

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

"Evaluación del efecto de los agregados de asfalto reciclado en las propiedades físico-mecánicas de las mezclas asfálticas en frío"

Trabajo de Titulación, Modalidad proyecto experimental previo a la obtención del Título de Ingeniera Civil

AUTORA: Cristal Monserrat Romero Carrera

TUTOR: Ing. Galo Wilfrido Núñez Aldaz, Mg.

Ambato - Ecuador

Junio - 2026

APROBACIÓN DEL TUTOR

En mi calidad de tutor del trabajo experimental, previo a la obtención del Título de Ingeniero Civil, con el tema: **"EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LOS AGREGADOS DE ASFALTO RECICLADO EN LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS EN FRÍO"**, elaborado por el estudiante Cristal Monserrat Romero Carrera, portador de la cédula de ciudadanía número 0550637615, estudiante de la Carrera de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica.

Certifico:

- Que el presente trabajo experimental es original de su autor.
- Ha sido revisado cada uno de sus capítulos componentes.
- Está concluido en su totalidad.

Ambato, junio 2026

.....

Ing. Galo Wilfrido Núñez Aldaz, Mg.

C.C.: 1802229227

TUTOR

AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, **Cristal Monserrat Romero Carrera**, con C.I. 0550637615 declaro que todos los contenidos y actividades expuestos en el desarrollo del presente trabajo experimental con el tema: **"EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LOS AGREGADOS DE ASFALTO RECICLADO EN LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS EN FRÍO"**, así como también los análisis estadísticos, gráficos, conclusiones y recomendaciones son de mi exclusiva responsabilidad como autor del trabajo experimental, a excepción de las referencias bibliográficas citadas en el mismo. En tal virtud, el contenido, efectos legales y académicos que se desprenden del mismo son de exclusiva responsabilidad del autor.

Ambato, junio 2026

.....

Cristal Monserrat Romero Carrera

C.C.: 0550637615

AUTOR

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que haga de este trabajo experimental o parte de él, un documento disponible para su lectura consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los Derechos en línea patrimoniales de mi trabajo experimental, con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este documento dentro de las regulaciones de la Universidad, siempre y cuando esta reproducción no suponga una ganancia económica y se realice respetando mis derechos de autor.

Ambato, junio 2026

.....

Romero Carrera Cristal Monserrat

C.C.: 0550637615

AUTOR

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

Los miembros del Tribunal de Grado aprueban el informe del trabajo experimental, realizado por el estudiante **Cristal Monserrat Romero Carrera**, de la Carrera de Ingeniería Civil bajo el tema: **"EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LOS AGREGADOS DE ASFALTO RECICLADO EN LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS EN FRÍO", Modalidad experimental.**

Ambato, junio 2026

Para constancia firma:

.....	.....
Ing. Diego Sebastián Chérrez Gavilanes, Mg.	Ing. Alex Gustavo López Arboleda, Mg.
C.C.: 1803324894	C.C.: 1802919322
MIEMBRO CALIFICADOR	**MIEMBRO CALIFICADOR**

DEDICATORIA

Con profundo amor y gratitud, dedico este trabajo a Dios, quien ha sido mi guía constante y quien me ha brindado la fortaleza y sabiduría necesaria para alcanzar esta importante meta en mi vida.

A mis padres, Orlando y Clary, por su amor incondicional, sacrificio y apoyo permanente. Gracias por ser mi mayor ejemplo de constancia y dedicación, por impulsarme a seguir adelante y por confiar en mí en cada paso de este camino.

A mis hermanos, Carolina e Israel, por su cariño, compañía y por ser parte fundamental de este proceso, acompañándome en cada etapa con su apoyo y cercanía.

A mi abuelito Rubén (+), quien ocupa un lugar muy especial en mi corazón. Su amor, sus enseñanzas y los recuerdos compartidos continúan siendo una fuente de inspiración que me acompaña cada día.

A las personas que han estado presentes a lo largo de esta etapa, quienes con sus palabras de ánimo y su cariño hicieron este proceso una experiencia significativa, dejando en mí recuerdos y aprendizajes que siempre llevaré conmigo.

Cristal Monserrat Romero Carrera

AGRADECIMIENTO

Detrás de cada meta alcanzada está la presencia de un Dios bueno, que guía, sostiene y da fuerzas incluso en los momentos más difíciles. A Él elevo mi más profundo agradecimiento por acompañarme en cada paso de este camino, por darme la sabiduría necesaria y por no soltarme a lo largo de este proceso.

A mis padres, Orlando y Clary, y a mis hermanos, Carolina e Israel, quienes han sido mi mayor apoyo y mi refugio en todo momento. Gracias por su amor incondicional, por su paciencia y por impulsarme siempre a seguir adelante. Cada palabra de aliento, cada gesto y cada sacrificio han sido fundamentales para alcanzar este logro.

Expreso mi gratitud a la Universidad Técnica de Ambato, a la Carrera de Ingeniería Civil y a sus docentes por su valiosa contribución a mi formación académica y profesional.

Al Ing. Galo Núñez, en su calidad de tutor, agradezco por el seguimiento brindado durante el desarrollo de este trabajo.

De manera especial, al Ing. Favio Portilla, expreso mi profundo agradecimiento por su apoyo permanente, su guía cercana y el tiempo dedicado en cada etapa de este proceso. Su aporte fue determinante para culminar esta investigación.

A JEAL Construcciones, particularmente al Ing. José Alvarado Lascano y al Ing. Roberto Vintimilla, por la confianza, la apertura y el respaldo brindado.

A mis compañeros de universidad, Katherin, Camila, Alex y Christian, con quienes compartí no solo horas de estudio, sino también experiencias que marcaron esta etapa en mi vida. Gracias por su amistad, por su apoyo en los momentos difíciles y por cada palabra de ánimo que me ayudo a seguir adelante.

Finalmente, gracias a todos quienes formaron parte de este camino, de una u otra manera. Hoy cierro esta etapa con el corazón lleno de gratitud, sabiendo que este logro no es solo mío, sino también de quienes caminaron conmigo.

Cristal Monserrat Romero Carrera

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDO

PORTADA……i

APROBACIÓN DEL TUTOR..... II

AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN..... III

DERECHOS DE AUTOR..... IV

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO..... V

DEDICATORIA VI

AGRADECIMIENTO..... VII

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDO..... VIII

ÍNDICE DE FIGURAS..... XIII

ÍNDICE DE TABLAS..... XV

ÍNDICE DE ANEXOS..... XVIII

SIGLAS, ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS..... XX

RESUMEN EJECUTIVO XXI

ABSTRACT..... XXII

CAPÍTULO I.- MARCO TEÓRICO 1

I. JUSTIFICACIÓN 1

II. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS..... 2

III. OBJETIVOS..... 5

A. OBJETIVO GENERAL 5
B. OBJETIVOS ESPECÍFICOS 5

CAPÍTULO II.- METODOLOGÍA 6

I. EQUIPOS Y MATERIALES 6

A. MEZCLA ASFÁLTICA 7
1) Mezcla en caliente 7
2) Mezcla en frío 8
B. AGREGADOS CONVENCIONALES 10
1) Agregado grueso 10
2) Agregado fino 11
3) Relleno mineral filler 11
C. PAVIMENTO ASFÁLTICO RECICLADO 12
1) Campo de aplicación 13
2) Procedimiento de fresado del pavimento asfáltico recuperado 13
3) Ventajas del material fresado o pavimento asfáltico recuperado 14
4) Especificaciones para material asfáltico recuperado 14
D. LIGANTES BITUMINOSOS 15
1) Cemento asfáltico 15
2) Asfaltos diluidos 18
3) Emulsión asfáltica 19
A. FASE I 24
1) Ensayo de extracción de asfalto 24
2) Gravedad específica y absorción del agregado grueso 25
3) Gravedad específica y absorción del agregado fino 26
4) Análisis granulométrico 27
5) Masa unitaria (peso volumétrico) del agregado grueso 28
6) Masa unitaria (peso volumétrico) del agregado fino 29
7) Resistencia al desgaste por abrasión 29
8) Punto de reblandecimiento o ablandamiento del cemento asfáltico AC-20 31

9) Punto de inflamación y combustión del cemento asfáltico AC-20 32
10) Gravedad específica del cemento asfáltico AC-20 33
11) Residuo por evaporación de la emulsión asfáltica CSS -1h 34
12) Gravedad específica de la emulsión asfáltica CSS-1h 34
B. FASE II 36
1) Elaboración de briquetas y ensayo Marshall 36
2) Método RICE o densidad máxima teórica 38
C. FASE III 40

I. MÉTODOS 40

A. FASE I 40
1) Localización y obtención de materiales 40
2) Muestreo de campo – NTE INEN 695 45
3) Ensayo de extracción de asfalto – ASTM D 2172 46
4) Análisis granulométrico – ASTM C 136 49
5) Gravedad específica y absorción del agregado grueso – NTE INEN 857 52
6) Gravedad especifica y absorción del agregado fino – NTE INEN 856 55
7) Masa unitaria (peso volumétrico) de los agregados – NTE INEN 858 57
8) Resistencia al desgaste por abrasión – ASTM C 131 58
9) Punto de reblandecimiento del cemento asfáltico AC-20 – AASHTO T 53-74 60
10) Punto de inflamación y combustión del cemento asfáltico AC-20 – ASTM T 48-74 . 61
11) Gravedad específica del cemento asfáltico AC-20 – ASTM D 70 63
12) Residuo por evaporación de la emulsión asfáltica CSS-1h – NTE INEN 905 64
13) Gravedad específica de la emulsión asfáltica CSS-1h – ASTM D 6937 65
B. FASE II 67
1) Diseño de mezclas asfálticas 67
2) Dosificación de la mezcla asfáltica en frío 70
3) Elaboración de briquetas - ASTM D 6926-16 70
4) Compactación de briquetas – ASTM D 6926-16 71
5) Desencofrado de briquetas 72
6) Ensayos de briquetas compactadas 73

7) Método Rice o gravedad específica teórica máxima – ASTM D 2041 79
C. FASE III 81
1) Evaluación y comparación de resultados obtenidos 81

CAPÍTULO III.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN 82

I. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS 82

A. FASE I 82
1) Análisis de resultados de los ensayos realizados a los agregados reciclados "RAP" 83
2) Análisis de resultados de los ensayos realizados a los agregados nuevos 87
3) Análisis de resultados de los ensayos realizados al cemento asfáltico AC-20 90
4) Análisis de resultados de los ensayos realizados a la emulsión asfáltica CSS-1h 92
B. FASE II 93
1) Análisis granulométrico combinado para una Mezcla asfáltica en frío utilizando agregados nuevos 94
2) Análisis granulométrico combinado para una Mezcla asfáltica en frío utilizando agregados nuevos y reciclados 96
3) Diseño de la mezcla asfáltica en frío con agregados nuevos utilizando diferentes porcentajes de emulsión asfáltica siguiendo las especificaciones establecidas por el Método Marshall / Norma MOP–001 –F–2002 98
4) Diseño de la mezcla asfáltica en frío con agregados nuevos y reciclados utilizando diferentes porcentajes de emulsión asfáltica siguiendo las especificaciones establecidas por el Método Marshall / Norma MOP–001 –F–2002 101
5) FASE III 109

II. VERIFICACIÓN DE HPÓTESIS 114

A. HIPÓTESIS 114
B. VERIFICACIÓN DE LA HIPÓTESIS 114

CAPÍTULO IV.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 116

I. CONCLUSIONES 116

II. RECOMENDACIONES 118

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 119

ANEXOS 124

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1 Panorámica general de una planta de mezcla asfáltica en caliente [13] (2004).....7
Fig. 2 Equipo móvil para la fabricación y extensión de mezclas en frío [13] (2004). 8
Fig. 3 Proceso de trituración del material pétreo [13] (2004). 10
Fig. 4 Agregado grueso [13] (2004).....11
Fig. 5 Agregado fino [13] (2004). 11
Fig. 6 Relleno mineral o filler [13] (2004).....12
Fig. 7 Componentes de la mezcla asfáltica reciclada [13] (2004). 13
Fig. 8 Cemento asfáltico [10] (2020). 16
Fig. 9 Esquema de una emulsión [19] (2014). 19
Fig. 10 Proceso de rotura según su carga eléctrica [19] (2014). 21
Fig. 11 Ubicación de la muestra de los agregados reciclados (RAP) 41
Fig. 12 Proceso de fresado de la vía "El Placer" 42
Fig. 13 Ubicación de la cantera "KUMOCHI".....42
Fig. 14 Ubicación de la mina "KUMOCHI" 43
Fig. 15 Ubicación Planta de asfalto - JEAL Construcciones 43
Fig. 16 Entrada planta de asfalto - JEAL Construcciones.....44
Fig. 17 Ubicación de la Fabrica Chova – Imptek.....44
Fig. 18 Despacho de emulsión asfáltica - Planta industrial Imptek 45
Fig. 19 Toma de muestras del material convencional en campo 46
Fig. 20 Toma de muestras del material reciclado en campo 46
Fig. 21 Proceso de extracción del asfalto residual de los agregados reciclados 49
Fig. 22 Proceso del ensayo de análisis granulométrico.....52
Fig. 23 Proceso del ensayo de gravedad específica y absorción del agregado grueso.....54
Fig. 24 Proceso del ensayo de gravedad específica y absorción del agregado fino.....56
Fig. 25 Proceso del ensayo de peso unitario suelto del agregado grueso.....58
Fig. 26 Proceso del ensayo de peso unitario suelto del agregado fino.....58
Fig. 27 Proceso del ensayo de resistencia al desgaste por abrasión.....60
Fig. 28 Proceso del ensayo de punto de reblandecimiento del cemento asfáltico AC-20.....61
Fig. 29 Proceso del ensayo de punto de inflamación y combustión del cemento asfáltico AC-2062

Fig. 30 Proceso del ensayo de gravedad específica del cemento asfáltico AC-20.....64
Fig. 31 Proceso del ensayo de residuo por evaporación de la emulsión asfáltica CSS-1h 65
Fig. 32 Proceso del ensayo de gravedad específica de la emulsión asfáltica CSS-1h 66
Fig. 33 Ejemplo de curvas – Método Marshall [8] (2023).....70
Fig. 34 Proceso de elaboración de briquetas 71
Fig. 35 Proceso de compactación de briquetas 72
Fig. 36 Proceso de desencofrado de briquetas 73
Fig. 37 Proceso para la gravedad específica bulk de las briquetas 74
Fig. 38 Proceso del ensayo de estabilidad y flujo 79
Fig. 39 Proceso del método RICE.....80
Fig. 40 Curva granulométrica del promedio de los agregados reciclados 85
Fig. 41 Curva granulométrica de la mezcla de diseño con agregados nuevos 95
Fig. 42 Curva granulométrica de la mezcla de diseño con agregados nuevos y reciclados.....97
Fig. 43 Curvas Método Marshall con agregados nuevos 99
Fig. 44 Curvas Método Marshall con agregados nuevos 100
Fig. 45 Curvas Método Marshall con agregados nuevos y reciclados 102
Fig. 46 Curvas Método Marshall con agregados nuevos y reciclados 103
Fig. 47 Análisis comparativo de la Estabilidad Marshall.....110
Fig. 48 Análisis comparativo del Flujo 111
Fig. 49 Análisis comparativo de los Vacíos de aire 112
Fig. 50 Análisis comparativo de la Densidad (Gmb) 113

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA I ENSAYOS RECOMENDADOS PARA EL MATERIAL FRESADO (2012) [17]....15
TABLA II ESPECIFICACIONES GENERALES DEL CEMENTO ASFÁLTICO MOP-001-F-2002 [2] 17
TABLA III CARACTERÍSTICAS DEL CEMENTO ASFÁLTICO AC-20 (2026) [18].....18
TABLA IV CLASIFICACIÓN SEGÚN LA CARGA ELÉCTRICA DE LA EMULSIÓN ASFÁLTICA.....20
TABLA V NOMENCLATURA PARA EMULSIONES ASFÁLTICAS (1997) [6].....21
TABLA VI CARACTERÍSTICAS Y APLICACIÓN DE LAS EMULSIONES ASFÁLTICAS (2022) [20].....22
TABLA VII REQUISITOS DE EMULSIONES ASFÁLTICAS CATIÓNICAS (2002) [2] 23
TABLA VIII INSTRUMENTOS DE LABORATORIO PARA EL ENSAYO DE EXTRACCIÓN DEL ASFALTO 24
TABLA IX INSTRUMENTOS DE LABORATORIO PARA EL ENSAYO DE GRAVEDAD ESPECÍFICA DE AGREGADOS GRUESOS 25
TABLA X INSTRUMENTOS DE LABORATORIO PARA EL ENSAYO DE GRAVEDAD ESPECÍFICA DE AGREGADOS FINOS.....26
TABLA XI INSTRUMENTOS DE LABORATORIO PARA EL ENSAYO DE ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO 27
TABLA XII INSTRUMENTOS DE LABORATORIO PARA EL ENSAYO DE MASA UNITARIA (PESO VOLUMÉTRICO) DEL AGREGADO GRUESO.....28
TABLA XIII INSTRUMENTOS DE LABORATORIO PARA EL ENSAYO DE MASA UNITARIA (PESO VOLUMÉTRICO) DEL AGREGADO FINO 29
TABLA XIV INSTRUMENTOS DE LABORATORIO PARA EL ENSAYO DE ABRASIÓN 30
TABLA XV INSTRUMENTOS DE LABORATORIO PARA EL ENSAYO DE PUNTO DE REBLANDECIMIENTO.....31
TABLA XVI INSTRUMENTOS DE LABORATORIO PARA EL ENSAYO DE PUNTO DE INFLAMACIÓN Y COMBUSTIÓN.....32

TABLA XVII INSTRUMENTOS DE LABORATORIO PARA EL ENSAYO DE GRAVEDAD ESPECÍFICA DEL CEMENTO ASFÁLTICO 33
TABLA XVIII INSTRUMENTOS DE LABORATORIO PARA EL ENSAYO DE RESIDUO POR EVAPORACIÓN 34
TABLA XIX INSTRUMENTOS DE LABORATORIO PARA EL ENSAYO DE GRAVEDAD ESPECÍFICA DE LA EMULSIÓN ASFÁLTICA 35
TABLA XX INSTRUMENTOS DE LABORATORIO PARA ELABORACIÓN DE BRIQUETAS Y ENSAYO MARSHALL 37
TABLA XXI INSTRUMENTOS DE LABORATORIO PARA EL MÉTODO RICE.....39
TABLA XXII MÉTODO ESTADÍSTICO 40
TABLA XXIII PESO MÍNIMO DE LAS MUESTRAS (2017) [23].....47
TABLA XXIV LÍMITES MÁXIMOS Y MÍNIMOS DE LA GRANULOMETRÍA DE HORMIGÓN ASFÁLTICO MEZCLADO EN PLANTA (2002) [2] 50
TABLA XXV TAMAÑO DE LA MUESTRA PARA ENSAYO (ÁRIDO GRUESO) (2011) [27] 50
TABLA XXVI PESO MÍNIMO DE LA MUESTRA PARA ENSAYO (2010) [29] 53
TABLA XXVII CLASIFICACIÓN DE LA MUESTRA DE PRUEBA (2020) [34].....59
TABLA XXVIII ESPECIFICACIONES GENERALES PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS MOP-001-F-2002 [2] 69
TABLA XXIX MÍNIMO PORCENTAJE DE VACÍOS DE AGREGADO MINERAL INSTITUTO DEL ASFALTO (2014) [6].....69
TABLA XXX UBICACIÓN Y COORDENADAS GEOGRÁFICAS DEL SITIO DE MUESTREO 83
TABLA XXXI RESULTADOS DE LA EXTRACCIÓN DE ASFALTO.....83
TABLA XXXII RESUMEN DEL ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE LOS AGREGADOS RECICLADOS.....84
TABLA XXXIII RESUMEN DE GRAVEDADES ESPECÍFICAS Y ABSORCIONES DE LOS AGREGADOS RECICLADOS 86
TABLA XXXIV RESUMEN DEL ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE LOS AGREGADOS NUEVOS.....87

TABLA XXXV RESUMEN DE GRAVEDADES ESPECÍFICAS Y ABSORCIONES DE LOS AGREGADOS NUEVOS 88
TABLA XXXVI RESUMEN DEL MASAS UNITARIAS DE LOS AGREGADOS NUEVOS 89
TABLA XXXVII RESULTADOS DE LA RESISTENCIA AL DESGASTE POR ABRASIÓN DEL AGREGADO GRUESO 89
TABLA XXXVIII RESULTADOS DEL PUNTO DE REBLANDECIMIENTO DEL CEMENTO ASFÁLTICO 90
TABLA XXXIX RESUMEN DE LOS PUNTOS DE INFLAMACIÓN DEL CEMENTO ASFÁLTICO 91
TABLA XL RESULTADOS DE LA GRAVEDAD ESPECÍFICA DEL CEMENTO ASFÁLTICO 91
TABLA XLI RESULTADOS DE RESIDUO POR EVAPORACIÓN DE LA EMULSIÓN ASFÁLTICA CSS-1H 92
TABLA XLII EQUIVALENCIA DEL ASFALTO NETO CON LA EMULSIÓN ASFÁLTICA 93
TABLA XLIII RESULTADOS DE LA GRAVEDAD ESPECÍFICA DE LA EMULSIÓN ASFÁLTICA CSS-1H 93
TABLA XLIV RESULTADOS DEL ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO COMBINADO PARA EL DISEÑO DE LA MEZCLA CON AGREGADOS NUEVOS 94
TABLA XLV RESULTADOS DEL ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO COMBINADO PARA EL DISEÑO DE LA MEZCLA CON AGREGADOS NUEVOS Y RECICLADOS 96
TABLA XLVI ENSAYO MARSHALL - AGREGADOS NUEVOS 98
TABLA XLVII ENSAYO MARSHALL - AGREGADOS NUEVOS Y RECICLADOS 101
TABLA XLVIII RESUMEN DE RESULTADOS 104
TABLA XLIX RESUMEN DEL ENSAYO RICE PARA LAS DOS MEZCLAS ASFÁLTICAS 108

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Ensayo de extracción del asfalto reciclado.....124
Anexo 2: Granulometría de los agregados reciclados - Muestra 1 y 2 125
Anexo 3: Granulometría de los agregados reciclados - Muestra 3 y 4 126
Anexo 4: Gravedad específica y absorción de los agregados reciclados (fracción gruesa).....127
Anexo 5: Gravedad específica y absorción de los agregados reciclados (fracción fina) 128
Anexo 6: Granulometría del agregado grueso 3/4" 129
Anexo 7: Granulometría del agregado grueso 3/8" 130
Anexo 8: Granulometría del agregado fino - Muestra 1 131
Anexo 9: Granulometría del agregado fino - Muestra 2 132
Anexo 10: Gravedad específica y absorción del agregado grueso 3/4" 133
Anexo 11: Gravedad específica y absorción del agregado grueso 3/8" 134
Anexo 12: Gravedad específica y absorción del agregado grueso fino 135
Anexo 13: Masa unitaria del agregado grueso 3/4" 136
Anexo 14: Masa unitaria del agregado grueso 3/8" 136
Anexo 15: Masa unitaria del agregado fino 137
Anexo 16: Ensayo de abrasión del agregado grueso.....137
Anexo 17: Punto de reblandecimiento del cemento asfáltico AC-20 138
Anexo 18: Punto de inflamación y combustión del cemento asfáltico AC-20 139
Anexo 19: Gravedad específica del cemento asfáltico AC-20.....140
Anexo 20: Residuo por evaporación de la emulsión asfáltica CSS-1h.....140
Anexo 21: Gravedad específica de la emulsión asfáltica CSS-1h 141
Anexo 22: Ensayo Rice de la mezcla asfáltica con agregados nuevos 141
Anexo 23: Ensayo Rice de la mezcla asfáltica con agregados nuevos y reciclados 142
Anexo 24: Ensayo de extracción de la mezcla asfáltica con agregados nuevos 142
Anexo 25: Ensayo de extracción de la mezcla asfáltica con agregados nuevos y reciclados 143
Anexo 26: Ensayo de extracción de asfalto reciclado del Municipio de Ambato.....144
Anexo 27: Granulometría de los agregados reciclados del Municipio de Ambato.....145

Anexo 28: Factores de corrección de la Estabilidad Marshall 146
Anexo 29: Ficha técnica del cemento asfáltico AC-20 147
Anexo 30: Ficha técnica de la emulsión asfáltica CSS-1h.....148
Anexo 31: Anexos fotográficos de los ensayos 150

SIGLAS, ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ASTM	American Society for Testing and Materials
INEN	Servicio Ecuatoriano de Normalización
INV E	Norma de Ensayo del Instituto Nacional de Vías (INVÍAS)
MOP	Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones
MS	Manual Series (Serie de Manuales del Instituto del Asfalto)
RAP	Pavimento Asfáltico Reciclado
SSS	Saturado Superficialmente Seco
UTA	Universidad Técnica de Ambato
Va	Vacíos de Aire
VFA	Vacíos Llenos de Asfalto
VMA	Vacíos en el Agregado Mineral

RESUMEN EJECUTIVO

La presente investigación se centró en la evaluación de los agregados reciclados de carpeta asfáltica en la estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en frío mediante el Método Marshall, con la finalidad de determinar su viabilidad técnica como alternativa sostenible para la construcción vial. La importancia del estudio radicó en la necesidad de reducir el consumo de agregados vírgenes y aprovechar materiales provenientes del fresado de pavimentos deteriorados, contribuyendo a la conservación de recursos naturales y a la disminución de impactos ambientales.

La metodología contempló inicialmente la caracterización físico-mecánica de los agregados reciclados, agregados nuevos, cemento asfáltico y emulsión asfáltica mediante ensayos normados ASTM e INEN. Posteriormente, se diseñó una mezcla patrón convencional y una alternativa con la adición de 20% de RAP combinado con 80% de agregados nuevos, logrando un acoplamiento granulométrico óptimo bajo las especificaciones del MOP-001-F-2002. En la fase de diseño se determinó un contenido óptimo de asfalto neto del 6,0% para ambas propuestas; para la mezcla convencional esto representó un 9,84% de emulsión asfáltica CSS-1h, mientras que la mezcla reciclada requirió únicamente un 8,70% de emulsión líquida nueva debido al aporte del ligante preexistente en el material reciclado.

Finalmente, se compararon los resultados experimentales de estabilidad, flujo, densidad bulk, y vacíos en sus puntos óptimos. La incorporación del 20% de agregados reciclados provocó una reducción del 20,03% en la estabilidad y del 3,57% en el flujo de la mezcla. Volumétricamente, la adición del RAP provocó un incremento del 2,3% en los vacíos de aire, mientras que la densidad bulk decreció un 0,18%. Se concluyó que la utilización de agregados reciclados en mezclas asfálticas en frío es técnicamente factible y sostenible, a pesar de las variaciones mecánicas y volumétricas, el diseño reciclado cumple con los requerimientos de estabilidad, flujo, densidad y vacíos en el agregado mineral establecidos por la normativa vigente, garantizando la aptitud estructural del pavimento y optimizando el consumo de ligante nuevo.

Palabras clave: MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO, ASFALTO RECICLADO, MÉTODO MARSHALL, EMULSIÓN ASFÁLTICA, ESTABILIDAD.

ABSTRACT

This research focused on evaluating the stability and flow of cold asphalt mixes using recycled asphalt aggregates (RAP) in the Marshall Method, with the aim of determining their technical viability as a sustainable alternative for road construction. The importance of the study lay in the need to reduce the consumption of virgin aggregates and utilize materials from the milling of deteriorated pavements, contributing to the conservation of natural resources and the reduction of environmental impacts.

The methodology initially included the physical-mechanical characterization of recycled aggregates, new aggregates, asphalt cement, and asphalt emulsion using ASTM and INEN standardized tests. Subsequently, a conventional standard mix and an alternative mix with the addition of 20% RAP combined with 80% new aggregates were designed, achieving optimal particle size distribution according to the specifications of MOP-001-F-2002. In the design phase, an optimal net asphalt content of 6.0% was determined for both proposals. For the conventional mix, this represented 9.84% CSS-1h asphalt emulsion, while the recycled mix required only 8.70% new liquid emulsion due to the contribution of the pre-existing binder in the recycled material.

Finally, the experimental results for stability, flow, bulk density, and voids were compared at their optimum points. The incorporation of 20% recycled aggregates resulted in a 20.03% reduction in stability and a 3.57% reduction in mix flow. Volumetrically, the addition of RAP caused a 2.3% increase in air voids, while bulk density decreased by 0.18%. It was concluded that the use of recycled aggregates in cold asphalt mixes is technically feasible and sustainable. Despite mechanical and volumetric variations, the recycled design meets the stability, flow, density, and void content requirements for the mineral aggregate established by current regulations, guaranteeing the structural integrity of the pavement and optimizing the consumption of new binder.

Keywords: COLD ASPHALT MIX, RECYCLED ASPHALT, MARSHALL METHOD, ASPHALT EMULSION, STABILITY.

CAPÍTULO I.- MARCO TEÓRICO

I. JUSTIFICACIÓN

La contaminación medioambiental se considera uno de los retos más críticos a nivel mundial, exigiendo que sectores como la construcción asuman procesos de reciclaje y optimización de los recursos. Por ello, la reutilización de residuos no es solo una responsabilidad industrial, sino que también se transforma en una estrategia necesaria para evitar el agotamiento de las materias primas y el desarrollo de una construcción más sostenible [1]. En el Ecuador, gran parte de la red vial está conformada por pavimentos flexibles las cuales están expuestas de forma constante a las acciones de los agentes climatológicos y cargas que produce el tránsito vehicular, lo que genera un deterioro progresivo de las capas de rodadura, mostrándose en forma de fisuras, pérdida de adherencia entre el ligante asfáltico y los agregados pétreos y como la reducción de la vida útil del pavimento para la cual está destinado [2].

Ante esta problemática, el análisis de las mezclas asfálticas tiene un importante protagonismo, ya que son uno de los materiales más relevantes en la construcción y la rehabilitación de carreteras. Las mezclas asfálticas en frío se han vuelto más atractivas cuando se propone como alternativa al uso habitual de mezclas asfálticas en caliente [3], [4]. Su uso responde a la necesidad de crear soluciones que permitan realizar una optimización de los costos de inversión y al mismo tiempo conducir a un enfoque orientado al desarrollo sustentable, ya que el aglomerante es del tipo emulsión asfáltica y la puesta en obra se emplea a temperatura ambiente [3]. Por lo que, en el Ecuador es interesante promover el conocimiento y la investigación de las ventajas que ofrece la aplicación de esta tecnología en la construcción y mantenimiento de pavimentos.

El asfalto recuperado, que se obtiene a partir del fresado de pavimentos de vías existentes, representa una oportunidad para optimizar recursos y, por lo tanto, también reducir el impacto ambiental. Este material contiene agregados minerales y ligante asfáltico envejecido que pueden reutilizarse en la elaboración de nuevas mezclas asfálticas, es por esta razón es que se plantea una propuesta de reciclaje de este material para evitar que se encuentre acumulado al aire libre y genere un problema de espacio y contaminación [5].

Pese a que el ámbito de los materiales para pavimentos ha ido avanzando, a nivel nacional la información técnica sobre el comportamiento de las mezclas asfálticas en frío que contengan materiales reciclados es escasa. Si bien diversas investigaciones han demostrado el potencial de uso de agregados provenientes de pavimentos recuperados, es necesario realizar ensayos experimentales que verifiquen su comportamiento bajo condiciones específicas de los materiales disponibles en el país. Por lo tanto, la generación de información contribuye a consolidar el conocimiento técnico con respecto al uso de materiales alternativos en ingeniería civil.

El propósito de este trabajo experimental surge de la necesidad de analizar de manera específica: ¿Cómo influye la incorporación de los agregados de asfalto reciclado en las propiedades físico-mecánicas de las mezclas asfálticas en frío? Este análisis resulta fundamental, ya que permite comprender el comportamiento de la mezcla frente a solicitaciones de carga, evaluando parámetros como la estabilidad, flujo, densidad y el contenido de vacíos. Los resultados alcanzados en esta investigación permitirán determinar los porcentajes óptimos de los materiales empleados en la elaboración de las mezclas, además, la información generada puede servir como aporte a futuras investigaciones relacionadas con el estudio de mezclas asfálticas en frío, facilitando la evaluación de su factibilidad y aplicabilidad en el área vial.

II. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

La reutilización de pavimento asfáltico reciclado destinado para la rehabilitación y construcción de carreteras ha despertado un creciente interés dentro de la ingeniería civil, ya que representa un uso más eficiente de los recursos naturales y aporta una reducción significativa de los costos de producción de las mezclas asfálticas [5].

La recuperación de materiales a partir del proceso de repavimentación y reconstrucción de carreteras permite obtener el denominado pavimento asfáltico reciclado o recuperado “RAP”, lo que supone un recurso valioso constituido por ligante asfáltico y agregados pétreos [5]. Como fuente alternativa de áridos, su reutilización conforme a ciertos requerimientos de calidad contribuye a la reducción del uso de agregados vírgenes en la producción de nuevas mezclas. Por tanto, disminuye la explotación de canteras, lo que favorece la conservación de reservas naturales

de agregados. Según datos de la Federal Highway Administration [5], en USA se procesan cada año más de ochenta millones de toneladas de RAP para la producción de nuevas mezclas asfálticas.

Las mezclas asfálticas en frío reducen el consumo energético durante su fabricación, ya que son aplicadas a temperatura ambiente [6]. El uso de emulsiones asfálticas se remonta a principios del siglo XX, donde las primeras aplicaciones registradas de este material en la construcción de carreteras ocurrieron en 1905 en la ciudad de Nueva York. Posteriormente, su uso se extendió a diferentes países debido a sus ventajas técnicas y económicas [7].

En la investigación realizada en El salvador por Guevara, Méndez y Pimental [4], titulada "Diseño de mezclas asfálticas densas en frío basado en el método Marshall modificado de la Universidad de Illinois", se determinó que la banda granulométrica adoptada define la gradación de los agregados combinados. Este parámetro resulta crítico en el diseño, dado que el contenido óptimo de emulsión en la mezcla depende estrictamente de la distribución del tamaño de las partículas del material pétreo. De manera similar, Jiménez, Sibaja y Molina [3], evaluaron en Costa Rica el desempeño de mezclas asfálticas en frío mediante ensayos de laboratorio relacionados con la estabilidad, cohesión y resistencia al desgaste. Los autores concluyeron que estas mezclas presentan un comportamiento adecuado para trabajos de mantenimiento vial cuando se controla adecuadamente el proceso de compactación y el contenido de humedad.

Según el trabajo titulado "Evaluación del efecto de la adición de caucho vulcanizado triturado en mezclas asfálticas en frío" [8], de la Universidad Técnica de Ambato, Quimbita Loma describe el comportamiento de mezclas asfálticas mediante el método Marshall, considerando diferentes contenidos de emulsión asfáltica. En el caso de la mezcla convencional, es decir sin adicción de caucho, se estableció que el contenido óptimo de emulsión asfáltica fue de 6.03%, valor obtenido a partir del análisis de las curvas de estabilidad, flujo, densidad y vacíos. Con este porcentaje se alcanzó una estabilidad de 2607 lb, un flujo de 13.1 (1/100 pulgadas) y un contenido de vacíos de 4.23%, parámetros que se encuentran dentro de los rangos establecidos por las especificaciones para este tipo de mezclas. Estos resultados evidencian que el adecuado control del contenido de emulsión permite obtener mezclas asfálticas en frío con propiedades mecánicas satisfactorias para su aplicación en pavimentos [8].

Belmar [9], desarrolló una investigación en la Universidad Técnica Federico Santa María, orientada al diseño de mezclas asfálticas en frío utilizando pavimento asfáltico reciclado para caminos de bajo volumen de tránsito. Tras la caracterización del RAP y el diseño de mezclas con emulsión asfáltica, se evaluó su desempeño mediante el método Marshall. Los resultados permitieron determinar que el contenido óptimo de emulsión fue aproximadamente del 7%, alcanzándose una densidad cercana de 2.14 Mg/m3, valores que permitieron concluir que ese tipo de mezclas recicladas constituye una alternativa viable para mejorar la superficie de rodadura en caminos básicos.

En el estudio desarrollado por Ushiña Toapanta [10], enfocado en el diseño de adoquines con mezclas asfálticas en frío, se determinó un contenido óptimo de emulsión de 10.5% para agregados reciclados, y 10.3% para agregados convencionales, obteniéndose valores de estabilidad Marshall de 5250 lb y 4984 lb respectivamente. De igual manera, las resistencias a compresión alcanzaron 38.84 kg/cm2 para mezclas con material reciclado y 37.66 kg/cm2 para las no recicladas, evidenciando un comportamiento mecánico favorable del RAP. Pero es importante considerar que la emulsión es un sistema compuesto por una fase ligante y una fase acuosa (constituida por agua) [3]. Por lo tanto, un contenido del 10.5% de emulsión no implica la misma cantidad de asfalto residual. A partir de los antecedentes expuestos, se establece que el contenido óptimo de emulsión es una variable multifactorial que depende estrictamente de las propiedades de los materiales, como el tipo de aplicación, granulometría, el contenido de agregados reciclados, absorción del agregado y el método de diseño.

Los resultados obtenidos por Thenoux et al. [11] y Múnera [12] confirmaron que la inclusión de agregados reciclados de carpeta asfáltica en proporciones del 30% al 50% no solo responde a criterios de sostenibilidad, sino que eleva la estabilidad Marshall hasta en un 20%, manteniendo valores adecuados de flujo y vacíos. Por ello, resulta pertinente continuar investigando el comportamiento de este tipo de mezclas asfálticas en frío, particularmente con la incorporación de agregados de asfalto reciclado.

III. OBJETIVOS

A. OBJETIVO GENERAL

Evaluar el efecto de los agregados reciclados de carpeta asfáltica en la estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en frío, utilizando el Método Marshall.

B. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1) Determinar las propiedades físico-mecánicas de los agregados reciclados, agregados nuevos y del cemento asfáltico, para el diseño de la mezcla asfáltica en frío.

2) Diseñar la mezcla asfáltica en frío con diferentes porcentajes de emulsión asfáltica con la finalidad de obtener el porcentaje óptimo siguiendo las especificaciones establecidas por el Método Marshall.

3) Comparar los resultados experimentales obtenidos de estabilidad, flujo, porcentaje de vacíos, y densidad de mezclas asfálticas en frío fabricadas con agregados nuevos y con agregados reciclados.

CAPÍTULO II.- METODOLOGÍA

La presente investigación se fundamenta en un enfoque cuantitativo de tipo experimental, basado en el análisis de resultados obtenidos mediante ensayos realizados en laboratorio. El estudio tiene como finalidad evaluar el efecto de la incorporación de agregados reciclados provenientes de carpeta asfáltica en el comportamiento de mezclas asfálticas en frío, particularmente en parámetros como estabilidad y flujo, mediante la aplicación del método Marshall. Para el desarrollo del mismo se emplearon agregados pétreos nuevos, material fresado de pavimento asfáltico reciclado "RAP" y emulsión asfáltica CSS – 1h como ligante. A partir de estos materiales se diseñaron mezclas asfálticas en frío con el fin de analizar su comportamiento físico-mecánico, permitiendo determinar su desempeño y su posible aplicación en obras viales.

La metodología se estructuró en tres fases:

La primera fase corresponde a la caracterización físico-mecánica de los materiales, donde se determinaron las propiedades de los agregados reciclados, agregados nuevos, cemento asfáltico y emulsión asfáltica. La segunda fase comprende el diseño de la mezcla asfáltica en frío, considerando diferentes porcentajes de emulsión asfáltica para determinar el contenido óptimo mediante el método Marshall. Finalmente, la tercera fase se centró en la evaluación y comparación de los resultados experimentales analizando parámetros como estabilidad, flujo, densidad y porcentajes de vacíos en mezclas elaboradas con agregados convencionales y con agregados reciclados.

I. EQUIPOS Y MATERIALES

Para el desarrollo de esta investigación, fue necesario emplear distintos materiales y equipos de laboratorio específicos que permitieron cumplir con las actividades planteadas en cada etapa del estudio. La fase experimental se enfocó en la dosificación y fabricación de mezclas asfálticas en frío, integrando agregados nuevos y agregados reciclados, con el objetivo de realizar un análisis comparativo sobre su desempeño físico-mecánico.

A continuación, se presenta una descripción detallada de los insumos que conforman dichas mezclas, especificando sus propiedades físicas y características fundamentales.

A. MEZCLA ASFÁLTICA

Una mezcla asfáltica es el resultado de combinar, de forma muy certera, un ligante hidrocarbonado con agregados pétreos de diversos tamaños (gruesos y finos). Estos componentes se integran en proporciones específicas para formar una capa estructural capaz de soportar las cargas cíclicas del tránsito vehicular y las variaciones de las condiciones ambientales. Sus propiedades dependen de la calidad de los materiales, la granulometría y el contenido óptimo de ligante definido en el diseño [13].

De acuerdo con el Instituto del Asfalto [6], el correcto diseño y control de las mezclas asfálticas permite garantizar la estabilidad, durabilidad y resistencia del pavimento frente a las solicitaciones de tráfico, de tal manera, que se pueda evitar fallas prematuras que reducen la vida útil. Se elaboran generalmente en plantas mezcladores, como también pueden ser fabricadas in situ. Estas mezclas pueden ser calientes o frías.

1) Mezcla en caliente

Este tipo de mezcla es el más empleado en el área de pavimentos y se compone de un ligante asfáltico y agregados minerales. Su fabricación consiste en calentar tanto el asfalto como los agregados para obtener una mezcla homogénea en la que las partículas queden completamente recubiertas por el ligante. Generalmente, los agregados pétreos se calientan entre 140 o 150 °C, mientras que el ligante asfáltico alcanza temperaturas aproximadas de 110 a 130 °C. Posteriormente, la mezcla es colocada y compactada en obra a temperaturas elevadas para garantizar una adecuada adherencia y desempeño estructural [2], [13]. (Ver Fig.1).

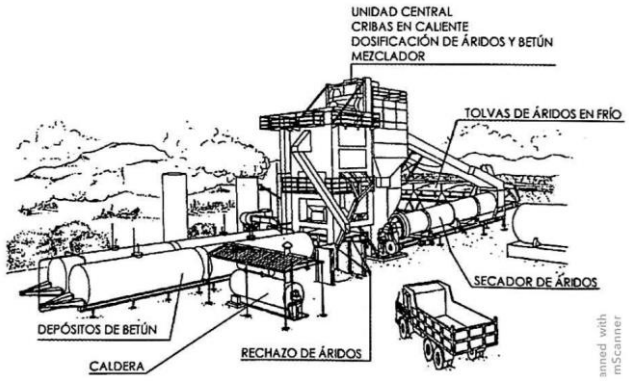


Fig. 1 Panorámica general de una planta de mezcla asfáltica en caliente [13] (2004).

2) Mezcla en frío

Estas mezclas se elaboran mediante la combinación de agregados pétreos y emulsiones bituminosas, sin necesidad de calentar los materiales durante su elaboración. Las mezclas asfálticas en frío presentan una adecuada trabajabilidad y compactación debido a la menor viscosidad de la emulsión antes de romperse y evaporar el agua. Su empleo resulta beneficioso debido a que no requieren procesos de fabricación complejos ni equipos especializados como los utilizados en las mezclas en caliente, lo que permite reducir costos de producción y ejecución, como se observa en la Fig. 2. Además, se recomienda su colocación a temperaturas comprendidas entre 20 y 40 °C para garantizar un mejor desempeño de la mezcla [13].

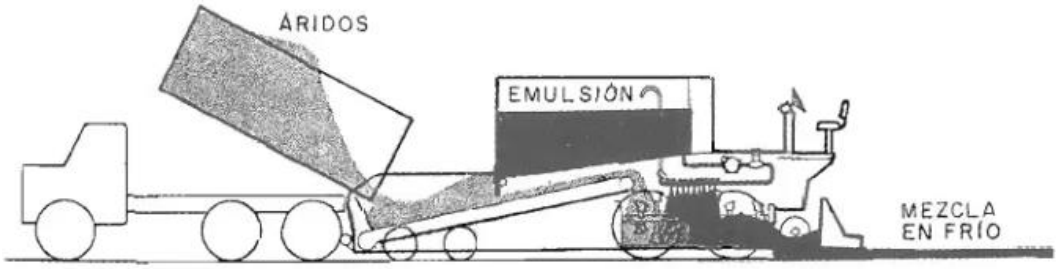


Fig. 2 Equipo móvil para la fabricación y extensión de mezclas en frío [13] (2004).

Las mezclas asfálticas en frío se clasificación según su granulometría abierta o densa.

a) Mezcla abierta en frío

Se realizan mediante la combinación de agregados gruesos naturales o triturados con emulsión asfáltica, pudiendo añadir aditivos que mejoren la compatibilidad entre el agregado y el ligante. Ya que posee un bajo contenido de agregado fino, estas mezclas presentan una estructura abierta donde la resistencia se genera principalmente por el rozamiento interno entre las partículas. Su contenido de vacíos se estima que supera el 20%, lo que permite obtener una mayor macrotextura superficial y elevar la resistencia al deslizamiento [2], [14]. Para garantizar la integridad de esta estructura, se emplean emulsiones asfálticas tipo catiónico de rompimiento medio. La clave de este ligante reside en su viscosidad, la cual debe ser la adecuada para recubrir íntegramente los agregados con una película asfáltica que asegure la cohesión y la estabilidad de todo el conjunto [14].

b) Mezcla densa en frío

También se las conoce como mezclas cerradas en frío, se caracterizan por ser combinaciones homogéneas de agregados pétreo y emulsión asfáltica, elaboradas con una granulometría continua que generalmente comprende tamaños entre el tamiz 1 ½" y el tamiz No. 200. Debido al alto contenido de material fino, se requiere el uso de emulsiones asfálticas de rotura lenta que permiten un adecuado recubrimiento de los agregados [2], [14].

Las mezclas densas en frío suelen aplicarse para trabajos de mantenimiento vial, como bacheo, capas de rodadura en vías de bajo y medio tránsito, o como capas de refuerzo en estructuras de pavimento [15]. Según, el Asphalt Institute en el manual MS-14, para este tipo de mezclas se recomiendan emulsiones de rotura lenta como SS-1, SS-1h, CSS-1 o CSS-1h, las cuales permiten un mejor recubrimiento del agregado y una adecuada cohesión de la mezcla [6].

Los agregados pueden ser de origen natural o triturado y deben cumplir con especificaciones de limpieza, resistencia y durabilidad. El agregado grueso aporta resistencia y fricción interna en la mezcla, y el agregado fino contribuye a la cohesión e impermeabilidad. Además, se puede incorporar llenante mineral "filler" para mejorar la rigidez y reducir los vacíos, sin embargo, su contenido debe ser controlado [14].

i) Requisitos para el diseño de mezclas asfálticas en frío

En la Universidad de Illinois se realizaron investigaciones que indican que antes de elaborar una mezcla asfáltica en frío, es indispensable realizar un análisis previo de las propiedades de los materiales que la componen. Mediante este estudio se comprende las características de cada componente y su influencia en el comportamiento de la mezcla una vez que los materiales se integran y conforman el sistema estructural [4]. Por ello, es importante evaluar para el diseño de la mezcla asfáltica en frío:

- Idoneidad de lo áridos y de la emulsión asfáltica.
- Compatibilidad entre la emulsión asfáltica y los áridos.
- Determinación del contenido óptimo de humedad durante el proceso de compactación.
- Verificación de propiedades estructurales y de durabilidad adecuadas.

B. AGREGADOS CONVENCIONALES

Entre los más comunes se encuentran la grava, piedra triturada, arena y polvo de piedra, los cuales se obtienen principalmente de canteras, ríos o depósitos naturales, y son sometidos a procesos de trituración y clasificación para obtener las gradaciones requeridas o necesarias, como se observa en la Fig.3. Estos materiales representan aproximadamente entre el 90 y 95% del peso total de la mezcla asfáltica, por lo que influyen directamente en su comportamiento y durabilidad [2]. Por esta razón, se verificó que los agregados se encuentren limpios y libres de contaminantes, ya que la presencia de arcillas o materia orgánica puede afectar la adherencia con el ligante asfáltico y el desempeño de la mezcla.

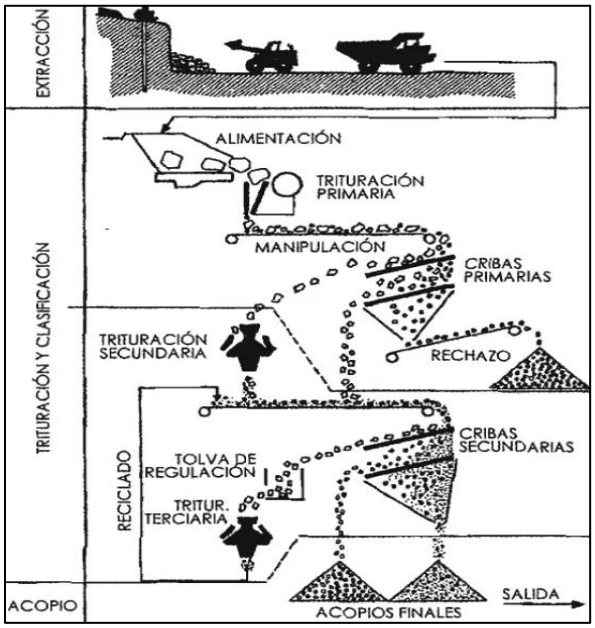


Fig. 3 Proceso de trituración del material pétreo [13] (2004).

1) Agregado grueso

Corresponde al material granular retenido en el tamiz Nº4 (4.75 mm) y está conformado generalmente por grava o piedra triturada. Su función en las mezclas asfálticas es proporcionar resistencia estructural y estabilidad frente a las cargas de tránsito vehicular. Estos materiales deben ser duros, resistentes al desgaste, durables y estar libres de impurezas que puedan afectar la adherencia con el ligante asfáltico y el desempeño de la mezcla [2]. (Ver Fig. 4).



Fig. 4 Agregado grueso [13] (2004).

2) Agregado fino

Se denomina como agregado fino al material constituido por partículas minerales que pasan por el tamiz Nº4 y son retenidas en el tamiz Nº200. Este tipo de material suele estar formado por arena natural o producto de trituración. En las mezclas asfálticas, el agregado fino es importante para conseguir una buena trabajabilidad y cohesión, siendo el encargado de rellenar los vacíos o espacios entre las partículas gruesas y así mejorar la interacción del asfalto, lo que se traduce a una mejora de la estabilidad y durabilidad en el pavimento [2]. (Ver Fig. 5).



Fig. 5 Agregado fino [13] (2004).

3) Relleno mineral filler

Se entiende como el material fino no plástico que pasa el tamiz No. 200 y se incorpora a la mezcla asfáltica para mejorar su estabilidad y reducir la cantidad de asfalto requerida. Incluso en pequeñas proporciones, y contribuye a mantener una adecuada estructura interna a la mezcla sin afectar significativamente el flujo. Debido a influencia en la resistencia y durabilidad, es importante controlar tanto su cantidad como su calidad durante el diseño de la mezcla [2], [13]. (Ver Fig. 6).

Cuando el agregado mineral entra en contacto y queda recubierto con asfalto, modifica su comportamiento físico, especialmente en relación con el proceso de compactación. De igual manera, mientras mayor sea el espesor de la película de asfalto, mayor será la capacidad de la mezcla para evitar el ingreso del agua. Es importante controlar su contenido, ya que, si se añade en exceso, la mezcla se vuelve rígida, seca y propensa a fisuras o agrietamientos. En cambio, su escasez incrementaría los vacíos intergranulares de la mezcla y dejaría vulnerable al pavimento frente a la acción del agua "desgranamiento" y ante las cargas del tráfico, facilitando la aparición de "roderas" que son deformaciones plásticas [13].

Debido a esto, el procedimiento más seguro para el diseño de mezclas asfálticas consiste en la elaboración y evaluación de muestras en laboratorio, así como la verificación en campo del cumplimiento de las propiedades establecidas [13].



Fig. 6 Relleno mineral o filler [13] (2004).

Para este estudio se emplearon agregados de origen virgen o convencionales, clasificados en tamaños nominales de 3/4", 3/8" y polvo de piedra. Este último componente cumple la función de agregado fino y aporta la fracción granulométrica pasante del tamiz No. 200, actuando de manera complementaria como relleno mineral (filler) para la cohesión de la mezcla. La totalidad de los materiales pétreos se obtuvieron de la cantera "Kumochi", operada por la empresa "JEAL Construcciones", ubicada en el cantón Ambato, provincia de Tungurahua.

C. PAVIMENTO ASFÁLTICO RECICLADO

Reclaimed Asphalt Pavement o "RAP" corresponde a la reutilización de materiales que ya han cumplido su función inicial, con el objetivo de incorporarlos nuevamente en procesos

constructivos. De tal manera, que un pavimento degradado se pueda transformar en una estructura capaz de soportar nuevamente las condiciones de tránsito previstas. Está conformado por agregados pétreos y cemento asfáltico convencional [16]. (Ver Fig. 7).

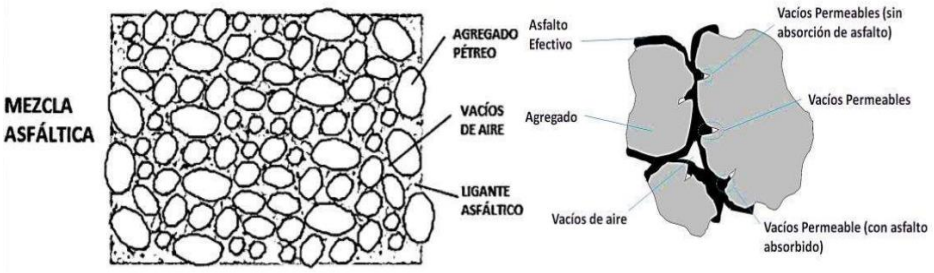


Fig. 7 Componentes de la mezcla asfáltica reciclada [13] (2004).

1) Campo de aplicación

Las fallas viales que justifican la implementación del reciclado de pavimentos corresponden:

- *Degradación del ligante:* genera pérdida de flexibilidad y aumento de rigidez en el asfalto debido al envejecimiento cronológico [15], [16].
- *Fallas de adherencia:* provoca desprendimiento del agregado grueso por incompatibilidad con el betún o fatiga del material [15], [16].
- *Inestabilidad estructural:* se producen fallas plásticas como ondulaciones, ahuellamiento y corrimientos [15], [16].
- *Reducción de la fricción:* pérdida de la rugosidad superficial por exudación de ligante, comprometiendo la resistencia al deslizamiento [15], [16].
- *Fisuración severa:* genera grietas por fatiga cíclica (piel de cocodrilo) o contracciones debidas a gradientes térmicos [15], [16].

2) Procedimiento de fresado del pavimento asfáltico recuperado

El fresado del pavimento asfáltico es un proceso en caliente o frío, que consiste en remover la capa superficial del pavimento hasta una profundidad determinada, con el fin de restaurar la superficie y corregir las pendientes longitudinales y transversales de la vía. Este procedimiento logra eliminar deformaciones, huellas o irregularidades, dejando la superficie lista para su futura rehabilitación [16].

En este proceso se emplean máquinas fresadoras autopropulsadas, equipadas con un tambor giratorio que trabaja en frío y que permite retirar el material deteriorado del pavimento. El material obtenido, conocido como fresado o RAP, es transportado mediante cintas hacia camiones o volquetas para su traslado a zonas de acopio, donde posteriormente puede ser reutilizado en procesos de reciclaje de mezclas asfálticas, ya sea en frío o caliente. Durante la operación, la máquina fresadora controla el espesor de corte y mantiene las pendientes de la vía [16].

3) Ventajas del material fresado o pavimento asfáltico recuperado

Una de las ventajas que presenta este material es una estrategia económica que transforma un residuo en un activo útil para la construcción y mantenimiento de carreteras. Además, reduce los costos operativos asociados a los botaderos y vertederos, evitando un volumen alto de acumulación de escombros que ocupa un espacio físico innecesario. Estudios indican que la incorporación de un 50% de RAP puede generar ahorros de hasta un 34% en los costos de materiales. En la parte ambiental, su principal función es preservar recursos naturales no renovables, es decir, disminuir emisiones de carbono vinculadas por la explotación de canteras y del transporte de materiales [14].

Las mezclas con incorporación de un cierto porcentaje de RAP, han demostrado un desempeño superior en ciertos parámetros frente a las mezclas convencionales. Debido al endurecimiento que experimenta el ligante asfáltico con el paso del tiempo (envejecimiento), las mezclas resultantes suelen ser más rígidas y presentan una mayor resistencia a la deformación permanente. Además, el material fresado facilita el control de la granulometría de las mezclas y permite una rápida apertura al tránsito, lo que reduce considerablemente el tiempo de interrupción en las vías intervenidas [14].

4) Especificaciones para material asfáltico recuperado

Es esencial caracterizar los agregados reciclados realizando ciertos ensayos que permiten conocer sus propiedades y determinar su viabilidad en nuevas mezclas asfálticas [17].

La Asociación Mexicana del Asfalto (AMAAC) en su publicación sobre reciclado con emulsión asfáltica (REA 15/12), recomienda una serie de ensayos mostrados en la TABLA I, para evaluar el material granular proveniente del fresado de pavimentos [17].

TABLA I
ENSAYOS RECOMENDADOS PARA EL MATERIAL FRESADO (2012) [17]

Ensayo	Norma
Muestreo en campo	INEN 695
Contenido de humedad	ASTM D 2216
Análisis granulométrico (agregados para mezcla en sitio A, B o C)	INEN 696 / ASTM C 136
Extracción cuantitativa de asfalto residual (método de la centrifuga)	ASTM D 2172
Análisis granulométrico (después de la extracción)	ASTM C 136
Determinación del peso unitario suelto y compactado	INEN 858 / ASTM C 29

Para este estudio se emplearon agregados reciclados de carpeta asfáltica, obtenidos de una vía en mantenimiento ubicada en el sector "El Placer", en el cantón Quero en la provincia de Tungurahua. Se estimó una vida útil cercada a los 30 años, considerando que inicialmente fue construida como empedrado y posteriormente recubierta con una carpeta asfáltica, condición que contribuyó a la falla estructural del pavimento.

D. LIGANTES BITUMINOSOS

Son materiales derivados del petróleo que se utilizan para unir y mantener cohesionado los agregados en las mezclas asfáltica. Entre los ligantes bituminosos, se encuentran cemento asfáltico, asfaltos diluidos y emulsiones asfálticas [7]. Los materiales empleados para evaluar su comportamiento fueron cemento asfáltico AC-20 (obtenido en la planta de asfalto de "JEAL Construcciones") y emulsión asfáltica CSS – 1h (obtenido en la empresa Chova Imptek).

1) Cemento asfáltico

Se caracteriza por tener un estado sólido o semisólido a temperatura ambiente, es el ligante más utilizado en el área de pavimentos y proviene casi exclusivamente de la destilación fraccionada del petróleo, por ello su color negro o marrón oscuro, ver Fig. 8. Cuando se combinan con materiales

agregados, generan el cemento asfáltico, utilizado en las superficies de rodadura o en la base. Su clasificación se basa principalmente en el grado de penetración y en la viscosidad a 60°C, siendo esta última la más representativa de su comportamiento [2], [3].

Tiene propiedades aglomerantes, adhesivas e impermeables, las cuales proporcionan resistencia y durabilidad a las mezclas asfálticas. Además, aporta flexibilidad a los agregados con los que se combina y presenta buena resistencia frente a la acción de ácidos, sales y otras sustancias químicas importantes [13].



Fig. 8 Cemento asfáltico [10] (2020).

El cemento asfáltico se comercializa en cinco rangos de consistencia, definidos a partir del ensayo de penetración. En Ecuador, esta clasificación está establecida en la INEN 2060, la cual determina los intervalos que permiten identificar cada grado utilizado en pavimentación [10]:

- *Cemento asfáltico AC 40-50:* cumplen una penetración entre 40 y 50 décimas de milímetro [10].
- *Cemento asfáltico AC 60-70:* cumple una penetración entre 60 y 70 décimas de milímetro [10].
- *Cemento asfáltico AC 85-100:* cumple una penetración entre 85 y 100 décimas de milímetro [10].
- *Cemento asfáltico AC 120-150:* cumple una penetración entre 120 y 150 décimas de milímetro [10].
- *Cemento asfáltico AC 200-300:* cumple una penetración entre 200 y 300 décimas de milímetro [10].

De acuerdo con esta norma, los asfaltos de mayor penetración, como el AC 200-300, presentan un comportamiento más blando o flexible, por lo que se deforman con mayor facilidad a temperatura ambiente. En cambio, los de menor penetración, como el AC 40-50, son más rígidos o duros y ofrecen mayor resistencia a la deformación.

Dentro de estos rangos, el AC 60-70 y AC 85-100 es uno de los más empleados en obras viales, ya que ofrece un balance adecuado entre flexibilidad y estabilidad [10]. La TABLA II muestra las especificaciones técnicas de los ensayos que debe cumplir el cemento asfáltico de acuerdo con la MOP-001-F-2002.

TABLA II

ESPECIFICACIONES GENERALES DEL CEMENTO ASFÁLTICO MOP-001-F-2002 [2]

ENSAYOS	60-70		85-100	
	MÍN.	MÁX.	MÍN.	MÁX.
PENETRACIÓN (25°C, 100gr, 5s), mm/10	60	70	85	100
PUNTO DE ABLANDAMIENTO, A y B, °C	48	57	45	53
ÍNDICE DE PENETRACIÓN (*)	-1,5	+1,5	-1,5	+1,5
DUCTILIDAD (25°C, 5 cm/min), cm	100	-	100	-
CONTENIDO DE AGUA (en volumen), %	-	0,2		0,2
SOLUBILIDAD EN TROCLOROETILENO, %	99	-	99	-
PUNTO DE INFLAMACIÓN, COPA CLEVELAND, °C	232	-	232	-
DENSIDAD RELATIVA, 25°C/25°C	1,00	-	1,00	-
ENSAYO DE LA MANCHA (**)	NEGATIVO		NEGATIVO	
CONTENIDO DE PARAFINAS, %	-	2,2	-	2,2

En la TABLA III, se observa el informe técnico de resultados de los ensayos del cemento asfáltico AC-20 del año 2026 proporcionado por Petroecuador [18]. Siendo un cemento asfáltico de penetración 60-70, es importante conocer estos valores ya que es el material a estudiarse en la presente investigación, por ello es indispensable conocer su ficha técnica actual.

TABLA III

CARACTERÍSTICAS DEL CEMENTO ASFÁLTICO AC-20 (2026) [18]

PARÁMETRO	MÉTODO (ASTM/INEN)	ESPECIFICACIÓN		RESULTADO	UNIDAD DE MEDIDA
		MÍN.	MÁX.		
VISCOSIDAD ABSOLUTA 140°F (60°C)	ASTM D2171 / INEN 810	160	240	235,0	Pa s
VISCOSIDAD CINEMÁTICA 275°F (135°C)	ASTM D2171 / INEN 810	300	-	413,0	mm2/s
PENETRACIÓN 77°F (25°C, 100gr, 5s)	ASTM D5 / INEN 918	60	-	73,0	dmm
PUNTO DE INFLAMACIÓN COPA ABIERTA CLEVELAND	ASTM D92 / INEN 808	232	-	326,0	°C
SOLUBILIDAD EN TRICLOROETILENO	ASTM D2042 / INEN 915	99	-	99,98	%P
RESIDUO DE ENSAYO DE PELÍCULA FINA (RTFOT)	N/A	-	-	-	-
VISCOSIDAD 60°C	ASTM D2171 / INEN 810	--	800	669,0	Pa s
DUCTILIDAD 77°F (25°C) 5cm/min	ASTM D113 / INEN 916	50	-	68,0	Cm
GRAVEDAD API A 60°F (15.6°C)	ASTM D1298 / INEN 2319	REPORTE	REPORTE	7,0	API
GRAVEDAD ESPECÍFICA 60/60°F (15.6°C)	ASTM D1298 / INEN 2319	REPORTE	REPORTE	1,0217	-
GRAVEDAD ESPECÍFICA 25/25°C	ASTM 70	REPORTE	REPORTE	1,013	-
PUNTO DE ABLANDAMIENTO	ASTM D36	-	-	49,9	°C
ÍNDICE DE PENETRACIÓN	ASTM D5	-1,5	1	-0,29	-
CAMBIO DE MASA	ASTM D2872	-	1	-0,23	%P

2) Asfaltos diluidos

Son aquellos materiales asfálticos que conservan una consistencia fluida o blanda, que cuenta con una magnitud que sobrepasa el límite mínimo de 300 determinado en el ensayo de penetración de acuerdo a la normativa INEN 917. La clasificación de los mismos está dada por la velocidad de evaporación del solvente:

- *Asfalto líquido de curado rápido (RC):* consiste en un cemento asfáltico que mediante la adicción de gasolina reduce su viscosidad [2], [7].
- *Asfalto líquido de curado medio (MC):* es una ligante fluidificado utilizando kerosene como solvente base [2], [7].
- *Asfalto líquido de curado lento (SC):* está compuesto por residuos aceitosos pesados o combinaciones de estos con destilados de baja volatilidad [2], [7].

3) Emulsión asfáltica

Las emulsiones asfálticas pueden definirse como una dispersión fina de un líquido dentro de otro, de los cuales no es posible su combinación. Para que esta dispersión sea posible se requiere la presencia de una sustancia denominada emulsificante o agente emulsionante, el cual favorece la posibilidad de unión entre los dos líquidos, manteniendo la estabilidad de ambos. Se distinguen por dos fases: una fase continua o dispersante, que es la que proporciona el medio en el que se dispersa el otro componente, y una fase dispersa o discreta, que corresponde al líquido que está distribuido en pequeñas partículas dentro de la fase continua [7]. (Ver Fig. 9).

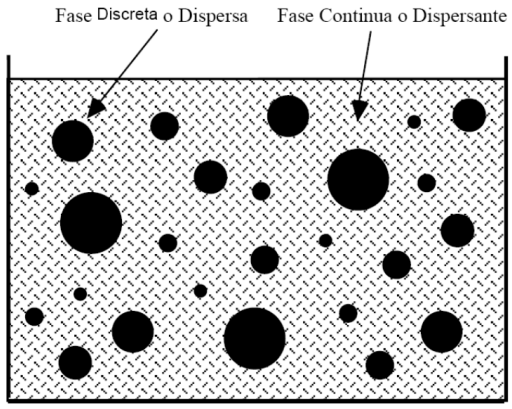


Fig. 9 Esquema de una emulsión [19] (2014).

Las emulsiones asfálticas se obtienen a partir de la combinación de:

- *Cemento asfáltico:* está presente en la emulsión entre un 50 – 70%. Este material tiene alta impermeabilidad, además de presentar propiedades adhesivas y cohesivas que le permiten mantener unidos los agregados en las mezclas asfálticas. El asfalto está formado particularmente por complejas moléculas de hidrocarburos cuya composición puede variar notablemente, su comportamiento coloidal depende tanto de la naturaleza química como de la proporción y la interacción entre dichas moléculas [7].
- *Agua:* debe ser lo necesariamente pura y libre de materias extrañas, es un componente importante ya que representar el 98% de la solución jabonosa. Es necesario controlar la presencia de minerales, especialmente calcio y magnesio, ya que estos pueden alterar las características químicas de la emulsión y comprometer su estabilidad [7].

- *Agentes emulsionantes:* actúa como un agente tensoactivo que reduce la tensión superficial entre el asfalto y el agua, permitiendo mantener las partículas de asfalto dispersas y estables en la mezcla [7].

a) Clasificación en función de la carga eléctrica

Una de las formas más críticas de clasificar las emulsiones asfálticas y analizar su compatibilidad con los agregados pétreos, es por medio de la polaridad o también conocida como carga eléctrica de las partículas de asfalto suspendidas en una fase acuosa [7]. Los agregados silíceos, como areniscas, cuarzo y gravas silíceas, generalmente poseen carga negativa, por lo que se adhieren mejor a emulsiones catiónicas. En cambio, agregados como las calizas suelen tener carga positiva, siendo más compatibles con emulsiones aniónicas [7]. Estas emulsiones deben cumplir con las especificaciones establecidas en la norma. (Ver TABLA IV).

TABLA IV
CLASIFICACIÓN SEGÚN LA CARGA ELÉCTRICA DE LA EMULSIÓN ASFÁLTICA

Clasificación	Descripción de partículas
Aniónica	Partículas de asfalto negativas
Catiónica	Partículas de asfalto positivas
No - iónica	Partículas de asfalto neutras

b) Clasificación en función de la velocidad de rotura

- *Emulsiones de rompimiento rápido (RS):* se rompen casi de inmediato al entrar en contacto con los agregados, por lo que son adecuadas para riegos de liga o imprimaciones, donde se necesita una rápida adherencia entre capas [20].
- *Emulsiones de rompimiento medio (MS):* presentan un tiempo de rotura intermedio, lo que permite su uso en mezclas asfálticas para trabajos de mantenimiento, como bacheo, especialmente cuando el contenido de finos es bajo ($\leq 2\%$) [20].

- *Emulsiones de rompimiento lento (SS):* tienen una rotura más gradual, lo que facilita su manejo en mezclas producidas en planta y en procesos de estabilización de suelos, ya que requiere mayor tiempo para mezclarse de forma homogénea con los materiales [20].

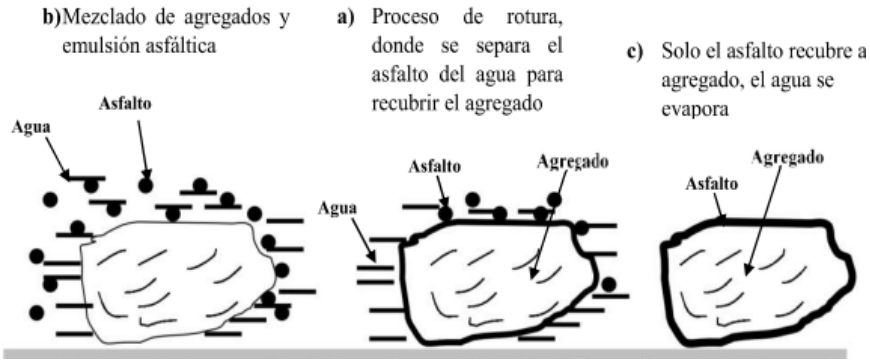


Fig. 10 Proceso de rotura según su carga eléctrica [19] (2014).

c) Clasificación y nomenclatura de las emulsiones asfálticas

La identificación y codificación de las emulsiones asfálticas, tanto de carácter aniónico como catiónico, se encuentran normadas bajo las especificaciones técnicas de las normativas ASTM D977 - D2397 y AASHTO M140 - M208, ver TABLA V.

TABLA V
NOMENCLATURA PARA EMULSIONES ASFÁLTICAS (1997) [6]

Emulsión aniónica	Emulsión catiónica
RS-1	CRS-1
RS-2	CRS-2
MS-1	-
MS-2	CMS-2
MS-2h	CMS-2h
HFMS-1	-
HFMS-2	-
HFMS-2h	-
SS-1	CSS-1
SS-1h	CSS-1h
QS-1h	CQS-1h

Los acrónimos comerciales empleados para designar las propiedades físico-químicas de estos ligantes se describen a continuación:

- *Carga de las partículas:* La letra **"C"** al inicio significa que la emulsión es tipo catiónica (carga positiva); su ausencia significa que es aniónica (carga negativa) [6].
- *Velocidad de rotura:* Las letras intermedias definen el tiempo de curado: rotura rápida **"RS",** rotura media **"MS",** y rotura lenta **"SS"** o controlada **"QS"** [6].
- *Viscosidad:* El número **1** indica baja viscosidad y el **2** alta viscosidad [6].
- *Consistencia del residuo:* La **"h"** (hard) indica un asfalto base más duro y resistente a deformaciones; la **"s"** (soft) define un asfalto más blando [6].

d) Características y aplicación

Las mezclas asfálticas producidas con emulsiones se conocen como mezclas en frío, ya que su elaboración no requiere altas temperaturas. Generalmente, se preparan por debajo de los 60 ºC (según la viscosidad del cemento asfáltico), y tanto su colocación como su compactación se realizan a temperatura ambiente, lo que facilita su manejo en obra [20], ver TABLA VI.

TABLA VI
CARACTERÍSTICAS Y APLICACIÓN DE LAS EMULSIONES ASFÁLTICAS (2022) [20]

Características	Rotura rápida	Rotura media	Rotura lenta
Rotura	Inmediata al contacto con el agregado.	Rompe en pocos minutos, con estabilidad media.	Rompimiento por evaporación, alta estabilidad.
Mezclado	Agregados finos.	Agregados gruesos.	Agregados finos bien graduados.
Aplicación	Riegos superficiales.	Mezclas asfálticas.	Mezclas y estabilización de suelos.

e) Tipos de emulsiones más empleadas en reciclado de pavimentos asfálticos

La emulsión más empleada y recomendada por el Manual de Reciclado de Asfalto MS-14 para el diseño de mezclas con material asfáltico reciclado es la emulsión CSS – 1h, de tipo catiónico y rompimiento lento. Este tipo de emulsión ha sido formulado específicamente para su uso en riegos de liga entre capas asfálticas, sellos negros, lechadas asfálticas y procesos de reciclado, entre otras aplicaciones similares [6]. Los requisitos que establece el Ministerio de Transporte y Obras Públicas para este tipo de emulsión se pueden observar en la TABLA VII.

TABLA VII

REQUISITOS DE EMULSIONES ASFÁLTICAS CATIÓNICAS (2002) [2]

PROPIEDAD	ROTURA RÁPIDA		ROTURA MEDIA						ROTURA LENTA			
	(CRS-1)		(CRS-2)		(CMS-2)		(CMS-2h)		(CSS-1)		(CSS-1h)	
	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
VISCOSIDAD FUROL 25 °C, s.	-	-	-	-	-	-	-	-	20	100	20	100
VISCOSIDAD FUROL 50 °C, s.	20	100	100	400	50	450	50	450	-	-	-	-
ESTABILIDAD AL ALMACENAJE 24 h, %	-	1	-	1	-	1	-	1	-	1	-	1
DEMULSIFICACIÓN: 35 ml .8% sds, %	40	-	40	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CUBRIMIENTO: Agregado seco	-	-	-	-	bueno	-	bueno	-	-	-	-	-
CUBRIMIENTO: Luego rociado	-	-	-	-	pobre	-	pobre	-	-	-	-	-
CUBRIMIENTO: Agregado húmedo	-	-	-	-	pobre	-	pobre	-	-	-	-	-
CUBRIMIENTO: Luego rociado	-	-	-	-	pobre	-	pobre	-	-	-	-	-
CARGA DE PARTÍCULA	+		+		+		+		+		+	
MEZCLA CON CEMENTO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	-	2
ENS. DEL TAMIZ	-	0,1	-	0,1	-	0,1	-	0,1	-	0,1	-	0,1
DESTILACIÓN: ACEITE DESTILADO %	-	3	-	3	-	12	-	12				
RESIDUO, %	60	-	65	-	65	-	65	-	57	-	57	-
PENETRACIÓN (25 °C, 100g, 5s)	100	250	100	250	100	90	40	90	100	250	40	90
DUCTILIDAD (25 °C, 5 cm/m, cm)	40	-	40	-	40	-	40	-	40	-	40	-
SOLUBILIDAD EN TRICLOROETILENO %	97,5	-	97,5	-	97,5	-	97,5	-	97,5	-	97,5	-
TEMP. ALMACENAMIENTO (°C)	50	85	50	85	50	85	50	85	10	60	10	60
TEMP. MEZCLA EN PLANTA (°C)	-	-	-	-	10	70	10	70	10	70	10	70
TEMP. MEZCLA EN SITIO (°C)	-	-	-	-	20	70	20	70	20	70	20	70
TEMP. TRATAMIENTO SUPERFICIAL (°C)	50	85	50	85	-	-	-	-	-	-	-	-

A continuación, se describen los recursos utilizados, organizados de acuerdo con las fases que conforman la metodología del proyecto.

A. FASE I

En la primera fase, destinada a la determinación de las propiedades físico-mecánicas de los materiales; agregados reciclados, agregados nuevos, cemento asfáltico, y emulsión asfáltica se emplearon diferentes equipos y materiales específicos según el tipo de ensayo realizado.

1) Ensayo de extracción de asfalto

Para este ensayo se empleó un extractor de asfalto tipo centrífuga eléctrica digital, que consiste en un equipo que cuenta con un recipiente metálico o bol que gira mediante un motor de velocidad controlada hasta 3600 rpm (modelo 003, serie 005). Su diseño incluye un armazón exterior que sirve para recolectar el solvente que sale expulsado por la fuerza del giro y un sistema de drenaje en la parte inferior para evacuar el solvente (gasolina) [10].

Además, se utilizó papel filtro para la retención de partículas finas, un horno industrial y una balanza digital para control de masas. De igual manera, se utilizaron recipientes metálicos, una probeta de vidrio borosilicato (marca Simax) con capacidad de 1000 ml, una espátula y una brocha para la manipulación, como se puede ver en la TABLA VIII.

TABLA VIII
INSTRUMENTOS DE LABORATORIO PARA EL ENSAYO DE EXTRACCIÓN DEL ASFALTO

ENSAYO	MÉTODO PARA DETERMINAR EL CONTENIDO DE LIGANTE ASFÁLTICO EN MEZCLAS DE PAVIMENTACIÓN	
NORMA	**MATERIALES**	**FOTOGRAFÍA**
ASTM D 2172	Agregados reciclados de carpeta asfáltica o material fresado. Solvente (gasolina).	
INSTRUMENTOS		**DETALLE**
Extractor de asfalto		- Centrifuga de graduación hasta 3600 rpm.

	- Modelo 003, serie 005.
Papel filtro	- Tamaño del extractor.
Horno	- Control de temperatura hasta 110 ± 5°C. - Humboldt, modelo H-30145E.
Balanza	- Capacidad de 30 kg y 1g de precisión. - Marca TCS-Electronic Scale.
Probeta volumétrica	- Capacidad hasta 1000 ml. - Marca Simax.
Brocha	- Tamaño pequeño.
Espátula	- Instrumento para remover o raspar la muestra.
Recipientes metálicos	- Con fondo plano para calentar agregados.

2) Gravedad específica y absorción del agregado grueso

Para el ensayo se utilizó una canastilla con abertura de 3,35 mm o No. 6, que consiste en un contenedor fabricado con malla de alambre fina, es fundamental que la estructura de la canastilla permita sumergirla totalmente sin que se formen burbujas o quede aire atrapado en su interior, garantizando así la precisión del peso sumergido [2]. Además, se emplearon recipientes metálicos grandes, un tanque de agua (suspendido debajo de la balanza), el tamiz Nº 4 (marca Gran Test), una balanza digital con 1g de precisión, horno para el secado de las muestras y franela para el secado superficial, como se muestra en la TABLA IX.

TABLA IX
INSTRUMENTOS DE LABORATORIO PARA EL ENSAYO DE GRAVEDAD ESPECÍFICA DE AGREGADOS GRUESOS

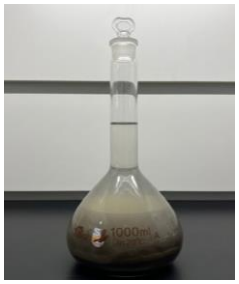
ENSAYO	GRAVEDAD ESPECÍFICA DE AGREGADOS GRUESOS	
NORMA	**MATERIALES**	**FOTOGRAFÍA**
NTE INEN 857	Agregado pétreo grueso. Agregados reciclados de carpeta asfáltica o material fresado. Agua.	

INSTRUMENTOS	DETALLE
Canastilla	- Abertura de 3,35 mm o No. 6. Con capacidad de 4-7 litros para abarcar un tamaño nominal máximo de agregados de 37,5 mm o menores.
Recipientes metálicos	- Con fondo plano para calentar agregados.
Tanque de agua	- Tanque hermético.
Tamices	- Malla con abertura de 4,75 mm (Nº 4). - Marca Gran Test.
Balanza	- Marca TCS-Electronic Scale.
Horno o estufa	- Control de temperatura hasta 110 ± 5°C.
Franela	- Franela o toalla para secar los agregados.

3) Gravedad específica y absorción del agregado fino

Se usó un picnómetro de vidrio (marca Mediclife) con capacidad de 1000 ml, instrumento para determinar con gran precisión la densidad y gravedad específica de sólidos finos, al comparar la masa de la muestra con la de un volumen igual de agua [10]. Además, se utilizaron recipientes metálicos, un termómetro graduado para el control de temperatura (escala de 0-50 °C y con precisión de 0,1 °C), una pipeta que es un instrumento tubular graduado que permite medir y transferir volúmenes exactos de líquidos, una balanza eléctrica, un horno para el secado, un tamiz con abertura 2,36 mm (Nº 8) (marca Gran Test) y un embudo para facilitar la manipulación de la muestra. Materiales y equipos mencionados en la TABLA X.

TABLA X
INSTRUMENTOS DE LABORATORIO PARA EL ENSAYO DE GRAVEDAD ESPECÍFICA DE AGREGADOS FINOS

ENSAYO	GRAVEDAD ESPECÍFICA DE AGREGADOS FINOS	
NORMA	**MATERIALES**	**FOTOGRAFÍA**
NTE INEN 856	Agregado fino. Agua.	

INSTRUMENTOS	DETALLE
Picnómetro de vidrio	- Capacidad de 1000 ml. - Marca Mediclife.
Recipientes metálicos	- Con fondo plano para calentar agregados.
Termómetro graduado	- Escala de 0-50 °C y con precisión de 0,1 °C.
Pipeta	- Precisión al medir el agua.
Balanza	- Marca TCS-Electronic Scale.
Horno o estufa	- Temperatura uniforme hasta 110 ± 5°C.
Tamiz	- Tamiz con abertura 2,36 mm (Nº 8).

4) Análisis granulométrico

Para la granulometría de los agregados, tanto grueso, fino y RAP, se emplearon los siguientes equipos; una tamizadora eléctrica, que sirve para separar el material por diferentes tamaños mediante vibraciones mecánicas controladas, un conjunto de tamices de aberturas como 3/4'', 1/2'', 3/8'', Nº 4, Nº 8, Nº 16, Nº 30, Nº 50, Nº100, Nº200 (marca Gran Test), recipientes metálicos, horno para el secado, balanza digital y una brocha, instrumentos mencionados en la TABLA XI.

TABLA XI

INSTRUMENTOS DE LABORATORIO PARA EL ENSAYO DE ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

ENSAYO	ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO	
NORMA	**MATERIALES**	**FOTOGRAFÍA**
ASTM C117 ASTM C136	Agregado fino y grueso. Agregados reciclados de carpeta asfáltica o material fresado.	
INSTRUMENTOS		**DETALLE**
Tamizadora		- Marca MATEST, modelo Server P.
Tamices		- De abertura: 3/4'', 1/2'', 3/8'', Nº 4, Nº 8, Nº 16, Nº 30, Nº 50, Nº 100, Nº 200 y fuente.

	- Marca Gran Test.
Recipientes metálicos	- Tamaño mediano.
Horno	- Temperatura uniforme hasta 110 ± 5°C.
Balanza	- Marca TCS-Electronic Scale.
Brocha	- Tamaño pequeño.

5) Masa unitaria (peso volumétrico) del agregado grueso

Se utilizaron recipientes de volumen conocido, una balanza digital (marca TCS-Electronic Scale), un pistón de acero para enrazar el material sobrante del recipiente de medida o molde, una pala de tamaño convencional para mezclar correctamente el agregado grueso, una brocha grande y una fuente para evitar el desperdicio de material, ver TABLA XII.

TABLA XII
INSTRUMENTOS DE LABORATORIO PARA EL ENSAYO DE MASA UNITARIA (PESO VOLUMÉTRICO) DEL AGREGADO GRUESO

ENSAYO	PESO UNITARIO SUELTO DEL AGREGADO GRUESO	
NORMA	**MATERIALES**	**FOTOGRAFÍA**
ASTM C29 NTE INEN 858	Agregado pétreo grueso.	
INSTRUMENTOS		**DETALLE**
Balanza		- Marca TCS-Electronic Scale.
Pisón		- Vara de acero - Diámetro: 3/8’’ - Longitud: 24’’
Recipiente de medida		- Volumen 5,301 cm3.
Pala		- Tamaño convencional.
Fuente		- De tal forma que no se desperdicie material.
Brocha		- Tamaño grande.
Carretilla		- Transporte de material.

6) Masa unitaria (peso volumétrico) del agregado fino

De igual manera, se emplearon equipos similares, como es un recipiente de medida o molde, una balanza digital (marca TCS-Electronic Scale), un pistón de acero para enrazar el material sobrante, una pala de tamaño convencional para mezclar correctamente el agregado fino, una brocha y una fuente, ver TABLA XIII.

TABLA XIII
INSTRUMENTOS DE LABORATORIO PARA EL ENSAYO DE MASA UNITARIA (PESO VOLUMÉTRICO) DEL AGREGADO FINO

ENSAYO	PESO UNITARIO SUELTO DEL AGREGADO FINO	
NORMA	**MATERIALES**	**FOTOGRAFÍA**
ASTM C29 NTE INEN 858	Agregado pétreo fino.	
INSTRUMENTOS		**DETALLE**
Balanza		- Marca TCS-Electronic Scale.
Pisón		- Vara de acero de diámetro 3/8’’. - Longitud 24’’.
Recipiente de medida		- Recipiente cilíndrico de metal de volumen 2,124 cm3.
Pala		- Tamaño convencional.
Fuente		- De tal forma que no se desperdicie material.
Brocha		- Tamaño pequeño.
Carretilla		- Transporte de material.

7) Resistencia al desgaste por abrasión

Para el ensayo se usó la máquina de Los Ángeles (marca SKU 48-D0500/G), que es un equipo diseñado para medir la resistencia al desgaste y a la degradación de los agregados mediante el impacto y la fricción con esferas metálicas dentro de un cilindro giratorio [10].

Además, se utilizó un conjunto de tamices de diferentes aberturas: 3/4’’, 1/2’’, 3/8’’, 1/4’’, Nº 4, Nº 8, y Nº 12 (marca Gran Test), 11 esferas de acero con diámetro de 47 mm y masa en un rango de 390 y 445g (el número de esferas es según el método empleado en el ensayo), horno (marca HUMBOLT H-30145E) y una balanza digital (marca KERN) para el control del peso de las muestras antes y después del ensayo, como se muestra la TABLA XIV.

TABLA XIV

INSTRUMENTOS DE LABORATORIO PARA EL ENSAYO DE ABRASIÓN

ENSAYO	RESISTENCIA AL DESGASTE POR ABRASIÓN	
NORMA	**MATERIALES**	**FOTOGRAFÍA**
ASTM C 131 AASHTO T96	Agregado pétreo grueso. Agregados reciclados de carpeta asfáltica o material fresado.	
INSTRUMENTOS		**DETALLE**
Máquina de los ángeles		- Marca SKU 48-D0500/G. - Estructura de acero soldada con altos niveles de rigidez mecánica.
Tamices		- De abertura: 3/4’’, 1/2’’, 3/8’’, 1/4’’, Nº 4, Nº 8, y Nº 12. Marca Gran Test.
Esferas		- Bolas de acero con diámetro de 47 mm y masa en un rango de 390 y 445g.
Recipientes metálicos		- Tamaño grande.
Horno		- Temperatura constante de 110 ± 5°C. - Marca HUMBOLT H-30145E.
Balanza		- Capacidad superior a 10kg. - Marca KERN.
Brocha		- Tamaño pequeño.

8) Punto de reblandecimiento o ablandamiento del cemento asfáltico AC-20

Se empleó un vaso de precipitación (beaker) (marca Glassco) resistente al calor con diámetro mayor que 8,5 cm, altura 10,5 cm y capacidad máxima 700 ml, 2 anillos de bronce, 2 bolas de acero de diámetro 3/8'' y peso de 3,45 gramos, 2 guías de bola, un termómetro con escala -2 a 80ºC, una cocineta capaz de alcanzar una temperatura superior a 100°C para calentar el cemento asfáltico, y un calentador en este caso un mechero de gas, ver TABLA XV.

TABLA XV

INSTRUMENTOS DE LABORATORIO PARA EL ENSAYO DE PUNTO DE REBLANDECIMIENTO

ENSAYO	PUNTO DE REBLANDECIMIENTO DEL CEMENTO ASFÁLTICO	
NORMAS	**MATERIALES**	**FOTOGRAFÍA**
ASTM D 36 AASHTO T 53-74	Cemento asfáltico AC-20. Agua destilada.	
INSTRUMENTOS		**DETALLE**
Anillo de bronce		-
Bola de acero		- Dimensiones: Diámetro de 3/8'' Peso entre 3.45 y 3.55 gramos.
Guía de bola		-
Termómetro		- Escala de -2 a 180 °C. - Resistente a altas temperaturas.
Vaso de precipitación		- Marca Glassco. - Resistente al calor. - Diámetro mayor que 8.5 cm. - Altura 10.5 cm.
Cocineta		- Capaz de alcanzar una temperatura de 100°C.
Fundidor		- Mechero de gas o calentador.
Papel aluminio		-
Guipe		-

9) Punto de inflamación y combustión del cemento asfáltico AC-20

Para el ensayo de punto de inflamación y combustión del cemento asfáltico AC-20, se utilizó el equipo de Copa abierta de Cleveland. Este conjunto incluye una placa de calentamiento metálica (marca HUMBOLDT, modelo H-2085), que sirve como base para sostener el equipo y ayudar a repartir el calor de forma uniforme. También se empleó el vaso de Cleveland fabricado en bronce, que es un recipiente redondo donde se coloca la muestra de asfalto para el calentamiento [3].

El control térmico del proceso se realizó mediante un termómetro graduado en escala -6 a 400ºC, empleando un fundidor o mechero de gas regulable para fuente de energía calórica. Se incluyó un guaipe y un tanque de gas, mencionado en la TABLA XVI.

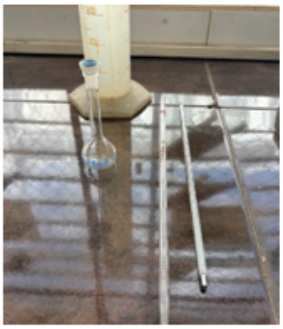
TABLA XVI
INSTRUMENTOS DE LABORATORIO PARA EL ENSAYO DE PUNTO DE INFLAMACIÓN Y COMBUSTIÓN

ENSAYO	PUNTO DE INFLAMACIÓN Y COMBUSTIÓN DEL CEMENTO ASFÁLTICO	
NORMAS	**MATERIALES**	**FOTOGRAFÍA**
AASHTO T 48-74 ASTM D 92-66	Cemento asfáltico AC-20.	
INSTRUMENTOS		**DETALLE**
Vaso abierto de Cleveland		- Vaso abierto de bronce - Borde inclinado de aproximadamente 45°.
Placa de calentamiento de metal		- Soporte para el vaso Cleveland. - Marca HUMBOLDT, modelo H-2085.
Fundidor de gas		- Mechero de gas.
Termómetro		- Graduado en escala -6 a 400 °C.
Tanque de gas		-
Guantes térmicos		-

10) Gravedad específica del cemento asfáltico AC-20

Para la realización de este ensayo se empleó un picnómetro de vidrio con capacidad comprendida entre 24 y 30 ml, para contener una masa aproximada máxima de 40 g. El mismo es utilizado para determinar la relación entre la masa y el volumen del cemento asfáltico AC-20 y sus modificaciones. Además, se empleó el equipo de baño maría para mantener la temperatura constante de 25°C. Los instrumentos complementarios fueron un termómetro con escala de -8 a 32°C, una cocineta como fuente de calor para calentar el cemento asfáltico, una balanza digital, recipientes metálicos resistentes al calor y guantes de protección, ver TABLA XVII.

TABLA XVII
INSTRUMENTOS DE LABORATORIO PARA EL ENSAYO DE GRAVEDAD ESPECÍFICA DEL CEMENTO ASFÁLTICO

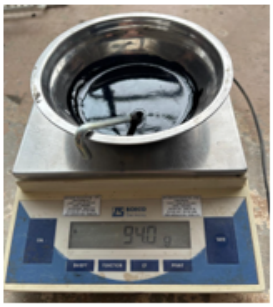
ENSAYO	GRAVEDAD ESPECÍFICA DEL CEMENTO ASFÁLTICO	
NORMAS	**MATERIALES**	**FOTOGRAFÍA**
ASTM D 70 I.N.V.E -707-13	Cemento asfáltico AC-20. Agua destilada.	
INSTRUMENTOS		**DETALLE**
Picnómetro de vidrio		- Capacidad entre 24 – 30 ml. - Masa aproximada máxima de 40 g. - Tapón esmerilado con orificio central de 1 a 2 mm de diámetro.
Baño de agua		- Capaz de mantener temperatura constante a 25°C - Variación máxima de ± 0,1 °C.
Termómetro		- Escala -8 a 32 °C.
Fuente de calor		- Capaz de alcanzar una temperatura de 100°C.
Balanza digital		- Sensibilidad mínima de 0,01g.
Recipiente metálico		- Utilizado para calentar la muestra.
Guantes de protección		- Resistentes al calor.

11) Residuo por evaporación de la emulsión asfáltica CSS -1h

Para este ensayo se utilizó un horno (marca HUMBOLT H-30145E) con temperatura superior a 163 ± 3 °C, balanza digital con precisión de 0,1g (marca BOECO), 3 recipientes metálicos o vasos de precipitación de vidrio borosilicato (resistente a temperaturas hasta 200 °C) para colocar la emulsión asfáltica, 3 varillas para agitar la muestra y evitar burbujas de aire en el interior después de un determinado tiempo (proceso de evaporación del agua), y guantes de protección para sacar las muestras del horno, ver TABLA XVIII.

TABLA XVIII

INSTRUMENTOS DE LABORATORIO PARA EL ENSAYO DE RESIDUO POR EVAPORACIÓN

ENSAYO	RESIDUO POR EVAPORACIÓN DE LA EMULSIÓN ASFÁLTICA	
NORMAS	**MATERIALES**	**FOTOGRAFÍA**
NTE INEN 905 ASTM 244-29	Emulsión asfáltica CSS -1h	
INSTRUMENTOS		**DETALLE**
Horno		- Marca HUMBOLT H-30145E. - Temperatura 163 ± 3 °C.
Balanza digital		- Marca BOECO - Precisión 0.1g.
Recipientes		- Tres recipientes metálicos - Tamaño pequeño.
Varillas		- Tamaño pequeño para agitar la muestra.
Guantes de protección		- Resistentes al calor.

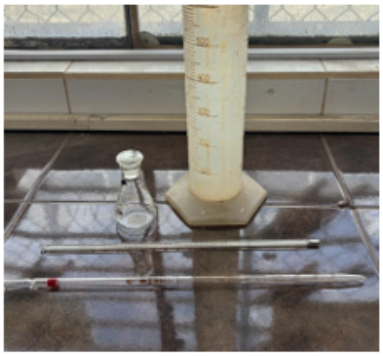
12) Gravedad específica de la emulsión asfáltica CSS-1h

Para determinar la gravedad específica de la emulsión asfáltica CSS-1h se emplearon instrumentos como un picnómetro o copa metálica fabricada de acero inoxidable con capacidad aproximada de 83,2 ml, que permite contenes un volumen conocido del material para calcular su

densidad. Además, se empleó el equipo de baño maría para controlar una temperatura constante de 25 ± 0,5 °C durante el ensayo. Los instrumentos complementarios fueron un termómetro con escala de 19 a 27 °C, una balanza digital con sensibilidad de 0,01 g, una espátula o varilla metálica para homogenizar la emulsión asfáltica, recipientes metálicos resistentes al calor y guantes de protección, ver TABLA XIX.

TABLA XIX

INSTRUMENTOS DE LABORATORIO PARA EL ENSAYO DE GRAVEDAD ESPECÍFICA DE LA EMULSIÓN ASFÁLTICA

ENSAYO	GRAVEDAD ESPECÍFICA DE LA EMULSIÓN ASFÁLTICA	
NORMAS	**MATERIALES**	**FOTOGRAFÍA**
ASTM D 6937	Emulsión asfáltica CSS-1h.	
INSTRUMENTOS		**DETALLE**
Picnómetro o copa metálica		- Fabricado de acero inoxidable. - Capacidad aproximada de 83,2 ml. - Tapa metálica con ajuste hermético.
Baño de agua		- Capaz de mantener temperatura constante a 25°C. - Variación máxima de ± 0,1 °C.
Termómetro		- Escala 19 a 27 °C. - Precisión de 0,1 °C.
Balanza digital		- Sensibilidad mínima de 0,01g.
Espátula o varilla metálica		- Homogenizar la emulsión asfáltica.
Recipiente metálico		- Resistente al calor.
Guantes de protección		- Resistentes al calor y manipulación de materiales asfálticos.

B. FASE II

En la segunda fase, destinada a comprender el diseño de la mezcla asfáltica en frío, considerando diferentes porcentajes de emulsión asfáltica para determinar el contenido óptimo mediante el método Marshall, se emplearon varios equipos y materiales específicos según el tipo de ensayo realizado.

1) Elaboración de briquetas y ensayo Marshall

Para la elaboración de briquetas se utilizaron los siguientes equipos y materiales:

- *Molde:* se basa en un cilindro metálico de 4 in (10,16 cm) de diámetro y 3 in (7,62 cm) de altura, al que se le añade un collar de extensión y una placa de basa plana. El equipo cuenta con agarraderas laterales para su manipulación durante el proceso de compactación, que permiten el ensamble hermético para evitar pérdida del material [21]. Para la elaboración se emplearon 3 moldes.
- *Martillo de compactación*: consiste en un pistón de acero que tiene una base circular plana de 98,4 mm de diámetro con un contrapeso deslizante. Esta máquina cuenta con una masa total de 10 lb o 4536 ± 9 g y está diseñada para proporcionar una energía de impacto constante por medio de una altura de caída libre de 18 in o 457,2 ± 1,524 mm [21].
- *Pedestal de compactación:* este elemento consiste en un bloque prismático de madera dura, como el roble, con dimensión de 203,2 mm por lado y una altura de 457,2 mm. En la parte superior el bloque dispone de una placa de acero de 304,8 mm de lado y 25,4 mm de espesor, la cual se encuentra anclada con firmeza con la intención de proporcionar una superficie de apoyo estable y nivelada [21].

Además, se emplearon instrumentos como balanza superior a 5 kg (marca TCS- Electronic Scale), un recipiente grande para mezclar los agregados y la emulsión asfáltica, baño maría para controlar la temperatura a 25°C, espátula grande, cucharón grande, guantes de protección para la manipulación de la mezcla, guaipe y aceite quemado para limpiar los equipos.

Para el ensayo Marshall se utilizaron los siguientes equipos y materiales:

- *Extractor de probetas:* se trata de un disco de acero de resistencia elevada, con un diámetro de 100 mm y un espesor de 12,7 mm. Su función consiste en acelerar la expulsión de la probeta compactada desde el interior del molde hacia el collar de extensión [21].
- *Pie de rey o calibrador:* instrumento de medida de alta precisión utilizado para mediciones de espesores y diámetros de las probetas, (marca Uyustools).
- *Prensa:* equipos para determinar la resistencia al flujo plástico. El dispositivo dispone de un motor de velocidad constante y un sistema de inversión que produce un desplazamiento vertical uniforme de 51 mm (2 in) por min [21].
- *Medidor de la estabilidad Marshall:* el equipo incorpora un anillo de carga calibrado H-4454.100 y un indicador de carátula que permite medir la carga aplicada durante el ensayo. Presenta una capacidad máxima de 50 kN (11000 lbf) y un recorrido máximo del pistón de 88 mm. Sus dimensiones son 457x457x978 mm y altura de 38,5 in [21]. La marca del equipo utilizado es HUMBOLDT modelo H 1339B, ver TABLA XX.

TABLA XX

INSTRUMENTOS DE LABORATORIO PARA ELABORACIÓN DE BRIQUETAS Y ENSAYO MARSHALL

ENSAYO	MÉTODO MARSHALL	
NORMAS	**MATERIALES**	**FOTOGRAFÍA**
ASTM D 6926-16 ASTM D 6927-22	Agregados (gruesos y finos). Agregados reciclados. Emulsión asfáltica.	 
INSTRUMENTOS		**DETALLE**
Prensa de estabilidad Marshall		- Marca HUMBOLDT modelo H 1339B.
Moldes para briquetas		- Dimensiones: 4” de diámetro y 3” de altura.
Martillo compactador		- Con zapata de forma circular de 10 lb.
Pedestal de compactación		- Debe estar correctamente anclado al suelo.
Balanza		- Capacidad de 30 kg y 1g de precisión. - Marca TCS-Electronic Scale.

Extractor de probeta	- Equipo de acero con diámetro de 3,95” y un espesor de 12,7”.
Baño María	- Equipo utilizado para obtener una temperatura constante.
Recipiente	- Tamaño grande.
Cucharón	- Tamaño grande.

2) Método RICE o densidad máxima teórica

Finalmente, para el ensayo de densidad máxima teórica o método RICE se utilizaron como material las mezclas en estado suelto elaboradas anteriormente (tanto la mezcla asfáltica en frío con material convencional, así como también, con agregado reciclado) y como equipos se emplearon los siguientes:

- *Recipiente de vacíos:* se trata de un contenedor de alta resistencia, ya sea de vidrio o policarbonato, diseñado para soportar presiones negativas extremas sin sufrir implosiones. Este equipo integra los accesorios para el ensayo y dispone de un conducto de conexión hacia la bomba de vacío, el cual se protege con una malla de 75 µm para prevenir la succión de partículas finas de la muestra [10].
- *Taza de vacíos:* recipiente cilíndrico de metal, con un diámetro de entre 180 a 260 mm y una altura de 160 mm. Dispone de una tapa transparente, que permite la observación de la liberación de burbujas de aire [10].
- *Bomba de vacíos:* este equipo tiene un sistema de succión mecánica diseñado para evacuar el aire de los recipientes de ensayo hasta alcanzar una presión residual igual o inferior a 30 mm Hg [10]. La marca del equipo de la bomba de vacíos utilizada fue una Fischer LAV-3.
- *Manómetro de presión residual:* es un dispositivo de medición de alta presión que está conectado de forma directa al recipiente de vacío. Su función es monitorear la presión residual, garantizando un control riguroso sobre el nivel de desaireación [10].
- *Válvula de escape:* facilita la liberación controlada de aire hacia el sistema, facilitando la estabilización del vacío en los niveles requeridos por la normativa y evitando cambios bruscos de presión que pueda alterar el comportamiento [10].

Además, se utilizó una balanza digital (marca TCS-Electronic Scale) con precisión de 1g, una bandeja metálica de tamaño grande, una espátula plana con mango de plástico y guantes látex para la manipulación del material y evitar que existan pérdidas del mismo. Estos equipos y materiales se mencionan en la TABLA XXI.

TABLA XXI

INSTRUMENTOS DE LABORATORIO PARA EL MÉTODO RICE

ENSAYO	MÉTODO RICE O DENSIDAD MÁXIMA TEÓRICA	
NORMAS	**MATERIALES**	**FOTOGRAFÍA**
ASTM D 2041 I.N.V.E 735 – 07	Mezclas en estado suelto de agregados convencionales y agregados reciclados.	
INSTRUMENTOS		**DETALLE**
Recipiente de vacío		- Capacidad entre 2000 y 10000 ml.
Taza de vacío		- Diámetro de 180 a 260 mm y altura de 1601 mm. - Incluye tapa transparente.
Bomba de vacío		- Capaz de sostener una presión residual de al menos 40 KPa (30 mmHg). - Marca Fischer LAV-3.
Manómetro de presión residual		- Medidor de presión.
Válvula de escape		-
Balanza		- Marca TCS-Electronic Scale.
Bandeja metálica		- Tamaño grande.
Espátula		- Plana con mango plástico.
Guantes		- Guantes de protección látex.

C. FASE III

Para la tercera fase, destinada a la evaluación y comparación de los resultados experimentales analizando parámetros como estabilidad, flujo, densidad y porcentajes de vacíos en mezclas elaboradas con agregados convencionales y con agregados reciclados, se realizó el análisis de los datos obtenidos mediante un método estadístico, apoyado en el uso de una Laptop HP Pavilion i7 que cuenta con herramientas como Excel, donde se generaron gráficas comparativas de las propiedades evaluadas en función del porcentaje de contenido óptimo de emulsión. Esta fase permitió integrar los resultados del estudio y establecer conclusiones fundamentales en criterios técnicos sobre el comportamiento del material, ver TABLA XXII.

TABLA XXII
MÉTODO ESTADÍSTICO

MÉTODO ESTADÍSTICO	
INSTRUMENTO	**FOTOGRAFÍA**
Laptop HP Pavilion i7 (software de aplicación: Excel)	

I. MÉTODOS

La presente investigación corresponde a un trabajo de tipo experimental, para el cual fue necesario seguir una serie de procedimientos que permitieron su desarrollo. Con este fin, el estudio se organizó en tres fases, las cuales se describen a continuación:

A. FASE I

1) Localización y obtención de materiales

Los materiales empleados en el estudio correspondieron a los componentes necesarios para la elaboración de mezclas asfálticas en frío. La selección de dichos materiales se realizó considerando su disponibilidad en la zona y su representatividad para el estudio.

a) Material reciclado de pavimento asfáltico

Los agregados reciclados de carpeta asfáltica o “RAP”, se obtuvieron directamente de la vía ubicada en el sector “El Placer”, en el cantón Quero, provincia de Tungurahua, donde se ejecutaban trabajos de fresado de carpeta asfáltica para un mantenimiento vial por parte de “JEAL Construcciones”, ver Fig. 11. Su ubicación corresponde a:

- *Zona:* 17
- *Coordenadas:* 768215.00 m E; 9842632.00 m S.

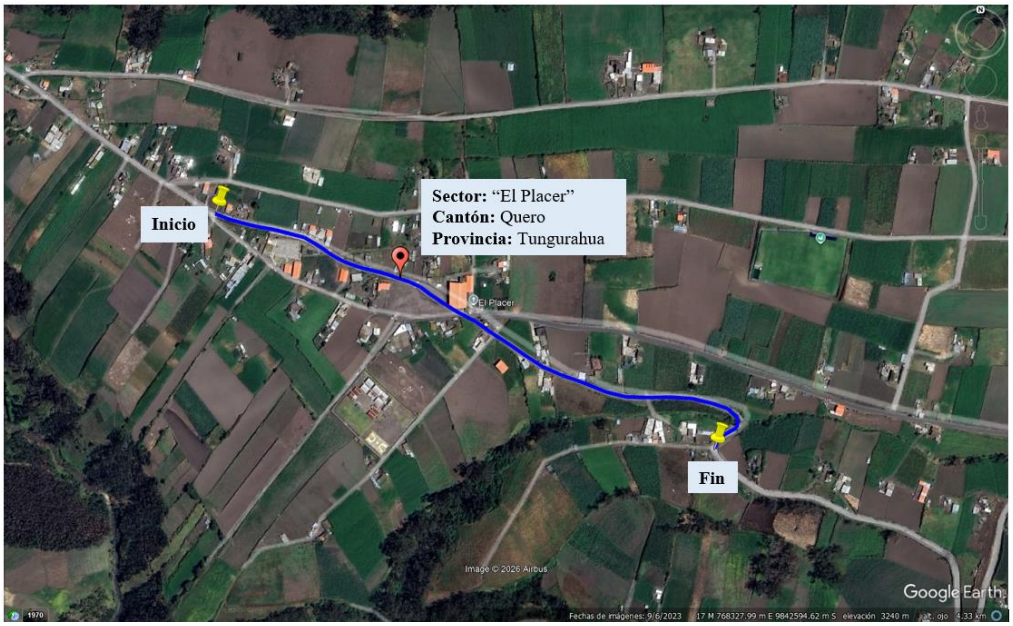


Fig. 11 Ubicación de la muestra de los agregados reciclados (RAP)

Se realizó el muestreo del material fresado mediante la recolección de cuatro sacos, los cuales fueron almacenados adecuadamente bajo las precauciones necesarias para preservar sus propiedades originales antes de su análisis. La obtención del material fue posible gracias a los trabajos de intervención vial ejecutados por “JEAL Construcciones”.

La vía intervenida presentaba una longitud aproximada de 1,5 km y un ancho de 6 m. Además, se estimó una vida útil cercada a los 30 años, considerando que inicialmente fue construida con empedrado y posteriormente recubierta con una carpeta asfáltica, condición que contribuyó a la falla estructural del pavimento. (Ver Fig. 12).



Fig. 12 Proceso de fresado de la vía "El Placer"

b) Agregados vírgenes o convencionales

Por otra parte, los agregados vírgenes o nuevos (agregado grueso y fino) fueron obtenidos de una fuente autorizada, correspondiente a la cantera “KUMOCHI” perteneciente a la empresa “JEAL Construcciones”, ver Fig. 13. Su ubicación corresponde a:

- *Zona:* 17
- *Coordenadas:* 769089.00 m E; 9862392.00 m S.



Fig. 13 Ubicación de la cantera "KUMOCHI"

La selección de esta cantera se realizó en función de la calidad y disponibilidad de los materiales pétreos (agregado grueso 3/4 in, 3/8 in y polvo de piedra) requeridos para el diseño de la mezcla asfáltica. (Ver Fig. 14).



Fig. 14 Ubicación de la mina "KUMOCHI"

c) Cemento asfáltico AC-20

De igual manera, el cemento asfáltico AC-20 se obtuvo en la misma constructora en la planta de asfalto. De tal forma que se almacenó con los cuidados necesarios ya que es inflamable. Su ubicación corresponde a la zona: 17, con coordenadas: 769154.00 m E; 9863049.00 m S, como se muestra en la Fig. 15.



Fig. 15 Ubicación Planta de asfalto - JEAL Construcciones

Se obtuvo aproximadamente un litro de cemento asfáltico AC-20 y se almacenó cuidadosamente en un lugar a temperatura ambiente (laboratorio de la misma constructora). (Ver Fig. 16).



Fig. 16 Entrada planta de asfalto - JEAL Construcciones

d) Emulsión asfáltica CSS – 1h

Y a su vez, la emulsión asfáltica tipo CSS -1h de rotura lenta se obtuvo en la planta industrial "IMPTEK" Chova del Ecuador S.A. ubicada en Sangolquí, cantón Rumiñahui, provincia de Pichincha. Zona: 17; 786402.00 m E; 9963753.00 m S, ver la Fig. 17.



Fig. 17 Ubicación de la Fabrica Chova – Imptek

Se obtuvo dos canecas de emulsión asfáltica CSS – 1h de rompimiento lento, las mismas que se almacenaron rigurosamente en un lugar a temperatura ambiente. En la fábrica Chova - Imptek se recomendó mezclar con una barra metálica cada 3 días para que se evite el asentamiento del cemento asfáltico, y por ende una cierta separación con el agua. (Ver Fig. 18).



Fig. 18 Despacho de emulsión asfáltica - Planta industrial Imptek

2) Muestreo de campo – NTE INEN 695

Este método estableció el procedimiento para la obtención de muestras representativas de áridos finos y gruesos provenientes de una fuente específica, según la norma NTE INEN 695 [22].

Para su correcta aplicación, se consideraron las precauciones necesarias, ya que la calidad de la muestra dependió de factores como la experiencia del personal y el uso adecuado de los equipos o herramientas. Se realizó el muestreo tanto para el agregado grueso de 3/4", 3/8" y para el agregado fino (polvo de piedra).

Procedimiento del muestreo [22]:

1. Se llevó a cabo una revisión visual del área de acopio o almacenamiento del material, con el fin de identificar los puntos; superior, intermedio e inferior donde se efectuaría los muestreos correspondientes. (Ver Fig. 19 y Fig. 20).
2. Se ubicó al operador en la zona intermedia de la pila de material.
3. Se ejecutó una excavación de aproximadamente 30 cm utilizando palas.
4. Se extrajo la muestra desde la excavación realizada y se la colocó en los sacos correspondientes.

5. Se repitió el procedimiento de perforación y extracción en los puntos inferior y superior de la pila de acopio.
6. Se recolectaron cantidades suficientes de material, con el propósito de cubrir los requerimientos de los ensayos de laboratorios posteriores.
7. Finalmente, se transportaron los sacos al lugar de almacenamiento.



Fig. 19 Toma de muestras del material convencional en campo



Fig. 20 Toma de muestras del material reciclado en campo

3) Ensayo de extracción de asfalto – ASTM D 2172

Para determinar el porcentaje de asfalto residual de los agregados reciclados mediante centrifugación, se realizó siguiendo los procedimientos establecidos en la norma ASTM D 2172, el cual permite separar el ligante asfáltico de los agregados utilizando un solvente adecuado, en este caso gasolina, con el fin de cuantificar el porcentaje de asfalto envejecido presente en el material fresado [23].

El método es aplicable para mezclas asfálticas y especímenes de pavimento, y el contenido de asfalto se determina a partir de la diferencia de masas entre el agregado extraído, el contenido de humedad y el material mineral remanente en el extracto. Los resultados se expresan como porcentaje en masa de la mezcla libre de humedad [14], [23].

Es importante considerar que la precisión del ensayo puede verse afectada por el envejecimiento del material y el tiempo transcurrido desde su preparación, ya que muestras almacenadas durante largos periodos tienden a presentar menores valores de contenido asfáltico. Además, algunos agregados pueden retener residuos de solvente o pequeñas cantidades de ligante, lo que puede influir ligeramente en la medición final [14].

Procedimiento del ensayo [23]:

1. Se colocó una muestra asfáltica en una bandeja o fuente.
2. Se realizó el cuarteo del material con el fin de obtener una muestra representativa.
3. Se colocó una muestra en el bol del extractor, dependiendo del tamaño de la partícula más grande del agregado de la mezcla, aunque también depende de la capacidad de la máquina de extracción, como se muestra en la TABLA XXIII.

TABLA XXIII
PESO MÍNIMO DE LAS MUESTRAS (2017) [23]

Tamaño nominal máximo, (pulgadas)	**Tamaño de la muestra del ensayo mínimo (g)**
1(in)	2500
¾ (in)	2000
½ (in)	1500
3/8 (in)	1000
No. 4	500

4. Se añadió gasolina como solvente, en cantidad suficiente para cubrir completamente la mezcla asfáltica reciclada y se dejó reposando de 15 a 30 minutos.

5. El papel filtro fue previamente secado en horno durante 1 minuto, luego fue enfriado y pesado; posteriormente, se colocó alrededor del borde del recipiente del extractor y se procedió a cerrar el equipo de forma hermética.
6. Se colocó un recipiente en el sistema de drenaje (botella o bote) para recolectar el solvente, asegurándolo correctamente para evitar pérdidas durante el ensayo.
7. Se encendió la máquina centrífuga hasta 3600 rpm, incrementando gradualmente la velocidad, con el objetivo de iniciar la extracción del ligante asfáltico.
8. El proceso de lavado se repitió varias veces, adicionando nuevo solvente, hasta que el líquido extraído presentó un color claro, indicando que el asfalto fue removido completamente.
9. Una vez que el solvente dejó de fluir, se detuvo el equipo y se abrió cuidadosamente. Con ayuda de una espátula, se removió el material adherido a las paredes del recipiente, redistribuyéndolo de manera uniforme.
10. Finalizada la extracción, tanto el agregado como el papel filtro fueron llevados al horno a una temperatura de 100 a 110 °C hasta alcanzar masa constante. Posteriormente, se dejaron enfriar a temperatura ambiente y se registraron sus pesos finales. (Ver Fig. 21).
11. Con el material del lavado se realizó el ensayo de análisis granulométrico, utilizando una serie de tamices desde ¾'' hasta el Nº 200 y la fuente.
12. Se registró el peso retenido parcial de cada uno de los tamices.
13. Se realizó los respectivos cálculos para identificar el tipo de granulometría y saber si cumple con la faja establecida por la MOP.

    Es importante conocer que los agregados obtenidos mediante este método pueden utilizarse para el ensayo de análisis granulométrico mediante el método ASTM C117 y ASTM C136.

Para determinar el porcentaje de asfalto se empleó la siguiente fórmula:

$$\% \, ASF = \frac{(A - (B + E + F))}{A} * 100 \qquad (1)$$

Donde,

A Peso de la mezcla asfáltica antes del lavado (g).

B Peso de la mezcla asfáltica después del lavado (g).

C Peso del filtro antes del lavado (g).

D Peso del filtro después del lavado (g).

E % de retenido en el filtro (C-D).

F Peso del solvente (3,5 g).

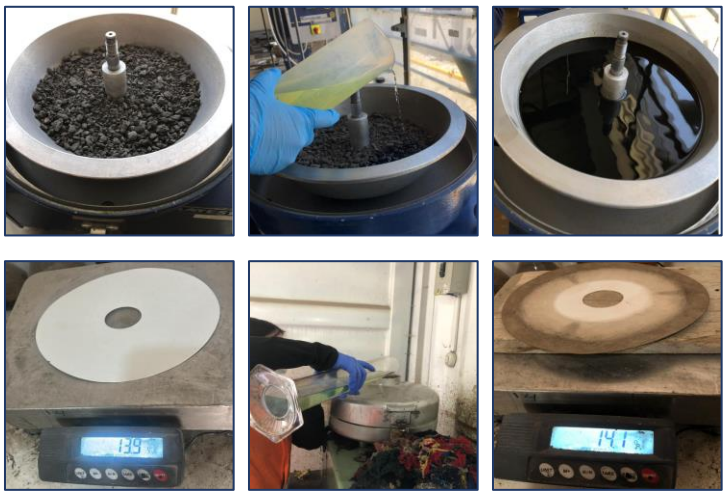


Fig. 21 Proceso de extracción del asfalto residual de los agregados reciclados

4) Análisis granulométrico – ASTM C 136

La granulometría es una de las propiedades físicas más importantes de los agregados, ya que influye directamente en la resistencia y en el comportamiento de las mezclas asfálticas durante su elaboración y compactación. La selección de la granulometría del material pétreo depende principalmente de los requerimientos de la obra y la normativa técnica aplicable. Las mezclas que contienen una mayor proporción de partículas de tamaño grueso presentan una alta estabilidad. Además, el tamaño máximo de las partículas no debe exceder las 2/3 partes del espesor de la carpeta asfáltica [13]. Dentro de los requisitos establecidos por el MOP-001-F-2002, se menciona que los agregados deben estar completamente limpios, secos y libres de cualquier material extraño. Para los agregados gruesos el coeficiente de desgaste a la abrasión deberá ser < 40% y su adherencia será > 95% [2].

El procedimiento se basó en las normas ASTM C 136 / NTE INEN 696. El ensayo se realizó empleando una serie de tamices dispuestos de forma descendentes, los cuales son sometidos a vibración para separar el material retenido en cada fracción [25], [26]. La TABLA XXIV muestra las especificaciones granulométricas que deben cumplirse para el diseño de las mezclas asfálticas.

TABLA XXIV
LÍMITES MÁXIMOS Y MÍNIMOS DE LA GRANULOMETRÍA DE HORMIGÓN ASFÁLTICO MEZCLADO EN PLANTA (2002) [2]

TAMIZ	Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada			
	¾"	½"	3/8"	N°4
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

Procedimiento del ensayo [26]:

1. Se efectuó la mezcla y homogeneización de las muestras del material, procurando evitar la segregación y la pérdida de las partículas más finas del agregado.
2. Se realizó el cuarteo conforme a la norma INEN 696, ver TABLA XXV.

TABLA XXV
TAMAÑO DE LA MUESTRA PARA ENSAYO (ÁRIDO GRUESO) (2011) [27]

Tamaño nominal máximo, Aberturas cuadradas, en mm (pulgadas)	Tamaño de la muestra del ensayo mínimo (kg)
9.5	1
12.5	2
19.0	5
25.0	10
37.5	15
50	20
63	35
75	60
90	100
100	150
125	300

3. La muestra fue sometida a un proceso de secado en horno, manteniéndose a una temperatura constante de 110 °C $\pm$ 5 °C durante un periodo de 24 $\pm$ 2 h.
4. Se determinó el peso de la muestra seca requerida para el ensayo, tomando como referencia la TABLA XXV y utilizando una balanza. En este caso, se consideró un peso aproximado de la muestra de 5 kg.
5. Se seleccionó el conjunto de tamices de acuerdo con lo indicado en la TABLA XXIV (1" hasta el Nº200), y se organizaron en orden ascendente, desde el de menor abertura hasta el de mayor abertura.
6. Se colocó una cantidad adecuada del material en el tamiz superior, procurando que las partículas pudieran pasar varias veces a través de las aberturas durante el proceso.
7. Se realizó el tamizado mediante agitación manual o mecánica durante el tiempo necesario para lograr separar las partículas según el tamaño.
8. Se retiraron los tamices con precaución, evitando la pérdida del material.
9. El material retenido en cada tamiz fue depositado en recipientes debidamente identificados; cuando fue necesario, se utilizó una brocha para recuperar el material adherido.
10. Se repitió el procedimiento de los pasos anterior hasta completar el tamizado de toda la muestra. (Ver Fig. 22).

    Cálculos:

a) Porcentaje de peso retenido parcial

$$\%\ Ret_{Par.} = \frac{Peso\ retenido\ parcial_{(i)}}{W_m} \times 100 \qquad (2)$$

Donde,

$\%\boldsymbol{Ret_{par.}}$ % Retenido parcial (i).

$\boldsymbol{W_m}$ Peso total de la muestra (g).

b) Porcentaje de peso retenido acumulado

$$\%\ Ret_{ac.} = \sum_{i=1}^{i=n} Ret_{Par.} \qquad (3)$$

Donde,

$\%\boldsymbol{Ret_{ac.}}$ % Retenido acumulado (i).

$\%\boldsymbol{Ret_{par.}}$ % Retenido parcial (i).

$\boldsymbol{W_m}$ Peso total de la muestra (g).

c) Porcentaje de peso que pasa:

$$\%\ Pasa = 100 - \%\ Ret_{ac.} \quad (4)$$

Donde,

$\%\boldsymbol{Ret_{ac.}}$ % Retenido acumulado (i).



Fig. 22 Proceso del ensayo de análisis granulométrico

5) Gravedad específica y absorción del agregado grueso – NTE INEN 857

El ensayo de gravedad específica y absorción del agregado grueso se realizó conforme a las normas NTE INEN 857 / ASTM C127, las cuales definieron el procedimiento para determinar la densidad, la gravedad específica y la capacidad de absorción de los agregados. Estos parámetros resultaron fundamentales para evaluar el comportamiento del material dentro de las mezclas asfálticas, debido a su influencia en la dosificación y en la interacción con el ligante [28], [29].

La gravedad específica se considera como la relación entre la masa del material y la masa de un volumen igual de agua a una temperatura determinada. Por su parte, la absorción permite establecer la cantidad de agua que el agregado es capaz de retener bajo condiciones específicas [28], [29].

Procedimiento del ensayo [29]:

1. Se tomó una muestra representativa del agregado grueso, con una masa mínima aproximada de 3 kg, según la TABLA XXVI, la cual fue secada previamente en horno y posteriormente sumergida en agua durante un período de 24 horas.

TABLA XXVI
PESO MÍNIMO DE LA MUESTRA PARA ENSAYO (2010) [29]

Tamaño nominal máximo mm (pulgadas)	Peso mínimo de la muestra (kg)
12.5 (1/2 in)	2
19.0 (3/4 in)	3
25.0 (1 in)	4
37.5 (1 ½ in)	5
50.0 (2 in)	8
63.0 (2 ½ in)	12
75.0 (3 in)	18

2. Transcurrido este periodo, la muestra fue retirada del agua y colocada en un recipiente metálico, procediéndose al secado superficial con una franela, eliminando la humedad visible sin afectar el agua contenida en los poros del agregado grueso.
3. Posteriormente, se determinó la masa del agregado en condición saturada superficialmente seca (SSS), registrando este valor para los cálculos posteriores.
4. Se pesó la canastilla al aire y luego se colocó la muestra en su interior para obtener la masa conjunta.
5. Después, la muestra en condición SSS fue sumergida en agua a una temperatura de 23 ± 2 °C, determinando su masa aparente. Durante este proceso se tuvo completo cuidado en eliminar el aire atrapado mediante agitación, asegurando una medición precisa. La diferencia entre la masa en aire y la masa sumergida corresponde al volumen de agua desplazada por la muestra.
6. Se colocaron porciones de agregado en recipiente metálicos previamente pesado y se introdujeron en horno a una temperatura de 110 °C ± 5 °C hasta alcanzar masa constante.
7. Luego de 24 horas, los recipientes fueron retirados del horno, se dejaron enfriar hasta una temperatura manipulable y se registró la masa seca correspondiente.

8. Finalmente, con los datos obtenidos se realizaron los cálculos necesarios para determinar la gravedad específica y el porcentaje de absorción del agregado grueso [20]. (Ver Fig. 23).

   Cálculos:

   a) Gravedad específica seca Bulk o neta

$$Gsb = \frac{A}{B - C} \tag{5}$$

   b) Gravedad específica saturada superficialmente seca Bulk

$$Gsssb = \frac{B}{B - C} \tag{6}$$

   c) Gravedad específica seca aparente

$$Gsa = \frac{A}{A - C} \tag{7}$$

   d) Porcentaje de absorción

$$\%Abs = \frac{B - A}{A} * 100 \tag{8}$$

Donde,

A Peso en el aire del agregado secado al horno (g).

B Peso en el aire del agregado saturado superficialmente seco (g).

C Peso del agregado saturado superficialmente seco sumergido (g).



Fig. 23 Proceso del ensayo de gravedad específica y absorción del agregado grueso

6) Gravedad especifica y absorción del agregado fino – NTE INEN 856

El ensayo de gravedad específica y absorción del agregado fino se realizó conforme a las normas NTE INEN 856 / ASTM C128, las cuales establecen el procedimiento para determinar la densidad, gravedad específica y la capacidad de absorción del material fino [30].

Este ensayo se realizó con el fin de encontrar uno de los parámetros necesarios para el diseño de mezclas asfálticas. La gravedad específica permite establecer el volumen que ocupa el material dentro de la mezcla y calcular el contenido de vacíos, mientras que la absorción indica la cantidad de agua que pueden retener las partículas en sus poros. Para obtener este valor, el agregado fino seco fue sumergido en agua durante un periodo determinado hasta alcanzar una condición cercana a la saturación [30], [31].

Procedimiento del ensayo [30]:

1. Mediante el proceso de cuarteo se obtuvo una muestra característica de aproximadamente 500 g de agregado fino, la cual fue secada en horno a una temperatura de 100 ± 5 °C.
2. Una vez enfriada a temperatura ambiente, se registró su masa inicial y posteriormente se sumergió completamente en agua durante 24 h.
3. Pasado el tiempo de necesario, la muestra fue retirada cuidadosamente, evitando la pérdida de partículas finas. Luego, se extendió sobre una bandeja y se dejó secar hasta alcanzar la condición de saturado superficialmente seco (SSS).
4. Se utilizó un picnómetro previamente calibrado, el cual fue llenado parcialmente con agua. Luego, se incorporó una porción de 500 ± 10 g de agregado fino en condición SSS con ayuda de un embudo, ajustando posteriormente el nivel del agua hasta la marca de aforo.
5. El picnómetro con la muestra fue agitado manual para eliminar el aire atrapado.
6. Una vez eliminado el aire, el sistema se dejó enfriar hasta una temperatura comprendida entre 23 ± 2 °C, registrándose posteriormente la masa.
7. Después, el agregado fue retirado del picnómetro y colocado en recipientes metálicos para determinar su masa húmeda.
8. Para el cálculo de la absorción, una porción adicional de agregado fino en condición SSS fue secada en horno hasta alcanzar masa constante, luego de 24 horas, los recipientes fueron retirados y se registró la masa seca.

9. Finalmente, con los valores obtenidos se realizaron los cálculos necesarios para determinar la gravedad específica y el porcentaje de absorción del agregado fino. (Ver Fig. 24).

   Cálculos:

   a) Gravedad específica seca Bulk o neta

$$Gsb = \frac{A}{B + S - C} \tag{9}$$

   b) Gravedad específica saturada superficialmente seca Bulk

$$Gsssb = \frac{A}{B + S - C} \tag{10}$$

   c) Gravedad específica seca aparente

$$Gsa = \frac{A}{B + A - C} \tag{11}$$

   d) Porcentaje de absorción

$$\%Abs = \frac{S - A}{A} * 100 \tag{12}$$

Donde,

A Peso en el aire del agregado secado al horno (g).

B Peso del picnómetro lleno de agua (g).

C Peso del picnómetro calibrado con el agregado y agua hasta la marca (g).

S Peso del material en estado saturado superficialmente seco (g).



Fig. 24 Proceso del ensayo de gravedad específica y absorción del agregado fino

7) Masa unitaria (peso volumétrico) de los agregados – NTE INEN 858

El ensayo de peso unitario suelto del agregado se realizó conforme a las normas NTE INEN 858 / ASTM C29, las cuales permitieron determinar la relación entre la masa y el volumen de un agregado en estado suelto, es decir, sin aplicar ningún tipo de compactación. Este parámetro permite conocer las condiciones de acomodo natural de las partículas y evaluar las características físicas del material, como su distribución granulométrica y textura superficial [32], [33].

Procedimiento del ensayo [32]:

1. Se escogió una muestra representativa del agregado, la cual fue previamente secada en horno hasta alcanzar una condición de masa constante y posteriormente enfriada a temperatura ambiente.
2. Se determinó un recipiente de volumen conocido, donde el agregado fue vertido cuidadosamente desde una altura uniforme, evitando cualquier tipo de compactación o vibración, hasta llenar el recipiente completamente.
3. Una vez lleno e incluso hasta desbordarse, se procedió a enrasar la superficie con una varilla o regla metálica, retirando el exceso de material sin ejercer presión sobre el contenido.
4. Posteriormente, se determinó la masa del recipiente lleno con el agregado.
5. Finalmente, con los valores obtenidos se calculó el peso unitario suelto del material, dividiendo la masa del agregado contenido entre el volumen del recipiente. (Ver Fig. 25 y Fig. 26).

Cálculos:

a) Masa del agregado suelto

$$M_s = M_{sr} - T \tag{13}$$

b) Masa unitaria

$$M_{us} = \frac{M_s}{V} \tag{14}$$

Donde,

$\boldsymbol{M_{sr}}$ Masa del recipiente con el agregado (g).

$\boldsymbol{T}$ Masa del recipiente vacío (g).

$\boldsymbol{M_s}$ Masa del agregado suelto (g).

$\boldsymbol{V}$ Volumen del recipiente metálico calibrado (cm^3).



Fig. 25 Proceso del ensayo de peso unitario suelto del agregado grueso



Fig. 26 Proceso del ensayo de peso unitario suelto del agregado fino

8) Resistencia al desgaste por abrasión – ASTM C 131

El ensayo de resistencia al desgaste por abrasión se realizó conforme a las normas ASTM C131 / NTE INEN 860, utilizando la máquina de Los Ángeles para determinar el porcentaje de desgaste de los agregados gruesos frente a los efectos de abrasión e impacto. Este procedimiento es aplicable a mezclas asfálticas en frío o en caliente, con granulometría abierta o cerrada y tamaño máximo de agregado inferior a 25 mm [14], [34].

La prueba permite evaluar el comportamiento de los agregados ante las acciones producidas por el tránsito vehicular, analizando su capacidad para resistir la desintegración y el desprendimiento de partículas. A través de este ensayo también es posible valorar indirectamente la cohesión y durabilidad de la mezcla asfáltica, considerando que un menor porcentaje de desgaste representa una mayor resistencia mecánica y un mejor desempeño durante su vida útil [14]. Los agregados gruesos después de las 500 revoluciones no pueden superar un desgaste del 40% [2].

Procedimiento del ensayo [34]:

1. Se seleccionó una muestra de agregado grueso, la cual fue previamente lavada y secada en horno hasta alcanzar masa constante. Luego, el material fue separado en fracciones granulométricas, conformando la carga de ensayo correspondiente, ver TABLA XXVII.

TABLA XXVII

CLASIFICACIÓN DE LA MUESTRA DE PRUEBA (2020) [34]

Tamaño del tamiz (aberturas cuadradas)		Masa de los tamaños indicados, g			
		Calificación			
Paso	Retenido en	A	B	C	D
37,5 mm [1 ½en.]	25,0 mm [1 pulg.]	1 250 ± 25	…	…	…
25,0 mm [1 pulg.]	19,0 milímetros [¾en.]	1 250 ± 25	…	…	…
19,0 milímetros [¾en.]	12,5 mm [½en.]	1 250 ± 10	2 500 ± 10	…	…
12,5 mm [½en.]	9,5 mm [⅜en.]	1 250 ± 10	2 500 ± 10	…	…
9,5 mm [⅜en.]	6,3 mm [¼en.]	…	…	2 500 ± 10	…
6,3 mm [¼en.]	4,75 mm [No. 4]	…	…	2 500 ± 10	…
4,75 mm [No. 4]	2,36 mm [No. 8]	…	…	…	5 000 ± 10
Total		5 000 ± 10	5 000 ± 10	5 000 ± 10	5 000 ± 10

2. La muestra preparada fue colocada en el tambor de la máquina de Los Ángeles junto con una carga específica de esferas de acero (carga abrasiva), según el método correspondiente.
3. Posteriormente, el tambor fue sometido a rotación a una velocidad constante durante un número determinado de revoluciones (generalmente 500), permitiendo que el material experimente procesos de impacto y abrasión.
4. Finalizado el ciclo, el material fue retirado del tambor y pasado por el tamiz Nº12, separando el material fino generado durante el ensayo.
5. Se determinó la masa del material retenido en el tamiz, así como la masa inicial de la muestra, con el fin de establecer la pérdida de material.
6. Finalmente, se realizaron los cálculos correspondientes para determinar el porcentaje de desgaste por abrasión del agregado. (Ver Fig. 27).

Para determinar el porcentaje de degradación se empleó la siguiente fórmula:

$$\%D = \frac{B - C}{B} * 100 \qquad (15)$$

Donde,

%D Valor de degradación en %.

B Masa inicial de la muestra (g).

C Masa de la muestra retenida en el tamiz Nº12 después del ensayo (g).



Fig. 27 Proceso del ensayo de resistencia al desgaste por abrasión

9) Punto de reblandecimiento del cemento asfáltico AC-20 – AASHTO T 53-74

El ensayo de punto de reblandecimiento del cemento asfáltico AC-20 se realizó conforme a las normas AASHTO T 53-74 /ASTM D 36, conocida como método de "Anillo y Bola", la cual establece el procedimiento para determinar la temperatura a la que un material bituminoso alcanza una consistencia determinada bajo condiciones controladas [35].

Los betunes son materiales viscoelásticos y su grado de fluidez depende estrictamente de la temperatura. Por ello, este parámetro permite evaluar el comportamiento térmico del asfalto frente al incremento de temperatura, siendo un indicador importante de su susceptibilidad al calor y de su capacidad para mantener estabilidad en servicio [20], [35].

Procedimiento del ensayo [35]:

1. Se montó el equipo de ensayo, colocando los anillos, guías y termómetro dentro del recipiente de vidrio.
2. Posteriormente, se añadió agua destilada hasta cubrir al menos 5 cm por encima de los anillos.
3. Las esferas de acero fueron introducidas en el baño sin colocarlas inicialmente sobre las muestras.

4. El sistema se mantuvo a una temperatura aprox. de 25 °C durante 15 min, con el fin de estabilizar las condiciones del ensayo.
5. Transcurrido este tiempo, las esferas de acero fueron colocadas centradas sobre cada muestra mediante las gruías.
6. Se aplicó calor al baño de manera gradual, agitando ligeramente el líquido para asegurar una distribución uniforme de temperatura, manteniendo una velocidad de calentamiento de 5 ± 0,5 °C por min.
7. El calentamiento continuó hasta que el material se reblandeció y debido al peso de la esfera, descendió hasta tocar la placa base situada a una distancia de 1 in.
8. La temperatura registrada en el instante en que cada muestra tocó la base se consideró como el punto de reblandecimiento del material.
9. Finalmente, se realizaron determinaciones repetidas y se calculó el promedio de los valores obtenidos, el cual se reportó como el resultado final del ensayo. (Ver Fig. 28).

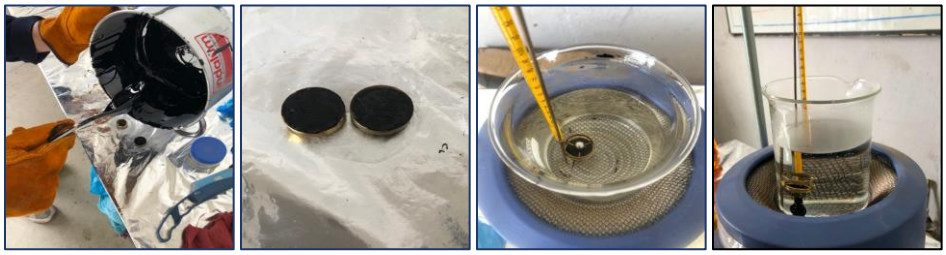


Fig. 28 Proceso del ensayo de punto de reblandecimiento del cemento asfáltico AC-20

10) Punto de inflamación y combustión del cemento asfáltico AC-20 – ASTM T 48-74

El ensayo de punto de inflamación y combustión se realizó con base a las normas ASTM T 48-74 / ASTM D 92-66, las cuales establecen el procedimiento para determinar las temperaturas a las que los vapores de un material bituminoso se inflaman momentáneamente y posteriormente mantienen la combustión (llama continua). Este ensayo permitió identificar el comportamiento del material frente a altas temperaturas, siendo un parámetro clave para garantizar condiciones seguras durante su manipulación, transporte y aplicación en obra [36].

El punto de inflamación corresponde a la temperatura mínima en la que los vapores desprendidos por el cemento asfáltico producen una llama instantánea al acercar una fuente de

fuego. Por otro lado, el punto de combustión representa la temperatura en la que el material mantiene la combustión de manera continua durante un tiempo determinado [7], [36].

Procedimiento del ensayo [36]:

1. Se colocó el termómetro en posición vertical dentro del equipo, asegurando que el bulbo quedará a aprox. 0,63 cm del fondo del recipiente y a una distancia intermedia entre el centro y la pared del mismo.
2. El recipiente fue llenado con el material a ensayar hasta la línea de aforo, evitando la formación de burbujas o derrames. En el caso de materiales sólidos, estos fueron previamente calentados hasta una consistencia fluida antes de su colocación.
3. Se reguló la llama de ensayo hasta alcanzar un diámetro aprox. entre 3,2 y 4,8 mm, conforme a lo establecido en la norma.
4. Se inició el calentamiento del material a una velocidad controlada, sin exceder los 16,5 °C por minuto, hasta aproximarse al punto de inflamación esperado. Posteriormente, la velocidad de calentamiento se redujo a un rango entre 5 – 6 °C por minuto.
5. A intervalos de incremento de temperatura de 3 °C, se aplicó la llama de ensayo, haciéndola pasar sobre la superficie del material en forma uniforme durante un segundo.
6. Se registró como punto de inflamación la temperatura indicada en el termómetro en el momento en que se observó un destello sobre la superficie del material.
7. Se continuó con el calentamiento bajo las mismas condiciones, aplicando la llama de ensayo hasta que el material presentó una combustión sostenida durante al menos cinco segundos.
8. La temperatura fue registrada.
9. Finalmente, este ensayo se realizó en un aula oscura, de manera que se apreció de mejor manera los puntos de inflamación y combustión. (Ver Fig. 29).



Fig. 29 Proceso del ensayo de punto de inflamación y combustión del cemento asfáltico AC-20

11) Gravedad específica del cemento asfáltico AC-20 – ASTM D 70

El ensayo de gravedad específica del cemento asfáltico se realizó de acuerdo a las normas ASTM D 70 / I.N.V.E -707-13, las cuales mencionan el procedimiento para determinar la densidad relativa de materiales bituminosos semisólidos mediante el uso de picnómetro [37].

Este ensayo permite determinar la relación entre la masa de un volumen determinado de material bituminoso (cemento asfáltico) y la masa de un volumen igual de agua a una temperatura de 25°C o 15,6°C. Esta variable es importante ya que facilita la conversión entre peso y volumen, además de aportar información sobre la uniformidad y características del asfalto [20], [37].

Procedimiento del ensayo [37]:

1. Se limpió y secó correctamente el picnómetro. Posteriormente, se determinó la masa del picnómetro vacío utilizando una balanza de precisión.
2. El cemento asfáltico fue calentado hasta alcanzar un estado fluido para facilitar su manipulación, evitando el sobrecalentamiento del material.
3. Luego, el cemento asfáltico fue colocado en el picnómetro hasta aproximadamente las tres cuartas partes de su capacidad, evitando que se formen burbujas de aire.
4. El picnómetro con el cemento asfáltico fue dejado en reposo hasta alcanzar la temperatura ambiente y posteriormente se tomó su masa.
5. Después, el picnómetro fue completado con agua destilada hasta la marca de aforo y se colocó en baño maría a una temperatura de 25 ± 0,1 °C durante 30 min.
6. Una vez finalizado el tiempo, se verificó nuevamente el nivel del agua en el picnómetro y se registró la masa total. Adicionalmente, se determinó la masa del picnómetro lleno únicamente con agua destilada a la misma temperatura de ensayo.
7. Finalmente, con las lecturas obtenidas se realizaron los cálculos correspondientes para determinar la gravedad específica del cemento asfáltico. (Ver Fig. 30).

Para determinar la gravedad específica del cemento asfáltico se empleó la siguiente fórmula:

$$GE_{C.A.} = \frac{C - A}{(B - A) - (D - C)} \tag{16}$$

Donde,

A Peso del picnómetro + tapa (g).

B Peso del picnómetro lleno con agua (g).

C Peso del picnómetro parcialmente lleno con cemento asfáltico (g).

D Peso del picnómetro + cemento asfáltico + agua (g).

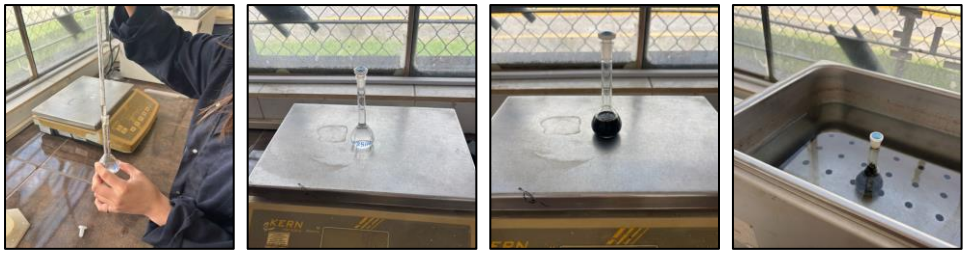


Fig. 30 Proceso del ensayo de gravedad específica del cemento asfáltico AC-20

12) Residuo por evaporación de la emulsión asfáltica CSS-1h – NTE INEN 905

El ensayo de residuo por evaporación realizado conforme a lo establecido por las normas NTE INEN 905 / ASTM 244-29, tiene como finalidad determinar la cantidad de ligante asfáltico residual que permanece después de la evaporación del agua contenida en la emulsión [38]. Este parámetro es fundamental para evaluar las propiedades reales del material una vez que la emulsión rompe y el agua se elimina durante el proceso de curado [7].

El procedimiento del ensayo consiste en someter una muestra de emulsión a un proceso controlado de calentamiento, con el propósito de evaporar el agua y obtener únicamente el residuo asfáltico. Los resultados obtenidos permiten evaluar la cantidad de la emulsión y su capacidad para proporcionar un contenido adecuado de ligante en mezclas asfálticas en frío [20].

Procedimiento del ensayo [38]:

1. Se determinó la masa de tres recipientes metálicos junto con sus respectivas varillas de agitación, con una precisión de 0,1 g.
2. Se colocaron 50 ± 0,1 g de emulsión asfáltica en cada recipiente, registrando la masa total del conjunto.

3. Los recipientes con las muestras fueron introducidos en el horno a una temperatura de 163 ± 3 °C durante un período de 2 horas.
4. Pasado ese tiempo, los recipientes fueron retirados y la emulsión asfáltica fue agitada cuidadosamente para homogenizarla.
5. Posteriormente, los recipientes se reintrodujeron en el horno durante 1 hora adicional hasta una masa constante, al término de la cual fueron retirados nuevamente.
6. Las muestras se dejaron enfriar a temperatura ambiente.
7. Una vez enfriados, se determinó la masa de cada recipiente con su respectivo residuo asfáltico. Finalmente, se obtuvo los cálculos necesarios. (Ver Fig. 31).

$$\%\ Residuo\ asfáltico = \frac{(A - B)}{C} * 100 \qquad (17)$$

Donde,

A Peso del recipiente + varilla + residuo asfáltico (g).

B Peso inicial del recipiente + varilla (g).

C Peso inicial de la muestra (g).



Fig. 31 Proceso del ensayo de residuo por evaporación de la emulsión asfáltica CSS-1h

13) Gravedad específica de la emulsión asfáltica CSS-1h – ASTM D 6937

El ensayo para determinar la gravedad específica de la emulsión asfáltica CSS-1h se realizó de acuerdo a la norma ASTM D 6937. Este ensayo tiene como finalidad evaluar la relación entre la masa de un volumen definido de la emulsión asfáltica y la masa de un volumen igual de agua destilada, manteniendo una temperatura controlada [39].

Procedimiento del ensayo [39]:

1. Se limpió y secó correctamente el picnómetro.
2. Se registró la masa del picnómetro vacío.
3. La muestra de emulsión asfáltica fue homogenizada antes del ensayo mediante una agitación manual lenta, para evitar la introducción de burbujas de aire.
4. Se vertió el ligante asfáltico dentro del picnómetro hasta la línea de aforo.
5. El exterior del picnómetro fue limpiado para eliminar restos de emulsión adheridos.
6. Posteriormente, se determinó la masa del picnómetro lleno con emulsión asfáltica.
7. Durante el ensayo, la temperatura de la muestra se mantuvo en baño maría de 25 ± 0,5 °C.
8. Finalmente, con los valores registrados se realizaron los cálculos necesarios para determinar la densidad y gravedad específica de la emulsión asfáltica. (Ver Fig. 32).

a) Densidad de la emulsión asfáltica

$$\rho_{E.A.} = \frac{A - B}{V} \tag{18}$$

b) Gravedad específica de la emulsión asfáltica

$$GE_{E.A.} = \frac{\rho_{E.A.}}{\rho_{Agua}} \tag{19}$$

Donde,

$\boldsymbol{\rho_{E.A.}}$ Densidad de la emulsión asfáltica a 25 °C (g/cm^3).

$\boldsymbol{A}$ Peso del picnómetro lleno con emulsión asfáltica (g).

$\boldsymbol{B}$ Peso del picnómetro vacío + tapa (g).

$\boldsymbol{V}$ Volumen calibrado del picnómetro (cm^3).

$\boldsymbol{\rho_{Agua}}$ Densidad del agua a temperatura de 25 °C (0,9971 g/cm^3).



Fig. 32 Proceso del ensayo de gravedad específica de la emulsión asfáltica CSS-1h

B. FASE II

La segunda fase de investigación experimental se desarrolló con el propósito de analizar el diseño de la mezcla asfáltica en frío mediante la variación de distintos porcentajes de emulsión asfáltica, con el fin de determinar el contenido óptimo de ligante a través del método Marshall. Por ello, los ensayos de laboratorio fueron ejecutados conforme a normas técnicas y especificaciones establecidas en documentos especializados.

Con el objetivo de comprender el procedimiento aplicado, a continuación, se presentan las definiciones, criterios técnicos y parámetros relacionados con el método Marshall utilizado en el análisis de las mezclas asfálticas.

1) Diseño de mezclas asfálticas

Los inicios del desarrollo de mezclas asfálticas se remontan a la investigación de Bruce Marshall en la década de 1940. Posteriormente, el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los EE.UU. amplió y perfeccionó esta metodología a través de diversos estudios, dando paso al método Marshall, que se utiliza actualmente en el diseño de mezclas asfálticas [21].

Este método fue desarrollado originalmente para el diseño y control de mezclas asfálticas en caliente, pero con el tiempo se realizaron cambios y adaptaciones que permitieron su uso en mezclas asfálticas en frío. Actualmente, no existe un método universalmente aceptado para el diseño de este tipo de mezclas, aunque la mayoría de los métodos utilizados se basan en los principios del método Marshall establecidos en la norma ASTM D 6927-22 [40].

Un diseño eficiente de pavimento asfáltico debe garantizar una alta estabilidad para resistir las cargas del tráfico y evitar deformaciones plásticas. A la vez, requiere un contenido de asfalto adecuado que asegure la cohesión, impermeabilidad y durabilidad de la mezcla. Además, el material debe tener una buena trabajabilidad, manteniendo un porcentaje de vacíos de aire que permita que las partículas se reordenen durante el tránsito sin provocar exudación del ligante, ni comprometer la integridad estructural de la carretera [2], [6].

A continuación, se presenta el método Marshall adoptado:

a) Método Marshall

El método Marshall es un procedimiento de ingeniería estandarizado utilizado en el diseño y evaluación de mezclas asfálticas. Su principal objetivo es determinar las proporciones adecuadas de agregados pétreos y ligante asfáltico para asegurar que el pavimento tenga un desempeño óptimo bajo las cargas del tránsito [21].

El método consiste en elaborar y ensayar una serie de briquetas con la misma granulometría, siempre que el tamaño máximo del agregado sea $\leq$ a 25 mm (1 in) y diferentes contenidos de asfalto. Las briquetas utilizadas poseen dimensiones estandarizadas de 4 in de diámetro y 2,5 in de espesor. Para garantizar la confiabilidad de los resultados, se elaboran 3 briquetas por cada contenido de asfalto evaluado y normalmente, se consideran 6 porcentajes distintos de ligante durante el diseño. Una vez fabricadas, las mezclas son sometidas a un periodo de curado, con el fin de permitir que la emulsión asfáltica desarrolle cohesión y adherencia como ligante. Posteriormente, las briquetas permanecen en horno a una temperatura controlada de 60°C hasta alcanzar masa constante [6]. Finalmente, las probetas son ensayadas en la prensa Marshall para determinar sus valores de estabilidad y flujo.

Cuando se requiere evaluar las propiedades volumétricas de la mezcla, previamente se determinan los pesos específicos de los materiales y de las briquetas compactadas, permitiendo calcular parámetros como densidad y porcentaje de vacíos [21].

La estabilidad Marshall es como la máxima carga que puede soportar una briqueta antes de producirse su falla, mientras que el flujo corresponde a la deformación que experimenta la muestra al alcanzar dicha carga máxima. Ambos parámetros son fundamentales para evaluar el comportamiento mecánico de las mezclas asfálticas en frío y verificar su cumplimiento con los criterios de diseño establecidos [21].

Para la presente investigación, el diseño de la mezcla asfáltica en frío se fundamenta en criterios de las Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos y Puentes MOP-001-F-2002, y este a su vez menciona un complemento con el Manual del Instituto del Asfalto, esto debido a las condiciones y características de servicio presentes en el país [2]. (Ver TABLA XXVIII).

TABLA XXVIII

ESPECIFICACIONES GENERALES PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS MOP-001-F-2002 [2]

ENSAYOS DE ACUERDO AL MÉTODO MARSHALL		TRÁFICO					
		PESADO		MEDIO		LIVIANO	
		Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
No. de Golpes (Compactación)		75		50		35	
Estabilidad	(N)	8006	-	5338	-	3336	-
	(lb)	1800	-	1200	-	750	-
Flujo (Pulgada/100)		8	16	8	18	8	20
% de Vacíos con aire:	Carpeta	3	5	3	5	3	5
	Base	3	8	3	8	3	8

Para el criterio de porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VMA) la MOP-001-F-2002 menciona al Instituto de Asfalto [2]. (Ver TABLA XXIX).

TABLA XXIX

MÍNIMO PORCENTAJE DE VACÍOS DE AGREGADO MINERAL INSTITUTO DEL ASFALTO (2014) [6]

MÁXIMO TAMAÑO DE PARTÍCULA NOMINAL		Porcentaje mínimo VMA		
		Porcentaje diseño vacíos de aire		
mm	in	3,0	4,0	5,0
1,18	No. 16	21,5	22,5	23,5
2,36	No. 8	19,0	20,0	21,0
4,75	No. 6	16,0	17,0	18,0
9,5	3/8	14,0	15,0	16,0
12,5	1/2	13,0	14,0	15,0
19	3/4	12,0	13,0	14,0
25	1.0	11,0	12,0	13,0
37,5	1.5	10,0	11,0	12,0

Para lograr analizar el porcentaje de asfalto óptimo de una mezcla asfáltica en frío es indispensable realizar cada una de las curvas variando el contenido de ligante. Estabilidad, flujo, % vacíos de aire, densidad (Gmb), VMA, VFA Vs. % Emulsión asfáltica [8]. (Ver Fig. 33).

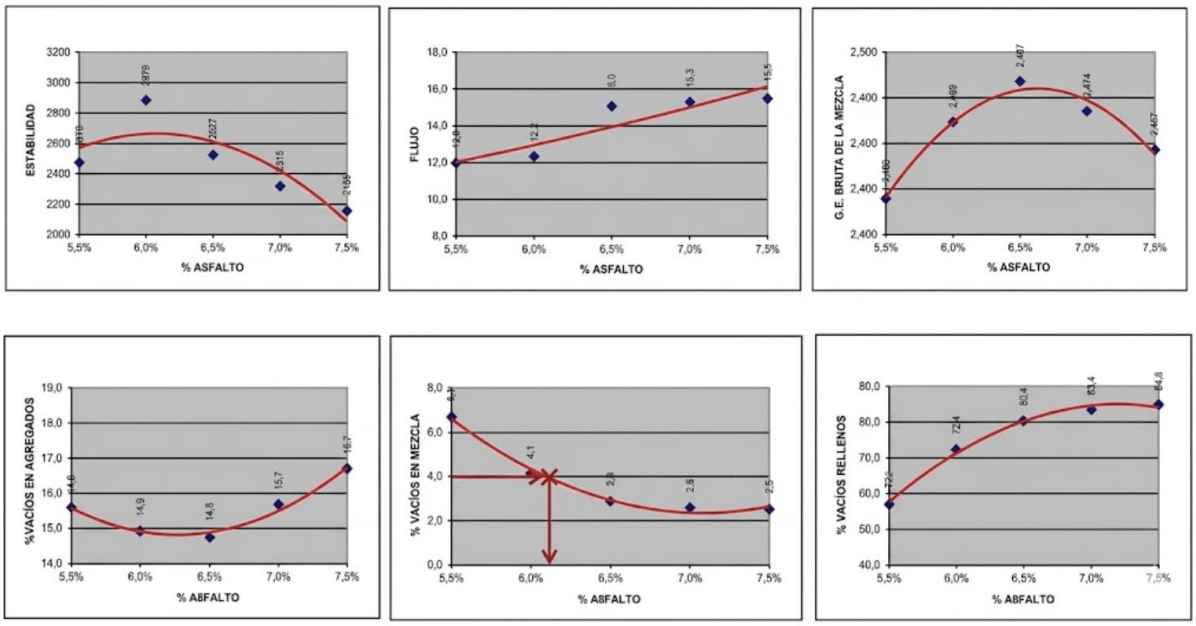


Fig. 33 Ejemplo de curvas – Método Marshall [8] (2023).

2) Dosificación de la mezcla asfáltica en frío

En base a los ensayos realizados en la Fase I, como son, las granulometrías de los agregados, el ensayo de residuo por evaporación de la emulsión asfáltica, y las gravedades específicas de cada agregado, se definió la dosificación de los materiales constituyentes de la mezcla en frío considerando agregados naturales; utilizando del agregado ¾" el 12%, del agregado 3/8" el 31% y para el agregado fino (polvo de piedra) el 57% en peso. Mientras que para la mezcla combinada se añadió un 20% de los agregados reciclados. De igual manera, se seleccionaron 6 puntos de contenidos de asfalto neto de la emulsión asfáltica CSS-1h de rompimiento lento: 5.0%, 5.5%, 6.0%, 6.5%, 7.0%, 7.5%, los cuales fueron evaluados para determinar el contenido óptimo.

3) Elaboración de briquetas - ASTM D 6926-16

La elaboración de briquetas, conocida también como briquetado se realizó conforme a la normativa ASTM D 6926-16, que tuvo como finalidad compactar la mezcla asfáltica de manera uniforme, facilitando su manipulación, transporte y ensayo. Para ello, se emplearon moldes prefabricados que permitieron conservar la forma cilíndrica de 4in de diámetro y 3in de altura [41].

Procedimiento para la elaboración de briquetas [41]:

1. Se realizó 3 briquetas para cada combinación de agregados convencionales y emulsión asfáltica, así como, para la combinación incluyendo RAP. Los porcentajes empleados fueron 5.0%, 5.5%, 6.0%, 6.5%, 7.0%, 7.5%, dando un total de 36 briquetas.
2. Se pesaron las cantidades de agregado y emulsión para cada briqueta, considerando que cada briqueta tiene una capacidad de 1200 g, para esto se utilizó una balanza y taras de metal, de acuerdo con la dosificación establecida.
3. Los agregados fueron colocados en una bandeja y mezclados en seco hasta lograr una distribución uniforme de sus componentes.
4. Para la emulsión asfáltica se consideró un mezclado de aproximadamente 7 min para tener una correcta homogenización del material (agua + asfalto neto), y además se tomó en cuenta el ensayo de residuo por evaporación de la emulsión asfáltica CSS-1h, con un 39% agua + 61% asfalto neto, con el fin de mejorar su trabajabilidad.
5. Posteriormente se incorporó a la mezcla de agregados, asegurando un recubrimiento homogéneo de las partículas. Entonces en otras palabras, en los 1200 gramos hubo un 5.0% de asfalto neto de la emulsión asfáltica y el 95% lo que componen los agregados pétreos [20]. (Ver Fig. 34).



Fig. 34 Proceso de elaboración de briquetas

4) Compactación de briquetas – ASTM D 6926-16

Procedimiento para la compactación de briquetas [41]:

1. Se limpiaron los moldes y el martillo compactador con ayuda de un guaipe con aceite hidráulico y una brocha.
2. Se armó colocando primero su base, luego el molde y finalmente el collar de extensión
3. Se vertió la mezcla en el molde y se realizó el varillado con espátula (15 golpes en el contorno y 10 en el centro) para lograr una distribución uniforme.
4. El molde fue colocado en el equipo Marshall, aplicando 75 golpes en una cara de la briqueta. Posteriormente, se volteó y se repitió el mismo número de golpes en la cara opuesta, considerando el golpe en caída libre.
5. Una vez finalizada la compactación, se retiró del molde del pedestal.
6. Las briquetas permanecieron en los moldes durante un período de aproximadamente 24 horas, con el fin de facilitar su endurecimiento inicial. (Ver Fig. 35).



Fig. 35 Proceso de compactación de briquetas

5) Desencofrado de briquetas

1. Pasadas las 24 horas en el molde, se colocó el mismo en el extractor mecánico y se aplicó presión de manera uniforme hasta expulsar la briqueta [20].
2. Finalmente, las muestras se almacenaron en un lugar seco y a temperatura ambiente para su respectivo tiempo de curado de 48 horas hasta la realización de los ensayos correspondientes [20]. (Ver Fig. 36).



Fig. 36 Proceso de desencofrado de briquetas

6) Ensayos de briquetas compactadas

Cada una de las briquetas compactadas fue sometida a ensayos como; gravedad específica bulk, ensayo de estabilidad y flujo Marshall y análisis volumétrico de densidad y vacíos.

a) Gravedad específica Bulk combinada

Mediante este cálculo se determinó la densidad volumétrica total de la mezcla de todos los agregados que la conforman (agregados nuevos y agregados reciclados). La gravedad específica combinada de la mezcla, sirve para estimar el volumen real que ocupa el esqueleto de los agregados en el pavimento, incluyendo los poros absorbibles [13].

Para el cálculo se empleó la siguiente fórmula:

$$Gsb = \frac{P_1 + P_2 + P_3}{\frac{P_1}{Gsb_1} + \frac{P_2}{Gsb_1} + \frac{P_3}{Gsb_1}} \quad (20)$$

Donde,

P % de cada agregado de la mezcla.

Gsb Gravedades específicas Bulk de cada agregado (grueso, intermedio y fino).

b) Gravedad específica Bulk

El procedimiento consistió en registrar la masa en estado seco de las briquetas, para luego sumergirlas en un baño de agua a 25°C, y registrar su masa sumergida. Posteriormente, se retiraron, se secaron superficialmente y se determinó nuevamente su peso en condición saturada superficialmente seca [42]. (Ver Fig. 37).

Para el cálculo se empleó la siguiente fórmula:

$$Gmb = \frac{E}{F - G} \tag{21}$$

Donde,

E Masa de la probeta seca en el aire.

F Masa en el aire de probeta saturada superficialmente.

G Masa de la probeta en agua.



Fig. 37 Proceso para la gravedad específica bulk de las briquetas

c) Gravedad específica teórico efectiva

Se calculó la gravedad específica teórico efectiva de la mezcla por cada porcentaje de asfalto residual, valor que indica un estado de compactación absoluta donde se eliminan totalmente los vacíos de aire y el volumen total es ocupado solamente por la combinación de los agregados y el ligante [13].

Para el cálculo se empleó la siguiente fórmula:

$$Gse = \frac{100 - \%\ AR}{\frac{100}{Gmm} - \frac{\%\ AR}{Gb}} \tag{22}$$

Donde,

% AR Porcentaje de asfalto residual.

Gmm Gravedad específica máxima teórica o Rice.

Gb Gravedad específica de la emulsión asfáltica.

d) Porcentaje de asfalto absorbido

Se calculó el porcentaje de asfalto absorbido que representa una cantidad de ligante asfáltico, que ingresa en los poros superficiales permeables de las partículas de agregado, básicamente, se considera como asfalto atrapado dentro de los agregados y no ayuda a unir las partículas ni a recubrirlas al exterior [13].

$$P_{ba} = \left(\frac{G_{se} - G_{sb}}{G_{sb} * G_{se}}\right) * \ G_b * 100 \qquad (23)$$

Donde,

Gse Gravedad específica teórico efectiva.

Gb Gravedad específica de la emulsión asfáltica.

Gsb Gravedad específica Bulk de los agregados.

e) Porcentaje de asfalto efectivo

Se calculó el porcentaje de asfalto efectivo, que es la cantidad real del ligante que queda en el exterior del agregado para unir las partículas entre sí, es decir, es el asfalto útil. Este valor indica que tan unida, fuerte y flexible quedará la mezcla [13].

$$P_{be} = \%AR - \left(\frac{P_{ba} * \%Agr}{100}\right) \qquad (24)$$

Donde,

%AR Porcentaje de asfalto residual.

Pba Porcentaje de asfalto absorbido.

%Agr Porcentaje de agregados.

f) Porcentaje en volumen del agregado respecto al volumen total de la briqueta

Se determinó este parámetro, y se entiende como el espacio total que ocupan los agregados dentro de la briqueta compactada, medido como un % de su volumen total [13].

Se utilizó la siguiente fórmula:

$$O = \frac{(100 - \%AR) * Gmb}{Gsb} \quad (25)$$

Donde,

% AR Porcentaje de asfalto residual.

Gmb Gravedad específica Bulk de la briqueta.

Gsb Gravedad específica Bulk de los agregados.

g) Porcentaje de vacíos con aire respecto al volumen total de la briqueta

Se calculó este parámetro que se entiende como el porcentaje de espacios de aire presentes en la briqueta compactada respecto a su volumen total, siendo un indicador crítico para evitar tanto la infiltración de agua como la exudación del ligante [13].

Se utilizó la siguiente fórmula:

$$P = \frac{100 * (Gmm - Gmb)}{Gmm} \quad (26)$$

Donde,

Gmm Gravedad específica máxima teórica o Rice.

Gmb Gravedad específica Bulk de la briqueta.

h) Porcentaje en volumen de asfalto efectivo respecto al volumen total de la briqueta

Esta medida representa la porción del ligante asfáltico que no es absorbido por los poros del agregado, y por ello, queda disponible para recubrir el agregado pétreo [13].

Se utilizó la siguiente fórmula:

$$Q = 100 - O - P \quad (27)$$

Donde,

O Porcentaje en volumen del agregado respecto al volumen total de la briqueta.

P Porcentaje de vacíos con aire respecto al volumen total de la briqueta.

i) Vacíos en el Agregado Mineral

Este parámetro se calculó en función de la gravedad específica de la briqueta, la gravedad específica bulk de los agregados y el porcentaje de ligante asfáltico contenido en la mezcla. Este parámetro es el espacio intergranular que existe entre las partículas del agregado de la mezcla compactada, pero expresado como un % del volumen total de la muestra [13].

Se utilizó la siguiente fórmula:

$$VMA = 100 * \left(1 - \frac{G_{mb} * (1 - \%Agr)}{G_{sb}}\right) \quad (28)$$

Donde,

Gmb Gravedad específica Bulk de la briqueta.

%Agr Porcentaje de agregados.

Gsb Gravedad específica Bulk de los agregados.

j) Vacíos de Aire

Corresponde a los espacios de aire que quedan entre las partículas del agregado en la mezcla asfáltica compactada. Su adecuada dosificación garantiza un equilibrio entre la impermeabilidad y la estabilidad, previniendo exudación del ligante [13].

Se utilizó la siguiente fórmula:

$$Va = 100 * \left(1 - \frac{G_{mb}}{G_{mm}}\right) \quad (29)$$

Donde,

Gmb Gravedad específica Bulk de la briqueta.

Gmm Gravedad específica máxima teórica o Rice.

k) Vacíos Llenos con Asfalto

Se refiere al porcentaje de vacíos del agregado mineral que son ocupados por el ligante asfáltico. Es el espacio intergranular relleno de asfalto, donde su control es crítico para asegurar la durabilidad del pavimento [13].

Se calculó mediante la siguiente fórmula:

$$VFA = 100 * \left(\frac{VMA - Va}{VMA}\right) \quad (30)$$

Donde,

VMA Vacíos en el agregado mineral, porcentaje del volumen total.

Va Vacíos de aire en mezclas compactadas, porcentaje del volumen total.

l) Ensayo de estabilidad y flujo Marshall - ASTM D 6927-22

Procedimiento del ensayo [40]:

- Se midió el espesor de cada una de las probetas con ayuda de un calibrador.
- Las briquetas fueron sumergidas en baño maría durante un período de 15 min, a una temperatura de 25 ± 1 °C, por ser elaboradas en frío.
- Posteriormente, cada probeta fue retirada del baño, secada superficialmente y colocada en la mordaza inferior del equipo Marshall, asegurando su correcta alineación mediante la colocación de la mordaza superior, de manera que la briqueta quede centrada en el dispositivo de carga.
- Se aplicó carga a la probeta a una velocidad de deformación constante de 51 mm (2 in) por minuto, hasta que se produjo la falla de la muestra. El punto de falla se identificó como la

carga máxima registrada durante el ensayo. Se realizó el mismo procedimiento para las 36 briquetas.

- Finalmente, se registraron los valores correspondientes de estabilidad y flujo en el instante de la rotura de la briqueta. (Ver Fig. 38).
- Fue necesario aplicar el factor de corrección en la estabilidad, esto se dio por los espesores de las briquetas. La tabla de corrección se colocó en los Anexos.
  Se utilizó la siguiente fórmula:

$$Estabilidad = U * V \tag{31}$$

Donde,

U Lectura del dial de carga – Estabilidad.

V Factor de corrección por volumen de la probeta.



Fig. 38 Proceso del ensayo de estabilidad y flujo

7) Método Rice o gravedad específica teórica máxima – ASTM D 2041

El procedimiento para determinar la densidad máxima teórica de las mezclas asfálticas se llevó a cabo bajo los lineamientos de la norma ASTM D 2041 [43]. El RICE es un parámetro que representa la densidad de una mezcla asfáltica en estado suelto cuando no tiene absolutamente ningún vacío de aire en su interior [20].

Procedimiento del ensayo [43]:

- Se seleccionó una muestra de la mezcla asfáltica en estado suelto para cada uno de los porcentajes de emulsión asfáltica bajo estudio.
- Se colocó la muestra en el recipiente de ensayo.

- Se registró el peso conjunto del recipiente y la muestra seca.
- Posteriormente, se añadió agua a 25 °C hasta cubrir aproximadamente las tres cuartas partes del volumen del recipiente.
- El recipiente se instaló en la base del vibro desaireador. El equipo se mantuvo en operación continua por un periodo de 15 min, con presión de aire de 3,7 ± 0,3 kPa para extraer el aire atrapado.
- Una vez finalizado ese tiempo, se llenó el frasco completamente con agua y se enrazó el agua con la boca del vidrio de tal manera que no quede ninguna burbuja dentro del recipiente. Posteriormente se procedió a registrar el peso total (recipiente, mezcla y agua).
- Este proceso se repitió para todas las probetas. (Ver Fig. 39).

  Se utilizó la siguiente fórmula:

$$Gmb = \frac{A}{(A + D - E)} \tag{32}$$

Donde,

A Peso de la muestra el aire (g).

D Peso del recipiente + agua a 25 °C + vidrio calibrado (g)

E Peso del recipiente + agua + muestra sumergida a 25 °C + vidrio (g).



Fig. 39 Proceso del método RICE

C. FASE III

1) Evaluación y comparación de resultados obtenidos

En esta etapa final, el estudio se centró en comparar dos tipos de mezclas en frío elaboradas con agregados completamente nuevos o vírgenes y aquellas que fueron fabricadas utilizando agregados reciclados, con el objetivo de evaluar si el material reciclado "RAP" es una alternativa viable y resistente.

Para lograrlo, se tabularon los datos que se obtuvieron en los diferentes ensayos de laboratorio realizados en la Fase I y II del proyecto. De este modo, a través de la elaboración de tablas y gráficos, se explicó y contrastó los resultados obtenidos bajo cuatro aspectos importantes: estabilidad, flujo, porcentaje de vacíos (espacios de aire internos que afectan su durabilidad) y la densidad (que muestra qué tan compactada y sólida quedó la mezcla final). Esta comparación permite verificar la hipótesis planteada sobre si los agregados de asfalto reciclado contribuyen a una mejora de las propiedades físico-mecánicas de las mezclas asfálticas en frío.

CAPÍTULO III.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Una vez finalizada la fase metodológica, se desarrolló el capítulo III, considerando como una de las partes más importantes de la investigación. En este apartado se presentaron, analizaron e interpretaron los resultados obtenidos durante el estudio, permitiendo dar respuesta al problema planteado y cumplir con los objetivos establecidos en la investigación.

I. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En el presente capítulo se analizaron los resultados obtenidos de los diferentes ensayos de caracterización realizados a los materiales empleados en la elaboración de las mezclas asfálticas en frío, así como también los resultados correspondientes a las pruebas de calidad y desempeño efectuadas sobre dichas mezclas.

El análisis de los materiales empleados tuvo como finalidad verificar el cumplimiento de las especificaciones establecidas por la normativa vigente MOP-001-F-2002, con el propósito de garantizar su aptitud para ser empleados como materia prima en la fabricación de las mezclas asfálticas.

De igual manera, el estudio de las mezclas elaboradas permitió determinar sus propiedades mecánicas y evaluar su comportamiento y desempeño de diseño aplicada. La mezcla asfáltica en frío convencional desarrollada en esta investigación estuvo conformada por agregados nuevos o vírgenes y una emulsión asfáltica tipo catiónica CSS-1h de rotura lenta empleada como ligante. Por otra parte, en las mezclas asfálticas modificadas se incorporó agregados reciclados de carpeta asfáltica en un 20% como parte del material granular.

A. FASE I

Para el desarrollo del estudio, se realizaron ensayos de laboratorio tanto para los agregados reciclados, agregados nuevos, cemento asfáltico AC-20 y emulsión asfáltica CSS-1h. Los ensayos que se realizaron fueron: extracción de asfalto, análisis granulométrico, gravedad específica y absorción, masa unitaria (peso volumétrico), abrasión por medio de la máquina de Los Ángeles, punto de reblandecimiento, punto de inflamación y combustión, residuo por evaporación, método Rice y el ensayo Marshall.

1) Análisis de resultados de los ensayos realizados a los agregados reciclados "RAP"

a) Localización y obtención de los agregados reciclados de carpeta asfáltica mediante el proceso de fresado

TABLA XXX

UBICACIÓN Y COORDENADAS GEOGRÁFICAS DEL SITIO DE MUESTREO

UBICACIÓN DEL LUGAR DE MUESTREO DEL MATERIAL RECICLADO			
Sector:	"El Placer"	Zona:	17
Cantón:	Quero	Este:	768215.00 m
Provincia:	Tungurahua	Sur:	9842632.00 m

Análisis e interpretación:

La obtención de los agregados reciclados se realizó mediante un proceso de fresado en una vía de aproximadamente 1,5 km de longitud y 6 m de ancho en el sector "El Placer" perteneciente al cantón Quero en la Provincia de Tungurahua, posterior al muestreo de campo se realizó un proceso de cuarteo, en el cual se tomó una muestra representativa para proceder a realizar los respectivos ensayos. Es importante mencionar que como primera instancia se obtuvo material reciclado proporcionado por el Municipio de Ambato, sin embargo, debido a la carencia de sus características e información de donde fue extraído, se tomó como primera opción utilizar los agregados reciclados del cantón Quero para el diseño de la mezcla asfáltica en frío.

b) Ensayo de extracción de asfalto

TABLA XXXI

RESULTADOS DE LA EXTRACCIÓN DE ASFALTO

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL				
ENSAYO: CONTENIDO DE ASFALTO DEL PAVIMENTO ASFÁLTICO RECUPERADO / ASTM D 2172				
Muestra	**1**	**2**	**3**	**4**
Contenido de Asfalto Residual (%)	6,24	6,15	5,43	4,94
Promedio (%)	**5,69**			

Análisis e interpretación:

Tras realizar el ensayo de extracción de asfalto a los 4 especímenes del material reciclado, se determinó un promedio de contenido de asfalto residual de 5,69%. De acuerdo con estudios y trabajos de investigación, se estableció que el contenido de ligante en las mezclas asfálticas oscila entre 4,5 y 6,0%, por lo que el resultado obtenido en el ensayo se considera elevado para un pavimento asfáltico recuperado, que por lo general tiene características de deterioro.

El resultado promedio de 5,69%, se considera significativo y altamente aprovechable, permitiendo concluir que los agregados reciclados contienen una buena cantidad de cemento asfáltico adherido a los agregados, por esta razón va a existir una reducción en el porcentaje de emulsión asfáltica en la mezcla, ya que el aporte del 20% de los agregados reciclados contribuye un 1,14% de asfalto neto.

c) Análisis granulométrico

TABLA XXXII

RESUMEN DEL ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE LOS AGREGADOS RECICLADOS

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

ENSAYO: ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO EN LOS ÁRIDOS /ASTM C 136 / INEN 696

TAMIZ		% QUE PASA				
Descripción	Abertura	Muestras No. 1 y 2	Muestras No. 3 y 4	PROMEDIO	Límites MOP	
[pulg]	[mm]				Inferior	Superior
3/4 in	19,0	100,0	100,0	100,0	100	100
1/2 in	12,7	93,1	91,2	92,1	90	100
3/8 in	9,5	88,8	84,0	86,4	-	-
No. 4	4,75	65,5	65,4	65,4	44	74
No. 8	2,36	48,0	46,9	47,4	28	58
No. 16	1,18	43,3	34,0	38,6	-	-
No. 30	0,60	32,1	23,7	27,9	-	-
No. 50	0,300	14,8	14,0	14,4	5	21
No. 100	0,150	7,4	5,9	6,6	-	-
No. 200	0,075	2,5	0,4	1,5	2	10
Pasa No. 200	-	0,0	0,0	0,0	-	-

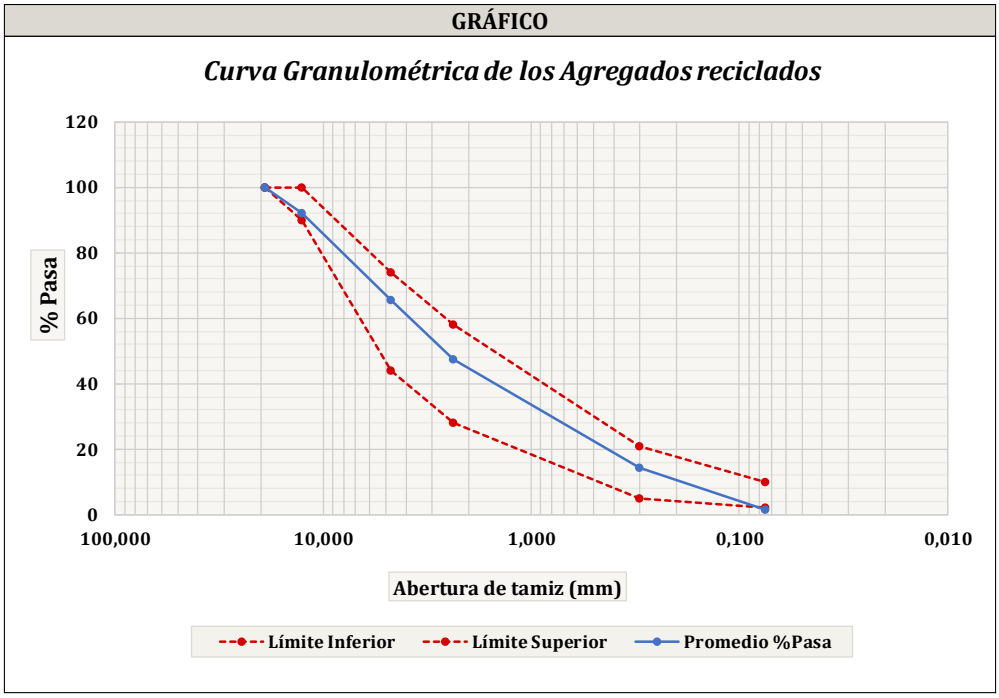


Fig. 40 Curva granulométrica del promedio de los agregados reciclados

Análisis e interpretación:

Una vez obtenido el porcentaje de ligante residual de los agregados reciclados, se evaluó la distribución granulométrica real previa al proceso de mezclado. Los ensayos se agruparon en dos combinaciones representativas: la primera (muestras No. 1 y 2) y la segunda (muestras No. 3 y 4). A partir de este análisis, se estableció un Tamaño Máximo "TM" de 3/4", al ser el último tamiz que muestra un 100% de pasante, y un Tamaño Máximo Nominal "TMN" de 1/2", que corresponde a la malla que retiene más del 5% del material.

Al evaluar el comportamiento gráfico promedio de las muestras, se observa que la curva se encuentra dentro de las franjas de los límites establecidos, demostrando una gradación continua y equilibrada compuesta por agregado grueso, medio y fino. No obstante, en la granulometría de las muestras No. 3 y 4 se registró un pasante de 0,4% en el tamiz No.200, lo que evidenció una ligera pérdida de polvo mineral durante las etapas de acopio. Esta deficiencia justificó metodológicamente la incorporación de polvo de piedra como material fino, garantizando así la estabilidad estructural de la mezcla y el cumplimiento de los límites admisibles exigidos por la normativa nacional, ver TABLA XXIV. Para el diseño de la mezcla asfáltica se utilizaron los porcentajes pasantes del promedio de las muestras de los agregados reciclados.

d) Gravedad específica y absorción

TABLA XXXIII

RESUMEN DE GRAVEDADES ESPECÍFICAS Y ABSORCIONES DE LOS AGREGADOS RECICLADOS

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

ENSAYO: GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN DE LOS AGREGADOS / NTE INEN 857 / 856

Agregado Reciclado	Gravedad específica seca Bulk	Gravedad específica en SSS Bulk	Gravedad específica seca aparante	Porcentaje de absorción
	[Gsb]	[Gsssb]	[Gsa]	[%Abs]
Grueso	2,632	2,688	2,789	2,148
Fino	2,018	2,062	2,112	2,204

Análisis e interpretación:

En la TABLA XXXIII, se puede observar los resultados de las gravedades específicas y absorciones de los agregados reciclados, en donde se deduce que los valores de la fracción gruesa cumplen con el mínimo de 2,40 g/cm^3, mostrando un equilibrio correcto de $Gsb < Gsssb < Gsa$, confirmando un ensayo coherente. Sin embargo, para la fracción fina no ocurre lo mismo, por ello, se optó para el análisis del método Marshall el valor correspondiente a la gravedad específica seca bulk de la fracción gruesa, de Gsb: 2,632 g/cm^3, para una correcta funcionalidad del estudio.

Por otra parte, la capacidad de absorción promedio registrada fue de 2,148%. Este valor muestra que la película de asfalto envejecido que recubre externamente los agregados reduce el ingreso de fluidos hacia los poros permeables de la piedra, y, además, este valor se mantiene debajo del límite de 3%.

2) Análisis de resultados de los ensayos realizados a los agregados nuevos

a) Análisis granulométrico

TABLA XXXIV

RESUMEN DEL ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE LOS AGREGADOS NUEVOS

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

ENSAYO: ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO EN LOS ÁRIDOS / INEN 696 / ASTM C 136

Tamiz		**% QUE PASA**				
Descripción	**Abertura**	**Agregado 3/4"**	**Agregado 3/8"**	**Agregado Fino**		
[pulg]	**[mm]**			**Muestra 1**	**Muestra 2**	**Promedio**
3/4 in	19,0	100,00	-	-	-	-
1/2 in	12,7	59,29	100,00	-	-	-
3/8 in	9,5	16,20	99,89	100,00	100,00	100,00
No. 4	4,75	1,86	17,94	97,87	98,65	98,26
No. 8	2,36	1,34	3,62	80,96	80,13	80,55
No. 16	1,18	-	2,61	59,58	59,35	59,47
No. 30	0,60	-	-	41,92	43,46	42,69
No. 50	0,30	-	-	28,90	29,90	29,40
No. 100	0,15	-	-	19,44	19,96	19,70
No. 200	0,075	-	-	12,75	11,51	12,13

Análisis e interpretación:

En la TABLA XXXIV, se pueden observar los resultados del análisis granulométrico de los tres agregados empleados en el estudio permitieron determinar la distribución de tamaños de las partículas que conforman cada fracción del material. En el caso del agregado ¾" se evidencia una presencia predominante de partículas gruesas. A su vez, el agregado de 3/8" indicó una gradación adecuada para complementar la estructura granular de la mezcla. Mientras que, para el agregado fino las 2 muestras analizadas mostraron resultados muy similares, indicando una escaza variación entre ambas muestras, confirmando su uniformidad. Por consecuencia, para definir la granulometría combinada de la mezcla asfáltica en frío, se integraron las distribuciones de los agregados de 3/4", 3/8", junto con el valor promedio del agregado fino.

b) Gravedad específica y absorción

TABLA XXXV

RESUMEN DE GRAVEDADES ESPECÍFICAS Y ABSORCIONES DE LOS AGREGADOS NUEVOS

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

ENSAYO: GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN DE LOS AGREGADOS / NTE INEN 857 / 856

Agregados Nuevos	Gravedad específica seca Bulk	Gravedad específica en SSS Bulk	Gravedad específica seca aparante	Porcentaje de absorción
	[Gsb]	[Gsssb]	[Gsa]	[%Abs]
3/4"	2,542	2,605	2,713	2,490
3/8"	2,536	2,611	2,742	2,970
Fino	2,503	2,558	2,648	2,205

Análisis e interpretación:

Al comparar los resultados de los 3 agregados nuevos con los requerimientos de la normativa, se comprobó que los valores de las gravedades específicas se mantienen estables y superando el mínimo de 2,40 g/cm^3, mostrando un equilibrio correcto de $Gsb < Gsssb < Gsa$, verificando que los agregados ensayados son de buena calidad.

Para el desarrollo de la mezcla asfáltica en frío, se emplearon los resultados de la gravedad específica seca Bulk; 2,542 g/cm^3, 2,536 g/cm^3 y 2,503 g/cm^3. Valores que permitieron corregir las variaciones por vacíos intergranulares, sirviendo como factores reales de conversión volumétrica para la estructuración de las briquetas bajo el método Marshall.

Por otra parte, los valores de absorción están por debajo del límite de 3,0%, lo que resultó apto para la interacción con la emulsión asfáltica de rotura lenta. Esta porosidad controlada facilitó que una fracción mínima de la fase acuosa penetrara en los poros del material, facilitando la rotura del ligante y una buena cohesión del residuo asfáltico en la superficie del agregado virgen.

c) Masa unitaria (peso volumétrico)

TABLA XXXVI

RESUMEN DEL MASAS UNITARIAS DE LOS AGREGADOS NUEVOS

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL			
ENSAYO: MASA UNITARIA (PESO VOLUMÉTRICO) DE LOS AGREGADOS / NTE INEN 858 / ASTM C29			
MASA UNITARIA			
Agregado 3/4"	**Agregado 3/8"**	**Agregado Fino**	**Especificaciones**
g/cm3			
1,353	1,278	1,257	1,20 - 1,50

Análisis e interpretación:

Mediante el ensayo de masa unitaria suelta los resultados obtenidos fueron: agregado 3/4" un valor de 1,353 g/cm3, agregado 3/8" un valor de 1,278 g/cm3 y el agregado fino un valor de 1,257 g/cm3, los mismos que se verificaron que cumplen con los límites de especificación de la norma que oscila entre 1,20 – 1,50 g/cm3. Esto comprueba que los agregados nuevos descartan anomalías por porosidad excesiva o meteorización. Los datos muestran un comportamiento lógico y decreciente a medida que disminuye el tamaño máximo de la partícula.

d) Resistencia al desgaste por abrasión

TABLA XXXVII

RESULTADOS DE LA RESISTENCIA AL DESGASTE POR ABRASIÓN DEL AGREGADO GRUESO

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL		
ENSAYO: DETERMINACIÓN DEL VALOR DE LA DEGRADACIÓN DEL ÁRIDO GRUESO DE PARTÍCULAS MENORES A 37,5mm MEDIANTE EL USO DE LA MÁQUINA DE LOS ÁNGELES. / ASTM C131 / NTE INEN 860		
DATOS	**ENSAYO**	**ESPECIFICACIONES MOP-001-F-2002**
Revoluciones	500	500
Porcentaje de degradación (%):	27,93	No mayor al 40%

Análisis e interpretación:

El ensayo determinó un porcentaje de degradación o desgaste por abrasión del 27,93% para el agregado grueso nuevo. Al revisar este dato con las especificaciones técnicas de la norma para capas de rodadura y bases asfálticas, se verificó que el árido cumplió de manera óptima con los criterios de aceptación, los cuales exigen un desgaste máximo e inferior al 40% luego de 500 revoluciones [2]. Se concluyó que el agregado grueso ensayado fue un material de buena dureza estructural y tenacidad. Esto garantizó que las partículas pétreas de aporte resistieran eficazmente lo proceso de fricción interna durante las etapas de mezclado y compactación en el laboratorio.

3) Análisis de resultados de los ensayos realizados al cemento asfáltico AC-20

a) Punto de reblandecimiento o ablandamiento

TABLA XXXVIII

RESULTADOS DEL PUNTO DE REBLANDECIMIENTO DEL CEMENTO ASFÁLTICO

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

ENSAYO: PUNTO DE REBLANDECIMIENTO DE MATERIALES BITUMINOSOS /AASHTO T 53-74 /ASTM D 36

Muestra No.:	1	2	3
Punto de reblandecimiento (ºC)	52,60	53,00	52,80
Tiempo (min)	5,52	5,61	5,57

Promedio Punto de reblandecimiento (ºC):	**52,80**
Promedio Velocidad (min):	**5,57**

Análisis e interpretación:

El ensayo determinó un punto de ablandamiento promedio de 52,80 °C, alcanzado en un tiempo promedio de 5,57 minutos. Al compararse este valor con las especificaciones técnicas de la norma (ver TABLA II) para un cemento asfáltico de penetración 60 -70, se comprueba que el resultado cumple perfectamente dentro del rango 48 – 57 °C [2]. La mínima dispersión registrada entre las lecturas de los anillos confirmó la homogeneidad y consistencia térmica del material analizado. Además, esta propiedad resulto determinante para mitigar fallas prematuras, como el ahuellamiento o deformaciones plásticas bajo las solicitaciones de carga de tránsito.

b) Punto de inflamación y combustión

TABLA XXXIX

RESUMEN DE LOS PUNTOS DE INFLAMACIÓN DEL CEMENTO ASFÁLTICO

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL	
ENSAYO: PUNTO DE INFLAMACIÓN Y COMBUSTIÓN /ASTM T 48-74 / ASTM D 92-66	

Muestra No.:	**Punto de Inflamación Corregido**	**Punto de Encendido Corregido**
1	278,16 ºC	274,16 ºC
2	275,16 ºC	270,16 ºC
Promedio	**276,66 ºC**	**272,16 ºC**

Análisis e interpretación:

El ensayo determinó un punto de inflamación promedio corregido de 276,66 °C. Al comparar este valor con los requisitos estipulados por la normativa vigente (ver TABLA II) para un cemento asfáltico de penetración 60 -70, se comprueba que el material supera el límite mínimo de seguridad exigido que es de 232 °C [2]. Este parámetro crítico está enfocado en la seguridad industrial durante las fases de almacenamiento, calentamiento y producción del material.

c) Gravedad específica

TABLA XL

RESULTADOS DE LA GRAVEDAD ESPECÍFICA DEL CEMENTO ASFÁLTICO

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL	
ENSAYO: GRAVEDAD ESPECÍFICA DEL ASFALTO SEMISÓLIDO /ASTM D 70 / I.N.V.E -707-13	

RESULTADO	
Temperatura ºC:	25
Gravedad específica del cemento asfáltico AC-20:	**1,0134**

Análisis e interpretación:

El ensayo determinó una gravedad específica de 1,0134 para el cemento asfáltico AC-20. Aunque formalmente se expresa de manera adimensional según cálculos normados, este parámetro representa la densidad relativa del ligante (g/cm3) a la temperatura estándar de ensayo 25 °C. El resultado obtenido se encuentra dentro del rango de control técnico de la norma (ver TABLA II), el cual establece un valor mínimo de 1,0 g/cm3. Se concluyó que este valor es un factor de conversión necesario para transformar las dosificaciones de masa en volúmenes reales dentro del diseño de la mezcla.

4) Análisis de resultados de los ensayos realizados a la emulsión asfáltica CSS-1h

a) Residuo por evaporación

TABLA XLI

RESULTADOS DE RESIDUO POR EVAPORACIÓN DE LA EMULSIÓN ASFÁLTICA CSS-1H

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

ENSAYO: RESIDUO POR EVAPORACIÓN EN EMULSIONES ASFÁLTICAS / NTE INEN 905 / ASTM 244-29

RESULTADO			
Muestra No.:	**1**	**2**	**3**
Porcentaje de residuo por evaporación (%):	61,2	61,2	61,2
Promedio Porcentaje de Residuo por Evaporación (%):	**61,2**		

Análisis e interpretación:

Mediante este ensayo se determinó un porcentaje de residuo de asfalto del 61,20%. Al evaluar este comportamiento frente a las especificaciones establecidas para emulsiones asfálticas catiónicas de rotura lenta CSS-1h (ver TABLA VII), se afirma que el material ensayado cumple al superar el límite mínimo del 57% exigido para garantizar la calidad del ligante [2].

Este parámetro definió la composición real de la emulsión, dada por un 61,20% de asfalto neto y un 38,80% de fase acuosa (agua). Para el diseño de la mezcla en frío, este valor representó un factor clave, ya que permitió establecer la equivalencia exacta para transformar el contenido de ligante óptimo calculado en la dosificación Marshall en la cantidad real de emulsión líquida que

fue añadida en el laboratorio. Esto aseguró que la evaporación del agua libre permitirá un correcto proceso de rotura, desarrollando cohesión y el curado necesario, ver TABLA XLII.

TABLA XLII
EQUIVALENCIA DEL ASFALTO NETO CON LA EMULSIÓN ASFÁLTICA

Equivalencia	Porcentajes					
Asfalto neto de la emulsión asfáltica	5%	5,50%	6%	6,50%	7%	7,50%
Emulsión asfáltica	8,20%	9,02%	9,84%	10,66%	11,48%	12,30%

b) Gravedad específica

TABLA XLIII
RESULTADOS DE LA GRAVEDAD ESPECÍFICA DE LA EMULSIÓN ASFÁLTICA CSS-1H

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

ENSAYO: GRAVEDAD ESPECÍFICA DE LA EMULSIÓN ASFÁLTICA /ASTM D 6937

RESULTADO	
Temperatura ºC:	25
Gravedad específica de la emulsión asfáltica CSS-1h:	**1,0004**

Análisis e interpretación:

El ensayo determinó una gravedad específica de 1,0004 para la emulsión asfáltica CSS-1h. Este valor adimensional representa la densidad relativa del material a 25°C (g/cm3). El resultado obtenido se encuentra dentro del rango especificado entre 0,9 – 1,10 g/cm3. Este parámetro resultó indispensable para la fase de dosificación de la mezcla asfáltica en frío, ya que permitió establecer una relación exacta entre la masa de los agregados y la emulsión asfáltica.

B. FASE II

Una vez finalizado los ensayos de laboratorio en la FASE I, se realizó el diseño de la mezcla asfáltica en frío mediante la variación de distintos porcentajes de asfalto residual de la emulsión asfáltica con la finalidad de obtener el porcentaje óptimo siguiendo las especificaciones establecidas por el Método Marshall.

1) Análisis granulométrico combinado para una Mezcla asfáltica en frío utilizando agregados nuevos

TABLA XLIV

RESULTADOS DEL ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO COMBINADO PARA EL DISEÑO DE LA MEZCLA CON AGREGADOS NUEVOS

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

PROYECTO:	"Evaluación del efecto de los agregados de asfalto reciclado en las propiedades físico-mecánicas de las mezclas asfálticas en frío."		
ENSAYO: ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO EN LOS ÁRIDOS			
Ensayado por:	Cristal Romero Carrera	**Normas:**	ASTM C 136 / INEN 696
Revisado por:	Ing. Galo Núñez Aldaz, Mg.	**Ubicación:**	Laboratorio "JEAL Construcciones"
Muestra:	Agregados Mina "Kumochi" Ambato	**Coordenadas:**	9863049.00 ; 769154.00

DOSIFICACIÓN MEZCLA DE DISEÑO

Porcentaje de cada agregado a la Mezcla de Diseño	Agregado Grueso No.1:	< 3/4"	12	%
	Agregado Grueso No.2:	< 3/8"	31	%
	Agregado Fino:	< 1.5 mm	57	%
	Total:		100	%

GRANULOMETRÍA COMBINADA DE LOS AGREGADOS NUEVOS

Tamiz		*% PASA*			*DOSIFICACIÓN*			*MEZCLA DE DISEÑO*	*MEDIA LÍMITES*	*Límites Específicos MTOP*	
Descripción	*Abertura*	*Agregado Grueso 3/4"*	*Agregado Grueso 3/8"*	*Agregado Fino*	*Agregado Grueso 3/4"*	*Agregado Grueso 3/8"*	*Agregado Fino*			*Inferior*	*Superior*
[pulg]	**[mm]**	**[%]**	**[%]**	**[%]**	**12%**	**31%**	**57%**			**[%]**	**[%]**
¾ in	19,0	100,00	100,00	100,00	12,00	31,00	57,00	100,00	100	100	100
1/2 in	12,7	59,29	100,00	100,00	7,11	31,00	57,00	95,12	95,0	90	100
3/8 in	9,50										
No.4	4,75	1,86	17,94	98,26	0,22	5,56	56,01	61,80	59,0	44	74
No.8	2,36	1,34	3,62	80,55	0,16	1,12	45,91	47,20	43,0	28	58
No.16	1,18										
No.30	0,60										
No.50	0,300	0,00	0,00	29,40	0,00	0,00	16,76	16,76	13,0	5	21
No.100	0,150										
No. 200	0,08	0,00	0,00	12,13	0,00	0,00	6,91	6,92	6,0	2	10

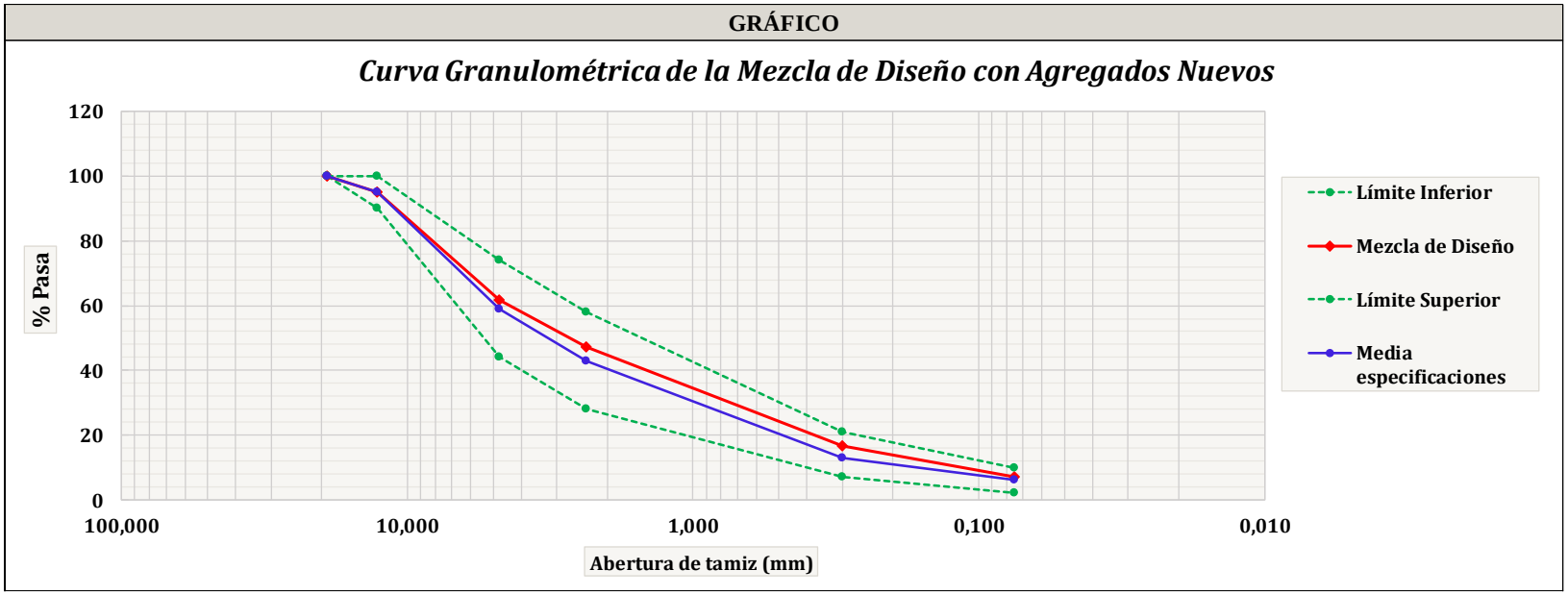


Fig. 41 Curva granulométrica de la mezcla de diseño con agregados nuevos

Análisis e interpretación:

Una vez establecidos los porcentajes de los agregados que conforman la mezcla de diseño; 12% de agregado grueso 3/4", 31% de agregado grueso 3/8" y 57% de agregado fino, se procedió a determinar la granulometría combinada con el fin de verificar su cumplimiento con los límites establecidos por la norma (ver TABLA XXIV) para mezclas asfálticas. Los resultados obtenidos muestran que la mezcla de diseño presentó porcentajes pasantes que están dentro de la faja de especificación. Además, que los valores se aproximan a la media de los límites establecidos, lo que evidencia una distribución equilibrada entre partículas gruesas y finas.

Por lo tanto, se concluyó que la combinación granulométrica seleccionada es adecuada para la elaboración de la mezcla asfáltica en frío objeto de estudio, ya que cumple con las especificaciones granulométricas establecidas por la normativa vigente.

2) Análisis granulométrico combinado para una Mezcla asfáltica en frío utilizando agregados nuevos y reciclados

TABLA XLV

RESULTADOS DEL ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO COMBINADO PARA EL DISEÑO DE LA MEZCLA CON AGREGADOS NUEVOS Y RECICLADOS

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

PROYECTO:	"Evaluación del efecto de los agregados de asfalto reciclado en las propiedades físico-mecánicas de las mezclas asfálticas en frío"		
ENSAYO: ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO EN LOS ÁRIDOS			
Ensayado por:	Cristal Romero Carrera	**Normas:**	ASTM C 136 / INEN 696
Revisado por:	Ing. Galo Núñez Aldaz, Mg.	**Ubicación:**	Laboratorio "JEAL Construcciones"
Muestra:	Agregados Mina "Kumochi" y "RAP" Quero	**Coordenadas:**	9863049.00 ; 769154.00

DOSIFICACIÓN MEZCLA DE DISEÑO

Mezcla con agregados NUEVOS	Agregado Grueso No.1:	< 3/4"	9,60	%
	Agregado Grueso No.2:	< 3/8"	24,80	%
	Agregado Fino:	< 1.5 mm	45,60	%
Mezcla con agregados RECICLADOS	Agregado Grueso No.1:	< 3/4"	10,00	%
	Agregado Fino:	< 1.5 mm	10,00	%
Mezcla de Diseño	**Total:**		100	%

GRANULOMETRÍA COMBINADA DE LOS AGREGADOS NUEVOS Y RECICLADOS

Tamiz		*Material Convencional (% Pasa)*				*Material RAP (% Pasa)*				*Límites Específicos MTOP (% Pasa)*		
Descripción	*Abertura*	*Agregado Grueso 3/4"*	*Agregado Grueso 3/8"*	*Agregado Fino*	*MEZCLA "AGREGADOS NUEVOS"*	*RAP Muestra 1 y 2*	*RAP Muestra 3 y 4*	*MEZCLA "AGREGADOS RECICLADOS"*	*MEZCLA DE DISEÑO*	*Límite Inferior*	*Límite Superior*	*MEDIA*
[pulg]	[mm]	9,60	24,80	45,60		10,00	10,00			[%]	[%]	[%]
¾ in	19,0	100,00	100,00	100,00	80,00	100,00	100,00	20,00	100,00	100	100	100,0
1/2 in	12,7	59,29	100,00	100,00	76,09	93,10	91,20	18,43	94,52	90	100	95,0
3/8 in	9,50											
No.4	4,75	1,86	17,94	98,26	49,43	65,50	65,40	13,09	62,52	44	74	59,0
No.8	2,36	1,34	3,62	80,55	37,76	48,00	46,90	9,49	47,25	28	58	43,0
No.16	1,18											
No.30	0,60											
No.50	0,300	0,00	0,00	29,40	13,41	14,80	14,00	2,88	16,29	5	21	13,0
No.100	0,150											
No. 200	0,075	0,00	0,00	12,13	5,53	2,50	0,40	0,29	5,82	2	10	6,0

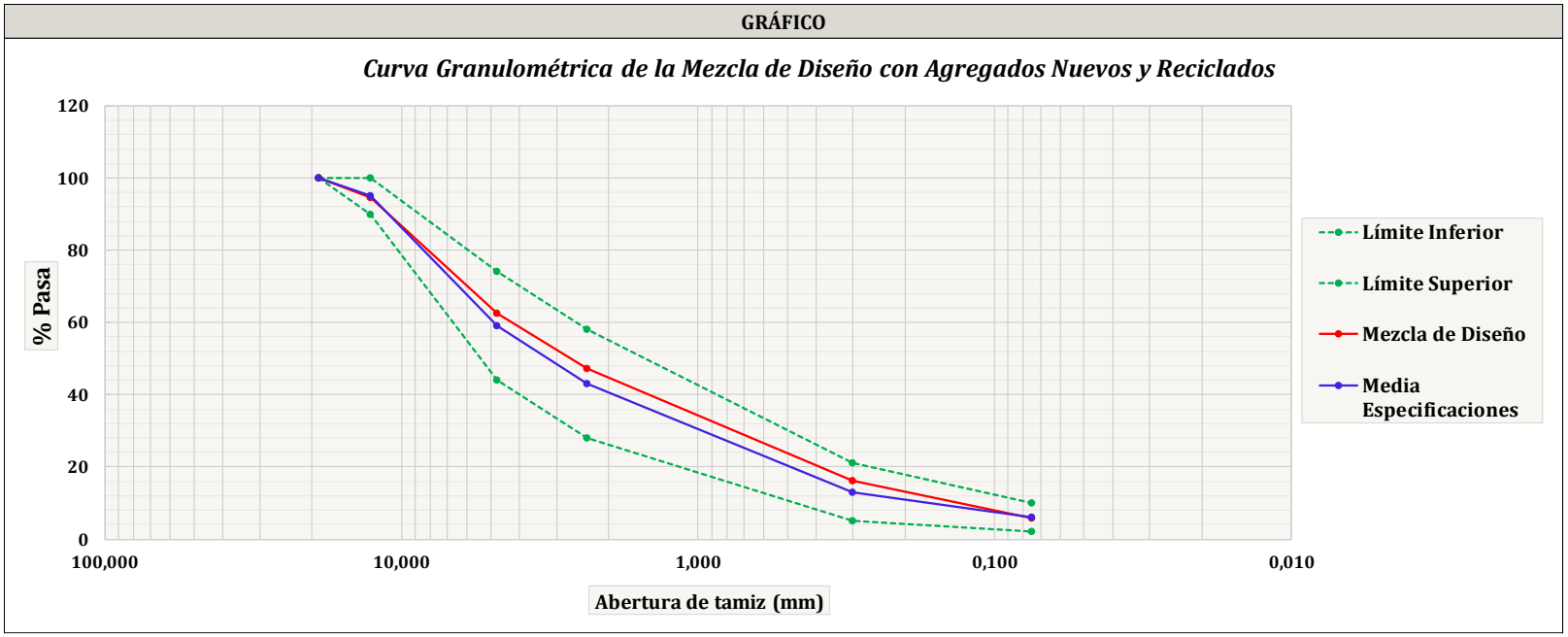


Fig. 42 Curva granulométrica de la mezcla de diseño con agregados nuevos y reciclados

Análisis e interpretación:

Con base en las proporciones establecidas para la mezcla de diseño, conformada por 80% de agregados nuevos y 20% de pavimento asfáltico recuperado, se determinó la granulometría combinada con el propósito de verificar su cumplimiento con los requisitos establecidos por las especificaciones de la norma para mezclas asfálticas, ver TABLA XXIV. Los valores pasantes de la mezcla fueron cercanos a la media de los límites, lo que se evidenció una adecuada distribución de partículas gruesas y finas. La incorporación del 20% de RAP no generó cambios significativos en la curva granulométrica de diseño, permitiendo que la mezcla mantenga una buena gradación. Por lo tanto, se concluyó que la combinación de agregados nuevos y reciclados seleccionados fueron adecuados para la elaboración de la mezcla asfáltica en frío y establece una alternativa técnica viable para el aprovechamiento de materiales reciclados en pavimentación.

3) Diseño de la mezcla asfáltica en frío con agregados nuevos utilizando diferentes porcentajes de emulsión asfáltica siguiendo las especificaciones establecidas por el Método Marshall / Norma MOP–001 –F–2002

TABLA XLVI

ENSAYO MARSHALL - AGREGADOS NUEVOS

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

PROYECTO:	"Evaluación del efecto de los agregados de asfalto reciclado en las propiedades físico-mecánicas de las mezclas asfálticas en frío"

ENSAYO: DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS DE LA ESTABILIDAD Y FLUJO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS EN FRÍO

Ensayado por:	Cristal Romero Carrera	**Agregado:**	Agregado convencional o nuevo	**Observaciones:**	No. de golpes: 75; Temperatura de ensayo: 25 ºC; Especificación del Flujo permitido: 8 a 16 (1/100"); Estabilidad mínima permitida: 1800 lb; Contenido de asfalto residual en la emulsión asfáltica catiónica tipo CSS-1h: 61% Asfalto residual + 39% Agua
Revisado por:	Ing. Galo Núñez Aldaz, Mg.	**Punto de muestreo:**	Mina "Kumochi" de "JEAL Construcciones"		
Ubicación:	Laboratorio "JEAL Construcciones"	**Uso:**	Mezcla asfáltica en frío con material convencional y emulsión asfáltica catiónica tipo		
Norma:	ASTM D 6927	**Ligante:**	Emulsión Asfáltica Catiónica Tipo CSS-1h		

ENSAYO MARSHALL

PESOS ESPECÍFICOS	Gravedad Específica de la Emulsión asfáltica =	1,0004 g/cm^3	Gb
	Gravedad Específica Bulk de Agregados para Diseño =	2,512 g/cm^3	Gsb

No. Briqueta	% De Asfalto residual	% De Agregados	Espesor de la briqueta [mm]	Factor de Corrección	PESO DE BRIQUETA [g]			Volumen [cm3]	GRAVEDAD ESPECÍFICA [g/cm3]				% ASFALTO		VOLUMEN TOTAL - %			VOLUMEN DE VACÍOS - %			ESTABILIDAD [lb]		FLUJO [1/100"]
					Seca en Aire	S.S.S. en Aire	S.S.S. en Agua		Bulk	Promedio	Máximo	Teórico efectiva	Absorbido	Efectivo	Agregados	Vacíos	Asfalto	Agregados	Mezcla Total	Llenos de asfalto	Lectura	Corregida	Lectura
Nom.	Pb	Ps							Gmb		Gmm	Gse	Pba	Pbe				VMA	Va	VFA			
Ref.	[A]	[B]	[C]	[D]	[E]	[F]	[G]	[H]	[I]	[J]	[K]	[L]	[M]	[N]	[O]	[P]	[Q]	[R]	[S]	[T]	[U]	[V]	[W]
1	5	95	60,3	1,090	952,8	955,5	513,2	442,3	2,154	2,154	2,336	2,513	0,009	4,992	81,46	7,79	10,75	18,54	7,79	57,97	3449,6	3760,1	11
2			59,8	1,093	961,6	963,8	517,3	446,5	2,154												3007,4	3287,1	13
3			60,8	1,074	979,9	982,1	527,2	454,9	2,154												3821,4	4104,2	14
Promedio								447,9														3717,11	12,67
1	5,5	94,5	56,2	1,228	882,9	884,2	480,0	404,2	2,184	2,182	2,322	2,515	0,054	5,449	82,07	6,05	11,88	17,93	6,05	66,26	2558,6	3142,0	17
2			56,0	1,235	913,8	914,8	495,6	419,2	2,180												2717	3355,5	11
3			55,9	1,239	981,4	982,5	532,4	450,1	2,180												3055,8	3786,1	15
Promedio								424,5														3427,86	14,33
1	6	94	56,5	1,216	925,7	927,5	508,8	418,7	2,211	2,198	2,304	2,513	0,016	5,985	82,24	4,61	13,15	17,76	4,61	74,05	2206,6	2683,2	15
2			56,8	1,205	945,6	947,5	511,0	436,5	2,166												2604,8	3138,8	15
3			56,8	1,205	926,2	928,2	510,3	417,9	2,216												2235,2	2693,4	13
Promedio								424,4														2838,48	14,33
1	6,5	93,5	57,0	1,198	938,2	940,0	517,4	422,6	2,220	2,185	2,297	2,524	0,197	6,316	81,34	4,86	13,80	18,66	4,86	73,94	2008,6	2406,3	13
2			59,1	1,127	972,0	974,0	525,3	448,7	2,166												2083,4	2348,0	13
3			59,0	1,131	972,4	974,2	526,0	448,2	2,170												2030,6	2296,6	16
Promedio								439,8														2350,30	14,00
1	7	93	60,0	1,099	942,5	944,2	507,0	437,2	2,156	2,155	2,273	2,514	0,027	6,975	79,80	5,17	15,03	20,20	5,17	74,39	1590,6	1748,1	17
2			55,0	1,276	909,6	911,2	489,5	421,7	2,157												1720,4	2195,2	14
3			56,0	1,235	923,4	925,0	496,2	428,8	2,153												1623,6	2005,1	16
Promedio								429,2														1982,82	15,67
1	7,5	92,5	60,8	1,074	946,9	948,5	508,6	439,9	2,153	2,150	2,257	2,513	0,015	7,486	79,18	4,73	16,09	20,82	4,73	77,30	999,9	1073,9	17
2			59,0	1,131	952,8	954,5	509,0	445,5	2,139												1034	1169,5	16
3			59,0	1,131	941,0	942,8	507,1	435,7	2,160												965,8	1092,3	18
Promedio								440,4														1111,89	17,00

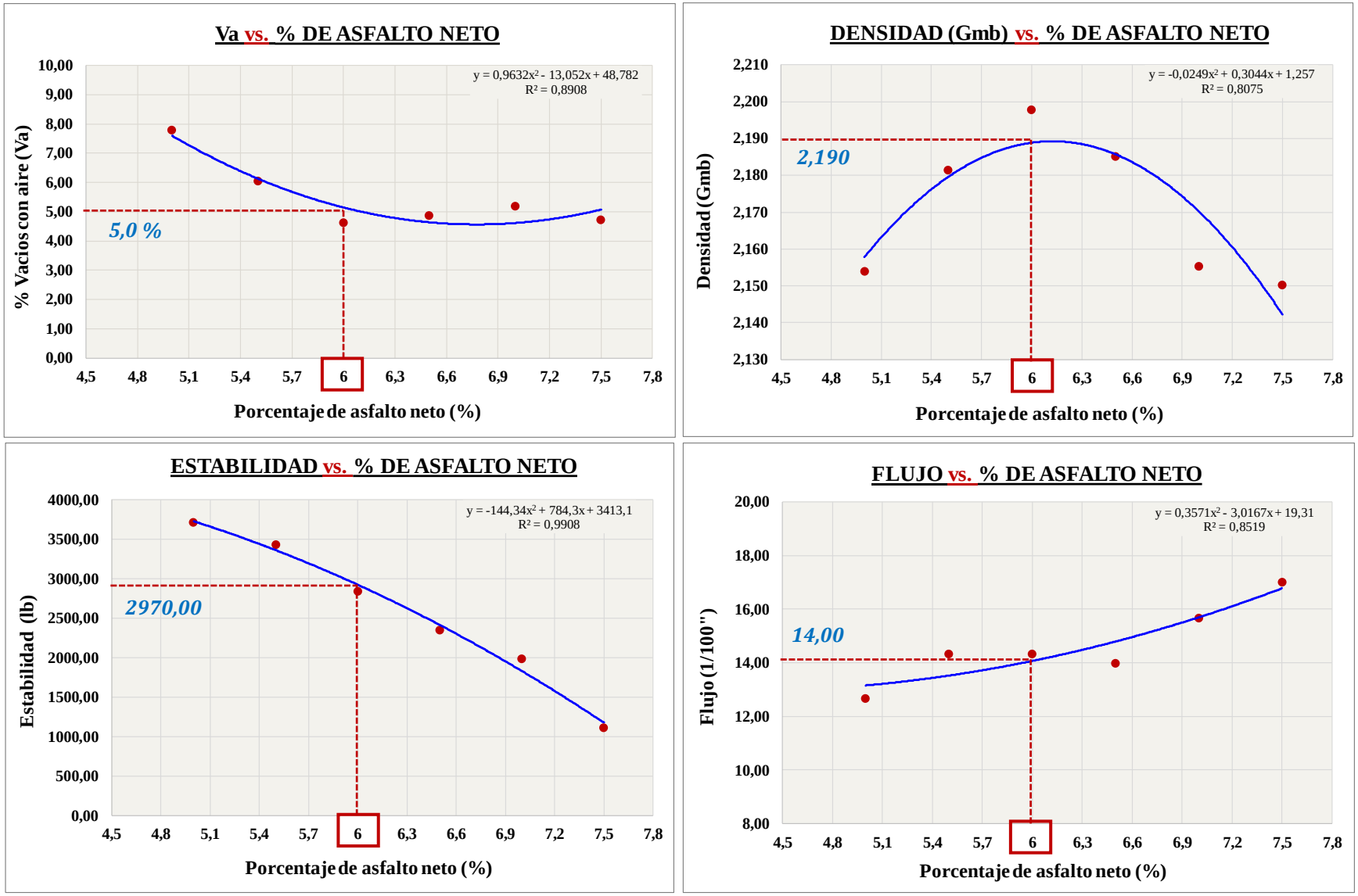
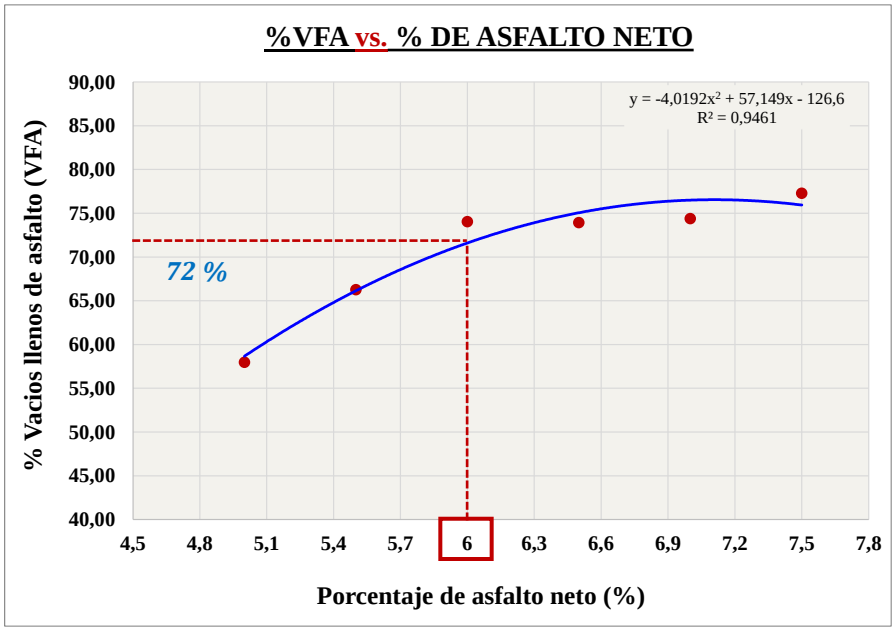


Fig. 43 Curvas Método Marshall con agregados nuevos



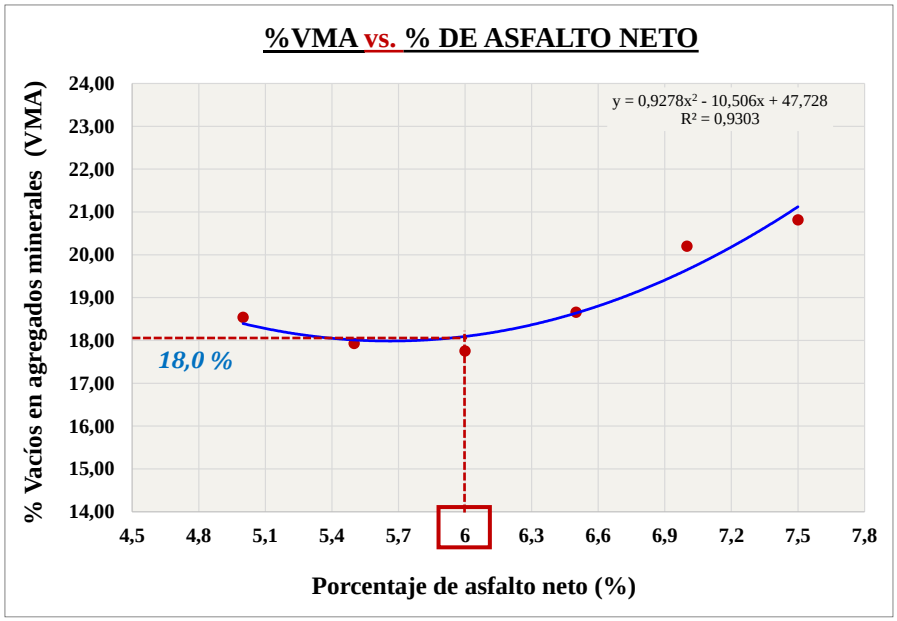


Fig. 44 Curvas Método Marshall con agregados nuevos

4) Diseño de la mezcla asfáltica en frío con agregados nuevos y reciclados utilizando diferentes porcentajes de emulsión asfáltica siguiendo las especificaciones establecidas por el Método Marshall / Norma MOP–001 –F–2002

TABLA XLVII

ENSAYO MARSHALL - AGREGADOS NUEVOS Y RECICLADOS

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

PROYECTO:	"Evaluación del efecto de los agregados de asfalto reciclado en las propiedades físico-mecánicas de las mezclas asfálticas en frío"

ENSAYO: DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS DE LA ESTABILIDAD Y FLUJO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS EN FRÍO

Ensayado por:	Cristal Romero Carrera	**Agregado:**	Agregados nuevos y reciclados	**Observaciones:**	No. de golpes: 75; Temperatura de ensayo: 25 ºC; Especificación del Flujo permitido: 8 a 16 (1/100"); Estabilidad mínima permitida: 1800 lb; Contenido de asfalto residual en la emulsión asfáltica catiónica tipo CSS-: 61% Asfalto residual + 39% Agua
Revisado por:	Ing. Galo Núñez Aldaz, Mg.	**Punto de muestreo:**	Cantón: Quero y Mina "Kumochi"		
Ubicación:	Laboratorio "JEAL Construcciones"	**Uso:**	Mezcla asfáltica en frío con material convencional, RAP y emulsión asfáltica catiónica tipo CSS-1h		
Norma:	ASTM D 6927	**Ligante:**	Emulsión Asfáltica Catiónica Tipo CSS-1h		

ENSAYO MARSHALL

PESOS ESPECÍFICOS	Gravedad Específica del Asfalto =	1,0004 g/cm^3	Gb
	Gravedad Específica Bulk de Agregados para Diseño =	2,535 g/cm^3	Gsb

No. Briqueta	% Asfalto		% De Agregados	Espesor de la briqueta [mm]	Factor de Corrección	PESO DE BRIQUETA [g]			Volumen [cm3]	GRAVEDAD ESPECÍFICA [g/cm3]				% ASFALTO		VOLUMEN TOTAL - %			VOLUMEN DE VACÍOS - %			ESTABILIDAD [lb]		FLUJO [1/100"]
	20% "RAP"	% Asfalto residual				Seca en Aire	S.S.S. en Aire	S.S.S. en Agua		Bulk	Promedio	Máximo	Teórico efectiva	Absorbido	Efectivo	Agregados	Vacíos	Asfalto	Agregados	Mezcla Total	Llenos de asfalto	Lectura	Corregida	Lectura
Nom.		Pb	Ps							Gmb		Gmm	Gse	Pba	Pbe				VMA	Va	VFA			
Ref.		[A]	[B]	[C]	[D]	[E]	[F]	[G]	[H]	[I]	[J]	[K]	[L]	[M]	[N]	[O]	[P]	[Q]	[R]	[S]	[T]	[U]	[V]	[W]
1	1,14	3,86	96,14	59,1	1,128	1001,0	1005,0	548,3	456,7	2,192	2,179	2,395	2,537	0,031	3,830	82,66	9,00	8,34	17,34	9,00	48,11	2129,6	2402,2	10
2				61,1	1,065	996,6	1000,6	546,9	453,7	2,197												2310	2460,2	14
3				61,0	1,068	1002,3	1006,3	540,1	466,2	2,150												2109,8	2253,3	11
Promedio									458,9														2371,87	11,67
1	1,14	4,36	95,64	61,1	1,065	998,7	1002,7	545,8	456,9	2,186	2,185	2,378	2,537	0,035	4,326	82,42	8,13	9,45	17,58	8,13	53,73	2281,4	2429,7	15
2				62,1	1,038	1004,5	1008,5	546,9	461,6	2,176												2417,8	2509,7	11
3				61,5	1,053	996,6	1000,6	545,9	454,7	2,192												2428,8	2557,5	13
Promedio									457,7														2498,96	12,87
1	1,14	4,86	95,14	61,3	1,059	1001	1005,0	547,7	457,3	2,189	2,188	2,361	2,537	0,035	4,826	82,10	7,34	10,55	17,90	7,34	58,98	2380,4	2520,8	12
2				60,5	1,084	996,6	1000,6	546,9	453,7	2,197												2017,4	2186,9	15
3				58,0	1,162	1004,7	1008,7	547,3	461,4	2,178												2024	2351,9	13
Promedio									457,5														2353,20	13,33
1	1,14	5,36	94,64	62,2	1,033	995,6	999,6	546,3	453,3	2,196	2,184	2,345	2,538	0,050	5,313	81,53	6,87	11,60	18,47	6,87	62,79	2055,4	2123,2	17
2				62,5	1,025	1003,7	1007,7	547,2	460,5	2,180												2034,4	2085,3	14
3				61,0	1,068	1001	1005	544,9	460,1	2,176												2043,8	2182,8	13
Promedio									458,0														2130,42	14,58
1	1,14	5,86	94,14	60,6	1,081	1002,1	1006,1	544,6	461,5	2,171	2,170	2,328	2,538	0,041	5,822	80,57	6,80	12,63	19,43	6,80	65,00	1768,8	1912,1	17
2				57,9	1,166	995,2	999,2	540,8	458,4	2,171												1984,4	2313,8	14
3				59,9	1,103	1004,7	1008,7	545,0	463,7	2,167												1377,2	1519,1	15
Promedio									461,2														1914,98	15,44
1	1,14	6,36	93,64	59,3	1,121	1003,3	1007,3	543,2	464,1	2,162	2,158	2,315	2,542	0,101	6,265	79,72	6,76	13,52	20,28	6,76	66,66	1388,2	1556,2	16
2				61,5	1,053	997,1	1001,1	538,8	462,3	2,157												1383,8	1457,1	15
3				63,1	1,01	996,80	1000,8	538,5	462,3	2,156												1331	1344,3	17
Promedio									462,9														1452,54	16,00

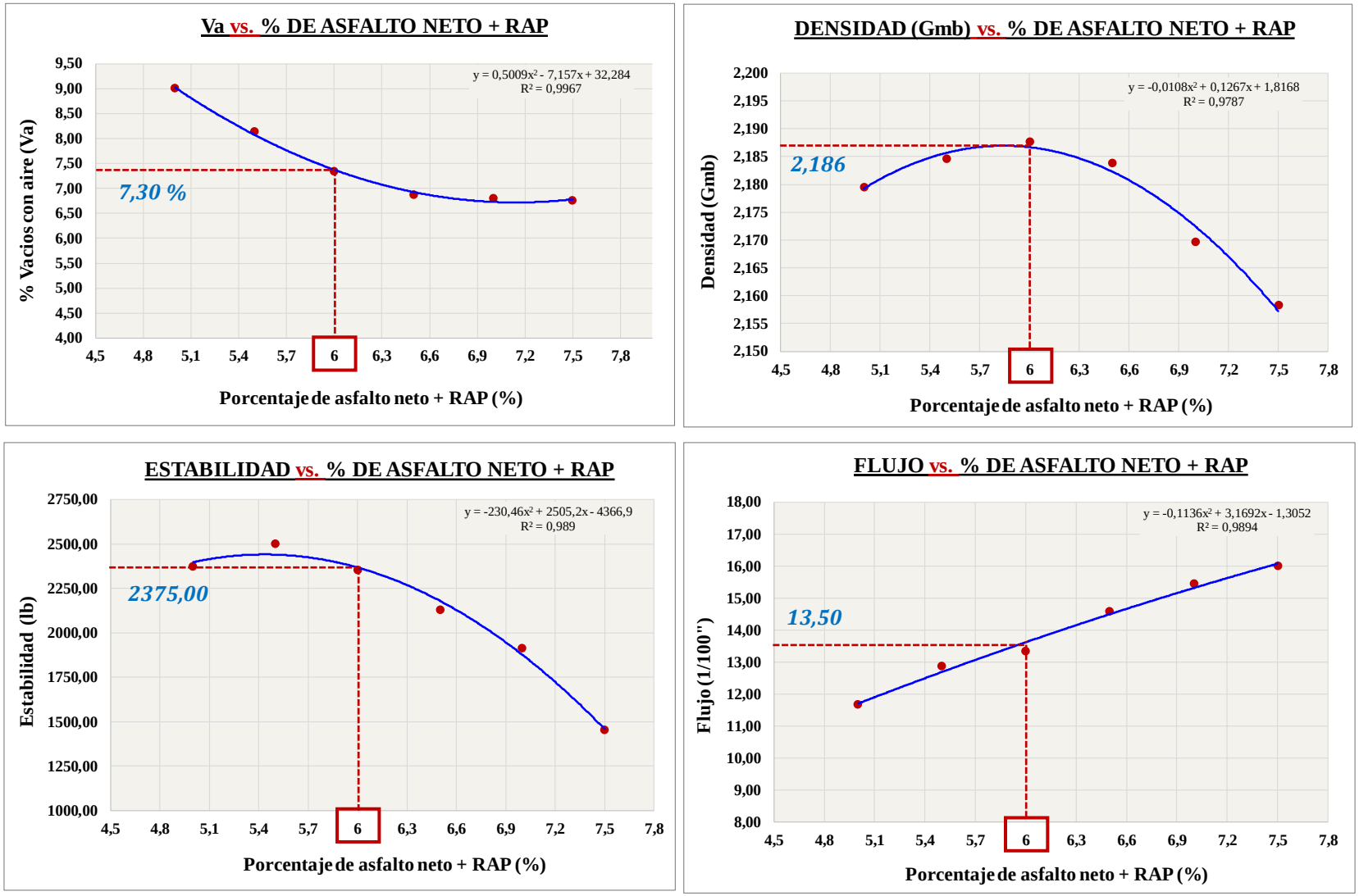
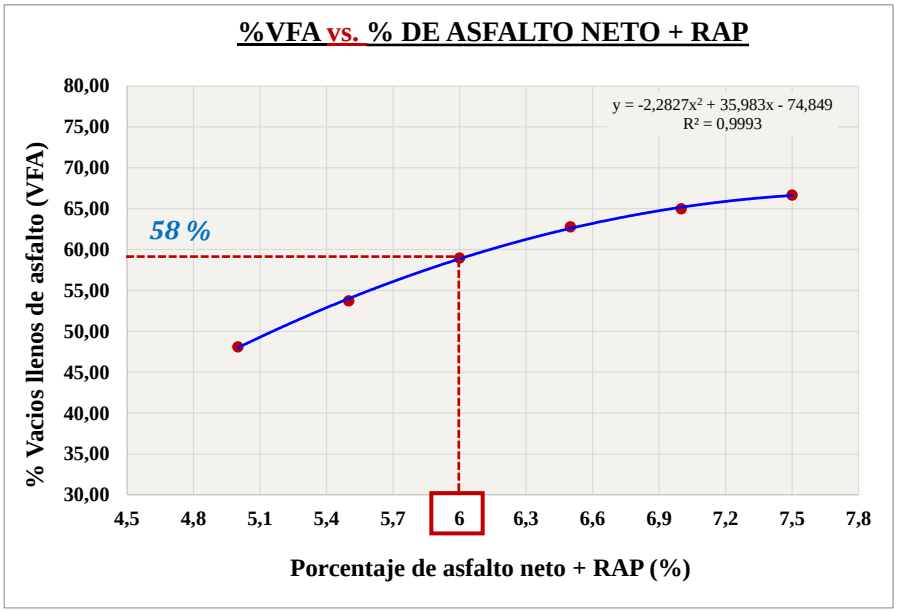


Fig. 45 Curvas Método Marshall con agregados nuevos y reciclados



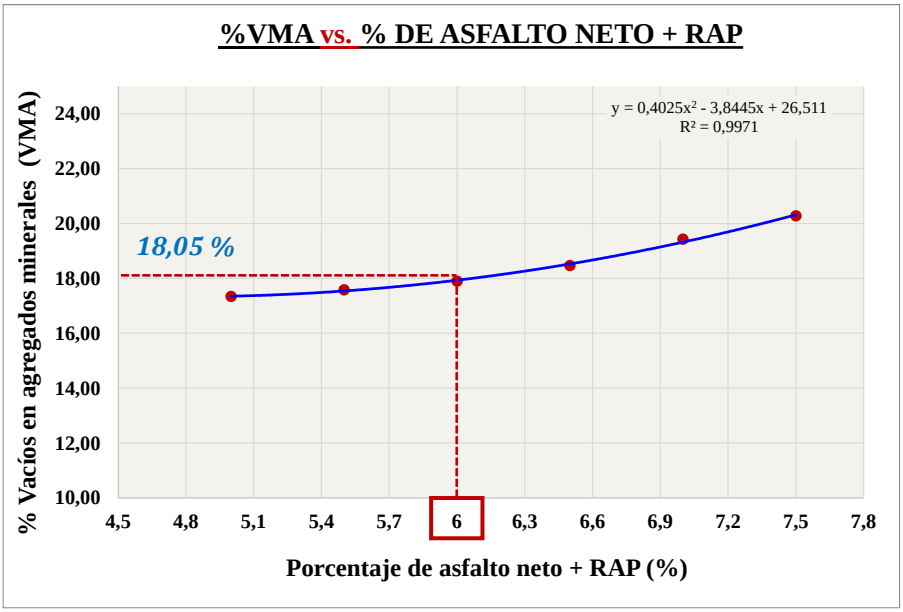


Fig. 46 Curvas Método Marshall con agregados nuevos y reciclados

TABLA XLVIII

RESUMEN DE RESULTADOS

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

RESUMEN DE LOS RESULTADOS

PARÁMETROS	Mezcla convencional	Mezcla con RAP	ESPECIFICACIONES
Estabilidad (lb)	2970	2375	mín 1800 lb
Flujo (1/100")	14,00	13,50	8 a 16
Densidad (Gmb)	2,190	2,186	-
Vacíos con aire (Va)	5,0	7,3	3 a 5%
Vacíos en agregados minerales (VMA)	18,00	18,05	mín 14
Vacíos llenos de asfalto (VFA)	72	58	65 a 75%

Análisis e interpretación:

Bajo los lineamientos de la norma ASTM D 6927 [40], el procedimiento para determinar el contenido óptimo de asfalto en el ensayo Marshall sugiere interceptar la curva de vacíos de aire en un valor del 4%. Sin embargo, es fundamental considerar que dicho criterio fue diseñado originalmente para mezclas asfálticas en caliente [9]. En esta investigación, al trabajar con una mezcla asfáltica en frío que incorpora tanto agregados nuevos como reciclados en un 20%, la naturaleza volumétrica del diseño arroja contenidos de vacíos ligeramente más altos. Por esta razón, se optó por definir el contenido óptimo de asfalto neto de la emulsión asfáltica CSS-1h priorizando el cumplimiento integral de las especificaciones de la norma MOP-001-F-2002. Tras el análisis de las curvas de estabilidad, flujo, densidad y % de vacíos, se determinó para ambos diseños que el porcentaje óptimo de asfalto neto es de 6,0%, lo que representa un valor de 9,84% de emulsión asfáltica.

- **Vacíos con aire [Va] vs. % Asfalto neto**

Tras definir el 6,0% como el contenido óptimo de asfalto neto, se determinó que la mezcla convencional alcanza un 5,0% de vacíos con aire, mientras que la mezcla con incorporación de

RAP se sitúa en un 7,30%. En ambos diseños se observa una tendencia decreciente en las curvas, representando que, a mayor cantidad de ligante, este ocupa progresivamente los espacios vacíos entre los agregados, reduciendo el volumen de aire en la estructura compactada.

En el caso de la mezcla convencional, para un porcentaje óptimo de asfalto neto del 6% el valor obtenido de porcentaje de vacíos de aire fue de 5%, verificando que cumple con el rango de referencia entre 3 a 5% estipulado por la norma vigente [2]. Mientras que, para la mezcla con agregados reciclados el resultado obtenido fue de 7,30%, confirmando que ese valor supera estos límites. Este comportamiento puede estar relacionado con las características propias del pavimento asfáltico recuperado incorporado a la mezcla. Aunque el contenido de asfalto neto total corresponde al 6%, no todo este porcentaje actúa como ligante efectivo, ya que aproximadamente el 1,14% es proveniente del asfalto envejecido contenido en el 20% de RAP, mientras que el 4,86% corresponde al ligante aportado por la emulsión asfáltica. Debido al envejecimiento del asfalto presente en el RAP, su capacidad de adherencia y aporte efectivo a la cohesión de la mezcla puede ser menor en comparación con el ligante aportado por la emulsión asfáltica.

Adicionalmente, la incorporación de RAP puede incrementar la cantidad de vacíos debido a la textura superficial y porosidad de las partículas recicladas. Parte del ligante incorporado puede ser absorbido o retenido en los poros del material, lo que reduce la cantidad de asfalto disponible para llenar los espacios vacíos de la mezcla y favorecer su compactación.

Sin embargo, los resultados obtenidos mostraron un comportamiento favorable de la mezcla, considerando que se logró reemplazar una parte de los agregados vírgenes por material reciclado sin afectar significativamente las propiedades de diseño. De igual forma, es posible que el porcentaje de vacíos disminuya durante la construcción del pavimento mediante un proceso de compactación más eficiente en campo, empleando rodillos neumáticos y rodillos de acero de doble tambor, así como considerar un número suficiente de pasadas y velocidades de operación controladas. Estas condiciones permitirían incrementar la densificación de la mezcla y reducir los vacíos. Por lo tanto, los resultados obtenidos sugieren que la incorporación de RAP en mezclas asfálticas en frío constituye una alternativa técnicamente viable y económica conveniente, ya que permite aprovechar materiales reciclados, reduciendo el consumo de agregados vírgenes (explotación de canteras) y contribuir al uso eficiente de los recursos disponibles.

- **Densidad [Gmb] vs. % Asfalto neto**

La gravedad específica bulk define la relación entre el peso de la mezcla compactada y su volumen total, y permite estimar la densidad que alcanzará el pavimento durante la vida útil debido a la acción del tránsito. En la gráfica se observa que la densidad aumenta progresivamente conforme se incrementa el contenido de asfalto neto, alcanzando un valor máximo cercano al porcentaje óptimo de diseño. El aumento inicial de la emulsión asfáltica favoreció la compactación de la mezcla, ya que el ligante redujo la fricción entre las partículas y facilitó su reacomodo, incrementando la densidad. Sin embargo, al superar el contenido óptimo de la emulsión, el exceso de ligante disminuyó el contacto entre los agregados. Debido a que el asfalto posee una gravedad específica menor que la de los materiales pétreos, se produjo una reducción de la gravedad específica bulk y, por consiguiente, de la densidad de la mezcla.

Se determinó un valor de 2,190 para la mezcla convencional, mientras que para la mezcla con RAP se registró un valor de 2,186 con el contenido óptimo de asfalto neto de 6%. La incorporación del 20% de RAP no afectó significativamente la densidad de la mezcla, ya que se obtuvieron valores muy cercanos entre ambas mezclas. Esto indica que el material reciclado se integró adecuadamente dentro de la estructura granular.

- **Estabilidad vs. % Asfalto neto**

Se puede observar en las gráficas una tendencia decreciente de la estabilidad conforme aumenta el contenido de asfalto residual. Si bien esta trayectoria podría mejorarse mediante la inclusión de más puntos de control para lograr una curva polinómica de mayor ajuste, el análisis se basa en la aptitud de la mezcla para soportar solicitaciones de tráfico sin deformaciones plásticas excesivas.

Es importante equilibrar este parámetro, ya que una estabilidad elevada produce una rigidez extrema, afectando negativamente la durabilidad del pavimento. Considerando que el diseño se realizó para tráfico pesado aplicando una compactación de 75 golpes por cara, los resultados obtenidos son sumamente satisfactorios: la mezcla convencional alcanzó una estabilidad de 2970 lb y la mezcla con RAP un valor de 2375 lb. Ambos valores superan el requerimiento mínimo de 1800 lb exigido para estas condiciones de carga, así como el requisito base de 750 lb para mezclas asfálticas en frío [2].

- **Flujo vs. % Asfalto neto**

Las gráficas presentan una tendencia creciente conforme aumenta el contenido de asfalto neto de la emulsión asfáltica. Esto se debe a que una mayor cantidad de ligante incrementa la flexibilidad de la mezcla, permitiendo una mayor deformación antes de alcanzar la falla. Por esta razón, los mayores contenidos de asfalto producen valores más altos de flujo. Para el contenido óptimo de asfalto neto del 6%, se obtuvo para la mezcla convencional un flujo de 14,0 (1/100"), y para la mezcla con RAP un flujo de 13,50 (1/100"), valores que indican que la mezcla posee una adecuada capacidad de deformación bajo cargas de tránsito, y verificando su cumplimiento dentro de los límites de 8 a 16 (1/100") [2]. Este comportamiento es favorable, ya que permite que la mezcla absorba esfuerzos provocados por el tránsito vehicular sin presentar una excesiva rigidez o fragilidad.

De igual manera, la incorporación de los agregados reciclados no afectó este parámetro, debido a que ambos valores fueron muy similares entre sí. Esto demuestra que la utilización de material reciclado mantiene un adecuado equilibrio entre resistencia y flexibilidad, contribuyendo al buen desempeño de la mezcla asfáltica en frío.

- **Vacíos Llenos de Asfalto [VFA] vs. % Asfalto neto**

El análisis de los vacíos llenos de asfalto muestra una tendencia ascendente en ambos diseños conforme se incrementó el contenido de asfalto neto de la emulsión, debido a que una mayor cantidad de ligante ocupa progresivamente los espacios vacíos presentes en la matriz mineral. Para la mezcla convencional, los resultados en la curva muestran que el VFA alcanza un valor de 72%, este resultado cumple adecuadamente con el criterio del Instituto del Asfalto, que sugiere un intervalo de 65 a 75% para condiciones de tráfico pesado.

Por lo contrario, la mezcla con incorporación de RAP presentó un desempeño volumétrico distinto, alcanzando un VFA de 58% para el contenido óptimo del 6%, valor que se sitúa por debajo del rango recomendado. Al incrementarse los vacíos de aire debido a la porosidad del RAP, la proporción de espacios llenos de ligante disminuye de manera obligatoria. El 58% de la mezcla reciclada ratifica que una parte importante del asfalto se encuentra atrapada o absorbida dentro de

la matriz porosa del RAP, restando volumen al ligante efectivo que debería rellenar los vacíos visibles del espécimen.

- **Vacíos en Agregados Minerales [VMA] vs. % Asfalto neto**

Para el contenido óptimo de asfalto neto del 6%, se obtuvieron valores de VMA de 18,0% para la mezcla convencional y 18,05% para la mezcla con RAP. Ambos resultados superan ampliamente el mínimo recomendado del 15% para mezclas con tamaño máximo nominal de ½ in y un porcentaje de vacíos de aire de 5%,ver TABLA XXIX.

Este comportamiento indica que la estructura granular de ambos diseños disponen de suficiente espacio intergranular para albergar tanto el ligante asfáltico necesario, como el volumen de vacíos de aire requerido para la durabilidad del pavimento. De igual manera, la similitud entre los resultados confirma que la incorporación del 20% de agregados reciclados no alteró de forma considerable este parámetro.

a) Método Rice para mezclas asfálticas utilizando agregados nuevos y reciclados con distintos porcentajes

TABLA XLIX

RESUMEN DEL ENSAYO RICE PARA LAS DOS MEZCLAS ASFÁLTICAS

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

ENSAYO: MÉTODO RICE / GRAVEDAD ESPECÍFICA MÁXIMA TEÓRICA Y DENSIDAD DE MEZCLAS BITUMINOSAS /ASTM D 2041

RESULTADO						
Mezcla asfáltica en frío	**Gravedad específica teórica máxima (Gmm) (g/cm3)**					
	5.0%	**5.5%**	**6.0%**	**6.5%**	**7.0%**	**7.5%**
Agregados Nuevos	2,336	2,322	2,304	2,297	2,273	2,257
Agregados Reciclados	2,395	2,378	2,361	2,345	2,328	2,315

Análisis e interpretación:

Al analizar el comportamiento de los resultados obtenidos, se identifican dos tendencias definidas en función del incremento de ligante y la naturaleza del agregdo empleado. Se puede observar que a mayor contenido de asfalto neto de la emulsión asfáltica, el valor de la (Gmm) disminuye de manera constante en ambos diseños. Explicando que la emulsión asfáltica posee una gravedad específica de 1,0004 g/cm3, la cual es mucho menor que la de los agregados pétreos, que registraron valores de 2,512 para la mezcla convencional y 2,535 para la mezcla con RAP. Por lo tanto, a medida que aumenta el ligante, este componente liviando va desplazando y ocupando el espacio del mineral pesado dentro del volumen total de la mezcla suelta, provocando que la masa por unidad de volumen teórico sea cada vez menor.

Por otro lado, al realizarse la comparación entre ambos materiales, se evidencia que la mezcla con agregados reciclados registra valores de (Gmm) ligeramente más altos en todos los niveles de dosificación en comparación con la mezcla convencional. Este fenómeno se puede deber a las partículas de RAP que han experimentado un desgate continuo y arrastre de finos de alta densidad.

De igual manera, el ligante envejecido que se encuentra adherido al agregado reciclado ha experimentado un proceso de edurecimiento debido a los años de exposición, lo que provoca una mayor rigidez y una densidad superior a la emulsión asfáltica (estado más fluido). De este modo, al procesar la muestra suelta en el extractor de vacios Rice, la rigidez de esta película envejecida del RAP evita que el material se expanda o absorva aire de la misma manera que el agregado virgen, conformando una estructura más densa y pesada que justifica los valores obtenidos.

5) FASE III

Finalmente, la FASE III se consolidó como la etapa medular del análisis técnico, enfocándose en la comparación de los resultados experimentales obtenidos en el laboratorio para ambos diseños. En esta fase, se confrontaron detalladamente los parámetros mecánicos de estabilidad y flujo, junto con las propiedades volumétricas esenciales como el porcentaje de vacíos con aire (Va), y la densidad bulk (Gmb) de las mezclas asfálticas en frío fabricadas con agregados nuevos y con incorporación del 20% de agregados reciclados.

a) Comparación de la Estabilidad de las mezclas asfálticas en frío fabricadas con agregados nuevos y con agregados reciclados

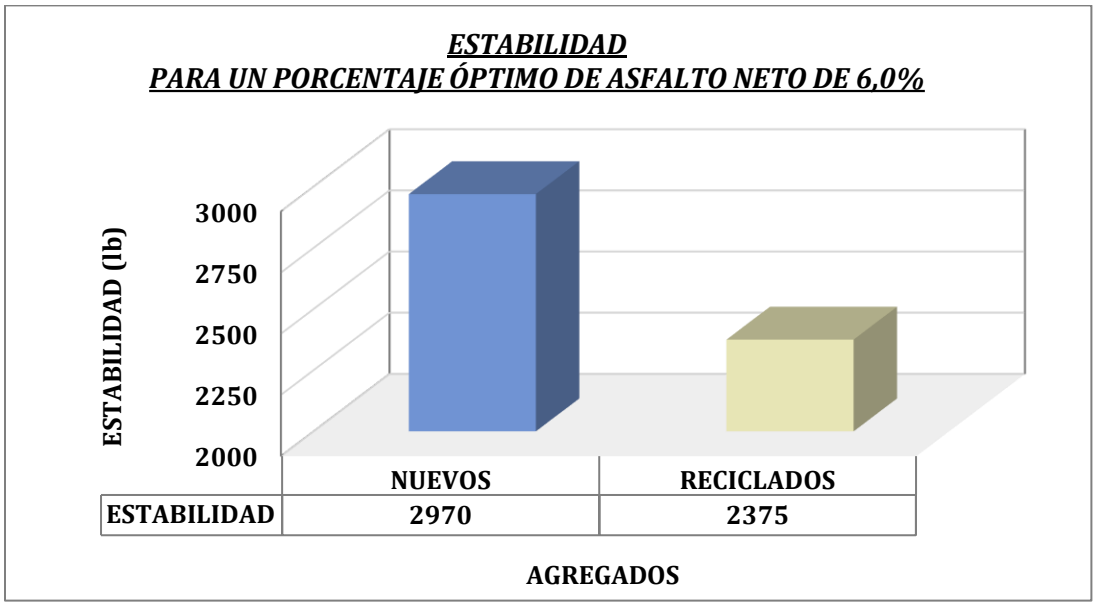


Fig. 47 Análisis comparativo de la Estabilidad Marshall

Al analizar el comportamiento mecánico de ambos diseños para un contenido óptimo de 6% de asfalto neto de la emulsión asfáltica, la Fig. 47 muestra que la mezcla con agregados nuevos alcanza una estabilidad de 2970 lb frente a las 2375 lb obtenidas por la mezcla que incorpora el 20% de agregados reciclados.

Esta diferencia de 595 lb ocurre debido a que, en la mezcla convencional, la totalidad del ligante proveniente de la emulsión asfáltica genera una cohesión homogénea y un buen acoplamiento entre las partículas minerales. En cambio, en el diseño de la mezcla con agregados reciclados, para alcanzar ese mismo 6% total se disminuyó el aporte de asfalto neto de la emulsión asfáltica en un 1,14%, dejando ese porcentaje al ligante residual propio del RAP. Como este asfalto reciclado se encuentra envejecido y rígido por su vida útil previa, no experimenta una reactivación completa ni se adhiere con la misma efectividad que el ligante fresco a temperatura ambiente, lo que hace que la mezcla con RAP quede ligeramente menos rígida que la convencional.

A pesar de esta disminución en la resistencia mecánica, ambos diseños superan el límite mínimo normativo de 1800 lb exigido para una carpeta asfáltica de tráfico pesado, validando la estabilidad estructural de la mezcla con RAP.

b) Comparación del Flujo de las mezclas asfálticas en frío fabricadas con agregados nuevos y con agregados reciclados

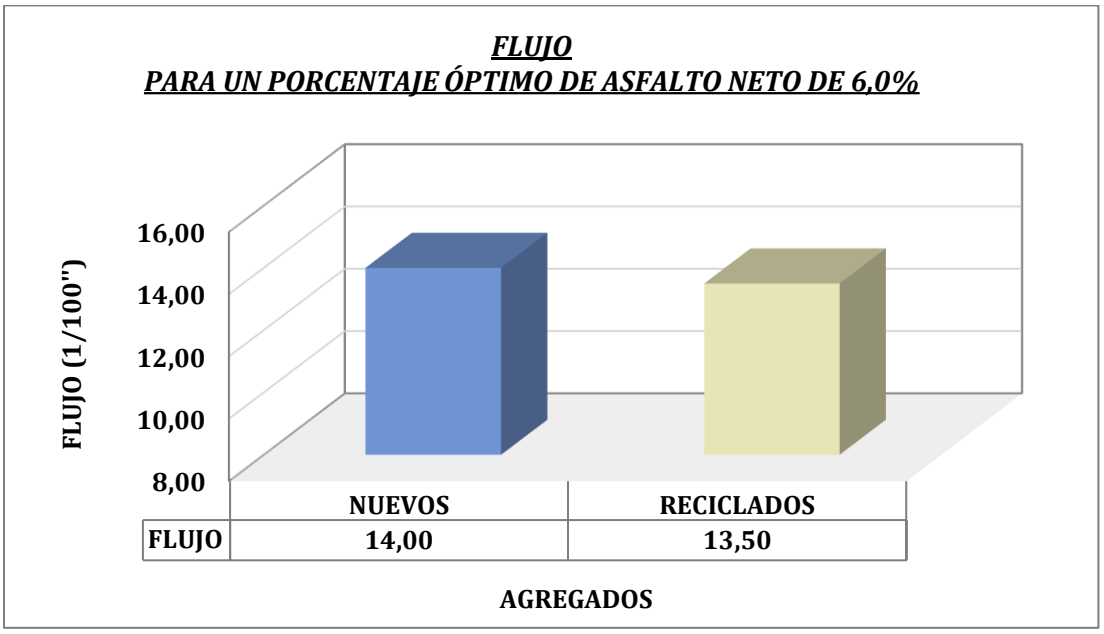


Fig. 48 Análisis comparativo del Flujo

Al evaluar el comportamiento de la deformación plástica para el contenido óptimo del 6% de asfalto neto, la Fig. 48 muestra que la mezcla con agregados nuevos alcanza un flujo de 14,00 centésimas de pulgada, mientras que la mezcla con incorporación de RAP presenta un valor ligeramente menor de 13,50 (1/00").

Esta variación representa una reducción del 3,57% en la deformación de la mezcla, lo cual se debe a que, en el diseño convencional, la totalidad del ligante proviene de la emulsión asfáltica fresca, aportando una película envolvente más blanda y propensa a desplazarse ante la aplicación de cargas mecánicas en la prensa Marshall. Por lo contrario, en la mezcla reciclada, al sustituir un 1,14% de este aporte por el ligante del RAP, la presencia de este asfalto viejo y endurecido le resta un poco de flexibilidad al bloque compactado, volviéndolo ligeramente más rígido. A partir de este versus, se concluye que la adición del material reciclado estabiliza el comportamiento plástico de la mezcla en frío sin volverla frágil, ambos resultados se encuentran dentro del rango estipulado por la norma, la cual exige un intervalo de 8 a 16 (1/100"), ver TABLA XXVIII [2].

c) Comparación del Porcentaje de Vacíos con aire de las mezclas asfálticas en frío fabricadas con agregados nuevos y con agregados reciclados

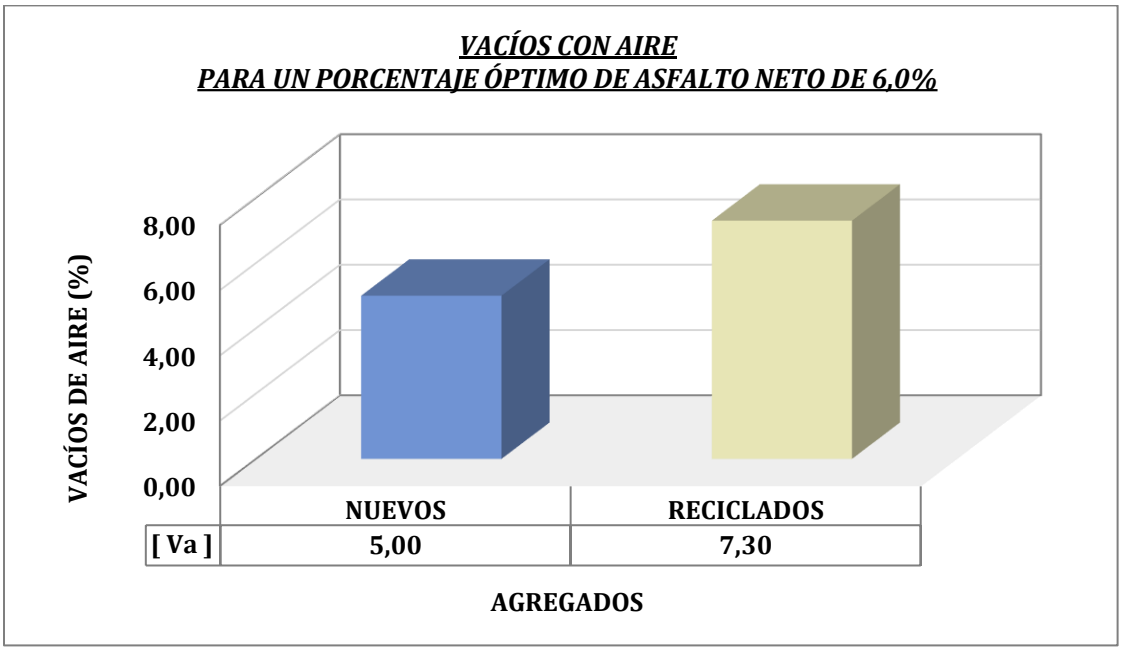


Fig. 49 Análisis comparativo de los Vacíos de aire

Al analizar volumétricamente el porcentaje de vacíos de aire con el contenido óptimo del 6% de asfalto neto de la emulsión asfáltica, la Fig. 49 muestra que el diseño de la mezcla con agregados nuevos alcanza un 5,0% de vacíos, mientras que la mezcla que incorpora un 20% de agregados reciclados muestra un valor superior de 7,30%. Esta variación representa un incremento del 2,3%, comportamiento que resulta lógico en mezclas asfálticas en frío.

En el diseño convencional, al emplear agregados vírgenes, las partículas logran un mejor reacomodo intergranular durante la compactación, facilitando la expulsión del agua libre de la emulsión. Por lo contrario, en la mezcla reciclada la textura superficial rugosa y la porosidad de las capas de asfalto envejecido del RAP complican ese acomodo y retienen humedad de la emulsión en su interior. Adicionalmente, de ese 6% total de asfalto neto, el 1,14% proviene del ligante envejecido del RAP que permanece inactivo a temperatura ambiente, reduciendo el volumen de asfalto fresco disponible para lubricar y rellenar estos espacios antes del curado.

El Instituto del Asfalto permite un rango entre 3 a 18% de vacíos de aire en mezclas asfálticas en frío, sin embargo, ya que el diseño está adaptado a la normativa nacional del MOP, se consideró un rango de 3 a 5%, verificándose que el diseño reciclado excede estos límites [2].

Debido a que el (Va) de la mezcla con RAP es un 2,3% superior al límite máximo especificado, la capa de pavimento podría ser propensa a sufrir pequeños asentamientos diferenciales o deformaciones por consolidación bajo las cargas continuas del tráfico vehicular. No obstante, se determinó que es técnicamente viable mitigar este efecto en la fase constructiva mediante una optimización de la energía de compactación en campo, para incrementar la densificación. Por lo tanto, los resultados demuestran que la incorporación de RAP es una técnica viable y ambientalmente sostenible, reduciendo la explotación de canteras y contribuyendo al uso eficiente de los recursos disponibles.

d) Comparación de la Densidad de las mezclas asfálticas en frío fabricadas con agregados nuevos y con agregados reciclados

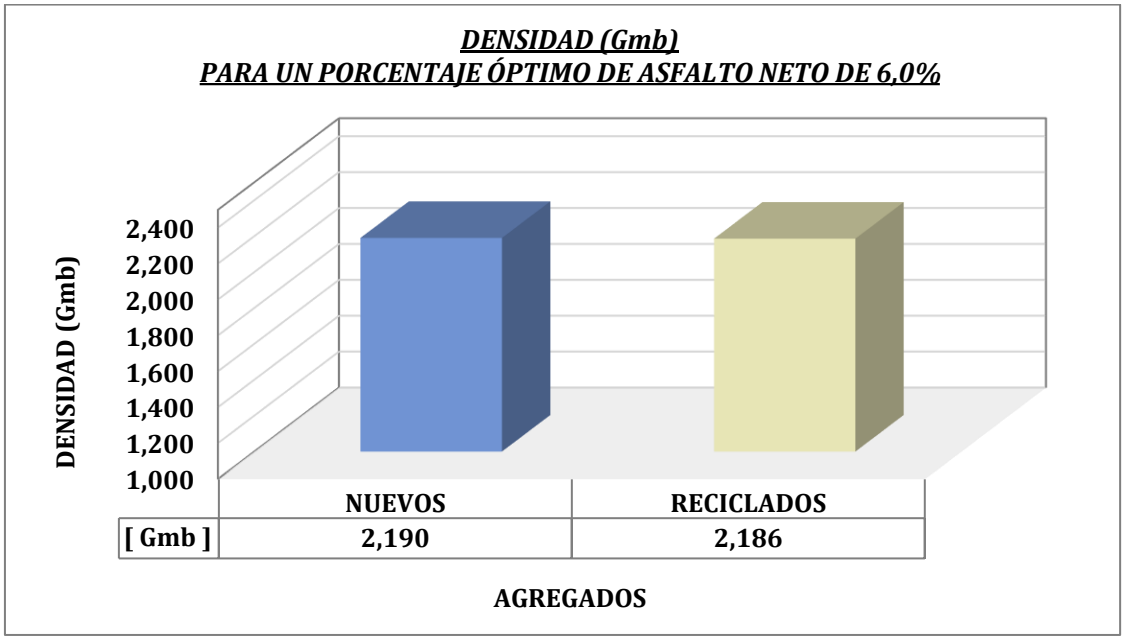


Fig. 50 Análisis comparativo de la Densidad (Gmb)

Al evaluar la densidad bulk (Gmb) para un contenido óptimo de 6% de asfalto neto, la Fig. 50 muestra que el diseño convencional alcanza un valor de 2,190 g/cm3, mientras que la mezcla con material reciclado experimenta un descenso casi inapreciable de 2,186.

Esta variación representa una disminución de apenas 0,18% en la masa por unidad de volumen del espécimen, esto se puede deber a que como la mezcla con agregados reciclados atrapa más vacíos de aire, el bloque compactado se vuelve menos denso. Además, influye de manera directa la composición del RAP, ya que viene con asfalto viejo adherido, el cual pesa menos que los agregados vírgenes. Sin embargo, los resultados demuestran que se consiguió reemplazar parte de los agregados naturales por material reciclado sin afectar significativamente la densificación de la mezcla. De igual forma, esta mínima variación en los resultados es manejable en obra, donde el paso de los rodillos neumáticos bajo pasadas controladas acomodará el material a su máxima capacidad, confirmando que el uso de RAP es una buena alternativa.

II. VERIFICACIÓN DE HPÓTESIS

Este estudio se centró en evaluar cómo la incorporación de agregados de asfalto reciclado influye en las propiedades físico-mecánicas de las mezclas asfálticas en frío, considerando que la dosificación óptima permite desarrollar un diseño viable que regula los parámetros volumétricos y optimiza el comportamiento mecánico bajo solicitaciones de carga.

A. HIPÓTESIS

Hipótesis planteada (H_1): la incorporación de agregados de asfalto reciclado modifica de manera significativa las propiedades físico-mecánicas de las mezclas asfálticas en frío, alterando de forma controlada la estabilidad Marshall y la deformación por flujo, y manteniendo la densidad bulk y el porcentaje de vacíos dentro de los rangos establecidos por las normativas técnicas vigentes.

B. VERIFICACIÓN DE LA HIPÓTESIS

Hipótesis nula (H_0): la incorporación de agregados de asfalto reciclado no genera cambios significativos ni mejoras en las propiedades físico-mecánicas (estabilidad, flujo, densidad bulk y vacíos de aire) de las mezclas asfálticas en frío.

Contrastación (H_0): los resultados experimentales obtenidos mediante el método Marshall rechazaron directamente la hipótesis nula (H_0). Los ensayos de laboratorio demostraron que al incorporar un contenido óptimo del 6% de asfalto neto de la emulsión asfáltica (donde el 1,14%

proviene del ligante recuperado del RAP), la mezcla experimenta variaciones medibles en toda su estructura volumétrica y mecánica. Este comportamiento contradice la afirmación de que el material reciclado no tendría efectos de diseño, ya que la rigidez del asfalto envejecido y la porosidad de las partículas alteraron de forma consistente los valores de respuesta frente a la mezcla convencional, validando que el RAP si ejerce influencia real en el comportamiento total del bloque compactado.

Evidencia de (H_1): la comprobación experimental determinó la aceptación y cumplimiento de la hipótesis de investigación (H_1) casi en su totalidad, validando el modelo propuesto con una ligera precisión en la sección volumétrica.

La hipótesis se cumplió de forma controlada; los resultados evidenciaron un comportamiento altamente favorable frente a las solicitaciones de carga, alcanzando una estabilidad de 2375 lb y un flujo de 13,50 centésimas de pulgada. Ambos parámetros se encuentran dentro de los rangos estipulados por la normativa del MOP, una estabilidad mínima de 1800 lb y un flujo de 8 a 16 (1/100"), garantizando la resistencia estructural y la adecuada flexibilidad del pavimento diseñado.

Con respecto a la densidad bulk, esta se mantuvo estable con una variación marginal de apenas 0,18% frente al diseño convencional. El único parámetro que experimentó una desviación respecto a los límites estrictos de referencia de laboratorio (3 a 5%) fue el porcentaje de vacíos con aire, el cual se situó en 7,3%. Esta variación se atribuye a la textura rugosa y porosidad del RAP que absorbe ligante y atrapa humedad. Pese a no cumplir el rango estricto, el diseño se considera técnicamente viable y aplicable en el área vial, bajo la condición de que este porcentaje de vacíos se reduzca y densifique durante la construcción en campo mediante un proceso de compactación más eficiente.

CAPÍTULO IV.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

I. CONCLUSIONES

- Los resultados de la caracterización de los agregados vírgenes y del asfalto AC-20 certificaron su idoneidad para la infraestructura vial al superar los mínimos normativos establecidos. En particular, el ligante cumplió con los parámetros para un asfalto de penetración 60-70 y una óptima gravedad específica, mientras que los agregados registraron una pérdida por abrasión de Los Ángeles de 27,93%, lo que garantiza la dureza y resistencia al desgaste necesarias dentro de la estructura del pavimento.

- El análisis realizado confirma que la emulsión asfáltica catiónica de rotura lenta CSS-1h cumple con las especificaciones técnicas requeridas, al presentar un porcentaje de residuo de asfalto del 61,20%, superior al límite mínimo del 57%. Este resultado no solo garantiza la calidad del ligante, sino que también fundamenta la composición precisa de la emulsión, estableciendo un equilibrio entre el asfalto neto y la fase acuosa. Además, la determinación de la gravedad específica en 1,0004 g/cm^3 dentro del rango estipulado, fue clave para ajustar correctamente la dosificación durante el diseño de la mezcla en frío.

- El pavimento asfáltico recuperado evidenció un contenido promedio de asfalto residual del 5,69% y una absorción de 2,148%. Parámetros que respaldaron la incorporación del 20% de RAP en la mezcla en frío. Este porcentaje aportó aproximadamente 1,14% de ligante envejecido al diseño, permitiendo reducir la cantidad de emulsión asfáltica requerida y optimizar el consumo de materiales. Además, el análisis granulométrico demostró una adecuada distribución de partículas, cumpliendo con la faja de especificaciones establecida por la normativa vigente.

- Mediante la aplicación de la metodología Marshall, se determinó que el contenido óptimo de asfalto neto de la emulsión asfáltica CSS-1h para el diseño de la mezcla en frío es del 6,0%, equivalente al 9,84% de emulsión, aplicable para el diseño convencional como para el reciclado. En la alternativa con 20% de RAP, al estar el 1,14% del ligante ya preexistente en el material recuperado, únicamente se requirió la adición complementaria de un 4,86%

de asfalto neto (8,70% de emulsión asfáltica). Esta reducción del porcentaje de ligante no solo garantiza efectividad del diseño, sino también representa un ahorro económico directo.

- La incorporación del 20% de agregados reciclados en la mezcla asfáltica en frío generó una estabilidad Marshall de 2375 lb, valor inferior a las 2970 lb obtenidas en la mezcla convencional, sin embargo, ambas superaron el mínimo normativo de 1800 lb exigido para pavimentos de tráfico pesado. De igual manera, el flujo de la mezcla con RAP fue de 13,50 (1/100"), ligeramente menor que el registrado en la mezcla convencional de 14,0 (1/100"), manteniéndose dentro del rango especificado por la normativa. Estos resultados demuestran que la incorporación de RAP permite conservar un comportamiento mecánico adecuado y una capacidad de deformación compatible con las exigencias técnicas.

- Finalmente, se concluyó que el comportamiento volumétrico de la mezcla con RAP mantuvo un VMA estable de 18,05% y una densidad bulk compatible de 2,186 g/cm^3, aunque redujo el VFA al 58% e incrementó los vacíos de aire al 7,30% (superando el límite del MOP). Esta condición de vacíos expone al diseño a posibles asentamientos por consolidación, por lo que se determina que la alternativa es técnicamente factible y recomendable para niveles de tráfico mediano.

II. RECOMENDACIONES

- Se sugiere determinar de manera precisa el contenido de asfalto residual y la granulometría del material reciclado antes de su incorporación, ya que estos parámetros influyen directamente en la dosificación de la emulsión asfáltica y en el comportamiento mecánico y volumétrico de la mezcla.

- Es recomendable optimizar la energía y procedimiento de compactación tanto en laboratorio como en campo, con la finalidad de reducir el contenido de vacíos y mejorar la densificación de las mezclas que incorporan material reciclado.

- Resultará importante estandarizar los tiempo y condiciones de curado de las mezclas elaboradas con emulsión asfáltica CSS-1h, asegurando la adecuada evaporación del agua y el correcto desarrollo de la cohesión interna del ligante antes de la compactación y puesta en servicio.

- Se propone complementar los estudios de laboratorio mediante ensayos de desempeño relacionados con la resistencia a la humedad, fatiga, deformación permanente y durabilidad, permitiendo evaluar el comportamiento de las mezclas asfálticas recicladas bajo condiciones reales de servicio.

- Se sugiere evaluar la aplicación de tratamientos superficiales o capas de sellado sobre las mezclas asfálticas en frío que incorporen RAP, con el propósito de reducir la permeabilidad, limitar la infiltración de agua y proteger la capa de rodadura frente a la acción de los agentes climáticos, contribuyendo así a incrementar la vida útil del pavimento.

- Finalmente, se recomienda ejecutar tramos experimentales en campo y realizar análisis económicos detallados que incluyan costos de producción, transporte y procesamiento del RAP, con el fin de validar técnica y económicamente la aplicación de mezclas asfálticas en frío recicladas en proyectos viales a escala real.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] R. Tórres, P. Flores, M. Flores, V. Flores y K. Mairon, “Mezclas asfálticas con materiales reciclados de construcción y demolición para la reparación de pavimentos,” Revista de Aplicaciones de la Ingeniería, vol. 1, no. 1, pp. 1-7, Dic. 2014.

[2] Ministerio de Obras Públicas, “Normas de diseño de carreteras,” MOP, Ecuador, Rep. MOP-001-F-2002, 2002.

[3] M. Jiménez, D. Sibaja y D. Molina, “Mezclas asfálticas en frío en Costa Rica, conceptos, ensayos y especificaciones,” Infraestructura Vial, no. 21, pp. 18-28, Feb. 2009.

[4] M. R. Guevara, H. A. Méndez y J. C. Pimentel, “Diseño de mezclas asfálticas densas en frío basado en el método Marshall modificado de la Universidad de Illinois,” Tesis de grado, Facultad de Ing. y Arq., Univ. de El Salvador, San Salvador, El Salvador, 2013.

[5] Federal Highway Administration, “Reclaimed asphalt pavement in asphalt mixtures: State of the practice,” FHWA, Washington D.C., Estados Unidos, Rep. FHWA-HIF-11-021, 2011, pp. 1–44.

[6] Asphalt Institute, “Asphalt cold mix manual,” Manual Series No. 14 (MS-14), 3.ª ed., Lexington, KY, Estados Unidos, 1997.

[7] R. Rodríguez, V. Castaño y M. Martínez, Emulsiones asfálticas, Sanfandila, México: Instituto Mexicano del Transporte, 2001.

[8] E. G. Quimbita, “Diseño de mezclas asfálticas en frío con incorporación de caucho vulcanizado triturado mediante el método Marshall,” Tesis de grado, Fac. Ing. Civil y Mecánica, Univ. Técnica de Ambato, Ambato, Ecuador, 2023.

[9] C. Belmar, “Diseño de mezclas asfálticas en frío con pavimento asfáltico reciclado para caminos de bajo volumen de tránsito,” Tesis de grado, Dept. Ing. Civil, Univ. Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile, 2017.

[10] J. M. Ushiña, “Diseño de adoquines con mezcla asfáltica en frío utilizando agregados reciclados y no reciclados,” Trabajo de titulación, Fac. Ing. Civil y Mecánica, Univ. Técnica de Ambato, Ambato, Ecuador, 2020.

[11] G. Thenoux, A. González y R. Dowling, “Energy consumption comparison for asphalt mixtures,” Constr. Build. Mater., vol. 21, no. 7, pp. 1444–1450, Jul. 2007.

[12] J. Múnera, “Evaluación del comportamiento mecánico de mezclas asfálticas en frío con RAP,” Tesis de maestría, Fac. Minas, Univ. Nacional de Colombia, Medellín, Colombia, 2017.

[13] C. Kraemer, J. M. Pardillo, S. Rocci, M. G. Romana, V. Olmos y V. Sánchez, “Ingeniería de Carreteras: Volumen II,” 2.ª ed., McGraw-Hill/Interamericana de España, Madrid, España, 2004.

[14] J. X. Méndez y E. V. Torres, “Diseño de una mezcla asfáltica en frío reutilizando material asfáltico fresado (RAP) e incorporando fillers comerciales (cal hidratada / cemento) por vía seca,” Trabajo de titulación, Carrera de Ingeniería Civil, Universidad Central del Ecuador, Quito, Ecuador, 2022.

[15] J. A. Montejo Fonseca, Ingeniería de pavimentos para carreteras. Bogotá, Colombia: Universidad Católica de Colombia, 2002.

[16] Asphalt Institute, *Basic Asphalt Emulsion Manual*, MS-19, Lexington, KY, Estados Unidos, 1993.

[17] Asociación Mexicana del Asfalto (AMAAC), *Reciclado con emulsiones asfálticas*, REA 15/12, Ciudad de México, México, 2012.

[18] EP Petroecuador, “Informe de resultados No. M01-0241-2026: Asfalto AC-20,” Laboratorio de Control de Calidad de Refinería Esmeraldas, Esmeraldas, Ecuador, 2026.

[19] P. J. Hernández Hernández, “Evaluación del comportamiento mecánico de mezclas asfálticas utilizando pavimento reciclado, ligantes hidráulicos y emulsiones asfálticas,”

Tesis de maestría, Dept. Ing. Civil y Agrícola, Univ. Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia, 2014.

[20] C. A. Chamba Zumba y K. M. Quinga Chungandro, "Caracterización de una mezcla asfáltica en frío usando emulsión convencional y una nano modificada con organosilanos de segunda generación," Tesis de grado, Carrera de Ing. Civil, Univ. Central del Ecuador, Quito, Ecuador, 2022.

[21] Universidad Mayor de San Simón (UMSS), Manual de Diseño de Pavimentos, Facultad de Ciencias y Tecnología, Cochabamba, Bolivia, 2004.

[22] Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN), "Áridos para hormigón. Requisitos," NTE INEN 695, Quito, Ecuador, 2010.

[23] ASTM International, "Método de ensayo normalizado para la extracción cuantitativa de asfalto de mezclas para pavimentos asfálticos," ASTM D2172/D2172M-17, West Conshohocken, PA, Estados Unidos, 2017.

[24] K. L. Aysabucha, "Diseño de adoquines con mezclas asfálticas en caliente utilizando agregados reciclados y no reciclados," Tesis de grado, Fac. Ing. Civil y Mecánica, Univ. Técnica de Ambato, Ambato, Ecuador, 2020.

[25] M. F. Chicaiza Sambonino, "Rehabilitación vial con reciclado y emulsión asfáltica con aplicación en las vías de la ciudad de Quito (Av. Simón Bolívar)," Trabajo de graduación, Carrera de Ing. Civil, Univ. Central del Ecuador, Quito, Ecuador, 2013.

[26] ASTM International, "Método de ensayo normalizado para el análisis granulométrico de agregados finos y gruesos," ASTM C136/C136M-19, West Conshohocken, PA, Estados Unidos, 2019.

[27] Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN), "Áridos. Determinación de la granulometría de los áridos grueso y fino," NTE INEN 696, Quito, Ecuador, 2011.

[28] S. D. Gavilanes, "Evaluación del comportamiento mecánico de mezclas asfálticas en frío con incorporación de caucho reciclado de neumáticos mediante el método marshall,"

Tesis de grado, Fac. Ing. Civil y Mecánica, Univ. Técnica de Ambato, Ambato, Ecuador, 2023.

[29] Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN), "Áridos. Determinación de la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del árido grueso," NTE INEN 857, Quito, Ecuador, 2010.

[30] Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN), "Áridos. Determinación de la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del árido fino," NTE INEN 856, Quito, Ecuador, 2010.

[31] J. L. Altamirano y D. P. Sánchez, "Análisis de asfaltos reciclados vs asfaltos conformados con lana de acero utilizando material asfáltico reciclado de la vía Guadalupe-Patate," Tesis de grado, Fac. Ing. Civil y Mecánica, Univ. Técnica de Ambato, Ambato, Ecuador, 2023.

[32] Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN), "Áridos. Determinación de la masa unitaria (peso volumétrico) y el porcentaje de vacíos," NTE INEN 858, Quito, Ecuador, 2010.

[33] ASTM International, "Método de ensayo normalizado para la determinación de la densidad aparente (peso unitario) y los vacíos en los agregados," ASTM C29/C29M-17, West Conshohocken, PA, Estados Unidos, 2017.

[34] ASTM International, "Método de ensayo normalizado para la resistencia a la degradación de agregados gruesos de tamaño pequeño por abrasión e impacto en la máquina de Los Ángeles," ASTM C131/C131M-20, West Conshohocken, PA, Estados Unidos, 2020.

[35] AASHTO, "Método de ensayo normalizado para el punto de ablandamiento de bitumen (aparato de anillo y bola)," AASHTO T 53, Washington, D.C., Estados Unidos, 2011.

[36] AASHTO, "Método de ensayo normalizado para el punto de inflamación y combustión mediante el vaso abierto de Cleveland," AASHTO T 48, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., Estados Unidos, 2017.

[37] ASTM International, “Standard Test Method for Specific Gravity and Density of Semi-Solid Bituminous Materials (Pycnometer Method),” ASTM D70-03, West Conshohocken, PA, Estados Unidos, 2003.

[38] Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN), “Emulsiones asfálticas. Determinación del residuo por evaporación,” NTE INEN 905:2013, Quito, Ecuador, 2013.

[39] ASTM International, “Standard Test Method for Determining Density of Emulsified Asphalt,” ASTM D6937-16, West Conshohocken, PA, Estados Unidos, 2016.

[40] ASTM International, “Standard Test Method for Marshall Stability and Flow of Asphalt Mixtures,” ASTM D6927-22, West Conshohocken, PA, Estados Unidos, 2022.

[41] ASTM International, “Standard Practice for Preparation of Bituminous Specimens Using Marshall Apparatus,” ASTM D6926-16, West Conshohocken, PA, Estados Unidos, 2016.

[42] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), “Standard Method of Test for Bulk Specific Gravity of Compacted Asphalt Mixtures Using Saturated Surface-Dry Specimens,” AASHTO T 166, Washington, D.C., Estados Unidos, 2022.

[43] ASTM International, “Método de ensayo normalizado para la gravedad específica máxima teórica y densidad de mezclas asfálticas bituminosas,” ASTM D2041/D2041M-19, West Conshohocken, PA, Estados Unidos, 2019.

ANEXOS

ANÁLISIS DE LABORATORIO

1. Ensayos a los agregados reciclados

Anexo 1: Ensayo de extracción del asfalto reciclado

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO **FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA** **CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**			
PROYECTO:	"Evaluación del efecto de los agregados de asfalto reciclado en las propiedades físico-mecánicas de las mezclas asfálticas en frío."		
ENSAYO: MÉTODO PARA DETERMINAR EL CONTENIDO DE LIGANTE ASFÁLTICO EN MEZCLAS DE PAVIMENTACIÓN POR MEDIO DE LA CENTRIFUGA (EXTRACCIÓN).			
Ensayado por:	Cristal Romero	**Norma:**	ASTM D 2172
Revisado por:	Ing. Galo Núñez Aldaz, Mg.	**Ubicación:**	Laboratorio "JEAL Construcciones"
Muestra:	"RAP" Sector: El Placer Cantón: Quero	**Coordenadas:**	9863049.00 ; 769154.00

CONTENIDO DE ASFALTO DEL PAVIMENTO ASFÁLTICO RECUPERADO					
Muestra No.:		**1**	**2**	**3**	**4**
Peso de la mezcla asfáltica antes del lavado (g)	[A]	775,6	790,7	761,8	751,7
Peso de la mezcla asfáltica después del lavado (g)	[B]	724,8	739,9	717,3	711,7
Peso del filtro antes del lavado (g)	[C]	14,0	14,0	14,8	14,2
Peso del filtro después del lavado (g)	[D]	15,1	15,3	15,2	14,8
% de retenido en el filtro (C-D) (g)	[E]	-1,1	-1,3	-0,4	-0,6
Peso del solvente (3,5 g)	[F]	3,5	3,5	3,5	3,5

CÁLCULOS				
Contenido de Asfalto Residual (% C.A.):	6,24	6,15	5,43	4,94
Promedio Contenido de Asfalto Residual (% C.A.):	**5,69**			

Anexo 2: Granulometría de los agregados reciclados - Muestra 1 y 2

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

PROYECTO:	"Evaluación del efecto de los agregados de asfalto reciclado en las propiedades físico-mecánicas de las mezclas asfálticas en frío."

ENSAYO: ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO EN LOS ÁRIDOS

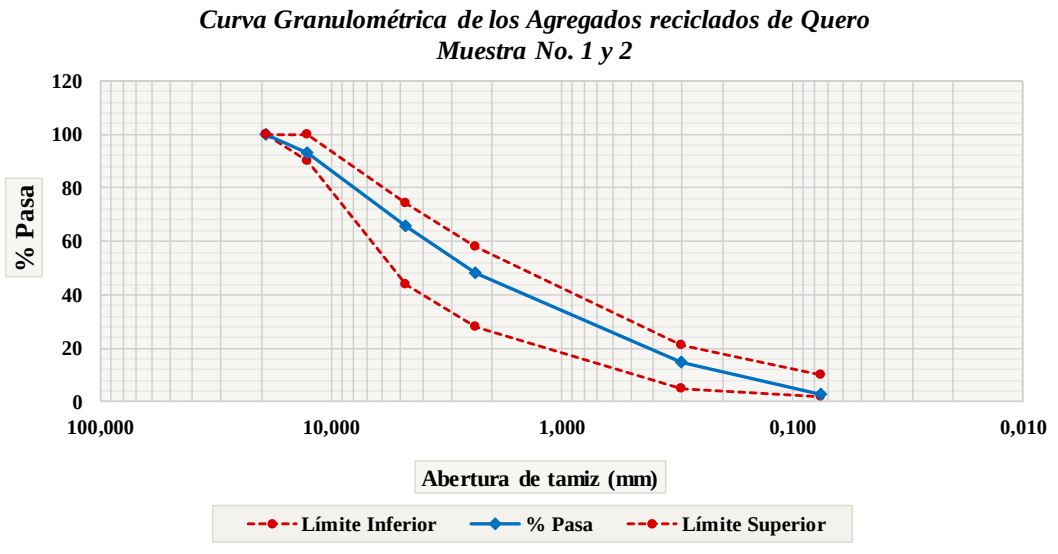
Ensayado por:	Cristal Romero	**Normas:**	ASTM C 136 / INEN 696
Revisado por:	Ing. Galo Núñez Aldaz, Mg.	**Ubicación:**	Laboratorio "JEAL Construcciones"
Muestra:	"RAP" Sector: El Placer Cantón: Quero	**Coordenadas:**	9863049.00 ; 769154.00

GRANULOMETRÍA DEL PAVIMENTO ASFÁLTICO RECUPERADO - MUESTRA 1 Y 2

Tamiz		Peso retenido Parcial	Peso retenido Acumulado	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasa	Límites específicos (% Pasa)	
Descripción	Abertura						Inferior	Superior
[pulg]	[mm]	[g]	[g]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
3/4 in	19,0	0,00	0	0	0	100,0	100	100
1/2 in	12,7	94,40	94,40	6,9	6,9	93,1	90	100
3/8 in	9,5	58,40	152,80	4,3	11,2	88,8	-	-
No. 4	4,75	319,70	472,50	23,3	34,5	65,5	44	74
No. 8	2,36	239,90	712,40	17,5	52,0	48,0	28	58
No. 16	1,18	63,70	776,10	4,7	56,7	43,3	-	-
No. 30	0,60	154,20	930,30	11,3	67,9	32,1	-	-
No. 50	0,300	236,50	1166,80	17,3	85,2	14,8	5	21
No. 100	0,150	101,90	1268,70	7,4	92,6	7,4	-	-
No. 200	0,075	66,20	1334,90	4,8	97,5	2,5	2	10
Pasa No. 200	-	34,90	1369,80	2,5	100,0	0,0	-	-
Total:		1369,80						

Peso total de la muestra:	1369,80	g
Peso de la muestra pasante del tamiz No.200:	34,90	g

Resultado:



Anexo 3: Granulometría de los agregados reciclados - Muestra 3 y 4

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

PROYECTO:	"Evaluación del efecto de los agregados de asfalto reciclado en las propiedades físico-mecánicas de las mezclas asfálticas en frío."

ENSAYO: ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO EN LOS ÁRIDOS

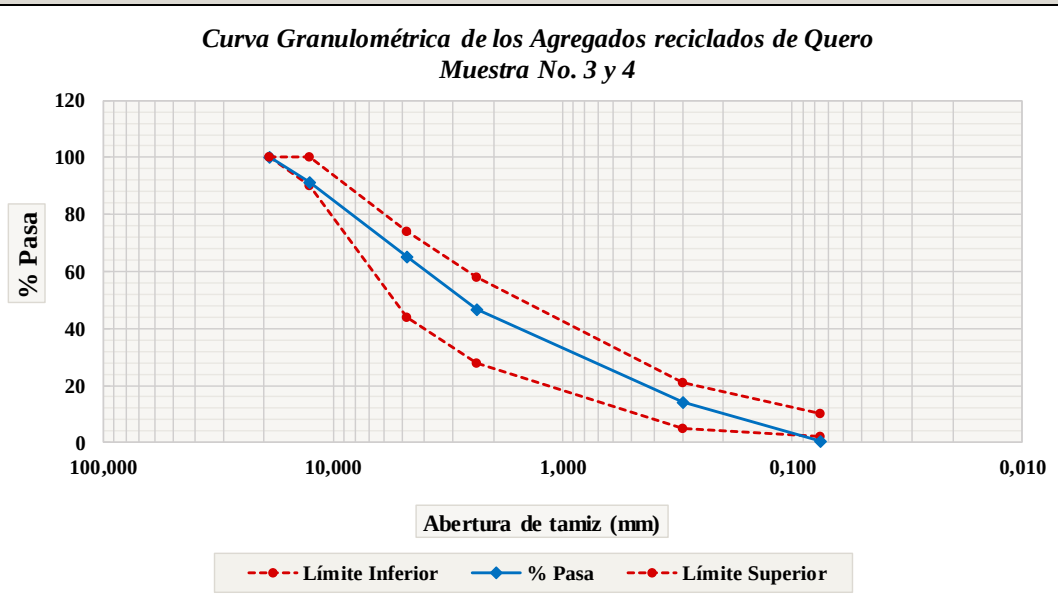
Ensayado por:	Cristal Romero	**Normas:**	ASTM C 136 / INEN 696
Revisado por:	Ing. Galo Núñez Aldaz, Mg.	**Ubicación:**	Laboratorio "JEAL Construcciones"
Muestra:	"RAP" Sector: El Placer Cantón: Quero	**Coordenadas:**	9863049.00 ; 769154.00

GRANULOMETRÍA DEL PAVIMENTO ASFÁLTICO RECUPERADO - MUESTRA 3 Y 4

Tamiz		Peso retenido Parcial	Peso retenido Acumulado	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasa	Límites específicos (% Pasa)	
Descripción	Abertura						Inferior	Superior
[pulg]	[mm]	[g]	[g]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
3/4 in	19,0	0,00	0	0	0	100,0	100	100
1/2 in	12,7	116,40	116,40	8,8	8,8	91,2	90	100
3/8 in	9,5	94,10	210,50	7,1	16,0	84,0	-	-
No. 4	4,75	245,70	456,20	18,6	34,6	65,4	44	74
No. 8	2,36	243,80	700,00	18,5	53,1	46,9	28	58
No. 16	1,18	170,30	870,30	12,9	66,0	34,0	-	-
No. 30	0,60	134,80	1005,10	10,2	76,3	23,7	-	-
No. 50	0,300	127,50	1132,60	9,7	86,0	14,0	5	21
No. 100	0,150	108,00	1240,60	8,2	94,1	5,9	-	-
No. 200	0,075	72,10	1312,70	5,5	99,6	0,4	2	10
Pasa No. 200	-	5,00	1317,70	0,4	100,0	0,0	-	-
Total:		1317,70						

Peso total de la muestra:	1317,70	g
Peso de la muestra pasante del tamiz No.200:	5,00	g

Resultado:



Anexo 4: Gravedad específica y absorción de los agregados reciclados (fracción gruesa)

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO **FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA** **CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**			
PROYECTO:	"Evaluación del efecto de los agregados de asfalto reciclado en las propiedades físico-mecánicas de las mezclas asfálticas en frío."		
ENSAYO: GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN AGREGADO GRUESO			
Ensayado por:	Cristal Romero	**Norma:**	NTE INEN 857 / ASTM C127
Revisado por:	Ing. Galo Núñez Aldaz, Mg.	**Ubicación:**	Laboratorio "JEAL Construcciones"
Muestra:	"RAP" Sector: El Placer Cantón: Quero	**Coordenadas:**	9863049.00 ; 769154.00

GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN DEL MATERIAL RECICLADO			
Datos:			
Muestra No.:		**1**	**2**
Peso seco de la muestra en el aire (g)	[A]	1864,6	1845,2
Peso en estado SSS de la muestra en aire (g)	[B]	1903,9	1885,5
Peso en agua de la muestra saturación (g)	[C]	1194,5	1184,8
Temperatura (ºC)	[D]	24,9	24,8

Cálculos:			
Gravedad específica seca Bulk	**Gsb:**	2,629	2,634
		2,632	
Gravedad específica en SSS Bulk	**Gsssb:**	2,684	2,691
		2,688	
Gravedad específica seca aparante	**Gsa:**	2,783	2,795
		2,789	
Porcentaje de absorción de agua (%)	**%Abs:**	2,11	2,19
		2,148	

Anexo 5: Gravedad específica y absorción de los agregados reciclados (fracción fina)

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO **FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA** **CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**			
PROYECTO:	"Evaluación del efecto de los agregados de asfalto reciclado en las propiedades físico-mecánicas de las mezclas asfálticas en frío."		
ENSAYO: GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN AGREGADO FINO			
Ensayado por:	Cristal Romero	**Norma:**	NTE INEN 856 / ASTM C128
Revisado por:	Ing. Galo Núñez Aldaz, Mg.	**Ubicación:**	Laboratorio "JEAL Construcciones"
Muestra:	"RAP" Sector: El Placer Cantón: Quero	**Coordenadas:**	9863049.00 ; 769154.00

GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN DEL MATERIAL RECICLADO			
Datos:			
Muestra No.:		**1**	**2**
Peso seco de la muestra en el aire (g)	[A]	490,1	444,7
Peso del picnómetro lleno con agua (g)	[B]	1317,3	1325,6
Peso en estado SSS de la muestra en aire (g)	[S]	500,9	454,5
Peso del picnómetro con muestra y agua hasta marca (g)	[C]	1576,8	1558,2

Cálculos:			
Gravedad específica seca Bulk	**Gsb:**	2,031	2,005
		2,018	
Gravedad específica en SSS Bulk	**Gsssb:**	2,075	2,049
		2,062	
Gravedad específica seca aparante	**Gsa:**	2,126	2,097
		2,112	
Porcentaje de absorción de agua (%)	**%Abs:**	2,20	2,20
		2,204	

2. Ensayos a los agregados nuevos o convencionales

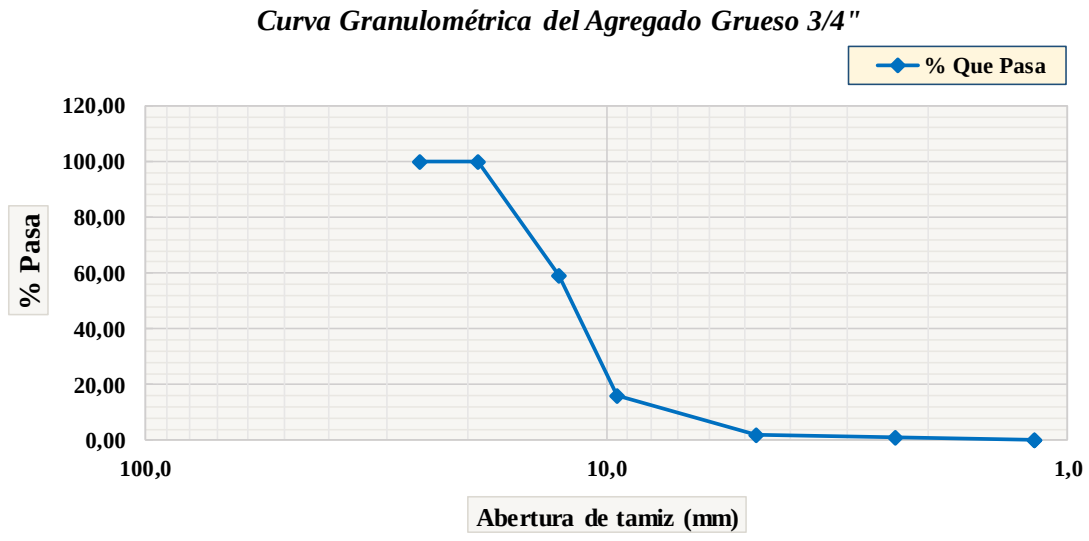
Anexo 6: Granulometría del agregado grueso 3/4"

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO **FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA** **CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**			
PROYECTO:	"Evaluación del efecto de los agregados de asfalto reciclado en las propiedades físico-mecánicas de las mezclas asfálticas en frío."		
ENSAYO: ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO EN LOS ÁRIDOS			
Ensayado por:	Cristal Romero	**Normas:**	ASTM C 136 / INEN 696
Revisado por:	Ing. Galo Núñez Aldaz, Mg.	**Ubicación:**	Laboratorio "JEAL Construcciones"
Muestra:	Agregado 3/4" Mina "Kumochi"	**Coordenadas:**	9863049.00 ; 769154.00

GRANULOMETRÍA AGREGADO GRUESO 3/4"

Tamiz		Peso retenido Parcial	Peso retenido Acumulado	% Retenido Acumulado	% Pasa
Descripción	Abertura				
[pulg]	[mm]	[g]	[g]	[%]	[%]
1 in	25,40	0,0	0,0	0,0	100,00
3/4 in	19,00	0,0	0,0	0,0	100,00
1/2 in	12,70	1945,0	1945,0	40,7	59,29
3/8 in	9,50	2059,0	4004,0	83,8	16,20
No. 4	4,75	685,0	4689,0	98,1	1,86
No. 8	2,36	25,0	4714,0	98,7	1,34
No. 16	1,18	64,0	4778,0	100,0	0,00
No. 30	0,60	0,0	4778,0	100,0	0,00
Fondo					
Total:		4778,00			

Resultado:



Anexo 7: Granulometría del agregado grueso 3/8"

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

PROYECTO:	"Evaluación del efecto de los agregados de asfalto reciclado en las propiedades físico-mecánicas de las mezclas asfálticas en frío."

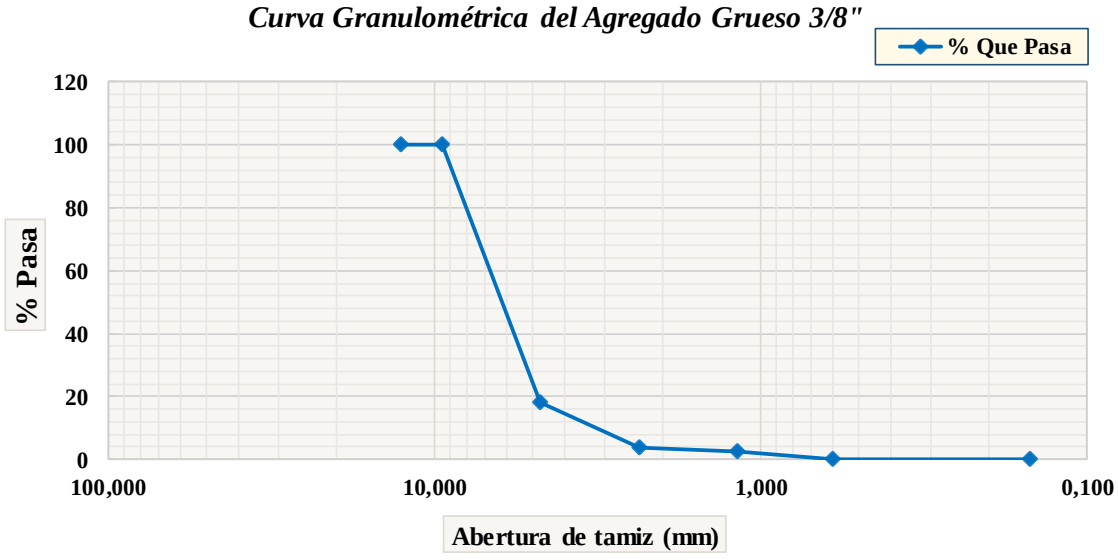
ENSAYO: ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO EN LOS ÁRIDOS

Ensayado por:	Cristal Romero	**Normas:**	ASTM C 136 / INEN 696
Revisado por:	Ing. Galo Núñez Aldaz, Mg.	**Ubicación:**	Laboratorio "JEAL Construcciones"
Muestra:	Agregado 3/8" Mina "Kumochi"	**Coordenadas:**	9863049.00 ; 769154.00

GRANULOMETRÍA AGREGADO GRUESO 3/8"

Tamiz		**Peso retenido Parcial**	**Peso retenido Acumulado**	**% Retenido Acumulado**	**% Pasa**
Descripción	**Abertura**				
[pulg]	**[mm]**	**[g]**	**[g]**	**[%]**	**[%]**
1 in	25,40	0,0	0,0	0,0	100,00
3/4 in	19,00	0,0	0,0	0,0	100,00
1/2 in	12,7	0,0	0,0	0,0	100,00
3/8 in	9,50	5,0	5,0	0,1	99,89
No. 4	4,75	3604,0	3609,0	82,1	17,94
No. 8	2,360	630,0	4239,0	96,4	3,62
No. 16	1,18	44,0	4283,0	97,4	2,61
No. 30	0,60	115,0	4398,0	100,0	0,00
No.100	0,15	0,0	4398,0	100,0	0,00
Fondo					
Total:		4398,00			

Resultado:



Anexo 8: Granulometría del agregado fino - Muestra 1

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

PROYECTO:	"Evaluación del efecto de los agregados de asfalto reciclado en las propiedades físico-mecánicas de las mezclas asfálticas en frío."

ENSAYO: ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO EN LOS ÁRIDOS

Ensayado por:	Cristal Romero	**Normas:**	ASTM C 136 / INEN 696
Revisado por:	Ing. Galo Núñez Aldaz, Mg.	**Ubicación:**	Laboratorio "JEAL Construcciones"
Muestra:	Arena Mina "Kumochi"	**Coordenadas:**	9863049.00 ; 769154.00

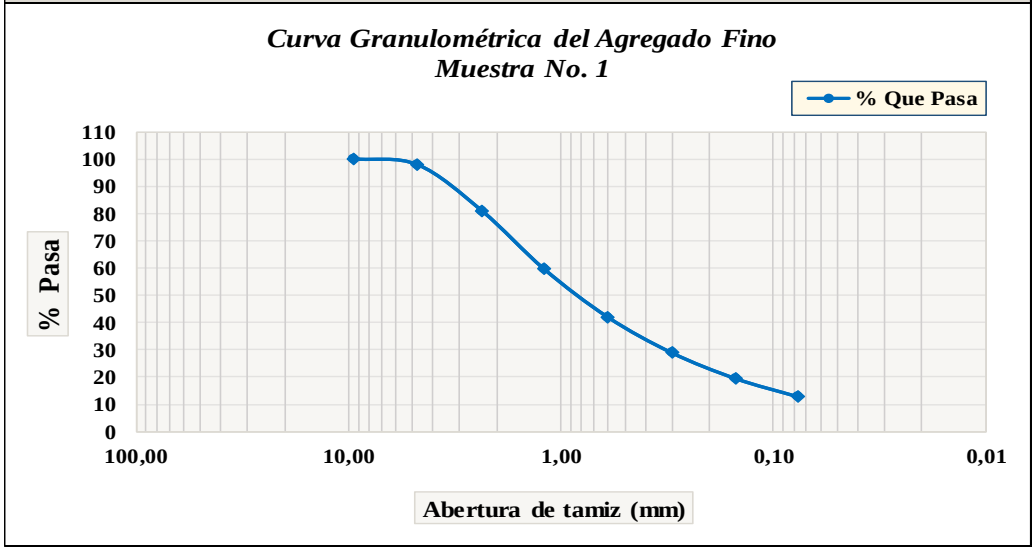
GRANULOMETRÍA AGREGADO FINO - MUESTRA 1

Peso seco inicial:		3662,8 g			
Tamiz		**Peso retenido Parcial**	**Peso retenido Acumulado**	**% Retenido Acumulado**	**% Pasa**
Descripción	**Abertura**				
[pulg]	**[mm]**	**[g]**	**[g]**	**[%]**	**[%]**
3/8 in	9,5	0	0,0	0,00	100,00
No. 4	4,75	77,90	77,90	2,13	97,87
Pasa No. 4	-	3584,9	3584,90	97,87	
No. 8	2,36	86,40	86,4	16,92	80,96
No. 16	1,20	109,20	195,6	38,30	59,58
No. 30	0,60	90,20	285,8	55,96	41,92
No. 50	0,30	66,50	352,3	68,98	28,90
No. 100	0,15	48,30	400,6	78,43	19,44
No. 200	0,08	34,20	434,8	85,13	12,75
Pasa No. 200	-	65,10	65,1	12,75	
Bandeja	-		499,9		
Total:		3662,80			

Módulo de finura (MF):	2,61

Peso antes del lavado (g):	499,90	Peso cuarteo antes del lavado (g):	499,90
Peso después del lavado (g):	434,80	Peso cuarteo después del lavado (g):	434,80
Total - diferencia (g):	3597,70	Diferencia o pasa el tamiz No. 200 (g):	65,10

Resultado:



Anexo 9: Granulometría del agregado fino - Muestra 2

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

PROYECTO:	"Evaluación del efecto de los agregados de asfalto reciclado en las propiedades físico-mecánicas de las mezclas asfálticas en frío."

ENSAYO: ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO EN LOS ÁRIDOS

Ensayado por:	Cristal Romero	**Normas:**	INEN 696 / ASTM C 136
Revisado por:	Ing. Galo Núñez Aldaz, Mg.	**Ubicación:**	Laboratorio "JEAL Construcciones"
Muestra:	Arena Mina "Kumochi"	**Coordenadas:**	9863049.00 ; 769154.00

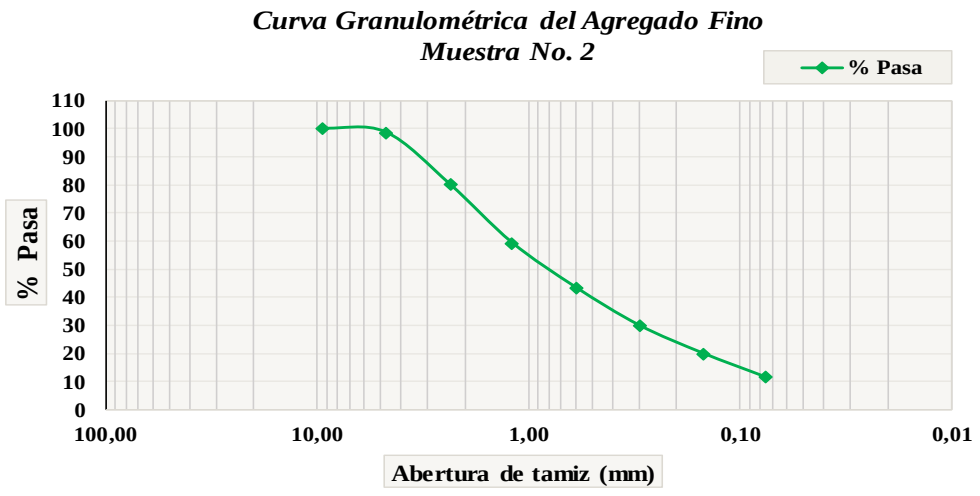
GRANULOMETRÍA AGREGADO FINO - MUESTRA 2

Peso seco inicial:			3604,2 g		
Tamiz		**Peso retenido Parcial**	**Peso retenido Acumulado**	**% Retenido Acumulado**	**% Pasa**
Descripción	**Abertura**				
[pulg]	**[mm]**	**[g]**	**[g]**	**[%]**	**[%]**
3/8 in	9,5	0	0,0	0,00	100,00
No. 4	4,75	48,70	48,70	1,35	98,65
Pasa No. 4	-	3555,5	3555,50	98,65	
No. 8	2,36	85,10	85,1	18,52	80,13
No. 16	1,20	95,50	180,6	39,30	59,35
No. 30	0,60	73,00	253,6	55,19	43,46
No. 50	0,30	62,30	315,9	68,75	29,90
No. 100	0,15	45,70	361,6	78,69	19,96
No. 200	0,08	38,80	400,4	87,14	11,51
Pasa No. 200	-	52,90	52,9	11,51	
Bandeja	-		453,3		
Total:		3604,20			

Módulo de finura (MF):	2,62

Peso antes del lavado:	453,30	Peso cuarteo antes del lavado:	453,30
Peso después del lavado:	400,4	Peso cuarteo después del lavado:	400,4
Total - diferencia	3551,30	Diferencia o pasa el tamiz No. 200:	52,9

Resultado:



Anexo 10: Gravedad específica y absorción del agregado grueso 3/4"

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO **FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA** **CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**			
PROYECTO:	"Evaluación del efecto de los agregados de asfalto reciclado en las propiedades físico-mecánicas de las mezclas asfálticas en frío."		
ENSAYO: GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN AGREGADO GRUESO			
Ensayado por:	Cristal Romero	**Norma:**	NTE INEN 857 / ASTM C127
Revisado por:	Ing. Galo Núñez Aldaz, Mg.	**Ubicación:**	Laboratorio "JEAL Construcciones"
Muestra:	Agregado 3/4" Mina "Kumochi"	**Coordenadas:**	9863049.00 ; 769154.00

GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN AGREGADO GRUESO 3/4"			
Datos:			
Muestra No.:		**1**	**2**
Peso seco de la muestra en el aire (g)	[A]	2680,3	2405,6
Peso en estado SSS de la muestra en aire (g)	[B]	2746,0	2466,0
Peso en agua de la muestra saturación (g)	[C]	1693,0	1518,0
Temperatura (ºC)	[D]	24,9	25,0

Cálculos:			
Gravedad específica seca Bulk	**Gsb:**	2,546	2,538
		2,542	
Gravedad específica en SSS Bulk	**Gsssb:**	2,608	2,602
		2,605	
Gravedad específica seca aparante	**Gsa:**	2,715	2,711
		2,713	
Porcentaje de absorción de agua (%)	**%Abs:**	2,46	2,52
		2,490	

Anexo 11: Gravedad específica y absorción del agregado grueso 3/8"

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL			
PROYECTO:	"Evaluación del efecto de los agregados de asfalto reciclado en las propiedades físico-mecánicas de las mezclas asfálticas en frío."		
ENSAYO: GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN AGREGADO GRUESO			
Ensayado por:	Cristal Romero	**Norma:**	NTE INEN 857 / ASTM C127
Revisado por:	Ing. Galo Núñez Aldaz, Mg.	**Ubicación:**	Laboratorio "JEAL Construcciones"
Muestra:	Agregado 3/8" Mina "Kumochi"	**Coordenadas:**	9863049.00 ; 769154.00

GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN AGREGADO GRUESO 3/8"			
Datos:			
Muestra No.:		**1**	**2**
Peso seco de la muestra en el aire (g)	[A]	2290,8	2090,0
Peso en estado SSS de la muestra en aire (g)	[B]	2356,8	2153,9
Peso en agua de la muestra saturación (g)	[C]	1454,7	1328,3
Temperatura (ºC)	[D]	25,0	24,7

Cálculos:			
Gravedad específica seca Bulk	**Gsb:**	2,540	2,532
		2,536	
Gravedad específica en SSS Bulk	**Gsssb:**	2,613	2,609
		2,611	
Gravedad específica seca aparante	**Gsa:**	2,740	2,744
		2,742	
Porcentaje de absorción de agua (%)	**%Abs:**	2,88	3,06
		2,970	

Anexo 12: Gravedad específica y absorción del agregado grueso fino

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO **FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA** **CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**			
PROYECTO:	"Evaluación del efecto de los agregados de asfalto reciclado en las propiedades físico-mecánicas de las mezclas asfálticas en frío."		
ENSAYO: GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN AGREGADO FINO			
Ensayado por:	Cristal Romero	**Norma:**	NTE INEN 856 / ASTM C128
Revisado por:	Ing. Galo Núñez Aldaz, Mg.	**Ubicación:**	Laboratorio "JEAL Construcciones"
Muestra:	Arena triturada Mina "Kumochi"	**Coordenadas:**	9863049.00 ; 769154.00

GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN AGREGADO FINO			
Datos:			
Muestra No.:		**1**	**2**
Peso seco de la muestra en el aire (g)	[A]	491,2	493,5
Peso del picnómetro lleno con agua (g)	[B]	652,4	654,1
Peso en estado SSS de la muestra en aire (g)	[S]	502,1	504,3
Peso del picnómetro con muestra y agua hasta marca (g)	[C]	958,1	961,2

Cálculos:			
Gravedad específica seca Bulk	**Gsb:**	2,502	2,503
		2,503	
Gravedad específica en SSS Bulk	**Gsssb:**	2,557	2,558
		2,558	
Gravedad específica seca aparante	**Gsa:**	2,648	2,648
		2,648	
Porcentaje de absorción de agua (%)	**%Abs:**	2,22	2,19
		2,205	

Anexo 13: Masa unitaria del agregado grueso 3/4"

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL			
PROYECTO:	"Evaluación del efecto de los agregados de asfalto reciclado en las propiedades físico-mecánicas de las mezclas asfálticas en frío."		
ENSAYO: MASA UNITARIA (PESO VOLUMÉTRICO) DE LOS AGREGADOS			
Ensayado por:	Cristal Romero	**Norma:**	NTE INEN 858 / ASTM C29
Revisado por:	Ing. Galo Núñez Aldaz, Mg.	**Ubicación:**	Laboratorio "JEAL Construcciones"
Muestra:	Grava triturada 3/4" Mina "Kumochi"	**Coordenadas:**	9863049.00 ; 769154.00

MASA UNITARIA (PESO VOLUMÉTRICO) DEL AGREGADO GRUESO 3/4"				
Tamaño máximo:		19 mm		
Muestra No.:		**1**	**2**	**3**
Volumen del recipiente (cm3)	[V]	5,301		
Masa del recipiente vacío (g)	[T]	7,629		
Masa agregado suelto + recipiente (g)	[Msr]	14,651	14,880	14,869

Cálculos:				
Masa agregado suelto: Msr - T (g)	[Ms]	7,022	7,251	7,240
Masa unitaria (g/cm3)	[Mus]	1,325	1,368	1,366
Promedio Masa unitaria:		**1,353**		**g/cm3**

Anexo 14: Masa unitaria del agregado grueso 3/8"

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL			
PROYECTO:	"Evaluación del efecto de los agregados de asfalto reciclado en las propiedades físico-mecánicas de las mezclas asfálticas en frío."		
ENSAYO: MASA UNITARIA (PESO VOLUMÉTRICO) DE LOS AGREGADOS			
Ensayado por:	Cristal Romero	**Norma:**	NTE INEN 858 / ASTM C29
Revisado por:	Ing. Galo Núñez Aldaz, Mg.	**Ubicación:**	Laboratorio "JEAL Construcciones"
Muestra:	Grava triturada 3/8" Mina "Kumochi"	**Coordenadas:**	9863049.00 ; 769154.00

MASA UNITARIA (PESO VOLUMÉTRICO) DEL AGREGADO GRUESO 3/8"				
Tamaño máximo:		9,5 mm		
Muestra No.:		**1**	**2**	**3**
Volumen del recipiente (cm3)	[V]	5,301		
Masa del recipiente vacío (g)	[T]	7,629		
Masa agregado suelto + recipiente (g)	[Msr]	14,406	14,356	14,432

Cálculos:				
Masa agregado suelto: Msr - T (g)	[Ms]	6,777	6,727	6,803
Masa unitaria (g/cm3)	[Mus]	1,279	1,270	1,284
Promedio Masa unitaria:		**1,278**		**g/cm3**

Anexo 15: Masa unitaria del agregado fino

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL			
PROYECTO:	"Evaluación del efecto de los agregados de asfalto reciclado en las propiedades físico-mecánicas de las mezclas asfálticas en frío."		
ENSAYO: MASA UNITARIA (PESO VOLUMÉTRICO) DE LOS AGREGADOS			
Ensayado por:	Cristal Romero	**Norma:**	NTE INEN 858 / ASTM C29
Revisado por:	Ing. Galo Núñez Aldaz, Mg.	**Ubicación:**	Laboratorio "JEAL Construcciones"
Muestra:	Arena triturada Mina "Kumochi"	**Coordenadas:**	9863049.00 ; 769154.00

MASA UNITARIA (PESO VOLUMÉTRICO) DEL AGREGADO FINO				
Muestra No.:		**1**	**2**	**3**
Volumen del recipiente (cm3)	[V]	2,124		
Masa del recipiente vacío (g)	[T]	5,004		
Masa agregado suelto + recipiente (g)	[Msr]	7,699	7,625	7,696

Cálculos:				
Masa agregado suelto: Msr - T (g)	[Ms]	2,695	2,621	2,692
Masa unitaria (g/cm3)	[Mus]	1,269	1,234	1,268
Promedio Masa unitaria:		**1,257**		**g/cm3**

Anexo 16: Ensayo de abrasión del agregado grueso

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL			
PROYECTO:	"Evaluación del efecto de los agregados de asfalto reciclado en las propiedades físico-mecánicas de las mezclas asfálticas en frío."		
ENSAYO: DETERMINACIÓN DEL VALOR DE LA DEGRADACIÓN DEL ÁRIDO GRUESO DE PARTÍCULAS MENORES A 37,5mm MEDIANTE EL USO DE LA MÁQUINA DE LOS ÁNGELES.			
Ensayado por:	Cristal Romero	**Normas:**	ASTM C131 / NTE INEN 860
Revisado por:	Ing. Galo Núñez Aldaz, Mg.	**Ubicación:**	Laboratorios FICM
Muestra:	Agregado grueso Mina "Kumochi"	**Coordenadas:**	9831479.00 ; 833697.00

ENSAYO DE ABRASIÓN MEDIANTE LA MÁQUINA DE LOS ÁNGELES									
Tamaño del tamiz (Aberturas cuadradas)		**Masa de los tamaños indicados (g)**							
		Granulometría							
Pasa	**Retenido**	**A**	**A**	**B**	**B**	**C**	**C**	**D**	**D**
37,5 mm (1-1/2")	25,0 mm (1")	**1250 ± 25**							
25,0 mm (1")	19, 0 mm (3/4")	**1250 ± 25**							
19, 0 mm (3/4")	12,5 mm (1/2")	**1250 ± 10**		**2500 ± 10**	2500				
12,5 mm (1/2")	9,5 mm (3/8")	**1250 ± 10**		**2500 ± 10**	2500				
9,5 mm (3/8")	6,3 mm (1/4")					**2500 ± 10**			
6,3 mm (1/4")	4,75 mm (No. 4)					**2500 ± 10**		**5000 ± 10**	
4,75 mm (No. 4)	2,36 mm (No. 8)								
Total (g):		**5000 ± 10**		**5000 ± 10**		**5000 ± 10**		**5000 ± 10**	
No. esferas:		**12**		**11**		**8**		**6**	
Revoluciones:		**500**							

DATOS			
Masa inicial de la muestra de ensayo	[B]	5000	g
Masa de la muestra retenida en el tamiz No. 12 (1,70 mm)	[C]	3603,5	g
Masa de la carga (pesar el conjunto de esferas)		4953,5	g

CÁLCULO			
Porcentaje de Degradación	[%D]	**27,93**	**%**

3. Ensayos al cemento asfáltico AC-20

Anexo 17: Punto de reblandecimiento del cemento asfáltico AC-20

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO **FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA** **CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**			
PROYECTO:	"Evaluación del efecto de los agregados de asfalto reciclado en las propiedades físico-mecánicas de las mezclas asfálticas en frío."		
ENSAYO: PUNTO DE REBLANDECIMIENTO DE MATERIALES BITUMINOSOS (MÉTODO DEL ANILLO Y BOLA)			
Ensayado por: **Revisado por:** **Muestra:**	Cristal Romero Carrera Ing. Galo Núñez Aldaz, Mg. Cemento asfáltico AC-20	**Normas:** **Ubicación:** **Coordenadas:**	AASHTO T 53-74 /ASTM D 36 Laboratorios FICM 9831479.00 ; 833697.00

PUNTO DE REBLANDECIMIENTO DEL CEMENTO ASFÁLTICO AC-20			
Muestra No.:	**Anillo 1**	**Anillo 2**	**Anillo 3**
Cantidad de agua destilada (ml)	600,00	600,00	600,00
Temperatura inicial del agua (ºC)	25,00	25,00	25,00
Lectura Punto de reblandecimiento (ºC)	52,60	53,00	52,80
Lectura Tiempo (min)	5,52	5,61	5,57

CÁLCULOS	
Promedio Punto de reblandecimiento (ºC):	**52,80 ºC**
Promedio Velocidad (min):	**5,57 min**

Anexo 18: Punto de inflamación y combustión del cemento asfáltico AC-20

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO **FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA** **CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**			
PROYECTO:	"Evaluación del efecto de los agregados de asfalto reciclado en las propiedades físico-mecánicas de las mezclas asfálticas en frío."		
ENSAYO: PUNTO DE INFLAMACIÓN Y COMBUSTIÓN			
Ensayado por:	Cristal Romero	**Normas:**	ASTM T 48-74 / ASTM D 92-66
Revisado por:	Ing. Galo Núñez Aldaz, Mg.	**Ubicación:**	Laboratorios FICM
Muestra:	Cemento asfáltico AC-20	**Coordenadas:**	9831479.00 ; 833697.00

PUNTO DE INFLAMACIÓN Y ENCENDIDO DEL CEMENTO ASFÁLTICO - MUESTRA 1		
Datos:		
Temperatura que produce una llama (Punto de Inflamación)	272	ºC
Temperatura de encendido del ensayo	268	ºC
Presión barométrica del ambiente	573,28	mm Hg
	76,431	Kpa

Cálculos:			
Punto de Inflamación Corregido	C + 0,25 (101,3 Kpa -K)	278,22	ºC
	C + 0,033 (760 mmHg - P)	278,16	ºC
Punto de Encendido Corregido	C + 0,25 (101,3 Kpa -K)	274,22	ºC
	C + 0,033 (760 mmHg - P)	274,16	ºC

PUNTO DE INFLAMACIÓN Y ENCENDIDO DEL CEMENTO ASFÁLTICO - MUESTRA 2		
Datos:		
Temperatura que produce una llama (Punto de Inflamación)	269	ºC
Temperatura de encendido del ensayo	264	ºC
Presión barométrica del ambiente	573,28	mm Hg
	76,431	Kpa

Cálculos:			
Punto de Inflamación Corregido	C + 0,25 (101,3 Kpa -K)	275,22	ºC
	C + 0,033 (760 mmHg - P)	275,16	ºC
Punto de Encendido Corregido	C + 0,25 (101,3 Kpa -K)	270,22	ºC
	C + 0,033 (760 mmHg - P)	270,16	ºC

Promedio Punto de Inflamación	**276,66**	**ºC**
Promedio Punto de Encendido	**272,16**	**ºC**

Anexo 19: Gravedad específica del cemento asfáltico AC-20

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL			
PROYECTO:	"Evaluación del efecto de los agregados de asfalto reciclado en las propiedades físico-mecánicas de las mezclas asfálticas en frío."		
ENSAYO: GRAVEDAD ESPECÍFICA DEL ASFALTO SEMISÓLIDO			
Ensayado por: **Revisado por:** **Muestra:**	Cristal Romero Carrera Ing. Galo Núñez Aldaz, Mg. Cemento asfáltico AC-20	**Normas:** **Ubicación:** **Coordenadas:**	ASTM D 70 / I.N.V.E -707-13 Laboratorios FICM 9831479.00 ; 833697.00

GRAVEDAD ESPECÍFICA DEL CEMENTO ASFÁLTICO AC-20			
Peso del picnómetro + tapón	[A]	41,25	g
Peso del picnómetro lleno con agua	[B]	66,41	g
Peso del picnómetro lleno con cemento asfáltico	[C]	61,74	g
Peso del picnómtro + cemento asfáltico + agua	[D]	66,68	g

CÁLCULO	
Gravedad específica del cemento asfáltico AC-20:	**1,0134**

4. Ensayos a la emulsión asfáltica CSS-1h

Anexo 20: Residuo por evaporación de la emulsión asfáltica CSS-1h

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL			
PROYECTO:	"Evaluación del efecto de los agregados de asfalto reciclado en las propiedades físico-mecánicas de las mezclas asfálticas en frío."		
ENSAYO: RESIDUO POR EVAPORACIÓN EN EMULSIONES ASFÁLTICAS			
Ensayado por: **Revisado por:** **Muestra:**	Cristal Romero Ing. Galo Núñez Aldaz, Mg. Emulsión Asfáltica CSS - 1h	**Normas:** **Ubicación:** **Coordenadas:**	NTE INEN 905 / ASTM 244-29 Laboratorios FICM 9831479.00 ; 833697.00

RESIDUO POR EVAPORACIÓN DE LA EMULSIÓN ASFÁLTICA				
Muestra No.:		**1**	**2**	**3**
Peso de la muestra inicial (g)	[A]	50	50	50
Recipiente vacío + varilla (g)	[B]	56,3	63,3	55,7
Recipiente vacío + varilla + emulsión (antes del horno) (g)	[C]	106,3	113,3	105,7
Recipiente vacío + varilla + emulsión (después del horno) (g)	[D]	86,9	93,9	86,3

CÁLCULOS			
Porcentaje de residuo por evaporación (%):	61,20	61,20	61,20
Promedio Porcentaje de Residuo por Evaporación (%):	**61,20**		

Anexo 21: Gravedad específica de la emulsión asfáltica CSS-1h

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL			
PROYECTO:	"Evaluación del efecto de los agregados de asfalto reciclado en las propiedades físico-mecánicas de las mezclas asfálticas en frío."		
ENSAYO: GRAVEDAD ESPECÍFICA DE LA EMULSIÓN ASFÁLTICA			
Ensayado por: **Revisado por:** **Muestra:**	Cristal Romero Carrera Ing. Galo Núñez Aldaz, Mg. Emulsión Asfáltica CSS - 1h	**Normas:** **Ubicación:** **Coordenadas:**	ASTM D 6937 Laboratorios FICM 9831479.00 ; 833697.00

GRAVEDAD ESPECÍFICA DE LA EMULSIÓN ASFÁLTICA CSS-1H			
Peso del picnómetro lleno con emulsión asfáltica	[A]	74,82	g
Peso del picnómetro vacío + tapa	[B]	24,95	g
Volumen calibrado del picnómetro	[V]	50,00	cm3
Densidad del agua a temperatura de 25ºC	[ρ.agua]	0,9971	g/cm3

CÁLCULO	
Gravedad específica de la emulsión asfáltica:	**1,0004**

5. Ensayos de las mezclas con agregados nuevos y reciclados

Anexo 22: Ensayo Rice de la mezcla asfáltica con agregados nuevos

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL			
PROYECTO:	"Evaluación del efecto de los agregados de asfalto reciclado en las propiedades físico-mecánicas de las mezclas asfálticas en frío."		
ENSAYO: MÉTODO RICE / GRAVEDAD ESPECÍFICA MÁXIMA TEÓRICA Y DENSIDAD DE MEZCLAS BITUMINOSAS DE PAVIMENTACIÓN			
Ensayado por: **Revisado por:** **Muestra:**	Cristal Romero Ing. Galo Núñez Aldaz, Mg. Agregados Mina "Kumochi"	**Norma:** **Ubicación:** **Coordenadas:**	ASTM D 2041 Laboratorio "JEAL Construcciones" 9863049.00 ; 769154.00

DETERMINACIÓN RICE (Gmm) DE LA MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO CON AGREGADOS NUEVOS							
% de Asfalto residual		**5.0%**	**5.5%**	**6.0%**	**6.5%**	**7.0%**	**7.5%**
Peso de la muestra (g)	[A]	1191,1	1132,8	1323,8	1263,4	1223,9	1215,0
Peso del recipiente (g)	[B]	2159,2	2159,2	2159,2	2159,2	2159,2	2159,8
Peso muestra + recipiente (g)	[C]=[A]-[B]	3350,3	3292,0	3483,0	3422,6	3383,1	3374,8
Peso del recipiente + agua (g)	[D]	7820,5	7820,5	7820,5	7820,5	7820,5	7820,5
Peso muestra + agua + recipiente (g)	[E]	8501,7	8465,5	8569,7	8533,9	8505,9	8497,2
Temperatura (ºC)	[F]	24,9	25,0	25,0	25,1	25,0	25,0

Gravedad específica teórica máxima (Gmm) (g/cm3):	**2,336**	**2,322**	**2,304**	**2,297**	**2,273**	**2,257**

Anexo 23: Ensayo Rice de la mezcla asfáltica con agregados nuevos y reciclados

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL			
PROYECTO:	"Evaluación del efecto de los agregados de asfalto reciclado en las propiedades físico-mecánicas de las mezclas asfálticas en frío."		
ENSAYO: MÉTODO RICE / GRAVEDAD ESPECÍFICA MÁXIMA TEÓRICA Y DENSIDAD DE MEZCLAS BITUMINOSAS DE PAVIMENTACIÓN			
Ensayado por:	Cristal Romero	**Norma:**	ASTM D 2041
Revisado por:	Ing. Galo Núñez Aldaz, Mg.	**Ubicación:**	Laboratorio "JEAL Construcciones"
Muestra:	"RAP" Sector: El Placer Cantón: Quero	**Coordenadas:**	9863049.00 ; 769154.00

DETERMINACIÓN RICE (Gmm) DE LA MEZCLA ASFÁLTICA CON AGREGADOS NUEVOS Y RECICLADOS							
% de Asfalto residual		**5.0%**	**5.5%**	**6.0%**	**6.5%**	**7.0%**	**7.5%**
Peso de la muestra (g)	[A]	1091,1	1105,2	1120,4	1135,8	1150,5	1212,0
Peso del recipiente (g)	[B]	2159,2	2159,2	2159,2	2159,2	2159,2	2159,2
Peso muestra + recipiente (g)	[C]=[A]-[B]	3250,3	3264,4	3279,6	3295,0	3309,7	3371,2
Peso del recipiente + agua (g)	[D]	7822,2	7822,2	7822,2	7822,2	7822,2	7822,2
Peso muestra + agua + recipiente (g)	[E]	8457,7	8462,6	8468,1	8473,7	8478,5	8510,6
Temperatura (ºC)	[F]	25,0	25,1	25,1	25,0	24,9	25,0

Gravedad específica teórica máxima (Gmm) (g/cm3):	**2,395**	**2,378**	**2,361**	**2,345**	**2,328**	**2,315**

Anexo 24: Ensayo de extracción de la mezcla asfáltica con agregados nuevos

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL			
PROYECTO:	"Evaluación del efecto de los agregados de asfalto reciclado en las propiedades físico-mecánicas de las mezclas asfálticas en frío."		
ENSAYO: MÉTODO PARA DETERMINAR EL CONTENIDO DE LIGANTE ASFÁLTICO EN MEZCLAS DE PAVIMENTACIÓN POR MEDIO DE LA CENTRIFUGA (EXTRACCIÓN).			
Ensayado por:	Cristal Romero	**Norma:**	ASTM D 2172
Revisado por:	Ing. Galo Núñez Aldaz, Mg.	**Ubicación:**	Laboratorio "JEAL Construcciones"
Muestra:	Agregados Mina "Kumochi"	**Coordenadas:**	9863049.00 ; 769154.00

CONTENIDO DE ASFALTO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO CON MATERIAL CONVENCIONAL							
% de Asfalto residual		**5.0%**	**5.5%**	**6.0%**	**6.5%**	**7.0%**	**7.5%**
Peso de la mezcla asfáltica antes del lavado (g)	[A]	750,1	757,3	763,1	750,3	749,1	752,3
Peso de la mezcla asfáltica después del lavado (g)	[B]	710,8	713,2	714,4	698,7	693,6	692,5
Peso del filtro antes del lavado (g)	[C]	14,0	14,5	14,3	13,9	14,0	14,0
Peso del filtro después del lavado (g)	[D]	14,9	15,2	15,1	14,9	15,2	15,1
% de retenido en el filtro (C-D) (g)	[E]	0,9	0,7	0,8	1,0	1,2	1,1
Peso del solvente (3,5 g)	[F]	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5

CÁLCULOS						
Contenido de Asfalto Residual (% C.A.):	4,7	5,3	5,9	6,3	6,8	7,4

Anexo 25: Ensayo de extracción de la mezcla asfáltica con agregados nuevos y reciclados

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO **FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA** **CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**			
PROYECTO:	"Evaluación del efecto de los agregados de asfalto reciclado en las propiedades físico-mecánicas de las mezclas asfálticas en frío."		
ENSAYO: MÉTODO PARA DETERMINAR EL CONTENIDO DE LIGANTE ASFÁLTICO EN MEZCLAS DE PAVIMENTACIÓN POR MEDIO DE LA CENTRIFUGA (EXTRACCIÓN).			
Ensayado por:	Cristal Romero	**Norma:**	ASTM D 2172
Revisado por:	Ing. Galo Núñez Aldaz, Mg.	**Ubicación:**	Laboratorio "JEAL Construcciones"
Muestra:	Agregados Mina "Kumochi" y "RAP" Quero	**Coordenadas:**	9863049.00 ; 769154.00

CONTENIDO DE ASFALTO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO CON MATERIAL CONVENCIONAL + RAP							
% de Asfalto residual		**5.0%**	**5.5%**	**6.0%**	**6.5%**	**7.0%**	**7.5%**
Peso de la mezcla asfáltica antes del lavado (g)	[A]	765,3	752,8	764,7	751,1	755,3	752,3
Peso de la mezcla asfáltica después del lavado (g)	[B]	721,2	706,1	714,9	697,2	699,1	691,0
Peso del filtro antes del lavado (g)	[C]	13,9	14,3	14,2	14,0	14,3	14,3
Peso del filtro después del lavado (g)	[D]	14,8	15,4	15,2	14,9	15,4	15,5
% de retenido en el filtro (C-D) (g)	[E]	0,9	1,1	1,0	0,9	1,1	1,2
Peso del solvente (3,5 g)	[F]	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5

CÁLCULOS						
Contenido de Asfalto Residual (% C.A.):	5,2	5,6	6,0	6,6	6,9	7,6

6. Ensayos adicionales de los agregados reciclados del Municipio de Ambato (datos no utilizados en la investigación, por descarte del material)

Anexo 26: Ensayo de extracción de asfalto reciclado del Municipio de Ambato

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO **FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA** **CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**			
PROYECTO:	"Evaluación del efecto de los agregados de asfalto reciclado en las propiedades físico-mecánicas de las mezclas asfálticas en frío."		
ENSAYO: MÉTODO PARA DETERMINAR EL CONTENIDO DE LIGANTE ASFÁLTICO EN MEZCLAS DE PAVIMENTACIÓN POR MEDIO DE LA CENTRIFUGA (EXTRACCIÓN).			
Ensayado por:	Cristal Romero	**Norma:**	ASTM D 2172
Revisado por:	Ing. Galo Núñez Aldaz, Mg.	**Ubicación:**	Laboratorios FICM
Muestra:	"RAP" Municipio de Ambato	**Coordenadas:**	9831479.00 ; 833697.00

CONTENIDO DE ASFALTO DEL PAVIMENTO ASFÁLTICO RECUPERADO - GAD AMBATO			
Muestra No.:		**1**	**2**
Peso de la mezcla asfáltica antes del lavado (g)	[A]	750,0	779,8
Peso de la mezcla asfáltica después del lavado (g)	[B]	709,5	734,7
Peso del filtro antes del lavado (g)	[C]	14,5	14,5
Peso del filtro después del lavado (g)	[D]	14,9	15,3
% de retenido en el filtro (C-D) (g)	[E]	0,4	0,8
Peso del solvente (3,5 g)	[F]	3,5	3,5

CÁLCULOS		
Contenido de Asfalto Residual (% C.A.):	4,88	5,23
Promedio Contenido de Asfalto Residual (% C.A.):	5,06	

Anexo 27: Granulometría de los agregados reciclados del Municipio de Ambato

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

PROYECTO:	"Evaluación del efecto de los agregados de asfalto reciclado en las propiedades físico-mecánicas de las mezclas asfálticas en frío."

ENSAYO: ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO EN LOS ÁRIDOS, ANTES DE LA EXTRACCIÓN DE ASFALTO RESIDUAL.

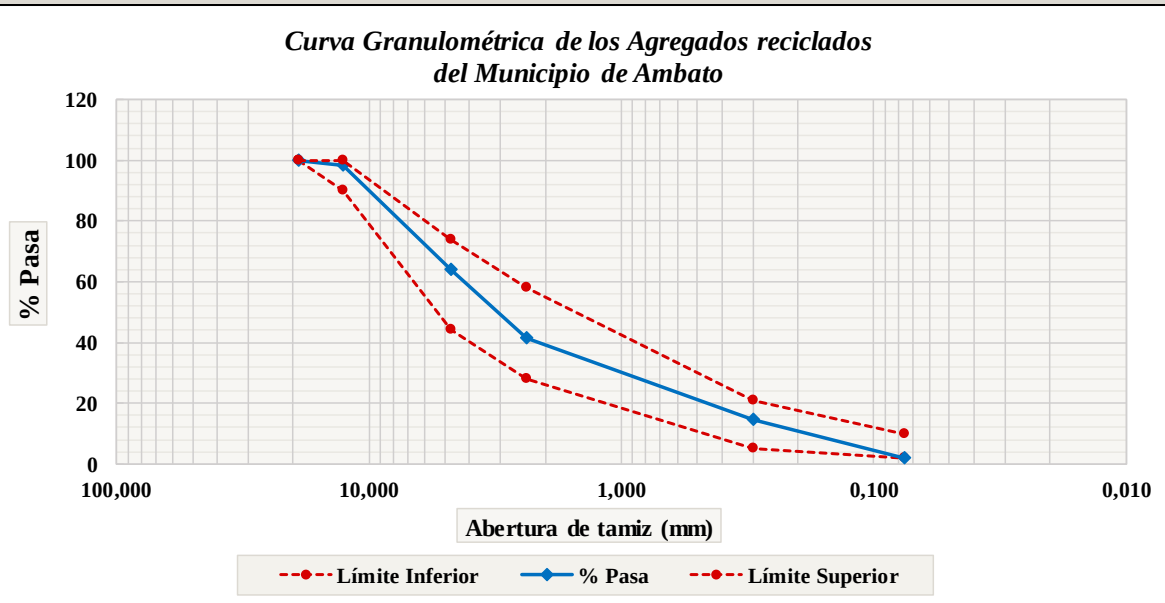
Ensayado por:	Cristal Romero	**Normas:**	INEN 696 / ASTM C 136
Revisado por:	Ing. Galo Núñez Aldaz, Mg.	**Ubicación:**	Laboratorio "JEAL Construcciones"
Muestra:	"RAP" Municipio de Ambato	**Coordenadas:**	9863049.00 ; 769154.00

GRANULOMETRÍA PAVIMENTO ASFÁLTICO RECUPERADO - MUNICIPIO DE AMBATO

Tamiz		Peso retenido Parcial (g)	Peso retenido Acumulado (g)	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasa	Límites específicos (% Pasa)	
Descripción	Abertura (mm)						Inferior	Superior
3/4 in	19,0	0,00	0	0	0	100	100	100
1/2 in	12,7	10,70	10,70	1,5	1,5	98,5	90	100
No. 4	4,75	243,10	253,80	34,6	36,1	63,9	44	74
No. 8	2,36	158,40	412,20	22,6	58,7	41,3	28	58
No. 50	0,300	188,50	600,70	26,8	85,5	14,5	5	21
No. 200	0,075	88,40	689,10	12,6	98,1	1,9	2	10
Pasa No. 200	-	13,10	13,10	1,9	100	0,0		
TOTAL:		702,20						

Peso total de la muestra:	702,20	g
Peso de la muestra pasante del tamiz No.200:	13,10	g

Resultado:



Anexo 28: Factores de corrección de la Estabilidad Marshall

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 1/12	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 9/16	39.7	2.50
329 to 340	1 5/6	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 3/8	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
498 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	68.7	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).

FICHA TÉCNICA DE LOS LIGANTES ASFÁLTICOS

Anexo 29: Ficha técnica del cemento asfáltico AC-20

EP - PETROECUADOR
INFORME DE RESULTADOS

EP PETROECUADOR

Laboratorio de ensayo acreditado por el SAE con ACREDITACIÓN No. SAE LEN 13-002 .

GERENCIA:	GERENCIA DE REFINACION	**REFERENCIA:**	PRO PRO # 04 (2026-02-22)	
ORGANIZACIÓN:	M01_REFINERÍA ESMERALDAS	**PRODUCTO ANALIZADO:**	0280	ASFALTO AC-20
INFORME NO.	M01-0241-2026	**CODIGO MUESTRA:**	ECC-26-0344	

DATOS CLIENTE	
NOMBRE	JEFE DE CONTROL Y PROGRAMACION DE LA PRODUCCION (ING. ALEJANDRO CAMACHO)
DIRECCION	Km 7 1/2 Antigua Via Atacames.
TELEFONO	062994000 (85070_85074)
SOLICITADO POR	ING. VICTOR GARCIA - ESPECIALISTA DE PROGRAMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN

DATOS DE LA MUESTRA			
ORIGEN DE LA MUESTRA	AO-V13		
FECHA DE TOMA DE MUESTRA	2026/02/22	HORA TOMA DE MUESTRA	17:00:00
CANTIDAD DE MUESTRA	1500 ml		
FECHA DE RECEPCION DE MUESTRA	2026/02/22	HORA DE RECEPCIÓN DE MUESTRA	17:45:00
LUGAR TOMA DE MUESTRA	ASFALTOS	PUNTO DE TOMA DE MUESTRA	AFORO DE TANQUE

DATOS DE ANÁLISIS			
TEMPERATURA AMBIENTE	23,7 °C		
HUMEDAD RELATIVA AMBIENTE	71,4 %HR	PRESION BAROMETRICA	100,9 kPa
FECHA DE INICIO DE LOS ENSAYOS	2026/02/22 17:55:00	FECHA FINALIZACION DE LOS ENSAYOS	2026/02/22 22:30:00
FECHA DE EMISION DEL INFORME	2026/02/23		

RESULTADOS

PARÁMETRO	MÉTODO		ESPECIFICACIÓN(1)		RESULTADO	UNIDAD DE MEDIDA	U(2)
	(ASTM_INEN)	INTERNO	MÍN.	MÁX.			
VISCOSIDAD ABSOLUTA 140 °F (60 °C)	ASTM D2171_NTE INEN 810	V03.06.01.03-T-22	160	240	**235,0**	Pa s	±4,3 %
VISCOSIDAD CINEMÁTICA 275 °F (135 °C)	ASTM D2170_NTE INEN 810/1981	V03.06.01.03-T-23	300	-	**413,0**	mm²/s	-
PENETRACIÓN 77 °F (25 °C 100 G. 5s)	ASTM D5_NTE INEN 918	V03.06.01.03-T-20	60	-	**73**	dmm	±4 dmm
PUNTO DE INFLAMACION	ASTM D92_NTE INEN 808	V03.06.01.03-T-21	232	-	**326**	°C	-
SOLUBILIDAD EN TRICLOROETILENO*	ASTM D2042_NTE INEN 915	V03.06.01.03-T-31	99	-	**99,98**	%P	-
RESIDUO DE ENSAYOS DE PELÍCULA FINA EN HORNO ROTATORIO*	N/A	V03.06.01.03-T-30	-	-	**-**	-	-
VISCOSIDAD ABSOLUTA 60°C*	ASTM D2171_NTE INEN 810	V03.06.01.03-T-22	-	800	**669,0**	Pa s	-
DUCTILIDAD 77 °F (25 °C) 5cm/min*	ASTM D113_NTE INEN 916	V03.06.01.03-T-24	50	-	**68,0**	cm	-
GRAVEDAD API A 60 °F (15.6 °C)*	ASTM D1298 _NTE INEN 2319	V03.06.01.03-T-04	REPORTE	REPORTE	**7,0**	°API	-
DENSIDAD RELATIVA (15.6/15.6°C)*	ASTM D1298_NTE INEN 2319	V03.06.01.03-T-04	REPORTE	REPORTE	**1,0217**	-	-
GRAVEDAD ESPECÍFICA 25/25 °C	ASTM 70	V03.06.01.03-T-57	REPORTE	REPORTE	**1,013**	-	±0,002
PUNTO DE ABLANDAMIENTO*	ASTM D36	V03.06.01.03-T-28	-	-	**49,9**	°C	±2,1 °C
INDICE DE PENETRACION*	ASTM D5		-1.5	1	**-0,29**	-	-
CAMBIO DE MASA*	ASTM D2872	V03.06.01.03-T-30	-	1	**-0,23**	%P	-
°API OBSERVADO: 15,359							
TEMPERATURA OBSERVADA: 104,0 °C							
OBSERVACIONES:							

FIRMAS DE RESPONSABILIDAD

Firmado electrónicamente por: EDGAR FABRICIO CAMPOVERDE LASTRA

AUTORIZADO POR: JEFE DE LABORATORIO Y CONTROL DE CALIDAD

NOTAS:
Los datos del cliente, origen, fecha, hora, muestra, parámetro o análisis requerido de la muestra, es información proporcionada por el cliente.
Los resultados de este informe corresponden únicamente a las propiedades de la muestra analizada en el laboratorio.
Los resultados se aplican únicamente a la muestra cómo se recibió.
Sin la aprobación del Especialista y/o Jefe de Control de Calidad, no se deberá reproducir el informe, excepto cuando se reproduce en su totalidad.
Los ensayos marcados con (*) NO están dentro del alcance de la acreditación del SAE.
Los resultados de los ensayos realizados a la muestra son de responsabilidad del Laboratorio RE, excepto si la información es suministrada por el cliente y esta afecte la validez de los resultados; esto se detallará en observaciones.
(1) Referido a la Norma INEN: NTE 2515
(2) La U es estimación multiplicando la u combinada por el factor de cobertura K=2 (95% nivel de confianza).

Dirección Organización: Km 7 1/2 VÍA ATACAMES S/N - teléfono: (593)06 2994000 - extensiones: 85450 - 85455 - 85457 - 85453 - ESMERALDAS-ECUADOR

Página 1 de 1 **Formato: V03.06.01.03-FO-300(V08-2018-08-11)**

Anexo 30: Ficha técnica de la emulsión asfáltica CSS-1h

FICHA TÉCNICA DE PRODUCTO

Emulsión catiónica de rotura lenta, de color café y estado líquido. Su composición es base agua, lo que hace que no sea contaminante, cuenta con aditivos de adherencia.

Uso Principal

- Como riego de liga, sobre superficie de hormigón o asfalto, previo a la colocación de mezclas asfálticas.
- Ligante asfáltico de agregados para realizar mezclas asfálticas en frío.
- Recuperación y reciclado de pavimentos existentes (fatigados).
- Estabilización de bases, estabilización de suelos.
- Sellos asfálticos como Sand seal, Fog Seal, Slurry Seal tipo 1, 2 y 3.
- Imprimante de superficies.
- Riegos de adherencia.
- Se puede usar para relleno o juntas y/o grietas.

Presentación

Líquido bituminoso suministrado al granel y en envases (bajo pedido).

Información Técnica

Propiedad	Norma	Unidad	Especificación	Norma
Residuo por evaporación	ASTM D6934 INEN 905	%	Min. 57	CUMPLE
Viscosidad saybolt-furol a 25°C	ASTM D7496 ASTM D88 UNE 10428 INEN 1981	SFF	20 - 100	CUMPLE
Mezcla con cemento	ASTM D6935 INEN 904	%	0 - 2	CUMPLE
Carga de partícula	ASTM D7402 UNE-EN-1430 INEN 908	-	Positiva	CUMPLE
Estabilidad de almacenamiento 24 horas	ASTM D6930 UNE-EN 12847 INEN 909	%	0 - 1	CUMPLE
Asentamiento 5 días	ASTM D6930 UNE-EN 12847 INEN 910	%	0 - 5	CUMPLE
Prueba del tamiz N°20	ASTM D6933 INEN 906	%	0 - 0.1	CUMPLE
Penetración en el residuo a 25°C	ASTM D5 UNE 104 281 NTE-INEN-918	dmm	40 - 90	CUMPLE
Ductilidad a 25°C	ASTM D113 INEN 916	cm	Min. 40	CUMPLE
Solubilidad en tricloroetileno	ASTM D2042 UNE-EN 12592 INEN 915	%	Min. 97.5	CUMPLE

EMULSIÓN ASFÁLTICA CSS-1h

imptek INNOVACIÓN BIENESTAR

IMPTEK - CHOVA DEL ECUADOR S.A. Vía E 35 Km 14, Sector El Inga, Quito - Ecuador. www.imptekcorp.com

EMULSIÓN ASFÁLTICA CSS-1h

Normas de Referencia

- ASTM-D2397
- UNE 104231
  NTE-INEN-2062 ***Producto con Certificado de Producto INEN***
- Ministerio de Obras Públicas del Ecuador MOP-001-F-2002 (Ecu)

Beneficios

- Fácil aplicación.
- Bajo contenido de volátiles es decir, es ecológico debido a que no contiene solventes.

Almacenaje y manejo en obra

- Para transportar el producto debe tener en cuenta que las cisternas deben contar con rompeolas, así mismo deben estar limpias y libres de desechos.
- No almacenar la emulsión en tanques que contengan residuos de otros productos. Se recomienda usar tanques verticales cerrados con entrada por la parte del fondo para evitar formación de espuma.
- Evitar mantener la emulsión almacenada durante períodos de tiempo prolongados, a temperaturas mayores a 5ºC.
- Evitar la re-circulación excesiva y la agitación brusca.
- Evitar someter la emulsión a ciclos de calentamiento y enfriamiento
- Evitar mezclar emulsiones de diferente tipo, inclusive evite mezclar emulsiones del mismo tipo de diferente fabricante. En caso de ser necesario el mezclado consulte con nuestro departamento técnico para que le brinde información sobre la compatibilidad de las emulsiones.
- En el caso de asentamiento agitar.
- utilizar método indirectos de calentamiento, nunca se debe aplicar llama directa para calentar el producto.

Dmpk _qbc sqmbcj npmbsarm

La emulsión puede ser utilizada para las aplicaciones detalladas en la siguiente tabla:

Propiedad	Cantidad aproximada	Unidad	Observación de aplicación
Mezcla asfáltica con agregado virgen	35 a 40	gal/m3	
Mezcla con materiales reciclados	18 a 23	gal/m3	
Slurry seal	1.8 a 2.0	l/m2	
Sello asfáltico	1.0 a 1.5	l/m2	
Imprimación	1 a 1.5	l/m2	Diluir la emulsión en agua en proporcion de 1:1 a 1:10 Temperatura de aplicación Max. 45°C
Riego de adherencia	0.3 a 0.6	l/m2	

Todos los tratamientos requieren de un diseño de laboratorio previo para determinar la cantidad de emulsión necesaria y definir si la emulsión es idónea para el tipo de suelo de acuerdo a su reactividad.

Seguridad

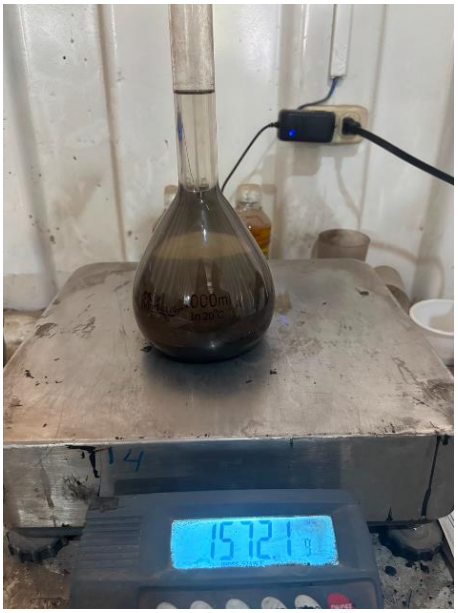
Consultar hoja de Seguridad del producto.

NOTA 1: IMPTEK- CHOVA DEL ECUADOR S.A. se reserva el derecho de modificar o anular algún parámetro sin previo aviso y deniega cualquier responsabilidad en el caso de anomalías producidas por el uso indebido del producto. Esta ficha técnica quedará anulada por revisiones posteriores.
NOTA 3: La garantía de IMPTEK- CHOVA DEL ECUADOR S.A. se limita a la calidad del producto, al ser un material complemento para diferentes sistemas de aplicación en obra, la garantía aplicará única y exclusivamente para sistemas que mantengan un diseño de laboratorio aprobado utilizando la referencia de emulsión descrita en la presente ficha técnica..
En cuanto a la puesta en obra, en la cual no participamos, se deberán cumplir los requisitos de la ejecución especificados en las normas aplicables, tanto en composición como en la instalación de los sistemas aplicables.

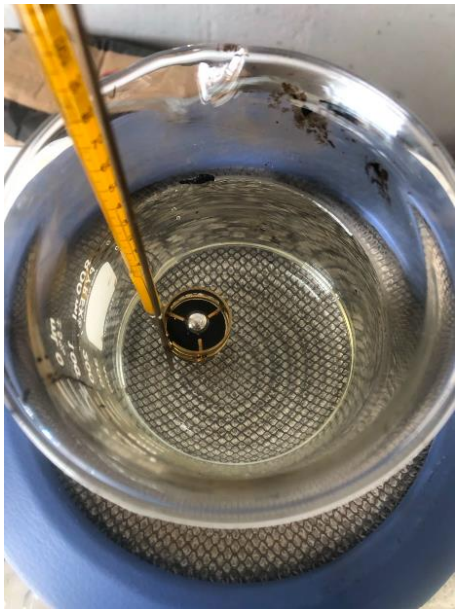
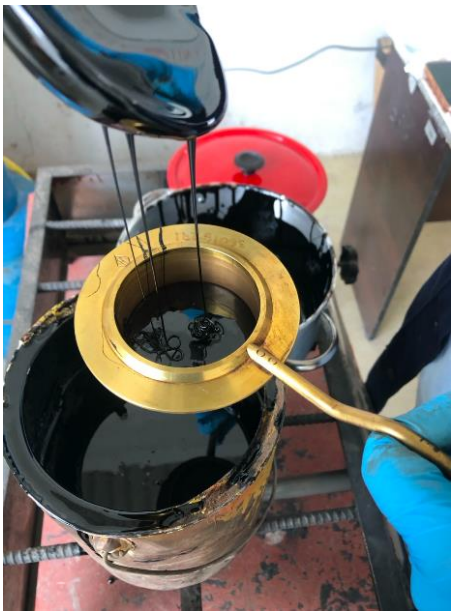
Fecha primera edición: Antes del 2010
Fecha revisión: Enero 2024
Edición: 3

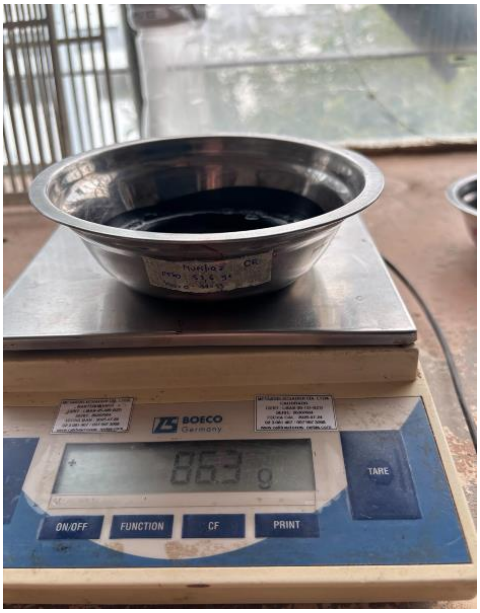
Anexo 31: Anexos fotográficos de los ensayos

Muestreo de los agregados convencionales	
	
Método de extracción del asfalto	
	

<table>
<tr><td colspan="2">Tamizado de los agregados reciclados</td></tr>
<tr><td></td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2">Gravedad específica del agregado fino</td></tr>
<tr><td></td><td></td></tr>
</table>

Ensayo de abrasión por medio de la máquina de Los Ángeles	
	
Masa unitaria de los agregados vírgenes	
	

Punto de reblandecimiento del cemento asfáltico AC-20	
	
Punto de inflamación del cemento asfáltico AC-20	
	

Gravedad específica de la emulsión	Residuo por evaporación de la emulsión
	
Elaboración de briquetas	
	

Compactación de briquetas	
	
Briquetas de la mezcla asfáltica en frío con agregados nuevos	Briquetas de la mezcla asfáltica en frío con agregados nuevos y reciclados
	

Medición del espesor de las briquetas	Densidad bulk
	
Ensayo Marshall	
	

Briquetas ensayadas	
	
Ensayo Rice de la mezcla asfáltica suelta	
	