm)

4.3 *Determination of Mixing and Compacting Temperatures:*

4.3.1 The temperatures to which the asphalt cement and asphalt cut-back must be heated to produce a viscosity of 170 ± 20 cSt shall be the mixing temperature.

4.3.2 The temperature to which asphalt cement must be heated to produce a viscosity of 280 ± 30 cSt shall be the compacting temperature.

4.3.3 From a composition chart for the asphalt cut-back used, determine from its viscosity at 140°F (60°C) the percentage of solvent by weight. Also determine from the chart the viscosity at 140°F (60°C) of the asphalt cut-back

after it has lost 50 % of its solvent. The temperature determined from the viscosity temperature chart to which the asphalt cut-back must be heated to produce a viscosity of 280 ± 30 cSt after a loss of 50 % of the original solvent content shall be the compacting temperature.

4.3.4 The temperature to which tar must be heated to produce Engler specific viscosities of 25 ± 3 and 40 ± 5 shall be respectively the mixing and compacting temperature.

4.4 Preparation of Mixtures:

4.4.1 Weigh into separate pans for each test specimen the amount of each size fraction required to produce a batch that will result in a compacted specimen 2.5 ± 0.05 in. (63.5 ± 1.27 mm) in height (about 1200 g). Place the pans on the hot plate or in the oven and heat to a temperature not exceeding the mixing temperature established in 4.3 by more than approximately 50°F (28°C) for asphalt cement and tar mixes and 25°F (14°C) for cut-back asphalt mixes. Charge the mixing bowl with the heated aggregate and dry mix thoroughly. Form a crater in the dry blended aggregate and weigh the preheated required amount of bituminous material into the mixture. For mixes prepared with cutback asphalt introduce the mixing blade in the mixing bowl and determine the total weight of the mix components plus bowl and blade before proceeding with mixing. Care must be exercised to prevent loss of the mix during mixing and subsequent handling. At this point, the temperature of the aggregate and bituminous material shall be within the limits of the mixing temperature established in 4.3. Mix the aggregate and bituminous material rapidly until thoroughly coated.

4.4.2 Following mixing, cure asphalt cutback mixtures in a ventilated oven maintained at approximately 20°F (11.1°C) above the compaction temperature. Curing is to be continued in the mixing bowl until the precalculated weight of 50 % solvent loss or more has been obtained. The mix may be stirred in a mixing bowl during curing to accelerate the solvent loss. However, care should be exercised to prevent

² Detailed requirements for these sieves are given in ASTM Specification E 11, for Wire-Cloth Sieves for Testing Purposes see *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 14.02.

loss of the mix. Weigh the mix during curing in successive intervals of 15 min initially and less than 10 min intervals as the weight of the mix at 50 % solvent loss is approached.

4.5 Compaction of Specimens:

4.5.1 Thoroughly clean the specimen mold assembly and the face of the compaction hammer and heat them either in boiling water or on the hot plate to a temperature between 200 and 300°F (93.3 and 148.9°C). Place a piece of filter paper or paper toweling cut to size in the bottom of the mold before the mixture is introduced. Place the entire batch in the mold, spade the mixture vigorously with a heated spatula or trowel 15 times around the perimeter and 10 times over the interior. Remove the collar and smooth the surface of the mix with a trowel to a slightly rounded shape. Temperatures of the mixtures immediately prior to compaction shall be within the limits of the compacting temperature established in 4.3.

4.5.2 Replace the collar, place the mold assembly on the compaction pedestal in the mold holder, and unless otherwise specified, apply 50 blows with the compaction hammer with a free fall in 18 in. (457.2 mm). During compaction, the operator shall hold the axis of the compaction hammer by hand as nearly perpendicular to the base of the mold assembly as possible. Remove the base plate and collar, and reverse and reassemble the mold. Apply the same number of compaction blows to the face of the reversed specimen. After compaction, remove the base plate and place the sample extractor on that end of the specimen. Place the assembly with the extension collar up in the testing machine, apply pressure to the collar by means of the load transfer bar, and force the specimen into the extension collar. Lift the collar from the specimen. Carefully transfer the specimen to a smooth, flat surface and allow it to stand overnight at room temperature. Weigh, measure, and test the specimen.

NOTE 5—The above procedure requires that the handle of the compaction hammer should be held freely by one hand in as nearly a vertical position as possible while hand compaction proceeds. Inevitably, this will result in some wobbling of the handle about the vertical as compaction takes place. This wobbling, however, provides a highly desirable kneading of the specimen during compaction, resulting in higher density. Consequently, for this standard test, no mechanical device of any kind should be used to restrict the handle of the hammer in the vertical position during compaction.

NOTE 6—In general, specimens shall be cooled as specified in 4.5.2. When more rapid cooling is desired, table fans may be used. Mixtures that lack sufficient cohesion to result in the required cylindrical shape on removal from the mold immediately after compaction may be cooled in the mold in air until sufficient cohesion has developed to result in the proper cylindrical shape.

5. Procedure

5.1 Bring the specimens prepared with asphalt cement or tar to the specified temperature by immersing in the water bath 30 to 40 min or placing in the oven for 2 h. Maintain the bath or oven temperature at 140 ± 1.8°F (60 ± 1.0°C) for the asphalt cement specimens and 100 ± 1.8°F (37.8 ± 1.0°C) for tar specimens. Bring the specimens prepared with asphalt cut-back to the specified temperature by placing them in the air bath for a minimum of 2 h. Maintain the air bath temperature at 77 ± 1.8°F (25 ± 1.0°C). Thoroughly clean the guide rods and the inside surfaces of the test heads prior to making the test, and lubricate the guide rods so that the upper test head slides freely over them. The testing-head

temperature shall be maintained between 70 to 100°F (21.1 to 37.8°C) using a water bath when required. Remove the specimen from the water bath, oven, or air bath, and place in the lower segment of the breaking head. Place the upper segment of the breaking head on the specimen, and place the complete assembly in position on the testing machine. Place the flowmeter, where used, in position over one of the guide rods and adjust the flowmeter to zero while holding the sleeve firmly against the upper segment of the breaking head. Hold the flowmeter sleeve firmly against the upper segment of the breaking head while the test load is being applied.

5.2 Apply the load to the specimen by means of the constant rate of movement of the load jack or testing-machine head of 2 in. (50.8 mm)/min until the maximum load is reached and the load decreases as indicated by the dial. Record the maximum load noted on the testing machine or converted from the maximum micrometer dial reading. Release the flowmeter sleeve or note the micrometer dial reading, where used, the instant the maximum load begins to decrease. Note and record the indicated flow value or equivalent units in hundredths of an inch (twenty-five hundredths of a millimetre) if a micrometer dial is used to measure the flow. The elapsed time for the test from removal of the test specimen from the water bath to the maximum load determination shall not exceed 30 s.

TABLE 1 Stability Correlation Ratios^a

Volume of Specimen, cm ³	Approximate Thickness of Specimen, in. ^b	mm	Correlation Ratio
200 to 213	1	25.4	5.56
214 to 225	1 1/16	27.0	5.00
226 to 237	1 1/8	28.6	4.55
238 to 250	1 3/16	30.2	4.17
251 to 264	1 1/4	31.8	3.85
265 to 276	1 5/16	33.3	3.57
277 to 289	1 3/8	34.9	3.33
290 to 301	1 7/16	36.5	3.03
302 to 316	1 1/2	38.1	2.78
317 to 328	1 5/8	39.7	2.50
329 to 340	1 5/8	41.3	2.27
341 to 353	1 11/16	42.9	2.08
354 to 367	1 3/4	44.4	1.92
368 to 379	1 13/16	46.0	1.79
380 to 392	1 7/8	47.6	1.67
393 to 405	1 15/16	49.2	1.56
406 to 420	2	50.8	1.47
421 to 431	2 1/16	52.4	1.39
432 to 443	2 1/8	54.0	1.32
444 to 456	2 3/16	55.6	1.25
457 to 470	2 1/4	57.2	1.19
471 to 482	2 5/16	58.7	1.14
483 to 495	2 3/8	60.3	1.09
496 to 508	2 7/16	61.9	1.04
509 to 522	2 1/2	63.5	1.00
523 to 535	2 9/16	65.1	0.96
536 to 546	2 5/8	66.7	0.93
547 to 559	2 11/16	68.3	0.89
560 to 573	2 3/4	69.8	0.86
574 to 585	2 13/16	71.4	0.83
586 to 598	2 7/8	73.0	0.81
599 to 610	2 15/16	74.6	0.78
611 to 625	3	76.2	0.76

^a The measured stability of a specimen multiplied by the ratio for the thickness of the specimen equals the corrected stability for a 2 1/2-in. (63.5-mm) specimen.

^b Volume-thickness relationship is based on a specimen diameter of 4 in. (101.6 mm).

 D 1559

NOTE 7—For core specimens, correct the load when thickness is other than $2\frac{1}{2}$ in. (63.5 mm) by using the proper multiplying factor from Table 1.

6. Report

6.1 The report shall include the following information:

6.1.1 Type of sample tested (laboratory sample or pavement core specimen).

NOTE 8—For core specimens, the height of each test specimen in inches (or millimetres) shall be reported.

6.1.2 Average maximum load in pounds-force (or newtons) of at least three specimens, corrected when required.

6.1.3 Average flow value, in hundredths of an inch, twenty-five hundredths of a millimetre, of three specimens, and

6.1.4 Test temperature.

The American Society for Testing and Materials takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, 1916 Race St., Philadelphia, PA 19103.

ANEXO 7. ESPESOR MINIMO DE CONCRETO ASFALTICO

ASPHALT INSTITUTE MS-1/1991

TABLA VI-3 ESPESOR MINIMO DE CONCRETO ASFALTICO SOBRE BASE DE AGREGADOS NO TRATADOS

TRAFICO (EAL)	CONDICION DE TRAFICO	ESPESOR MINIMO DE CONCRETO ASFALTICO
-10 ⁴ o menos	- Zonas de Parqueo y caminos rurales de bajo volumen	75 mm (3.0 pulg) ^a
-Entre 10 ⁴ y 10 ⁶	-Tráfico mediano de vehículos pesados	100 mm (4.0 pulg)
-10 ⁶ o mas	-Tráfico alto de vehículos pesados	125 mm (5.0 pulg) o mas

^a Para pavimentos asfálticos en todo su espesor o pavimentos con asfalto emulsificado, el espesor mínimo es de 100 mm (4.0 in.) en esta categoría de tráfico, tal cual se indica en las cartas de diseño.

(Instituto del asfalto, 1991, pág. 44)

ANEXO 8. NORMA NTE INEN 2515 Enmienda 1.



Quito – Ecuador

**NORMA
TÉCNICA
ECUATORIANA**

**NTE INEN 2515
Enmienda 1**
2014-05-20

**PRODUCTOS DERIVADOS DEL PETRÓLEO. CEMENTO ASFÁLTICO
(CLASIFICACIÓN POR VISCOSIDAD) REQUISITOS**

PETROLEUM PRODUCTS. ASPHALTS CEMENTS (VISCOSITY GRADED). REQUIREMENTS

Correspondencia:

DESCRIPTORES: Productos del petróleo, cementos asfálticos, requisitos
ICS: 93.080.20

1 Páginas

NTE INEN 2515:2010/Enmienda 1

En la Página 5 incluir

TABLA 7 Requisitos para Asfalto Cemento gradual Viscosidad a 60 °C [140 °F] a base de asfalto original

Ensayo	Unidad	Grado de Viscosidad										Norma de ensayo
		AC-6		AC-10		AC-20		AC-30		AC-42		
		Min.	Max	Min.	Max	Min.	Max	Min.	Max	Min.	Max	
Viscosidad absoluta, 60 °C	Pa s	60 ± 20		100 ± 20		200 ± 40		300 ± 60		420 ± 60		ASTMD 2171
Viscosidad cinemática, 135 °C	mm ² s ⁻¹	175	--	250	--	300	--	350	--	400	--	ASTMD 2170
Punto de Inflamación	°C	177	--	219	--	232	--	232	--	232	--	NTE INEN 808
w, Solubilidad en tricloroetileno, ^c	%	99,0	--	99,0	--	99,0	--	99,0	--	99,0	--	NTE INEN 915
Gravedad específica 25 °C/25 °C		Informe		Informe		Informe		Informe		Informe		ASTMD70
Índice de Penetración ^b		-1,5 a +1		-1,5 a +1		-1,5 a +1		-1,5 a +1		-1,5 a +1		ASTM D5/D5M
Residuo de ensayos de película fina en horno rotatorio:												
Viscosidad, 60 °C	Pa s	--	300	--	500	--	800	--	1 200	--	2 000	ASTMD 2171
Cambio de masa	% ww	--	1,5	--	1,0	--	1,0	--	1,0	--	1,0	ASTMD 2872
Ductilidad ^a , 25 °C [77 °F], 5 cm/min	cm	100	--	75	--	50	--	40	--	25	--	NTE INEN 916
^a Si la ductilidad es menor a 100, el material debe ser aceptado, solo si la ductilidad a 15,5 °C es mínimo 100 a una velocidad de tiro de 5 cm/min.												
^b Índice de penetración = $\frac{1952 - 500 \log pen - 20 SP}{50 \log pen - SP - 120}$												
donde: pen = penetración a 25 °C, 100 g, 5 s SP = punto de ablandamiento (°C) ASTM D36												
^c Solubilidad en bromuro de propilo N puede ser un método alternativo a la solubilidad en TCE.												

ANEXO 9. NORMA DIN 51519

DEUTSCHE NORM

August 1998

	ISO viscosity classification of industrial liquid lubricants	DIN 51519
<p>ICS 75.100 Supersedes July 1976 edition.</p> <p>Schmierstoffe – ISO-Viskositätsklassifikation für flüssige Industrie-Schmierstoffe</p> <p><i>In keeping with current practice in standards published by the International Organization for Standardization (ISO), a comma has been used throughout as the decimal marker.</i></p> <p>Foreword</p> <p>This standard has been prepared by Technical Committee <i>Anforderungen an Schmieröle und sonstige Öle</i> of the <i>Normenausschuss Materialprüfung</i> (Materials Testing Standards Committee). It conforms in substance with ISO 3448.</p> <p>A classification system should cover the full viscosity range of liquid lubricants in normal use, without including too many individual grades. The present classification system is therefore not continuous, with each grade range extending no more than 10 % from the mid-point viscosity value. This results in a similar degree of uncertainty to that given by the usual tolerances in parts manufacturing. The reference temperature is 40 °C, being a compromise between the internationally most frequently used temperatures (37,8 °C and 50 °C), and being a preferred working temperature in oil circulation systems. The designation of the viscosity classes is identical to that in the ASTM and BSI classification systems. Lubricants which cannot be classified according to this standard may, by agreement, continue to be used, provided their viscosity is given at the new reference temperature, 40 °C. Some natural or synthetic lubricants, such as diester oil, cannot be classified (cf. clause 1). The international SAE classification of automobile motor and gear lubricants is not affected by this standard.</p> <p>Amendments</p> <p>This standard differs from the July 1976 edition in that it has been brought into line with ISO 3448 and has been editorially revised.</p> <p>Previous edition</p> <p>DIN 51519: 1976-07.</p> <p>1 Scope</p> <p>This standard sets out a viscosity classification system for industrial liquid lubricants and related fluids. The usual method of determining viscosity is described in DIN EN ISO 3104, but may produce anomalous results when applied to non-Newtonian fluids (i.e. those whose viscosity coefficient varies significantly with the rate of shear). The method used to determine viscosity should therefore be stated.</p> <p>It should be noted that certain synthetic and natural products are used as lubricants, but cannot be classified using this system.</p> <p style="text-align: right;">Continued on pages 2 to 4.</p> <p style="text-align: center;">Translation by DIN-Sprachendienst.</p> <p style="text-align: center;"><small>In case of doubt, the German-language original should be consulted as the authoritative text.</small></p>		



All rights of this publication may be reproduced without the prior permission of
DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin. Beuth Verlag GmbH, 10772 Berlin, Germany,
the exclusive right of sale for German Standards (DIN-Normen).

Ref. No. DIN 51519 : 1998-08
English price group 05 Sales No. 0105
06.01

2 Normative references

This standard incorporates, by dated or undated reference, provisions from other publications. These normative references are cited at the appropriate places in the text, and the titles of the publications are listed below. For dated references, subsequent amendments to or revisions of any of these publications apply to this standard only when incorporated in it by amendment or revision. For undated references, the latest edition of the publication referred to applies.

- DIN 51562-1 Determination of kinematic viscosity using the Ubbelohde viscometer – Apparatus and measurement procedure
- DIN EN ISO 3104 Petroleum products – Determination of kinematic viscosity and calculation of dynamic viscosity of transparent and opaque liquids (includes Corrigendum AC : 1999) (ISO 3104 : 1994 + Corr. 1 : 1997)
- ISO 2909 : 1981 Petroleum products – Calculation of viscosity index from kinematic viscosity
- ISO 3448 : 1992 Industrial liquid lubricants – ISO viscosity classification

3 Classification

3.1 This classification system defines 20 viscosity grades in the range from 2 mm²/s to 3200 mm²/s at 40 °C. In the case of petroleum-based liquids, this range covers kerosine to engine oils.

3.2 Each viscosity grade is designated by the nearest whole number to its mid-point kinematic viscosity at 40 °C, in mm²/s, with its limits being ± 10 % of this value. Table 1 gives the viscosity grades and their limits.

Table 1: ISO viscosity classification

ISO viscosity grade	Mid-point kinematic viscosity at 40 °C, in mm ² /s	Kinematic viscosity limits at 40 °C, in mm ² /s	
		Min.	Max.
ISO VG 2	2,2	1,98	2,42
ISO VG 3	3,2	2,88	3,52
ISO VG 5	4,6	4,14	5,06
ISO VG 7	6,8	6,12	7,48
ISO VG 10	10	9,00	11,0
ISO VG 15	15	13,5	16,5
ISO VG 22	22	19,8	24,2
ISO VG 32	32	28,8	35,2
ISO VG 46	46	41,4	50,6
ISO VG 68	68	61,2	74,8
ISO VG 100	100	90,0	110
ISO VG 150	150	135	165
ISO VG 220	220	198	242
ISO VG 320	320	288	352
ISO VG 460	460	414	506
ISO VG 680	680	612	748
ISO VG 1 000	1 000	900	1 100
ISO VG 1 500	1 500	1 350	1 650
ISO VG 2 200	2 200	1 980	2 420
ISO VG 3 200	3 200	2 880	3 520

3.3 Classification is based on the assumption that the mid-point kinematic viscosity of a grade is 50 % greater than that of the preceding grade. Dividing each decade into six equal logarithmic stages enables smooth progression from decade to decade. The logarithmic series has been rounded off in order to provide simple numbers. The maximum deviation of the mid-point viscosity values from the logarithmic series is 2,2 %.

3.4 This classification does not evaluate quality, giving only information on kinematic viscosity at 40 °C. Viscosity at other temperatures will depend on the viscosity/temperature characteristics of the lubricants, which are usually given in terms of a viscosity index (cf. ISO 2909).



4 Reference temperature

This classification system is based on a reference temperature of 40 °C, replacing the previously widely used reference temperature of 37,8 °C.

5 Designation

EXAMPLE:

Designation of a lubricant of viscosity grade 10:

Viscosity grade ISO VG 10 DIN 51519

This may be abbreviated to:

ISO VG 10 DIN 51519



Appendix A
Approximate kinematic viscosity at other temperatures for different viscosity index values

Table A.1

ISO viscosity grade	Kinematic viscosity range at 40 °C, in mm ² /s	Approximate kinematic viscosity at other temperatures, in mm ² /s, for a viscosity index of								
		0			50			95		
		at 20 °C	at 37,8 °C	at 50 °C	at 20 °C	at 37,8 °C	at 50 °C	at 20 °C	at 37,8 °C	at 50 °C
ISO VG 2	1,98 to 2,42	(2,82 to 3,67)	(2,05 to 2,52)	(1,69 to 2,03)	(2,87 to 3,69)	(2,05 to 2,52)	(1,69 to 2,03)	(2,92 to 3,71)	(2,06 to 2,52)	(1,69 to 2,03)
ISO VG 3	2,88 to 3,52	(4,60 to 5,99)	(3,02 to 3,71)	(2,37 to 2,83)	(4,59 to 5,92)	(3,02 to 3,70)	(2,38 to 2,84)	(4,58 to 5,83)	(3,01 to 3,69)	(2,39 to 2,86)
ISO VG 5	4,14 to 5,06	(7,39 to 9,60)	(4,38 to 5,38)	(3,27 to 3,91)	(7,25 to 9,35)	(4,37 to 5,37)	(3,29 to 3,95)	(7,09 to 9,03)	(4,36 to 5,35)	(3,32 to 3,99)
ISO VG 7	6,12 to 7,48	(12,3 to 16,0)	(6,55 to 8,05)	(4,63 to 5,52)	(11,9 to 15,3)	(6,52 to 8,01)	(4,68 to 5,61)	(11,4 to 14,4)	(6,50 to 7,98)	(4,76 to 5,72)
ISO VG 10	9,00 to 11,0	20,2 to 25,9	9,73 to 12,0	6,53 to 7,83	19,1 to 24,5	9,63 to 11,9	6,65 to 7,99	18,1 to 23,1	9,64 to 11,8	6,78 to 8,14
ISO VG 15	13,5 to 16,5	33,5 to 43,0	14,7 to 18,1	9,43 to 11,3	31,6 to 40,6	14,7 to 18,0	9,62 to 11,5	29,8 to 38,3	14,6 to 17,9	9,80 to 11,8
ISO VG 22	19,8 to 24,2	54,2 to 69,8	21,8 to 26,8	13,3 to 16,0	51,0 to 65,8	21,7 to 26,6	13,6 to 16,3	48,0 to 61,7	21,6 to 26,5	13,9 to 16,6
ISO VG 32	28,8 to 35,2	87,7 to 115	32,0 to 39,4	18,6 to 22,2	82,6 to 108	31,9 to 39,2	19,0 to 22,6	76,9 to 98,7	31,7 to 38,9	19,4 to 23,3
ISO VG 46	41,4 to 50,6	144 to 189	46,6 to 57,4	25,5 to 30,3	133 to 172	46,3 to 56,9	26,1 to 31,3	120 to 153	45,9 to 56,3	27,0 to 32,5
ISO VG 68	61,2 to 74,8	242 to 315	69,8 to 85,8	35,9 to 42,8	219 to 283	69,2 to 85,0	37,1 to 44,4	193 to 244	66,4 to 83,9	38,7 to 46,6
ISO VG 100	90,0 to 110	402 to 520	104 to 127	50,4 to 60,3	356 to 454	103 to 126	52,4 to 63,0	303 to 383	101 to 124	55,3 to 66,6
ISO VG 150	135 to 165	672 to 862	157 to 194	72,5 to 86,9	583 to 743	155 to 191	75,9 to 91,2	486 to 614	153 to 188	80,8 to 97,1
ISO VG 220	198 to 242	1 080 to 1 390	233 to 286	102 to 123	927 to 1 180	230 to 282	108 to 129	761 to 964	226 to 277	115 to 138
ISO VG 320	288 to 352	1 720 to 2 210	341 to 419	144 to 172	1 460 to 1 870	337 to 414	151 to 182	1 180 to 1 500	331 to 406	163 to 196
ISO VG 460	414 to 506	2 700 to 3 480	495 to 608	199 to 239	2 290 to 2 930	488 to 599	210 to 252	1 810 to 2 300	478 to 587	228 to 274
ISO VG 680	612 to 748	4 420 to 5 680	739 to 908	283 to 339	3 700 to 4 740	728 to 894	300 to 360	2 880 to 3 650	712 to 874	326 to 393
ISO VG 1 000	900 to 1 100	7 170 to 9 230	1 100 to 1 350	400 to 479	5 960 to 7 640	1 080 to 1 330	425 to 509	4 550 to 5 780	1 050 to 1 290	466 to 560
ISO VG 1 500	1 350 to 1 650	11 900 to 15 400	1 650 to 2 040	575 to 688	9 850 to 12 600	1 640 to 2 010	613 to 734	7 390 to 9 400	1 590 to 1 960	676 to 812
ISO VG 2 200	1 980 to 2 420	19 400 to 25 200	2 460 to 3 020	810 to 970	15 900 to 20 400	2 420 to 2 970	865 to 1 040	11 710 to 15 300	2 350 to 2 890	950 to 1 150
ISO VG 3 200	2 880 to 3 520	31 180 to 40 300	3 610 to 4 435	1 130 to 1 355	25 360 to 32 600	3 350 to 4 360	1 210 to 1 450	18 450 to 24 500	3 450 to 4 260	1 350 to 1 620

Bracketed values are extrapolated and approximate.



www.iso.org - Search - Amnitz AG-Koeln - 1448775_L_Rr - 237382091 - 2004-04-26 07:15

ANEXO 10. NORMA ASTM D 2422



Designation: D 2422 – 97 (Reapproved 2002)

An American National Standard

Standard Classification of Industrial Fluid Lubricants by Viscosity System¹

This standard is issued under the fixed designation D 2422; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

1. Scope

1.1 This classification is applicable to all petroleum-base fluid lubricants and to those nonpetroleum materials which may be readily blended to produce fluid lubricants of a desired viscosity, that is, lubricants for bearings, gears, compressor cylinders, hydraulic fluids, etc.

1.2 This classification is applicable to fluids ranging in kinematic viscosity from 2 to 3200 cSt (mm^2/s) as measured at a reference temperature of 40°C. In the category of petroleum-base fluids, this covers the range from kerosine to heavy cylinder oils.

1.3 Fluids of either lesser or greater viscosity than the range described in 1.2 are, at present, seldom used as industrial lubricants. Should industrial practices change, then this system, based on a mathematical series of numbers, may be extended to retain its orderly progression.

2. Referenced Documents

- 2.1 *ASTM Document:*
D341 Viscosity-Temperature Charts for Liquid Petroleum Products²
- 2.2 *SAE Standard:*³
J 300 Engine Oil Viscosity Classification
- 2.3 *ISO Standard:*⁴
ISO 3448 Industrial Liquid Lubricants—ISO Viscosity Classification

3. Significance and Use

3.1 This classification establishes a series of definite viscosity levels so that lubricant suppliers, lubricant users, and equipment designers will have a uniform and common basis for designating, specifying, or selecting the viscosity of industrial fluid lubricants.

3.2 This classification is used to eliminate unjustified intermediate viscosities, thereby reducing the total number of viscosity grades used in the lubrication of industrial equipment.

3.3 This system provides a suitable number of viscosity grades, a uniform reference temperature, a uniform viscosity tolerance, and a nomenclature system for identifying the viscosity characteristics of each grade.

3.4 This system implies no evaluation of lubricant quality and applies to no property of a fluid other than its viscosity at the reference temperature. It does not apply to those lubricants used primarily with automotive equipment and identified with an SAE number.

4. Basis of Classification

4.1 Twenty viscosity grades are given in Table 1.

TABLE 1 Viscosity System for Industrial Fluid Lubricants^A

Viscosity System Grade Identification	Mid-Point Viscosity, cSt (mm^2/s) at 40.0°C	Kinematic Viscosity Limits, cSt (mm^2/s) at 40.0°C ^{B,C}	
		min	max
ISO VG 2	2.2	1.98	2.4
ISO VG 3	3.2	2.88	3.52
ISO VG 5	4.6	4.14	5.06
ISO VG 7	6.8	6.12	7.48
ISO VG 10	10	9.00	11.0
ISO VG 15	15	13.5	16.5
ISO VG 22	22	19.8	24.2
ISO VG 32	32	28.8	35.2
ISO VG 46	46	41.4	50.6
ISO VG 68	68	61.2	74.8
ISO VG 100	100	90.0	110
ISO VG 150	150	135	165
ISO VG 220	220	198	242
ISO VG 320	320	288	352
ISO VG 460	460	414	506
ISO VG 680	680	612	748
ISO VG 1000	1000	900	1100
ISO VG 1500	1500	1350	1650
ISO VG 2200	2200	1980	2420
ISO VG 3200	3200	2880	3520

^AThis system implies no evaluation of quality.

^BThis system is used in ISO 3448.

^CIf 40°C is not the temperature used when determining the viscosity (as is sometimes the case with very viscous fluids) then the related viscosity at 40°C shall be established by using Viscosity Temperature Charts D341.

¹ This classification is under the jurisdiction of ASTM Committee D02 on Petroleum Products and Lubricants and is the direct responsibility of Subcommittee D02.L on Industrial Lubricants.

Current edition approved June 10, 1997. Published October 1997. Originally published as D 2422 – 65 T. Last previous edition D 2422 – 86 (1996).

² *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 05.01.

³ Available from the Society of Automotive Engineers, 400 Commonwealth Dr., Warrendale, PA 15096.

⁴ Available from American National Standards Institute, 25W. 43rd St., 4th Floor, New York, NY 10036.

4.2 Each grade shall be designated by its nominal viscosity at 40°C.

4.3 The permissible variance in viscosity of each grade shall be as shown in the two right-hand columns of Table 1. These limits are based upon a $\pm 10\%$ deviation from the mathematical values which were used as the basis of construction of this system.

4.4 The lubricant supplier may choose to exert a manufacturing control on a given product that is closer than this $\pm 10\%$ tolerance. It is to be understood that any different percentage variation that he uses will still guarantee maximum and minimum values that are not outside the limits of the standard viscosity grade limits. However, the lubricant purchaser or the equipment designer shall not normally specify control closer than the maximum and minimums established herein for a given grade. Any exception to this rule shall be handled outside the scope of this system and on a direct consumer-supplier relationship.

5. Adoption of System

5.1 Adoption of this viscosity system is to be voluntary on the part of all persons or organizations. The system will be effective only if used widely by designers, producers, and consumers. There is nothing to prohibit use of a viscosity grade

not listed in the system if the producer and consumer mutually agree. It may be expected, however, that viscosity grades not in accordance with this classification will be less readily available to the purchaser than those grades which do conform.

5.2 For the sake of world-wide uniformity of nomenclature in identifying the viscosity characteristics of fluid lubricants the following wording shall be used to designate a particular viscosity grade:

ISO viscosity grade ...

which may be abbreviated to:

ISO VG ...

The wording would be followed by the nominal viscosity at 40°C expressed in centistokes (millimetres squared per second) units of measurement.

5.3 The establishment of standardized viscosity grades as has been done herein shall not imply nor require that every viscosity grade be made available by all lubricant suppliers for each and every type of fluid which he markets. The availability will be dictated by the demand that exists in any one locality at any given point in time.

6. Keywords

6.1 classification; lubricant; viscosity

ASTM International takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM International Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, at the address shown below.

This standard is copyrighted by ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-832-9585 (phone), 610-832-9555 (fax), or service@astm.org (e-mail); or through the ASTM website (www.astm.org).

ANEXO 11. NORMA ASTM D3381:2020

الهيئة السعودية للمواصفات والمقاييس والجودة

Saudi Standards, Metrology and Quality Org (SASO)

SASO / FDS/ ASTM D3381/D3381M: 2020

ASTM D3381/D3381M: 2018

المواصفة القياسية للرابط الاسفلتي المصنف طبقاً لدرجة اللزوجة للاستخدام في

بناء الرصف

Standard Specification for
Viscosity-Graded Asphalt Binder for Use in Pavement
Construction

ICS: 93.080.20

THIS DOCUMENT IS A DRAFT SAUDI STANDARD CIRCULATED FOR COMMENT. IT IS, THEREFORE SUBJECT TO CHANGE AND MAY NOT BE REFERRED TO AS A SAUDI STANDARD UNTIL APPROVED BY THE BOARD OF DIRECTORS.

Foreword

Saudi Standards, Metrology and Quality Organization (SASO) has Updated the Saudi Standard No. SASO 1776:2000" Asphalt (Bituminous) materials used in pavement – Asphalt (Bituminous) materials classified according to viscosity grade " by adopting Standard No. ASTM D3381/D3381M:2018 "Standard Specification for Viscosity-Graded Asphalt Binder for Use in Pavement Construction" issued by ASTM which has been translated into Arabic.

This standard has been approved As a Saudi Standard without any technical Modifications. The approved Standard will replace and supersede the Saudi Standard No. SASO 1776:2000



Designation: D3381/D3381M – 18

Standard Specification for Viscosity-Graded Asphalt Binder for Use in Pavement Construction¹

This standard is issued under the fixed designation D3381/D3381M; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This standard has been approved for use by agencies of the U.S. Department of Defense.

1. Scope

1.1 This specification covers asphalt binders graded by viscosity at 60 °C [140 °F] for use in pavement construction. Four sets of limits are offered in this specification. The purchaser shall specify the applicable table of limits. In the event the purchaser does not specify limits, Table 1 shall apply. For asphalt binders graded by penetration at 25 °C [77 °F], see Specification D946/D946M. If needed, volume corrections for asphalt binders should be made according to Practice D4311/D4311M.

1.2 The values stated in either SI units or inch-pound units are to be regarded separately as standard. The values stated in each system may not be exact equivalents; therefore, each system shall be used independently of the other. Combining values from the two systems may result in nonconformance with the standard.

1.3 *This international standard was developed in accordance with internationally recognized principles on standardization established in the Decision on Principles for the Development of International Standards, Guides and Recommendations issued by the World Trade Organization Technical Barriers to Trade (TBT) Committee.*

2. Referenced Documents

2.1 *ASTM Standards:*²

D5/D5M Test Method for Penetration of Bituminous Materials

D36/D36M Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus)

D70 Test Method for Density of Semi-Solid Asphalt Binder (Pycnometer Method)

¹ This specification is under the jurisdiction of ASTM Committee D04 on Road and Paving Materials and is the direct responsibility of Subcommittee D04.40 on Asphalt Specifications.

Current edition approved Dec. 15, 2018. Published January 2019. Originally approved in 1975. Last previous edition approved in 2013 as D3381/D3381M – 13. DOI: 10.1520/D3381_D3381M-18.

² For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, www.astm.org, or contact ASTM Customer Service at service@astm.org. For *Annual Book of ASTM Standards* volume information, refer to the standard's Document Summary page on the ASTM website.

D92 Test Method for Flash and Fire Points by Cleveland Open Cup Tester

D95 Test Method for Water in Petroleum Products and Bituminous Materials by Distillation

D113 Test Method for Ductility of Asphalt Materials

D140/D140M Practice for Sampling Asphalt Materials

D946/D946M Specification for Penetration-Graded Asphalt Binder for Use in Pavement Construction

D1754/D1754M Test Method for Effects of Heat and Air on Asphaltic Materials (Thin-Film Oven Test)

D2042 Test Method for Solubility of Asphalt Materials in Trichloroethylene

D2170/D2170M Test Method for Kinematic Viscosity of Asphalts

D2171/D2171M Test Method for Viscosity of Asphalts by Vacuum Capillary Viscometer

D2872 Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test)

D4311/D4311M Practice for Determining Asphalt Volume Correction to a Base Temperature

D7553 Test Method for Solubility of Asphalt Materials in N-Propyl Bromide

3. Manufacture

3.1 The asphalt binder shall be prepared from crude petroleum by suitable methods.

4. Physical Requirements

4.1 The asphalt binder shall be homogeneous, free from water, and shall not foam when heated to 177 °C [350 °F].

4.2 The asphalt binders shall conform to the requirements given in Table 1, Table 2, Table 3, or Table 4, as specified by the purchaser.

5. Methods of Sampling and Testing

5.1 Sample and test asphalt binders in accordance with the following methods:

5.1.1 *Sampling*—Practice D140/D140M.

5.1.2 *Water*—Test Method D95.

5.1.3 *Viscosity at 60 °C [140 °F]*—Test Method D2171/D2171M.

TABLE 1 Requirements for Asphalt Binder, Viscosity Graded at 60 °C [140 °F] Based on Original Asphalt

Test	Viscosity Grade					
	AC-2.5	AC-5	AC-10	AC-20	AC-30	AC-40
Viscosity, 60 °C [140 °F], Pa·s	25 ± 5	50 ± 10	100 ± 20	200 ± 40	300 ± 60	400 ± 80
Viscosity, 135 °C [275 °F], min, mm ² /s	80	110	150	210	250	300
Penetration, 25 °C [77 °F], 100 g, 5 s, min	200	120	70	40	30	20
Flash point, Cleveland open cup, min, °C [°F]	165 [325]	175 [350]	220 [425]	230 [450]	230 [450]	230 [450]
Solubility in trichloroethylene, ^a min, %	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0
Tests on residue from thin-film oven test:						
Viscosity, 60 °C [140 °F], max, Pa·s	125	250	500	1000	1500	2000
Ductility, 25 °C [77 °F], 5 cm/min, min, cm	100 ^b	100	50	20	15	10

^a Solubility in N-Propyl Bromide can be an alternate method to solubility in TCE.

^b If ductility is less than 100, material will be accepted if ductility at 15 °C [60 °F] is 100 minimum at a pull rate of 5 cm/min.

TABLE 2 Requirements for Asphalt Binder, Viscosity Graded at 60 °C [140 °F] Based on Original Asphalt

NOTE 1—Table 2 specifies asphalts that are less temperature susceptible than those specified by Table 1. Asphalts that meet Table 2 requirements will also meet Table 1 requirements of the same grade.

Test	Viscosity Grade					
	AC-2.5	AC-5	AC-10	AC-20	AC-30	AC-40
Viscosity, 60 °C [140 °F], Pa·s	25 ± 5	50 ± 10	100 ± 20	200 ± 40	300 ± 60	400 ± 80
Viscosity, 135 °C [275 °F], min, mm ² /s	125	175	250	300	350	400
Penetration, 25 °C [77 °F], 100 g, 5 s, min	220	140	80	60	50	40
Flash point, Cleveland open cup, min, °C [°F]	165 [325]	175 [350]	220 [425]	230 [450]	230 [450]	230 [450]
Solubility in trichloroethylene, ^a min, %	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0
Tests on residue from thin-film oven test:						
Viscosity, 60 °C [140 °F], max, Pa·s	125	250	500	1000	1500	2000
Ductility, ^b 25 °C [77 °F], 5 cm/min, min, cm	100 ^b	100	75	50	40	25

^a Solubility in N-Propyl Bromide can be an alternate method to solubility in TCE.

^b If ductility is less than 100, material will be accepted if ductility at 15 °C [60 °F] is 100 minimum at a pull rate of 5 cm/min.

TABLE 3 Requirements for Asphalt Binder, Viscosity Graded at 60 °C [140 °F] Based on Residue from Rolling Thin-Film Oven Test

Tests on Residue from Rolling Thin-Film Oven Test: ^a	Viscosity Grade				
	AR-1000	AR-2000	AR-4000	AR-8000	AR-16000
Viscosity, 60 °C [140 °F], Pa·s	100 ± 25	200 ± 50	400 ± 100	800 ± 200	1600 ± 400
Viscosity, 135 °C [275 °F], min, mm ² /s	140	200	275	400	550
Penetration, 25 °C [77 °F], 100 g, 5 s, min	65	40	25	20	20
% of original penetration, 25 °C [77 °F], min	...	40	45	50	52
Ductility, 25 °C [77 °F], 5 cm/min, min, cm	100 ^b	100 ^b	75	75	75
Tests on original asphalt:					
Flash point, Cleveland open cup, min, °C [°F]	205 [400]	220 [425]	225 [440]	230 [450]	240 [460]
Solubility in trichloroethylene, ^c min, %	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0

^a Thin-film oven test may be used, but the rolling thin-film oven test shall be the referee method.

^b If ductility is less than 100, material will be accepted if ductility at 15 °C [60 °F] is 100 minimum at a pull rate of 5 cm/min.

^c Solubility in N-Propyl Bromide can be an alternate method to solubility in TCE.

5.1.4 *Viscosity at 135 °C [275 °F]*—Test Method **D2170/D2170M**.

5.1.5 *Penetration*—Test Method **D5/D5M**.

5.1.6 *Flash Point, Cleveland Open Cup*—Test Method **D92**.

5.1.7 *Solubility in Trichloroethylene*—Test Method **D2042**.

5.1.8 *Thin-Film Oven Test*—Test Method **D1754/D1754M** (see Tables 1 and 2).

5.1.9 *Rolling Thin-Film Oven Test*—Test Method **D2872** (see Tables 3 and 4).

5.1.10 *Ductility*—Test Method **D113**.

5.1.11 *Softening Point*—Test Method **D36/D36M**.

5.1.12 *Density*—Test Method **D70**.

5.1.13 *Solubility in N-propyl Bromide*—Test Method **D7553**.

6. Keywords

6.1 asphalt binder; bitumen; pavements; viscosity

TABLE 4 Requirements for Asphalt Binder, Viscosity Graded at 60 °C [140 °F] Based on Original Asphalt

NOTE 1—Table 4 shows the limits typically used in Mexico, Central, and South America

Test	Viscosity Grade				
	AC-6	AC-10	AC-20	AC-30	AC-42
Viscosity, 60 °C [140 °F], P	600 ± 200	1000 ± 200	2000 ± 400	3000 ± 600	4200 ± 600
Viscosity, 135 °C [275 °F], min, cSt	175	250	300	350	400
Flash point, Cleveland open cup, min, °C [°F]	177 [350]	219 [425]	232 [450]	232 [450]	232 [450]
Solubility in trichloroethylene, ^c min, %	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0
Specific gravity 25 °C/25 °C [77 °F/77 °F]	Report	Report	Report	Report	Report
Penetration index ^d	-1.5 to +1	-1.5 to +1	-1.5 to +1	-1.5 to +1	-1.5 to +1
Tests on residue from rolling thin-film oven test:					
Mass Change, %w/w max	1.5	1.0	1.0	1.0	1.0
Viscosity, 60 °C [140 °F], max, P	3000	5000	8000	12 000	20 000
Ductility, ^a 25 °C [77 °F], 5 cm/min, min, cm	100	75	50	40	25

^a If ductility is less than 100, material will be accepted if ductility at 15.5 °C [60 °F] is 100 minimum at a pull rate of 5 cm/min.

$$^d \text{Penetration Index} = \frac{1952 - 500 \log pen - 20SP}{50 \log pen - SP - 120}$$

where:

pen = penetration at 25 °C [77 °F], 100g, 5s

SP = softening point (°C)

^c Solubility in N-Propyl Bromide can be an alternate method to solubility in TCE.

ASTM International takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM International Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, at the address shown below.

This standard is copyrighted by ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-832-9585 (phone), 610-832-9555 (fax), or service@astm.org (e-mail); or through the ASTM website (www.astm.org). Permission rights to photocopy the standard may also be secured from the Copyright Clearance Center, 222 Rosewood Drive, Danvers, MA 01923, Tel: (978) 646-2600; http://www.copyright.com/

ANEXO 12. ANALISIS DE PRECIOS UNITARIOS

ANALISIS DE PRECIOS UNITARIOS

UNIVERSIDAD LAICA VICENTE ROCAFUERTE DE GUAYAQUIL

FACULTAD DE INGENIERÍA, INDUSTRIA Y CONSTRUCCIÓN

NOMBRE DEL PROYECTO: PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MEZCLA ASFÁLTICA RECICLADA CON ACEITE DE MOTOR RECICLADO

Rubro : CAPA DE RODADURA DE HORMIGON ASFALTICO MEZCLADO EN
Detalle : PLANTA E=3" (7.5cm)

Unidad: m²

EQUIPOS					
Descripción	Cantidad (A)	Tarifa (B)	Costo hora C=(AxB)	Rendimiento R	Costo D=(CxR)
HERRAMIENTAS MENORES (5% M.O.)					0.02
CARGADORA FRONTAL 110 HP.	1.00	35.20	35.20	0.0040	0.14
TERMINADORA DE ASFALTO - 95 HP	1.00	52.80	52.80	0.0040	0.21
PLANTA ELÉCTRICA 175 KVA	1.00	32.59	32.59	0.0040	0.13
RODILLO VIBRATORIO LISO - 107 HP.	1.00	47.42	47.42	0.0040	0.19
RODILLO NEUMÁTICO	1.00	39.84	39.84	0.0040	0.16
PLANTA DE ASFALTO - 90 TON/H	1.00	200.76	200.76	0.0040	0.80
SUB TOTAL (M)					1.65
MANO DE OBRA					
Descripción	Cantidad (A)	Jornal/hr (B)	Costo hora C=(AxB)	Rendimiento R	Costo D=(CxR)
OPERADOR ACABADORA DE PAVIMENTO ASFALTICO OP-C1	1.00	4.29	4.29	0.0040	0.02
OPERADOR DE RODILLO AUTOPROPULSADO OP-C2	2.00	4.09	8.18	0.0040	0.03
OPERADOR RESPONSABLE DE LA PLANTA ASFÁLTICA EO-C2 (G2)	1.00	4.09	4.09	0.0040	0.02
PEÓN EO-E2 (OC I)	10.00	3.83	38.30	0.0040	0.15
OPERADOR DE EQUIPO EN GENERAL	1.00	4.29	4.29	0.0040	0.02
OPERADOR CARGADORA FRONTAL (PAYLOADER SOBRE RUEDAS U)	1.00	4.29	4.29	0.0040	0.02
AYUDANTE MAQUINARIA EO-D2 (OC III)	6.00	3.87	23.22	0.0040	0.09
INSPECTOR DE OBRA EO-B3 (OC V)	1.00	4.30	4.30	0.0040	0.02
SUB TOTAL (N)					0.36
MATERIALES					
Descripción	Unidad	Cantidad (A)	Precio Unitario (B)	Costo C=(AxB)	
AGREGADO 1/2"	M3	0.022	14.00	0.31	
AGREGADO 3/8"	M3	0.040	14.00	0.56	
ARENA FINA	M3	0.008	16.00	0.13	
ASFALTO AC-20	KG	8.171	0.48	3.92	
DIESEL	GLN	0.175	1.90	0.33	
SUB TOTAL (O)					5.24
TRANSPORTE					
DESCRIPCION	Unidad	Cantidad (A)	Tarifa (B)	Costo C=(AxB)	
TRANSPORTE DE MEZCLA ASFALTICA	M3-KM	4.80	0.24	1.15	
SUB TOTAL (P)					1.15

TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)	8.41
INDIRECTOS 16%	1.35
UTILIDAD 4%	0.34
COSTO TOTAL DEL RUBRO	10.10
VALOR OFERTADO	10.10

Este precio no incluye Iva

ANALISIS DE PRECIOS UNITARIOS
UNIVERSIDAD LAICA VICENTE ROCAFUERTE DE GUAYAQUIL
 FACULTAD DE INGENIERÍA, INDUSTRIA Y CONSTRUCCIÓN

NOMBRE DEL PROYECTO: PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MEZCLA ASFÁLTICA RECICLADA CON ACEITE DE MOTOR RECICLADO

Rubro : CAPA DE RODADURA DE MEZCLA ASFALTICA RECICLADO CON ACEITE DE MOTOR RECICLADO MEZCLADO EN PLANTA E=3" **Unidad:** m²
Detalle : (7.5cm)

EQUIPOS					
Descripción	Cantidad (A)	Tarifa (B)	Costo hora C=(AxB)	Rendimiento R	Costo D=(CxR)
HERRAMIENTAS MENORES (5% M.O.)					0.02
CARGADORA FRONTAL 110 HP.	1.00	35.20	35.20	0.0040	0.14
TERMINADORA DE ASFALTO - 95 HP	1.00	52.80	52.80	0.0040	0.21
PLANTA ELÉCTRICA 175 KVA	1.00	32.59	32.59	0.0040	0.13
RODILLO VIBRATORIO LISO - 107 HP.	1.00	47.42	47.42	0.0040	0.19
RODILLO NEUMATICO	1.00	39.84	39.84	0.0040	0.16
PLANTA DE ASFALTO - 90 TON./H	1.00	200.76	200.76	0.0040	0.80
SUB TOTAL (M)					1.65
MANO DE OBRA					
Descripción	Cantidad (A)	Jornal/hr (B)	Costo hora C=(AxB)	Rendimiento R	Costo D=(CxR)
OPERADOR ACABADORA DE	1.00	4.29	4.29	0.0040	0.02
OPERADOR DE RODILLO	2.00	4.09	8.18	0.0040	0.03
OPERADOR RESPONSABLE DE LA	1.00	4.09	4.09	0.0040	0.02
PEÓN EO-E2 (OC I)	10.00	3.83	38.30	0.0040	0.15
OPERADOR DE EQUIPO EN GENERAL	1.00	4.29	4.29	0.0040	0.02
OPERADOR CARGADORA FRONTAL	1.00	4.29	4.29	0.0040	0.02
AYUDANTE MAQUINARIA EO-D2 (OC III)	6.00	3.87	23.22	0.0040	0.09
INSPECTOR DE OBRA EO-B3 (OC V)	1.00	4.30	4.30	0.0040	0.02
SUB TOTAL (N)					0.36
MATERIALES					
Descripción	Unidad	Cantidad (A)	Precio Unitario (B)	Costo C=(AxB)	
AGREGADO DE LA MEZCLA ASFALTICA RECICLADA	M3	0.064	0.00	0.00	
ACEITE DE MOTOR RECICLADO	GLN	0.223	0.40	0.09	
ASFALTO AC-20	KG	6.993	0.48	3.36	
DIESEL	GLN	0.175	1.90	0.33	
SUB TOTAL (O)					3.78
TRANSPORTE					
DESCRIPCION	Unidad	Cantidad (A)	Tarifa (B)	Costo C=(AxB)	
TRANSPORTE DE MEZCLA ASFALTICA	M3-KM	4.80	0.24	1.15	
SUB TOTAL (P)					1.15

TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)	6.95
INDIRECTOS 16%	1.11
UTILIDAD 4%	0.28
COSTO TOTAL DEL RUBRO	8.34
VALOR OFERTADO	8.34

Este precio no incluye Iva					
----------------------------	--	--	--	--	--