



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD 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 caliente

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

AUTORA: Camila Monserrath Montesdeoca Chafla

TUTOR: Ing. Rodrigo Iván Acosta Lozada, 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 CALIENTE"**, elaborado por el estudiante Camila Monserrath Montesdeoca Chafla, portador de la cédula de ciudadanía número 1850075621, 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. Rodrigo Iván Acosta Lozada, Mg

C.C.: 1801950880

TUTOR

AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, **Camila Monserrath Montesdeoca Chafra**, con C.C. 1850075621 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 CALIENTE”**, 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



.....
Camila Monserrath Montesdeoca Chafra

C.C. 1850075621

AUTORA

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



.....
Montesdeoca Chafra Camila Monserrath

C.C. 1850075621

AUTORA

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

Los miembros del Tribunal de Grado aprueban el informe del trabajo experimental, realizado por el estudiante **Camila Monserrath Montesdeoca Chafila**, 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 CALIENTE”**, Modalidad Experimental

Ambato, junio 2026

Para constancia firma:

Ing. Diego Sebastián Chérrez Gavilanes, Mg

C.C.1803324894

MIEMBRO CALIFICADOR

Ing. Alex Gustavo López Arboleda, Mg

C.C. 1802919322

MIEMBRO CALIFICADOR

DEDICATORIA

*A **Dios**, por ser mi refugio, mi fe y la fuerza necesaria para avanzar firmes a pesar de cualquier adversidad.*

*A **mis padres**, Robert y Viviana, por ser mi ejemplo constante de fuerza, resiliencia y amor incondicional; por creer en mi sin condiciones y no permitir que me rindiera jamás.
Los amo eternamente.*

*A **mis hermanos**, Bryan, Christopher, Robert y Nathalie, por caminar a mi lado y formar parte esencial de mi vida, brindándome su apoyo incondicional y creer en mi incluso cuando yo misma no lo hacía.*

*Finalmente, dedico este logro a **mí misma** y, con profunda ternura, a mi yo de la infancia. A esa niña que soñó con este futuro. Este logro es por ti, por tus esfuerzos silenciosos, por persistir y no rendirte. Hoy abrazo con orgullo el camino recorrido, convencida de que los sueños se alcanzan cuando se construyen con constancias, fe y amor.*

Camila Monserrath Montesdeoca Chafla.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios, por ser mi guía que iluminó cada paso de este largo camino.

A mis padres, Robert y Viviana, por ser mi motivo principal para seguir adelante. Gracias por no dejarme caer, acompañarme con paciencia en este capítulo de mi vida y amarme sin condiciones. Son mi más grande ejemplo de que todo es posible cuando se trabaja con esfuerzo, disciplina y amor. Este logro es, por y para ustedes.

A mis hermanos, Bryan, Christopher, Robert y Nathalie, por creer en mí y caminar a mi lado. Tenerlos en mi vida es mi mayor logro; su presencia ha sido el impulso en mis momentos más difíciles. Gracias por ser mi soporte eterno.

A mi sobrino Domi, por llenar mis días de alegría y regalarme siempre tu cariño más puro y sincero.

A mi prima Doménica, por ser como una hermana para mí. Gracias por cada momento compartido a lo largo de este trayecto, por tu lealtad incondicional y por creer en mi sin necesidad de pedírtelo.

A mi familia y amigos quienes con sus palabras de aliento me alegraron cada día, por su cariño sincero y creyeron en mi a lo largo de este proceso.

A mi grupo de amigos de la universidad, quienes me recibieron desde el primer día de la carrera. A pesar de cualquier adversidad nos hemos mantenido unidos y agradezco que sigamos compartiendo momentos juntos.

A mis amigos, Cristal, Katherin, Alex y Christian, por su amistad incondicional y por hacer este camino muchísimo más ligero. Agradezco haber coincidido en esta vida con ustedes; gracias por mantenernos unidos y demostrar que nuestra amistad trasciende las aulas para convertirse en un vínculo real. Me llena de felicidad saber que hoy culminamos esta etapa juntos.

A mis docentes, por compartir sus conocimientos, por guiarme en este camino académico, confiar en mis capacidades y formarme como una profesional íntegra.

Al Ing. José Alvarado Lascano y al Ing. Roberto Vintimilla, por su apoyo y apertura de sus instalaciones para el desarrollo y ejecución de esta investigación.

Camila Monserrath Montesdeoca Chafía.

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDO

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 DE FIGURAS	xi
ÍNDICE DE TABLAS	xiv
ÍNDICE DE ANEXOS	xvii
SIGLAS ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS.....	xviii
RESUMEN EJECUTIVO	xix
ABSTRACT	xx
CAPÍTULO I.- MARCO TEÓRICO.....	1
I. JUSTIFICACIÓN.....	1
II. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS	2
III. OBJETIVOS.....	3
A. OBJETIVO GENERAL	3
B. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
CAPÍTULO II.- METODOLOGÍA	5
I. EQUIPOS Y MATERIALES	5
A. FASE I.....	5
B. FASE II.....	7
C. FASE III	7
II. MÉTODOS.....	8
A. FASE I.....	8

1)	Recolección de muestras	9
2)	Caracterización de los Agregados Nuevos y Reciclados	15
3)	Cemento Asfáltico	28
B.	FASE II.....	33
1)	Elaboración de briquetas utilizando agregados nuevos y agregados reciclados 34	
2)	Método Marshall de Diseño de Mezclas (ASTM D6926)	35
C.	FASE III	43
CAPÍTULO III.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN		44
I.	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....	44
A.	FASE I.....	44
1)	Caracterización de los Agregados Nuevos y Reciclados	44
2)	Cemento Asfáltico	53
B.	FASE II.....	53
1)	Método Marshall de Diseño de la Mezcla Convencional (ASTM D6926)..	53
2)	Método Marshall de Diseño de la Mezcla Modificada (ASTM D6926).....	68
C.	FASE III	83
1)	Comparativa del % Va vs % Contenido Óptimo de Cemento Asfáltico	83
2)	Comparativa del Gmb vs % Contenido Óptimo de Cemento Asfáltico	84
3)	Comparativa del VMA vs % Contenido Óptimo de Cemento Asfáltico	85
4)	Comparativa del VFA vs % Contenido Óptimo de Cemento Asfáltico	86
5)	Comparativa de la Estabilidad vs % Contenido Óptimo de Cemento Asfáltico 87	
6)	Comparativa del Flujo vs % Contenido Óptimo de Cemento Asfáltico	88
II.	VERIFICACIÓN DE HIPÓTESIS	88
A.	HIPÓTESIS	88
B.	VERIFICACIÓN DE HIPÓTESIS	89

CAPÍTULO VI.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	90
I. CONCLUSIONES	90
II. RECOMENDACIONES	91
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	92

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1. Ubicación del punto de muestreo del agregado reciclado.	9
Fig. 2. Maquinaria para proceso de fresado de la Vía Jaloa-El Guasmo.	10
Fig. 3. Estado de la vía en el proceso de fresado.	10
Fig. 4. Ubicación del punto de origen del agregado nuevo “Mina Kumochi”.	11
Fig. 5. Ubicación de los puntos de muestreo de los agregados nuevos “JEAL Construcciones”.	12
Fig. 6. Agregado grueso nuevo 3/4" (19.0 mm).	12
Fig. 7. Agregado grueso nuevo 3/8" (9.50 mm)	13
Fig. 8. Agregado fino nuevo "Polvo de piedra".	13
Fig. 9. Recolección de los agregados para los ensayos.	14
Fig. 10. Cemento Asfáltico tipo AC-20.	15
Fig. 11. Peso del agregado reciclado antes del lavado.	16
Fig. 12. Muestra en reposo previa al lavado.	17
Fig. 13. Lavado de la muestra.	17
Fig. 14. Material después del lavado.	18
Fig. 15. Muestra después del lavado seco.	18
Fig. 16. Tamizado de los agregados.	20
Fig. 17. Muestra sumergida en agua.	22
Fig. 18. Colocando el agregado fino al picnómetro.	23
Fig. 19. Picnómetro + material + agua hasta la línea de aforo.	24
Fig. 20. Lavado del material para el ensayo de Abrasión.	26
Fig. 21. Peso del material según las especificaciones de la TABLA VI.	27
Fig. 22. Tamizado del material por el tamiz No. 12 (1.70 mm).	27
Fig. 23. Peso de la muestra seca retenida en el tamiz No. 12 (1.70 mm).	28
Fig. 24. Peso del picnómetro vacío para determinar la gravedad específica del Cemento Asfáltico AC-20.	30

Fig. 25. Peso de la Muestra.	31
Fig. 26. Ensayo de Punto de Ablandamiento.	32
Fig. 27. Temperatura de la mezcla asfáltica	34
Fig. 28. Proceso de compactación de la mezcla asfáltica.....	35
Fig. 29. Briquetas sumergidas en agua a 25 °C.....	38
Fig. 30. Prensa Marshall.....	42
Fig. 31. Curva granulométrica del agregado RAP – Muestra 1-2.....	48
Fig. 32 Curva granulométrica del agregado RAP – Muestra 3-4.....	49
Fig. 33. Curva Granulométrica de la mezcla convencional.	54
Fig. 34. Propiedades mecánicas y volumétricas de la mezcla asfáltica convencional.	58
Fig. 35. Comportamiento de %Va vs %C.A.....	59
Fig. 36. Comportamiento de Gmb vs %C.A	61
Fig. 37. Comportamiento de VMA vs %C.A	62
Fig. 38. Comportamiento de VFA vs %C.A.....	63
Fig. 39. Comportamiento de Estabilidad vs %C.A	64
Fig. 40. Comportamiento de Flujo vs %C.A.....	65
Fig. 41. Criterio %Va para obtener el %Óptimo de Cemento Asfáltico.....	66
Fig. 42. Criterio Gmb para obtener el %Óptimo de Cemento Asfáltico	67
Fig. 43. Criterio de Estabilidad para obtener el %Óptimo de Cemento Asfáltico	67
Fig. 44. Curva Granulométrica de la mezcla modificada.....	69
Fig. 45. Propiedades mecánicas y volumétricas de la mezcla modificada.....	72
Fig. 46. Comportamiento de %Va vs %C.A.....	74
Fig. 47. Comportamiento de Gmb vs %C.A	75
Fig. 48. Comportamiento de VMA vs %C.A	76
Fig. 49. Comportamiento de VFA vs %C.A.....	77
Fig. 50. Comportamiento de Estabilidad vs %C.A	79

Fig. 51. Comportamiento de Flujo vs %C.A.....	80
Fig. 52. Criterio %Va para obtener el %Óptimo de Cemento Asfáltico.....	81
Fig. 53. Criterio Gmb para obtener el %Óptimo de Cemento Asfáltico	82
Fig. 54. Criterio de Estabilidad para obtener el %Óptimo de Cemento Asfáltico	82
Fig. 55. Comparación %Va vs %Óptimo C.A.....	83
Fig. 56. Comparación Gmb vs %Óptimo C.A	84
Fig. 57. Comparación VMA vs %Óptimo C.A	85
Fig. 58. Comparación VFA vs %Óptimo C.A.....	86
Fig. 59. Comparación Estabilidad vs %Óptimo C.A	87
Fig. 60. Comparación Flujo vs %Óptimo C.A.....	88

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA I COORDENADAS UTM DEL PUNTO DE MUESTREO DEL AGREGADO RECICLADO.....	9
TABLA II COORDENADAS UTM DEL PUNTO DE ORIGEN DEL AGREGADO NUEVO	11
TABLA III COORDENADAS UTM DE LOS PUNTOS DE MUESTREO DEL AGREGADO NUEVO.....	12
TABLA IV PESO MÍNIMO DE LAS MUESTRAS PARA EL ENSAYO DE EXTRACCIÓN DE CONTENIDO DE ASFALTO.....	16
TABLA V DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA DE LOS AGREGADOS (MOP-001-F-2002).....	21
TABLA VI. CANTIDAD DE MATERIAL SEGÚN EL MÉTODO PARA EL ENSAYO.....	26
TABLA VII ESPECIFICACIONES PARA CEMENTO ASFÁLTICO POR SU GRADO DE PENETRACIÓN (MOP-001-F-2002).....	29
TABLA VIII ESPECIFICACIONES PARA ENSAYOS DE ACUERDO CON EL METODO MARSHALL (MOP-001-F-2002)	33
TABLA IX VALORES MINIMOS MÉTODO MARSHALL PARA VMA	33
TABLA X PESOS MÍNIMOS DE LAS MUESTRAS PARA ENSAYO RICE	37
TABLA XI RESULTADOS DEL ENSAYO DE EXTRACCIÓN CONTENIDO DE ASFALTO EN LOS AGREGADOS RECICLADOS	44
TABLA XII ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE AGREGADO GRUESO 3/4" NUEVO	45
TABLA XIII ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE AGREGADO GRUESO 3/8" NUEVO	46
TABLA XIV ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE AGREGADO FINO POLVO DE PIEDRA	46
TABLA XV ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO AGREGADOS RECICLADOS – MUESTRA 1-2.....	47
TABLA XVI ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO AGREGADOS RECICLADOS – MUESTRA 3-4.....	49
TABLA XVII RESULTADOS DE LA GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN AGREGADO GRUESO 3/4".....	50

TABLA XVIII RESULTADOS DE LA GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN AGREGADO GRUESO 3/8"	50
TABLA XIX RESULTADOS DE LA GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN AGREGADO FINO POLVO DE PIEDRA	51
TABLA XX RESULTADOS DE LA GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN AGREGADO GRUESO RAP	51
TABLA XXI RESULTADOS DE LA GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN AGREGADO FINO RAP	52
TABLA XXII RESULTADO DEL ENSAYO DE RESISTENCIA AL DESGASTE POR ABRASIÓN	52
TABLA XXIII RESULTADOS DE LAS PROPIEDADES DEL CEMENTO ASFÁLTICO AC-20	53
TABLA XXIV DOSIFICACIÓN PATA MEZCLA CONVENCIONAL	53
TABLA XXV DISEÑO DE LA MEZCLA CONVENCIONAL	54
TABLA XXVI RESULTADOS DEL ENSAYO RICE PARA CADA PORCENTAJE DE CEMENTO ASFÁLTICO	55
TABLA XXVII TABLA MÉTODO MARSHALL DE MEZCLA CONVENCIONAL	57
TABLA XXVIII % DE VACIOS DE AIRE VS % DE CEMENTO ASFÁLTICO MEZCLA CONVENCIONAL	59
TABLA XXIX Gmb VS % DE CEMENTO ASFÁLTICO MEZCLA CONVENCIONAL	60
TABLA XXX VMA VS % DE CEMENTO ASFÁLTICO MEZCLA CONVENCIONAL	61
TABLA XXXI VFA VS % DE CEMENTO ASFÁLTICO MEZCLA CONVENCIONAL	63
TABLA XXXII ESTABILIDAD VS % DE CEMENTO ASFÁLTICO MEZCLA CONVENCIONAL	64
TABLA XXXIII FLUJO VS % DE CEMENTO ASFÁLTICO MEZCLA CONVENCIONAL	65
TABLA XXXIV PORCENTAJE ÓPTIMO DE CEMENTO ASFÁLTICO PARA MEZCLA CONVENCIONAL	66
TABLA XXXV DOSIFICACIÓN PARA MEZCLA MODIFICADA	68
TABLA XXXVI DISEÑO DE LA MEZCLA MODIFICADA	68
TABLA XXXVII RESULTADOS DE ENSAYO RICE PARA CADA PORCENTAJE DE CEMENTOS ASFÁLTICO	70

TABLA XXXVIII TABLA MÉTODO MARSHALL PARA MEZCLA MODIFICADA	71
TABLA XXXIX % DE VACIOS DE AIRE VS % DE CEMENTO ASFÁLTICO MEZCLA MODIFICADA	73
TABLA XL Gmb VS % DE CEMENTO ASFÁLTICO MEZCLA MODIFICADA.....	75
TABLA XLI VMA VS % DE CEMENTO ASFÁLTICO MEZCLA MODIFICADA	76
TABLA XLII VFA VS % DE CEMENTO ASFÁLTICO MEZCLA MODIFICADA.....	77
TABLA XLIII ESTABILIDAD VS % DE CEMENTO ASFÁLTICO MEZCLA MODIFICADA	78
TABLA XLIV FLUJO VS % DE CEMENTO ASFÁLTICO MEZCLA MODIFICADA	80
TABLA XLV PORCENTAJE ÓPTIMO DE CEMENTO ASFÁLTICO PARA MEZCLA MODIFICADA	81

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Contenido de Asfalto de los Agregados Reciclados	95
Anexo 2: Granulometría de los Agregados Gruesos 3/4"	96
Anexo 3: Granulometría de los Agregados Gruesos 3/8"	97
Anexo 4: Granulometría de las Agregados Finos - Polvo de Piedra.....	98
Anexo 5: Granulometría de los Agregados Reciclados Muestra 1-2	99
Anexo 6: Granulometría de los Agregados Reciclados Muestra 3-4	100
Anexo 7: Gravedad Específica y Absorción Agregado Grueso 3/4 Nuevo.....	101
Anexo 8: Gravedad Específica y Absorción Agregado Grueso 3/8 Nuevo.....	101
Anexo 9: Gravedad Específica y Absorción Agregado Fino Nuevo "Polvo de piedra"	102
Anexo 10: Gravedad Específica y Absorción Agregado Grueso RAP.....	102
Anexo 11: Gravedad Específica y Absorción Agregado Fino RAP	103
Anexo 12: Cálculo del desgaste del Agregado Grueso mediante el uso de la Maquina de los Ángeles.....	104
Anexo 13: Características del Cemento Asfáltico AC-20 Petroecuador	105
Anexo 14: Gravedad Específica del Cemento Asfáltico	106
Anexo 15: Punto de Ablandamiento del Cemento Asfáltico.....	106

SIGLAS ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

Sigla	Significado
RAP	Pavimento Asfáltico Reciclado.
ASTM	American Society for Testing and Materials.
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials.
MOP	Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones.
INEN	Servicio Ecuatoriano de Normalización.
VMA	Vacíos en el Agregado Mineral (Voids in Mineral Aggregate).
VFA	Vacíos Llenos de Asfalto (Void Filled with Asphalt).

RESUMEN EJECUTIVO

La presente investigación evaluó el efecto de la incorporación de agregados de pavimento reciclado (RAP) en las propiedades físico-mecánicas y volumétricas de mezclas asfálticas en caliente mediante el método Marshall. El estudio se desarrolló bajo un enfoque experimental comparativo estructurado en tres fases: La caracterización de los materiales pétreos; el diseño de las mezclas asfálticas mediante el método Marshall; y el análisis de las propiedades frente al porcentaje óptimo de cemento asfáltico, conforme a la normativa MOP-001-F-2002. Para el desarrollo experimental se recolectaron agregados pétreos pertenecientes a la Mina Kumochi, agregados pétreos reciclados (RAP) obtenido del fresado de la vía Jaloa – El Guasmo, Cantón Quero, y cemento asfáltico AC-20 de la planta de JEAL Construcciones.

Se diseñaron dos tipos de mezclas: una convencional constituida del 100% de agregados nuevos y una mezcla modificada con el 20% de RAP que cumplan con los requerimientos y su viabilidad en el diseño de carpeta asfáltica para tráfico pesado. Este estudio responde a la necesidad de optimizar los recursos materiales y reducir el impacto ambiental que genera la explotación de los agregados vírgenes en la infraestructura vial sin la necesidad de alterar su diseño estructural. Se determinó el porcentaje de cemento asfáltico residual en los agregados reciclados, obteniendo un valor de 5.69%, que se traduce de forma intrínseca como el 1.14% equivalente al 20% de RAP en la mezcla.

Mediante el método Marshall, se determinó el porcentaje óptimo de cemento asfáltico en ambas mezclas, revelando un valor de 6.20%. Analizando sus propiedades se concluyó que la incorporación del 20% de RAP produce un incremento en la estabilidad a comparación de la mezcla convencional. Por el contrario, el flujo disminuye, pero se mantiene dentro del rango que exige la normativa MOP-001-F-2002, lo cual se puede entender que es lo suficientemente rígida para no producir el fenómeno de ahuellamiento, pero resiste a las deformaciones plásticas provocadas por cargas de tráfico. Se concluye que la incorporación del material reciclado mejoró el comportamiento de sus propiedades en el diseño de la mezcla, lo cual lo hace técnicamente viable, siendo capaz de resistir a las solicitudes de tráfico.

Palabras clave: RAP, MÉTODO MARSHALL, CEMENTO ASFÁLTICO, MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE.

ABSTRACT

This research evaluated the effect of incorporating recycled asphalt pavement (RAP) aggregates on the physical-mechanical and volumetric properties of hot mix asphalt using the Marshall method. The study was conducted using a comparative experimental approach structured in three phases: characterization of the stone materials; design of conventional and modified asphalt mixtures using the Marshall method; and analysis of the properties in relation to the optimal asphalt cement content, in accordance with standard MOP-001-F-2002. For the experimental work, stone aggregates were collected from the Kumochi Mine, recycled stone aggregates (RAP) obtained from the milling of the Jaloa–El Guasmo road in Quero Canton, and AC-20 asphalt binder from the JEAL Construcciones plant.

Two types of mixtures were designed: a conventional mixture consisting of 100% new aggregates and a modified mixture containing 20% RAP, both of which meet the requirements and demonstrate feasibility for use in the design of asphalt pavements for heavy traffic. This study addresses the need to optimize material resources and reduce the environmental impact caused by the extraction of virgin aggregates for road infrastructure without altering its structural design. The percentage of residual asphalt binder in the recycled aggregates was determined, yielding a value of 5.69%, which intrinsically translates to 1.14% equivalent to 20% RAP in the mixture.

Using the Marshall method, the optimal asphalt binder content was determined for both mixtures, yielding a value of 6.20%. Analysis of their properties concluded that the incorporation of 20% RAP results in increased stability compared to the conventional mixture. Conversely, the flow decreased but remains within the range required by MOP-001-F-2002, which indicates that the mixture is sufficiently rigid to prevent rutting while resisting plastic deformations caused by traffic loads. It is concluded that the incorporation of recycled material improved the performance of its properties in the mix design, making it technically viable and capable of withstanding traffic loads.

Keywords: RAP, MARSHALL METHOD, ASPHALT BINDER, HOT MIX ASPHALT.

CAPÍTULO I.- MARCO TEÓRICO

I. JUSTIFICACIÓN

El desarrollo y mantenimiento de la infraestructura vial requiere de una gran demanda de agregados pétreos y ligantes asfálticos, lo que implica elevados costos económicos y un significativo impacto ambiental debido a la explotación de recursos naturales no renovables. A la vez, la rehabilitación de calzadas genera importantes cantidades de pavimento asfáltico recuperado (RAP), el cual en muchos casos no es reutilizado de manera técnica, provocando acumulación de residuos y desaprovechamiento de materiales con potencial de ser reutilizados [1].

A partir de lo expuesto, el uso de agregados de asfalto reciclado en mezclas asfálticas en caliente representa una alternativa sostenible que permite reducir el consumo de materiales vírgenes, disminuir costos de producción y mitigar los impactos ambientales asociados a la construcción y rehabilitación vial. Diversas investigaciones han demostrado que la incorporación controlada de RAP puede mejorar las propiedades como la estabilidad y flujo de las mezclas, aunque también puede influir en su durabilidad debido al envejecimiento del ligante asfáltico. [2]

La incorporación de RAP introduce variaciones en las propiedades físico-mecánicas de las mezclas asfálticas debido a la presencia de ligante envejecido, tales como estabilidad, flujo y parámetros volumétricos, lo cual requiere un análisis experimental que permita garantizar su adecuado desempeño estructural. En el Ecuador, si bien existen normativas como el MOP-001-F-2002 que regulan los materiales y el diseño de mezclas asfálticas, la información específica sobre el comportamiento de mezclas con agregados reciclados bajo condiciones locales es aún limitada [3], [4].

Por lo tanto, esta investigación se justifica en la necesidad de generar información técnica confiable que permita evaluar el efecto del uso de agregados de asfalto reciclado en las propiedades físico-mecánicas de las mezclas asfálticas en caliente, contribuyendo al desarrollo de criterios de diseño más sostenibles, eficientes y adaptados a las condiciones del país. Finalmente, el estudio aporta a nivel académico al ampliar el conocimiento sobre el comportamiento del RAP, a nivel técnico al proporcionar datos experimentales aplicables al

diseño de mezclas, y a nivel ambiental y económico al promover el uso eficiente de recursos y la reducción de residuos en proyectos viales.

En este contexto, surge la necesidad de responder a la siguiente interrogante de investigación: ¿De qué manera influye la incorporación de agregados de pavimento asfáltico reciclado (RAP) en las propiedades físico-mecánicas, como estabilidad y flujo y el comportamiento volumétricos en las mezclas asfálticas en caliente diseñadas mediante el método Marshall?

II. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

El uso de pavimento asfáltico reciclado (RAP) en mezclas asfálticas en caliente ha sido ampliamente estudiado a nivel internacional como una alternativa técnica, económica y ambientalmente sostenible que permite optimizar el uso de los materiales sin comprometer de manera significativa el desempeño estructural del pavimento. Este material proviene del fresado de pavimentos en servicio y conserva propiedades que permiten su reutilización en nuevas mezclas, disminuyendo la necesidad de agregados vírgenes y ligante asfálticos [5].

Según varias investigaciones realizadas a nivel internacional en países como Jordania determinan que el RAP puede contribuir a solucionar varios problemas que se presentan dentro de los asfaltos tanto económicos como ambientales mediante un estudio experimental basado en el método Marshall se evidenció que el uso de material reciclado permite obtener mezclas con estabilidad y flujo dentro de los rangos establecidos por normativas técnicas, siempre que se controle adecuadamente la dosificación del ligante y la granulometría [6].

Por otro lado, en Europa con estudios realizados en Italia se ha determinado mediante análisis tanto mecánicos como ambientales de manera combinada que en mezclas de asfalto poroso PA que incorpora dentro de su composición algunas materias primas recicladas como el RAP pueden representar una alternativa viable y sostenible para el medio ambiente para la construcción de carreteras con mayor seguridad vial [7].

En países latinoamericanos como México recientes estudios han demostrado que la incorporación de RAP genera beneficios significativos. Una investigación basada en análisis de ciclo de vida determinó que el uso de RAP reduce considerablemente las emisiones de gases de

efecto de invernadero y permite disminuir los costos de construcción en porcentajes entre un 14 y un 32 % en mezclas que incorporan porcentajes de RAP entre el 20 y 50% [2].

Por otro lado, en Colombia se ha evidenciado que mezclas de RAP más adición de emulsión de tipo CGR pueden llegar a mejorar de manera notable los resultados obtenidos en cuanto de deformación de las mezclas del pavimento, lo cual impacta de manera positiva en la construcción de redes viales secundarias y terciarias para mejorar la conectividad de zonas agrícolas y rurales con zonas urbanas lo que ayuda a potenciar el desarrollo de las actividades dentro de estas zonas [8].

En estudios realizados dentro del Ecuador se ha determinado que el RAP con contenido de asfalto del 5,67% llega a representar hasta un 74% del total de la mezcla asfáltica, la mezcla que se diseñó se redujo a un 4,20% de contenido de asfalto. Mediante método Marshall se alcanzó un porcentaje óptimo de 5,5% de contenido de asfalto. Según estos resultados se encontró 1,30% de déficit de contenido de asfalto que debe ser agregado a la nueva mezcla asfáltica para alcanzar los requerimientos solicitados de acuerdo con las normativas vigentes [9].

En el contexto nacional, las investigaciones sobre el uso de materiales reciclados en pavimentos siguen siendo limitadas. Sin embargo, algunos estudios han evidenciado que la reutilización de mezclas asfálticas recicladas llega a cumplir con las especificaciones técnicas del MOP-001-F-2002, demostrando su viabilidad en proyectos futuros, aun así, persiste la necesidad de general más información experimental bajo condiciones locales [4].

III. OBJETIVOS

A. OBJETIVO GENERAL

Evaluar el efecto de los agregados reciclados de carpeta asfáltica en la estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente, 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 caliente.

- 2) Diseñar la mezcla asfáltica en caliente con diferentes porcentajes de cemento asfáltico 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 caliente fabricadas con agregados nuevos y con agregados reciclados.

CAPÍTULO II.- METODOLOGÍA

En este capítulo la presente investigación se desarrolló con un enfoque comparativo, experimental y analítico cuantitativo, donde se describe tres fases secuenciales, las cuales están comprendidas en la caracterización de las propiedades de los agregados pétreos reciclados, nuevos y cemento asfáltico, donde se evaluará el efecto de la incorporación de pavimento asfáltico reciclado (RAP) en las propiedades de las mezclas asfálticas en caliente mediante el Método Marshall. Para ello, se elaboraron briquetas correspondientes a dos diseños de mezcla: una mezcla convencional compuesta del 100% de agregados nuevos y una mezcla combinada constituida al 80% de agregados nuevos y el 20% de RAP, con la finalidad de comparar sus propiedades físico-mecánicas y volumétricas mediante la aplicación de ensayos normalizados realizados en el laboratorio y determinar el contenido óptimo de cemento asfáltico para obtener una mezcla que cumpla con todas las especificaciones técnicas bajo el contexto ecuatoriano.

A continuación, se detallan los equipos, instrumentos y materiales que se utilizaron para el desarrollo experimental y los métodos, donde se describen los procedimientos empleados para la ejecución de los ensayos correspondientes.

I. EQUIPOS Y MATERIALES

Para el desarrollo de la presente investigación se utilizaron materiales pétreos reciclados, materiales pétreos nuevos y cemento asfáltico, así como equipos e instrumentos de laboratorio especializados aplicados en cada fase experimental, los cuales permitirán evaluar las propiedades de los materiales, el diseño de las mezclas asfálticas en caliente y sus propiedades mediante el Método Marshall.

A. FASE I

En esta primera fase contempló la recolección de los materiales necesarios para la elaboración de la mezcla asfáltica. Los agregados pétreos vírgenes gruesos y finos se extrajeron de la Mina Kumochi, ubicado en el sector Las Viñas, Cantón Ambato, provincia de Tungurahua. El muestreo de estos materiales se llevó a cabo con la ayuda de herramientas como palas y baldes. Por otra parte, los agregados pétreos reciclados que corresponden al pavimento asfáltico reciclado (RAP) se obtuvieron de dos fuentes, inicialmente se dispuso de un material proporcionado por el Municipio de Ambato; sin embargo, no se tenía un registro exacto del

lugar de donde provenía exactamente el RAP. Por esta razón, se decidió utilizar el material suministrado por la constructora proveniente del fresado de la vía Jaloa – El Guasmo, en el Cantón Quero, provincia de Tungurahua, para la recolección de estos materiales se necesitó herramientas menores como palas y sacos para almacenar los agregados.

Por otra parte, el cemento asfáltico tipo AC-20 se obtuvo de la planta de asfalto de JEAL Construcciones, para su recolección se emplearon guantes resistentes a altas temperatura y un recipiente metálico, que permitieron la correcta manipulación del material durante su traslado al laboratorio. Estos materiales serán sometidos a ensayos de caracterización con el fin de determinar sus propiedades físico-mecánicas.

Para el Análisis Granulométrico de los agregados grueso, finos y reciclados se empleó un juego de tamices estándar para ensayo (marca GRANOTEST), compuesto por los tamices 3/4", 1/2", 3/8", #4, #8, #16, #30, #50, #100, #200 y la fuente. A su vez, se utilizó una balanza de precisión (marca T-Scale) para determinar el peso del material. Para la gravedad específica y absorción de los agregados gruesos tanto nuevos como finos se utilizó un balde con agua para sumergir el material y una canastilla según las especificaciones de las normas ASTM C127 - NTE INEN 857, mientras que para la gravedad específica y absorción de los agregados finos se usó un picnómetro según las normas ASTM C128 - NTE INEN 856. A su vez, para el ensayo de Resistencia a la Degradación se realizó mediante la Máquina de Los Ángeles que consiste en un tambor cilíndrico de acero y 11 esferas de acero según las especificaciones de las normas ASTM C131 - NTE INEN 860, para estos ensayos se utilizaron herramientas menores como tamices, franelas, recipientes metálicos para recoger el material, termómetro y pala.

Para determinar el contenido de ligante asfáltico en el material reciclado se utilizó un extractor de asfalto con centrifuga eléctrica de 3600 rpm con una capacidad de 1500 gr, papel filtro del tamaño correspondiente al extractor, probeta de capacidad de 1000 ml y solventes como gasolina obtenida de la planta, siguiendo las especificaciones de las normas ASTM D2172 - AASHTO T164, asimismo, se usó herramientas como espátula, brocha para retirar el material previamente lavado del papel filtro evitando que se pierda material, recipientes metálicos, y un par de guantes.

Finalmente, en esta fase se caracterizaron las propiedades del cemento asfáltico tipo AC-20 como la gravedad específica, se empleó el uso de un picnómetro de 25 ml, agua destilada,

termómetro, balanza y baño maría para mantener la temperatura a 25°C como pide la norma ASTM D70 - AASHTO T228. Para el ensayo de Punto de Ablandamiento según las normas ASTM D36 - AASHTO T53 se utilizó un vaso de vidrio resistente al calor, anillos de bronce, bolas de acero de 9.5 mm de diámetro y 3.5 gr de peso, un soporte para el anillo, una guía para la bola, un termómetro para el control de temperatura durante el ensayo, agua destilada y una fuente de calor que se pueda regular como una manta electrothermal de 500 ml para aplicar calor de forma uniforme equipo perteneciente al Laboratorio de Química de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica. Por último, para el ensayo de Punto de Inflamación y Combustión mediante la Copa abierta de Cleveland, un mechero de gas y un termómetro conforme las especificaciones de las normas ASTM D92 – AASHTO T48.

B. FASE II

En esta fase se emplearon los materiales y equipos necesarios para la elaboración de las briquetas y determinación de las propiedades de las mezclas asfálticas en caliente mediante el Método Marshall. Para la preparación de la mezcla se utilizaron los agregados nuevos, agregados reciclados y cemento asfáltico tipo AC-20, una cocineta para calentar la muestra, recipientes, par de guantes que resistan altas temperaturas, un termómetro para el control de temperatura, espátulas y una balanza de precisión. Asimismo, se emplearon moldes cilíndricos con un collar que sea ajustable ambos extremos del molde y una placa de base plana, se compactó con un martillo de compactación con una base plana circular y un pisón deslizantes, el mismo que se encontraba en un pedestal de compactación que deben cumplir según las especificaciones de la norma ASTM D6926.

Una vez que las briquetas cumplieron su tiempo de enfriamiento se desmolda mediante un extractor de briquetas. Para la determinación de las propiedades se utilizó el equipo de baño maría (marca ANVIL), prensa Marshall (marca HUMBOLDT), medidor de flujo establecidos por la norma aplicada. De igual forma, para el ensayo de Gravedad Específica Máxima Teórica (Ensayo Rice) se usó un recipiente de vacío metálico y una bomba de vacío (marca Fischer).

C. FASE III

En esta última fase una vez definido el porcentaje óptimo de cemento asfáltico, se analizaron y compararon las propiedades mecánicas y volumétricas de ambas diseños de mezclas bajo

dicho porcentaje. Para el procesamiento y análisis de los resultados obtenidos en laboratorio se utilizó una computadora portátil.

II. MÉTODOS

La metodología se desarrolló bajo un enfoque experimental-comparativo, estructurado en tres fases secuenciales, las cuales corresponden a los objetivos específicos planteados. Cada fase comprende una serie de actividades y ensayos de laboratorio orientados a la caracterización de materiales, diseño de mezclas asfálticas mediante el Método Marshall y evaluación de sus propiedades físico-mecánicas y volumétricas. Los ensayos se ejecutaron conforme a las normas aplicadas vigentes como ASTM, AASHTO e INEN, según correspondiera. Sin embargo, el cumplimiento de todos los parámetros determinados se rigió a lo establecido en las Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos y Puentes MOP-001-F-2002 con el fin de garantizar la aplicabilidad de los resultados en el contexto ecuatoriano.

A. FASE I

En esta primera fase tiene como objetivo determinar las propiedades físico-mecánicas de los agregados reciclados, agregados nuevos y del cemento asfáltico, para el diseño de la mezcla asfáltica en caliente. El desarrollo de los ensayos se ejecutó de manera complementaria entre dos laboratorios, mencionados a continuación:

- Laboratorio de la Carrera de Ingeniería Civil de la Universidad Técnica de Ambato.
- Laboratorio de la planta de “JEAL Construcciones”.

Es importante que los materiales que se utilicen cumplan con las especificaciones técnicas de las normas aplicables vigentes, en este caso con la normativa MOP-001-F-2002 para la elaboración de mezclas asfálticas en caliente. Sin embargo, los materiales nuevos provienen de la Mina Kumochi, lo cual, asegura trabajar con materiales calificados y de calidad, teniendo en cuenta esto se han considerado los siguientes ensayos: Análisis granulométrico de los Agregados, Gravedades Específicas de los Agregados, Resistencia a la degradación (Máquina de los Ángeles), Contenido de Asfalto en el agregado reciclado. Asimismo, el cemento asfáltico al ser obtenido de una planta de asfalto, además de contar con el reporte de PETROECUADOR, garantiza que cumpla con las especificaciones, por lo tanto, solo se han realizado los ensayos

de: Gravedad Específica del ligante, Punto de ablandamiento y Punto de inflamación y combustión.

1) Recolección de muestras

a) Agregados Reciclados

El material reciclado que se utilizó para la presente investigación proviene del pavimento asfáltico reciclado o también conocido por sus siglas RAP, donde se puede definir como un material procedente del fresado, demolición o rehabilitación de la carpeta asfáltica, con contienen agregados pétreos recubiertos por ligante asfáltico envejecido. Como se mencionó anteriormente, este material fue suministrado por JEAL Construcciones propiedad del Ing. José Ernesto Alvarado Lascano, mismo que se obtuvo del fresado de la Vía Jaloa – El Guasmo, en el Cantón Quero, provincia de Tungurahua, lugar donde se ejecutó la recolección directa de las muestras. cuyas coordenadas UTM y ubicación exacta se indican en la Fig. 1 y la TABLA I .

TABLA I
COORDENADAS UTM DEL PUNTO DE MUESTREO DEL AGREGADO RECICLADO

<i>Coordenadas UTM</i>			
<i>Lugar</i>	<i>Zona</i>	<i>Norte</i>	<i>Este</i>
El placer, Quero	17 M	9842612 m	768243 m

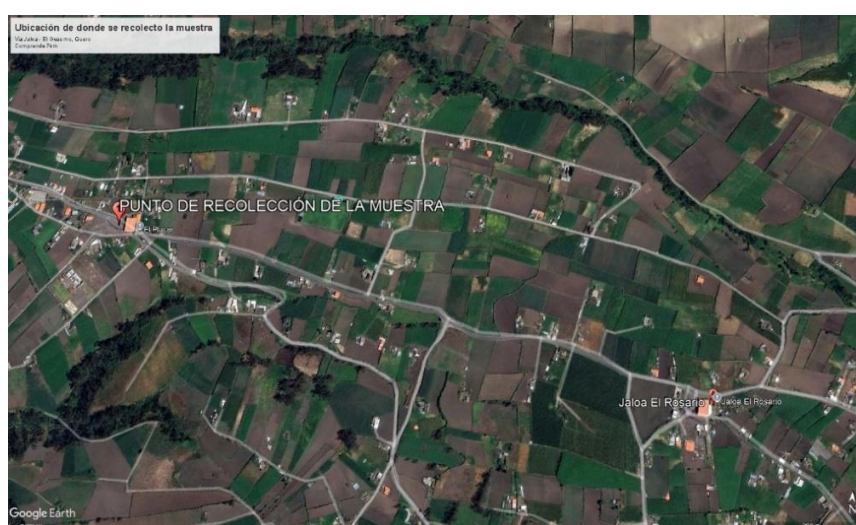


Fig. 1. Ubicación del punto de muestreo del agregado reciclado.

Se utilizó una máquina fresador y una volqueta para recolectar el material reciclado del sitio, y se tomaron cuatro muestras distintas para la investigación.



Fig. 2. Maquinaria para proceso de fresado de la Vía Jaloa-El Guasmo.



Fig. 3. Estado de la vía en el proceso de fresado.

El material fue trasladado al laboratorio de la constructora, donde se realizó su proceso de secado, desagregación y tamizado para obtener una granulometría uniforme para la investigación.

b) Agregados Nuevos

Los agregados pétreos gruesos y finos fueron suministrados por “JEAL Construcciones”, los cuales provienen de la Mina Kumochi, sector Las Viñas, paso Lateral en la ciudad de Ambato,

provincia de Tungurahua. Esta mina ofrece distintos tamaños de agregados triturado previamente clasificados, cuyas coordenadas y ubicación se detallan respectivamente en la TABLA II y la Fig. 4.

TABLA II
COORDENADAS UTM DEL PUNTO DE ORIGEN DEL AGREGADO NUEVO

<i>Coordenadas UTM</i>			
<i>Lugar</i>	<i>Zona</i>	<i>Norte</i>	<i>Este</i>
Mina Kumochi	17 M	9861915 m	770291 m

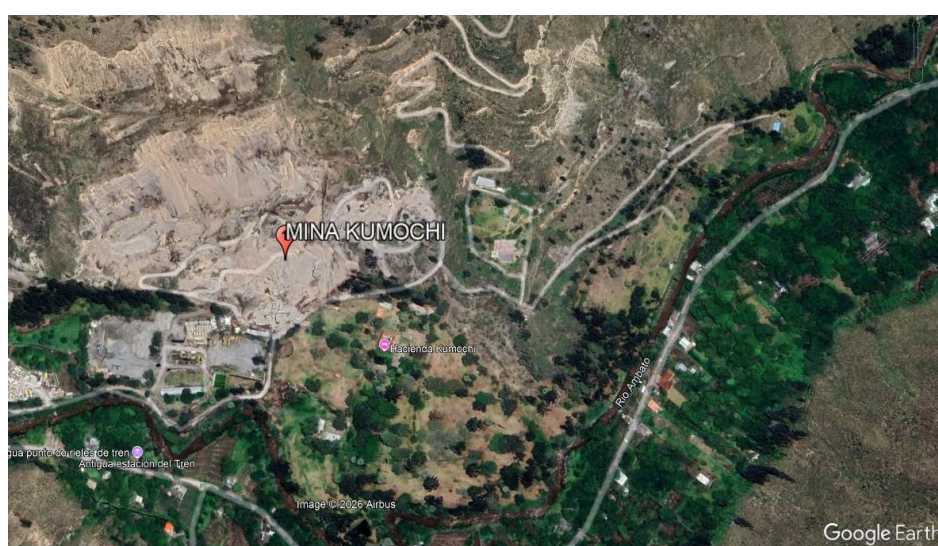


Fig. 4. Ubicación del punto de origen del agregado nuevo “Mina Kumochi”.

Los agregados son trasladados a la planta de asfalto de “JEAL Construcciones” cuyas coordenadas se indican en la TABLA III, lugar donde se encargan de triturar y clasificar el material según su tamaño como, agregados gruesos que se puede definir técnicamente como el material retenido en el tamiz No. 4 (4.75 mm) y agregados finos que se define como el material que pasa el tamiz No. 4 (4.75 mm) [4]. Para la caracterización y diseño de la mezcla se utilizó agregado grueso de tamaño 3/4” (19.0 mm) y 3/8” (9.50 mm), y agregado fino “Polvo de piedra”.

TABLA III
COORDENADAS UTM DE LOS PUNTOS DE MUESTREO DEL AGREGADO NUEVO

<i>Coordenadas UTM</i>			
<i>Lugar</i>	<i>Zona</i>	<i>Norte</i>	<i>Este</i>
Planta de Asfalto "JEAL Construcciones"	17 M	9863039 m	769164 m
Laboratorio de la Planta de Asfalto	17 M	9863068 m	769188 m



Fig. 5. Ubicación de los puntos de muestreo de los agregados nuevos "JEAL Construcciones".



Fig. 6. Agregado grueso nuevo 3/4" (19.0 mm).



Fig. 7. Agregado grueso nuevo 3/8" (9.50 mm)



Fig. 8. Agregado fino nuevo "Polvo de piedra".



Fig. 9. Recolección de los agregados para los ensayos.

c) Cemento Asfáltico

El ligante asfáltico que se utilizó para la presente investigación es cemento asfáltico, debido a las condiciones de temperatura y trabajabilidad requeridas para la elaboración de las briquetas asfálticas en caliente. Se considera este un material aglomerante, bituminoso derivado del refinamiento del petróleo[10] [11]. Su función es recubrir y unir los agregados pétreos en una sola masa, permitiendo que soporte cargas de tráfico y del ambiente [4].

Para el desarrollo experimental, se utilizó cemento asfáltico tipo AC-20, el mismo que fue adquirido desde la planta de producción de “JEAL Construcciones”.



Fig. 10. Cemento Asfáltico tipo AC-20.

2) Caracterización de los Agregados Nuevos y Reciclados

a) Contenido de ligante asfáltico (Método de la Centrifuga)

Este ensayo esta conforme la norma ASTM D2172, el objetivo de este ensayo es determinar el porcentaje de ligante asfáltico, en este caso, cemento asfáltico que está presente en mezclas asfálticas o en el material fresado, para obtener los agregados limpios que pueden ser utilizados para análisis granulométricos posteriores [12].

Según la norma, las muestras a ensayar deberán cumplir con un peso mínimo de acuerdo con el tamaño máximo nominal de la mezcla como se muestra en la TABLA IV. El TMN de la mezcla es de 1/2", por lo tanto, el peso mínimo a utilizar es de 1500 gr, permitiendo que si la muestra es más grande que la capacidad de la máquina se puede ensayar en partes [11]. Se utilizó cuatro muestras de aproximadamente 750 g cada una para al final obtener un promedio.

TABLA IV

PESO MÍNIMO DE LAS MUESTRAS PARA EL ENSAYO DE EXTRACCIÓN DE CONTENIDO DE ASFALTO.

<i>Tamaño de la partícula más grande del agregado</i>	<i>Peso mínimo de las muestras</i>
<i>Tamiz</i>	<i>Gr</i>
1(in)	2500
$\frac{3}{4}$ (in)	2000
$\frac{1}{2}$ (in)	1500
$\frac{3}{8}$ (in)	1000
No. 4	500

Se colocó la muestra de aproximadamente 750 g en un recipiente metálico para obtener su peso inicial, asimismo, se vertió la muestra previamente pesada de forma uniforme en el extractor. A continuación, se agregó 750 ml de solvente, en este caso, gasolina hasta que cubra la muestra y se dejó reposar durante un lapso de 30 minutos.



Fig. 11. Peso del agregado reciclado antes del lavado.



Fig. 12. Muestra en reposo previa al lavado.

Asimismo, el filtro se secó durante 1 minuto para obtener su peso en estado seco, luego se coloca el filtro en el plato del extractor y tapar para iniciar el ensayo de extracción. Se colocó un recipiente debajo del tubo de desagüe, para que recoja todo el líquido que sale de la maquina en cada lavada. Se añadió 750 ml por cada lavada y se realizó entre 7 u 8 lavadas por cada muestra hasta que se observó que el líquido que sale del drenaje sea de un color claro.



Fig. 13. Lavado de la muestra.

Por consiguiente, se retira cuidadosamente el filtro del plato, con ayuda de una espátula retirar el material que se encuentra adherido en este y agregarlo a la muestra lavada. Después, se puso a secar el filtro hasta obtener una masa constante para obtener su peso después del lavado. Asimismo, pasar el material previamente lavado a un recipiente para secarlo. Finalmente, se toma el peso de la muestra lavada seca, se repitió este proceso para las cuatro muestras.



Fig. 14. Material después del lavado.



Fig. 15. Muestra después del lavado seco.

Una vez, obtenido estos datos se determinó el contenido de asfalto que tiene la muestra mediante la siguiente fórmula[12]:

$$\% \text{ Retenido del filtro} = E = C - D \quad (1)$$

$$\%_{\text{ASFALTO}} = \frac{A - (B + E + F)}{A} * 100 \quad (2)$$

Donde,

A Peso de la muestra antes del lavado.

B Peso de la muestra después del lavado.

C Peso del filtro antes del lavado.

D Peso del filtro después del lavado.

E % retenido en el filtro. Ver ecuación (1)

F Peso del solvente (3.5 g). Por lo general, se utiliza el método de recuperación del residuo de la gasolina con el ligante asfáltico quemándolo, en el caso de no realizar este método, la norma sugiere utilizar un valor de 3.5 g de residuo.

b) Análisis Granulométrico de los Agregados

Este ensayo tiene como objetivo determinar la distribución de tamaños de los agregados, tanto nuevos como reciclados utilizados en la mezcla mediante tamizado. El ensayo se llevó a cabo bajo la norma ASTM C136, donde se inició secando el material a una temperatura de 110 °C hasta obtener una masa constante, para después pesar el material según esta establecido [3] [13].

Se ordenaron de forma decreciente los tamices necesarios según respecta al tamaño de la abertura, para proceder a colocar el material respectivamente, cabe destacar que se realizaron las granulometrías para cada tamaño de agregado de forma independiente para el material virgen (3/4", 3/8", Polvo de piedra), mientras que para el material reciclado (RAP) al ser una muestra obtenida en el sitio se realizó una granulometría mezcla de agregado grueso y fino. Finalmente se pesaron las masas que retiene cada tamiz con la ayuda de una balanza digital y se anotaron esos pesos para después ser procesados y obtener la curva granulométrica de cada agregado.



Fig. 16. Tamizado de los agregados.

Una vez obtenidas las curvas por cada agregado, se determinó las granulometrías combinadas mediante una dosificación porcentual que se refiere al porcentaje de material por cada agregado con respecto al total de la mezcla. Esto se calculó para los dos diseños de mezclas que se van a realizar (mezcla convencional y mezcla modificada), los cuales serán comparados en función de las especificaciones granulométricas establecidas en la normativa ecuatoriana MOP-001-2002 según el tamaño máximo nominal de la mezcla [4].

TABLA V
DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA DE LOS AGREGADOS (MOP-001-F-2002)

<i>TAMIZ</i>	<i>Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada</i>			
	<i>3/4"</i>	<i>1/2"</i>	<i>3/8"</i>	<i>Nº 4</i>
1" (25.4 mm.)	100	--	--	--
3/4" (19.0 mm.)	90 - 100	100	--	--
1/2" (12.70 mm.)	--	90 - 100	100	--
3/8" (9.50 mm.)	56 - 80	--	90 - 100	100
Nº 4 (4.75 mm.)	35 - 65	44 - 74	55 - 85	80 - 100
Nº 8 (2.36 mm.)	23 - 49	28 - 58	32 - 67	65 - 100
Nº 16 (1.18 mm.)	--	--	--	40 - 80
Nº 30 (0.60 mm.)	--	--	--	25 - 65
Nº 50 (0.30 mm.)	5-19	5-21	7-23	7-40
Nº 100 (0.15 mm.)	--	--	--	3-20
Nº 200 (0.075 mm.)	2-8	2-10	2-10	2-10

Fuente: [4]

c) Gravedad Específica y Absorción de los Agregados Gruesos nuevos y reciclados

Este ensayo se rige bajo las normas ASTM C 127 – NTE INEN 857:2010, donde determina las Gravedades Específicas Seca Bulk, Saturadas Superficialmente Seca, Seca Aparente y su porcentaje de Absorción. Para los agregados nuevos, se ensayó individualmente para fracciones de 3/4" y 3/8", mientras que, para los agregados reciclados se utilizó el material que se retuvo en el tamiz Nº4, la cual es sumergida en agua durante 24 ± 4 horas para permitir que se sature internamente. Luego del tiempo establecido, se seca el agua superficial con una franela para obtener el peso en el aire de la muestra en estado superficialmente seca. Después, se colocó dentro de una canastilla, que fue sumergida en agua para obtener el peso sumergido. Finalmente, se pone la muestra a secar en el horno para posterior a eso, dejar enfriarlo y así obtener su peso en estado seco [14].



Fig. 17. Muestra sumergida en agua.

Para determinar las gravedades específicas y absorción de los agregados gruesos se utilizaron las siguientes ecuaciones.

- i) *Gravedad Específica Seca Bulk o Gravedad Específica Neta del Agregado.*

$$G_{sb} = \frac{A}{B - C} \quad (3)$$

- ii) *Gravedad Específica Saturada Superficialmente Seca.*

$$G_{sss} = \frac{B}{B - C} \quad (4)$$

- iii) *Gravedad Específica Seca Aparente.*

$$G_{sa} = \frac{A}{A - C} \quad (5)$$

- iv) *Porcentaje de Absorción.*

$$\% Abs = \frac{B - A}{A} * 100 \quad (6)$$

Donde,

- A** Peso en aire del Agregado Seco.
- B** Peso en aire del Agregado Saturado Superficialmente Seco.
- C** Peso del Agregado Superficialmente Seco Sumergido en Agua.

d) Gravedad Específica y Absorción de los Agregados Finos nuevos y reciclados

Este ensayo se rige bajo las normas ASTM C 128 – NTE INEN 856:2010, donde tanto el material nuevo como el material reciclado fue sumergido en agua durante 24 horas, para luego dejar secar a temperatura ambiente para obtener el peso saturada superficialmente seca. Posteriormente, tomar una muestra por cada material y agregarla al picnómetro según corresponda, agregar agua hasta la marca de aforo. Se debe eliminar las burbujas de aire agitándolo, para seguido a esto obtener el peso del picnómetro con agregado y agua hasta la marca sin burbujas de aire. Asimismo, se debe secar la muestra del picnómetro para conocer el peso seco y finalmente tomar el peso del picnómetro solo con agua [15].



Fig. 18. Colocando el agregado fino al picnómetro.



Fig. 19. Picnómetro + material + agua hasta la línea de aforo.

Para determinar las gravedades específicas y absorción de los agregados finos se utilizaron las siguientes ecuaciones.

- i) *Gravedad Específica Seca Bulk o Gravedad Específica Neta del Agregado.*

$$G_{sb} = \frac{A}{B + D - C} \quad (7)$$

- ii) *Gravedad Específica Saturada Superficialmente Seca.*

$$G_{sss} = \frac{D}{B + D - C} \quad (8)$$

- iii) *Gravedad Específica Seca Aparente.*

$$G_{sa} = \frac{A}{B + A - C} \quad (9)$$

- iv) *Porcentaje de Absorción.*

$$\% Abs = \frac{D - A}{A} * 100 \quad (10)$$

Donde,

- A** Peso en aire del Agregado Seco.
- B** Peso del picnómetro + agua.
- C** Peso del picnómetro + material + agua hasta la línea de aforo.
- D** Peso del Agregado Saturado Superficialmente Seco.

e) Ensayo de Resistencia al desgaste por Abrasión (Máquina de los Ángeles)

Este ensayo nos ayuda a determinar la resistencia de los agregados gruesos a la degradación o desgaste cuando es sometida a la acción de impacto y abrasión dentro de un tambor que gira a una velocidad controlada, por lo general de 30 a 33 rpm durante 500 revoluciones. Se emplea una carga abrasiva compuesta por esferas de acero calibradas, donde el número de estas y su masa depende de la granulometría del material comprendida bajo la norma ASTM C131/131M [16].

Inicialmente se preparó la muestra, la cual fue previamente lavada, luego secada en el horno a $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ hasta obtener una masa constante. Para determinar el método que vamos a utilizar hay que tener en cuenta la granulometría, en este caso se realizó el Método B debido a que tenemos material que pasa el tamiz $\frac{3}{4}$ " y retiene material en el tamiz $\frac{1}{2}$ ". Procedemos a pesar 2500 ± 10 g de material que retiene el tamiz $\frac{1}{2}$ " y 2500 ± 10 g de material retenido en el tamiz $\frac{3}{8}$ ", obteniendo una masa de $5000\text{ gr} \pm 10\text{ g}$ para empezar con el ensayo, y la norma específica que para el Método B se emplearan una carga constituida de 11 esferas dentro del tambor a 500 revoluciones como se puede observar en la TABLA VI [16].

TABLA VI.
CANTIDAD DE MATERIAL SEGÚN EL MÉTODO PARA EL ENSAYO.

Tamaño del tamiz (Aberturas cuadradas)		Masa de los tamaños indicados (g)								Gradación			
		Granulometría											
		A	A	B	B	C	C	D	D			Pesos muestra para ensayar (g)	
Pasa	Retenido												
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			
12,5 mm (1/2")	9,5 mm (3/8")	1250 ± 10		2500 ± 10									
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											

Fuente: [16]



Fig. 20. Lavado del material para el ensayo de Abrasión.



Fig. 21. Peso del material según las especificaciones de la TABLA VI.

Después, se retiró el material que fue tamizado por el tamiz No. 12 (1.70 mm), asimismo, se lavó el material retenido en el tamiz N°12 para eliminar partículas finas adheridas. Finalmente, se secó el material en el horno hasta una masa constante y se pesó con una balanza para conocer el peso final, para así determinar el porcentaje de desgaste.



Fig. 22. Tamizado del material por el tamiz No. 12 (1.70 mm).



Fig. 23. Peso de la muestra seca retenida en el tamiz No. 12 (1.70 mm)

El porcentaje de desgaste se obtuvo mediante la siguiente fórmula [16]:

$$D_{\%} = \left(\frac{A - B}{A} \right) * 100 \quad (11)$$

Donde,

A Masa inicial de la muestra para el ensayo.

B Masa de la muestra retenida en el tamiz N°12 (1.70 mm).

Según la MOP-001-F-2002 y la ASTM C131 debe cumplir con la especificación de que el desgaste calculado no sea mayor al 40% [4], [16].

3) Cemento Asfáltico

De acuerdo con la MOP-001-F-2002 los cementos asfálticos se clasifican según su rango de penetración que oscila de 60-70 dmm u 85-100 dmm [4]. Estos tienen que cumplir según los requisitos detallados en la TABLA VII para su uso.

TABLA VII
ESPECIFICACIONES PARA CEMENTO ASFÁLTICO POR SU GRADO DE PENETRACIÓN (MOP-001-F-2002)

<i>Ensayos</i>	<i>Unidad</i>	<i>60-70 dmm</i>		<i>85-100 dmm</i>	
<i>Betún original</i>		<i>Mínimo</i>	<i>Máximo</i>	<i>Mínimo</i>	<i>Máximo</i>
<i>Penetración (25 °C, 100 gr, 5s)</i>	mm/10	60	70	85	100
<i>Punto de ablandamiento A y B</i>	°C	48	57	45	53
<i>Índice de penetración</i>		-1,5	1,5	-1,5	1,5
<i>Ductilidad (25 °C, 5 cm/minuto)</i>	cm	100	-	100	-
<i>Contenido de agua (volumen)</i>	%	-	0,2	-	0,2
<i>Solubilidad en Tricloroetileno</i>	%	99	-	99	-
<i>Punto de inflamación, Copa Cleveland</i>	°C	232	-	232	-
<i>Densidad relativa 25 °C/25 °C</i>		1	-	1	-
<i>Ensayo de la mancha</i>		NEGATIVO		NEGATIVO	
<i>Contenido de parafinas</i>	%	-	2,2	-	2,2

Fuente: [4]

Asimismo, se nos facilitó el informe de PETROECUADOR para asfalto AC-20 que utilizamos en la presente investigación, que muestra valores de control que cumplen con las especificaciones según las normas nacionales INEN e internacionales ASTM, tal como se muestran en el ANEXO. Aun así, se realizaron tres ensayos para determinar sus propiedades que de igual forma serán comparadas conforme a las normas anteriormente mencionadas[17].

a) Gravedad Específica de Materiales Bituminosos Semi-Sólidos (Método del Picnómetro)

Este ensayo tiene como objetivo determinar la relación entre la masa por unidad de volumen del material asfáltico a la temperatura correspondiente según la norma y la masa por unidad de volumen de agua destilada a la misma temperatura, que puede ser 15.6 °C o 25 °C. Se lo realizó mediante el método del picnómetro bajo la norma ASTM D70 y AASHTO T228 [18], [19].

Se inició tomando el peso del picnómetro junto con su tapón limpio, vacío y completamente seco. Asimismo, se agregó agua destilada a temperatura de 25 °C dentro del picnómetro más el tapón evitando que haya burbujas de aires para tomar su peso.



Fig. 24. Peso del picnómetro vacío para determinar la gravedad específica del Cemento Asfáltico AC-20.

Mientras tanto, se calentó el cemento asfáltico hasta que su consistencia sea fluida y trabajable sin sobrecalentarla. Se llenó el picnómetro con el cemento asfáltico hasta 3/4 partes de su capacidad tratando de evitar que se formen burbujas de aire, se dejó enfriar durante 30 minutos para luego obtener su peso. Finalmente, se agregó agua destilada hasta completar su volumen restante, se tapó y se llevó a baño maría por 30 minutos a una temperatura de 25 °C para estabilizar la temperatura, asimismo, pasado el tiempo establecido se retiró del baño maría y se obtuvo el peso de la muestra.

Con los pesos obtenidos, se calcula la gravedad específica mediante la siguiente fórmula:

$$G_b = \frac{C - A}{(B - A) - (D - C)} \quad (12)$$

Donde,

- A** Peso del picnómetro.
- B** Peso del picnómetro con agua destilada a 25 °C.
- C** Peso del picnómetro parcialmente lleno con cemento asfáltico.
- D** Peso del picnómetro con cemento asfáltico y agua destilada a 25 °C.

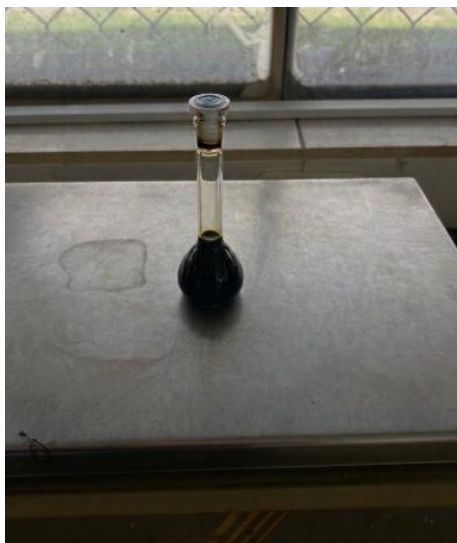


Fig. 25. Peso de la Muestra.

b) Punto de Ablandamiento de materiales bituminosos (Método del Anillo y Bola)

El objetivo de este ensayo es determinar la temperatura en la que el cemento asfáltico alcanza un punto de ablandamiento, refiriéndose a que pierde rigidez, mediante el método del anillo y bola. Fue realizado bajo la norma ASTM D36, AASHTO T53 y la especificación de la MOP [4], [20]

Se inició preparando la muestra, se calentó el cemento asfáltico a una temperatura que no superará los 100 °C, asimismo, se calentó el anillo de bronce a una temperatura parecida a la del asfalto. Se llenó el anillo con el material hasta que quede por encima del mismo, enfriar la muestra durante una hora y a temperatura ambiente, para después retirar el exceso con una espátula caliente, haciendo que quede al ras.

Mientras tanto, se armó el equipo, colocando el soporte del anillo, la guía de la bola y el termómetro dentro del recipiente de vidrio y se llenó el mismo con agua destilada hasta 5 cm por encima del anillo, teniendo como referencia la parte superior de este.

Se introdujo la bola dentro del recipiente, no sobre la muestra, a una temperatura de 25 °C durante un tiempo establecido de 15 minutos, para esto se utilizó una manta electrothermal que permitió controlar la temperatura durante todo el ensayo. Posteriormente, se colocó la bola sobre la muestra ayudándonos de la guía para que quede centrada. Se aplicó calor de forma que

la temperatura aumente progresivamente 5 ± 0.5 °C por minuto, hasta que la bola arrastrada por el material que va alcanzando su punto de ablandamiento, toque el fondo del recipiente [20].

Se tomó la temperatura del termómetro en el momento que la muestra tocó el fondo, que nos indica que el material ya alcanzó su punto de ablandamiento. Se repitió esto dos veces más, con el fin de obtener varios resultados y promediar.



Fig. 26. Ensayo de Punto de Ablandamiento.

c) Punto de inflamación y combustión de materiales bituminosos (Copa abierta de Cleveland)

Este ensayo permite determinar la temperatura en la que se produce un destello al aplicar una llama de prueba para el punto de inflamación, mientras que, para el punto de combustión se toma la temperatura en la que el material arde de forma continua al menos 5 segundos según las normas ASTM D92 y AASHTO T48 [21]

Se llenó la copa abierta de Cleveland con el cemento asfáltico hasta la línea de aforo. A continuación, se aplicó calor de forma que la temperatura no aumente más de 16.5 °C por minuto hasta que se acercó al punto por debajo de inflamación probable. Una vez aquí, se redujo la velocidad para que aumente 5 a 6 °C por minuto [21]

Se pasó la llama de prueba de aproximadamente 3.2 mm y 4.8 mm de diámetro según la norma aplicada en el ensayo. Para el punto de inflamación, se tomó la temperatura en el momento que apareció un destello, mientras que, para el punto de combustión se tomó la temperatura en el instante donde el material arde de forma continua durante al menos 5 segundos [21].

B. FASE II

En esta fase se diseñaron las mezclas asfálticas en calientes mediante el método Marshall, con el objetivo de evaluar el efecto de los materiales ante diferentes porcentajes de cemento asfáltico y en determinar el contenido óptimo de cemento asfáltico que cumpla con todas las especificaciones según las normas vigentes para mezclas asfálticas en caliente de tráfico pesado. Los criterios para el diseño se adoptaron bajo las exigencias de la normativa ecuatoriana (MOP-001-F-2002) y la Norma Ecuatoriana Vial NEVI-12 (MTOP), tal como se muestran en las TABLAS VIII y IX respectivamente.

TABLA VIII
ESPECIFICACIONES PARA ENSAYOS DE ACUERDO CON EL METODO MARSHALL (MOP-001-F-2002)

<i>Ensayos de acuerdo al método Marshall</i>	<i>Tipo de Tráfico</i>					
	<i>Pesado</i>		<i>Medio</i>		<i>Liviano</i>	
	<i>Mín</i>	<i>Máx</i>	<i>Mín</i>	<i>Máx</i>	<i>Mín</i>	<i>Máx</i>
<i>Nº de golpes</i>	75		50		35	
<i>Estabilidad (lb)</i>	1800	-	1200	-	750	-
<i>Flujo (pulg/100)</i>	8	16	8	18	8	20
<i>% vacíos con aire:</i>						
<i>Carpeta</i>	3	5	3	5	3	5
<i>Base</i>	3	8	3	8	3	8

TABLA IX
VALORES MINIMOS MÉTODO MARSHALL PARA VMA

<i>TMN,</i>	<i>VMA mínimo, %</i>		
	<i>Vacios de Aire de Diseño, %</i>		
<i>mm</i>	<i>3,0</i>	<i>4,0</i>	<i>5,0</i>
<i>4,75</i>	16	17	18
<i>9,5</i>	14	15	16
<i>12,5</i>	13	14	15
<i>19</i>	12	13	14

Fuente:

Para esto, se elaboraron dos diseños de mezclas: una mezcla convencional con el 100% de materiales nuevos y una mezcla modificada constituida del 80% de agregados nuevos y 20% de agregados reciclados (RAP). Para asegurar la correcta distribución de los tamaños de los agregados, se definieron dos dosificaciones para cada mezcla asegurando que cumpla con la faja granulométrica según las especificaciones del MOP-001-F-2002

1) Elaboración de briquetas utilizando agregados nuevos y agregados reciclados

Las briquetas fueron elaboradas en el laboratorio de la constructora “JEAL Construcciones” según lo establecido en la norma ASTM D6926 para la preparación y compactación de muestras mediante el método Marshall. Para cada porcentaje de cemento asfáltico se elaboró 3 briquetas de 101,6 mm (4 pulgadas) de diámetro y 63.5 mm (2,5 pulgadas) de altura; se inició pesando la cantidad necesaria de agregados grueso y finos según su dosificación previamente establecida. Posterior a esto, se calentó los agregados y el cemento asfáltico tipo AC-20 hasta que sus temperaturas estuvieran dentro de los rangos establecidos para la compactación con la ayuda de un termómetro, siendo estos valores entre 140°C y 160°C.



Fig. 27. Temperatura de la mezcla asfáltica

Una vez alcanzada las temperaturas deseadas, se mezclaron los materiales variando el contenido de cemento asfáltico en incrementos de 0.5% dentro de un rango de 5% al 7.5% con respecto al peso total de la muestra. Inmediatamente después, se colocó la mezcla a una temperatura entre 140°C y 160°C en los moldes cilíndricos de acero, que previamente fueron calentados para evitar la pérdida de temperatura por conducción. Con la ayuda de una espátula

caliente se varilló 15 veces alrededor y 10 veces en el centro, con el fin de eliminar vacíos iniciales y que la mezcla sea más uniforme antes de compactar.

Se compactó con un martillo mecánico Marshall deslizante de 10 libras con una altura de caída de 18 pulgadas, dando 75 golpes por cada cara de la briqueta que corresponde a los criterios de diseño para tráfico pesado. Finalmente, las briquetas se dejaron enfriar a temperatura ambiente por 24 horas, para posterior ese lapso ser extraídos con un extractor de briquetas para ensayos posteriores. Se elaboraron 18 briquetas para la mezcla convencional y 18 para la mezcla modificada, siendo un total de 36 briquetas, tres por cada uno de los seis porcentajes de contenido de asfalto.



Fig. 28. Proceso de compactación de la mezcla asfáltica

2) Método Marshall de Diseño de Mezclas (ASTM D6926)

Después de la elaboración y compactación de las briquetas, se realizó los ensayos y cálculos para determinar las propiedades volumétricas que describe la relación de espacio entre las fases sólida (agregados), líquida (asfalto) y gaseosa (vacíos), en la que se componen la estructura del pavimento compactado [11].

a) Gravedad Específica Combinada de los Agregados

Las gravedades específicas se obtuvieron de forma independiente para cada tamaño de agregado pétreo en la Fase I. Mientras que la gravedad específica combinada del total de los agregados se calculó como un promedio ponderado de las fracciones constituyentes, considerando el porcentaje de cada material en la mezcla mediante las siguientes fórmulas [11]:

i) *Gravedad Específica Bulk (G_{sb})*

$$G_{sb} = \frac{100}{\frac{P_1}{G_{sb1}} + \frac{P_2}{G_{sb2}} + \dots + \frac{P_n}{G_{sbn}}} \quad (13)$$

Donde,

$G_{sb1}, G_{sb2}, G_{sbn}$ Gravedad Específica Bulk de cada agregado.

P_1, P_2, P_n Porcentaje de cada agregado en la mezcla.

ii) *Gravedad Específica Aparente (G_{sa})*

$$G_{sa} = \frac{100}{\frac{P_1}{G_{sa1}} + \frac{P_2}{G_{sa2}} + \dots + \frac{P_n}{G_{san}}} \quad (14)$$

Donde,

G_{sa1}, G_{sa}, G_{san} Gravedad Específica Aparente de cada agregado.

P_1, P_2, P_n Porcentaje de cada agregado en la mezcla.

b) *Gravedad Específica Teórica Máxima de la Mezcla Suelta (G_{mm}) o Ensayo RICE*

Se define como el peso específico de la mezcla suelta sin vacíos de aire, y representa un parámetro fundamental para el análisis volumétrico [22]. Se lo realizó de forma experimental bajo las normas ASTM D2041/AASHTO T209 en el laboratorio de la planta de asfalto. Para el ensayo, se disgregó una muestra suelta de la mezcla, se dejó enfriar a temperatura ambiente para pesar el material seco de acuerdo con lo indicado al tamaño máximo nominal según la TABLA X y se colocó el material en un recipiente vacío metálico. Se sumergió el material en agua a 25 °C y se aplicó un vacío parcial con la ayuda de una bomba de presión de aire por unos 15 minutos de forma continua, para extraer el aire atrapado en la mezcla.

Luego de los 15 minutos, se llenó el recipiente con agua y se enrasó con la ayuda de una placa de vidrio para evitar que se quede alguna burbuja dentro, posterior a esto se pesó el

recipiente con la placa. Finalmente, también se pesó el recipiente lleno solamente con agua más la placa.

Se utilizó la siguiente fórmula para su cálculo:

$$G_{mm} = \frac{A}{A + B - C} \quad (15)$$

Donde,

A Peso de la muestra seca de la mezcla suelta en el aire.

B Peso del recipiente lleno con agua más placa de vidrio a 25 °C.

C Peso del recipiente lleno con agua más muestra sumergida a 25 °C y la placa de vidrio.

TABLA X
PESOS MÍNIMOS DE LAS MUESTRAS PARA ENSAYO RICE

<i>Tamaño de la partícula más grande del agregado de la mezcla</i>	<i>Peso mínimo de las muestras</i>
<i>Tamiz</i>	<i>gr</i>
1(in)	2500
¾ (in)	2000
½ (in)	1500
3/8(in)	1000
No. 4	500

Fuente: [22]

Este ensayo se repitió para cada porcentaje de cemento asfáltico de ambas mezclas.

c) Gravedad Específica Bulk de la Mezcla Compactada (G_{mb})

Este parámetro determina el peso específico volumétrico real de la briqueta compactada en condición saturada superficialmente seca y se obtuvo mediante el peso en tres condiciones (aire, SSS y sumergida). Se determinó conforme a la norma ASTM D2726, donde las briquetas previamente desmoldadas se pesaron en seco, posteriormente se sumergieron a un baño de agua

a 25 °C durante un lapso de 3 a 5 minutos para registrar su peso sumergido, y finalmente se sacaron del agua para secarlas de forma superficial con una franela para obtener el peso en estado SSS.

Se calcula por la siguiente fórmula:

$$G_{mb} = \frac{A}{B - C} \quad (16)$$

Donde,

A Peso de la briqueta seca en el aire.

B Peso de la briqueta saturada superficialmente seca.

C Peso de la briqueta sumergida en agua a 25 °C.



Fig. 29. Briquetas sumergidas en agua a 25 °C

Se repitió este proceso para las 36 briquetas elaboradas y compactadas de ambos diseños de mezclas asfálticas.

d) Gravedad Específica Efectiva del Agregado (G_{se})

La gravedad específica efectiva considera el volumen total de las partículas del agregado como los vacíos permeables que no fueron llenados por cemento asfáltico absorbido. Expresado mediante la fórmula [11]:

$$G_{se} = \frac{100 - P_b}{\frac{100}{G_{mm}} - \frac{P_b}{G_b}} \quad (17)$$

Donde,

P_b Porcentaje de cemento utilizado en la mezcla.

G_{mm} Gravedad específica teórica máxima suelta de la mezcla.

G_b Gravedad específica del cemento asfáltico AC-20 determinado en la Fase I.

e) Porcentaje de Vacíos de Aire

Representan el porcentaje del volumen total de aire dentro de la mezcla que no está ocupado por agregados ni por asfalto . Según los criterios en los que se va a basar esta investigación, el porcentaje de vacíos de aire es del 3% al 5% para tráfico pesado según las TABLA VIII [4]. Este cálculo se realizó sobre los promedios de las 3 briquetas por cada porcentaje de cemento asfáltico para disminuir la dispersión experimental y se deduce mediante la fórmula [11]:

$$V_a = \left(\frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} \right) * 100 \quad (18)$$

También puede estar expresada así:

$$V_a = \left(1 - \frac{G_{mb}}{G_{mm}} \right) * 100 \quad (19)$$

Donde,

G_{mb} Gravedad específica bulk promedio de la mezcla compactada.

G_{mm} Gravedad específica teórica máxima suelta de la mezcla.

f) Vacíos en el Agregado Mineral (VMA)

Es el espacio disponible entre las partículas de los agregados de la mezcla compactada, correspondiente al volumen ocupado por el aire como el volumen ocupado por el cemento asfáltico no absorbido [11].

La Norma Ecuatoriana NEVI-12 establece valores mínimos según el tamaño máximo nominal de la mezcla mostrados en la TABLA IX [23] y el % de vacíos (% Va) establecido anteriormente en el diseño. Se determinó mediante la siguiente ecuación [11]:

$$VMA = 100 - \left(\frac{G_{mb} * P_s}{G_{sb}} \right) \quad (20)$$

Donde,

G_{mb} Gravedad específica bulk promedio de la mezcla compactada.

G_{sb} Gravedad específica bulk de los agregados.

P_s Porcentaje de agregados en la mezcla.

g) Vacíos Llenos de Asfalto (VFA)

Se entiende como el porcentaje del VMA que se encuentra ocupado por el cemento asfáltico en los agregados. Permitiendo verificar que la mezcla tuviera una cantidad suficiente de asfalto que garantice durabilidad, evitando un exceso de ligante asfáltico que pueda generar exudación o comprometa su estabilidad [11], [24].

De acuerdo con las tolerancias permitidas en la TABLA XVI de la MOP-001-F-2002 para un tráfico pesado, este parámetro esta entre un rango del 65% al 75% para asegurar durabilidad [4]. Se calculó mediante la siguiente fórmula:

$$VFA = \left(\frac{VMA - V_a}{VMA} \right) * 100 \quad (21)$$

Donde,

VMA Porcentaje de Vacíos en el Agregado Mineral.

V_a Porcentaje de Vacíos de Aire.

h) Porcentaje de asfalto absorbido (P_{ba})

Corresponde a la cantidad de cemento asfáltico que es absorbida por los poros permeables de los agregados en la mezcla. Este porcentaje no contribuye a la adhesión o cohesión de los componentes de la mezcla.

Permitió establecer la cantidad de ligante asfáltico es absorbida por los agregados y calcular posteriormente el contenido de asfalto efectivo de la mezcla. Se calcula según la fórmula siguiente:

$$P_{ba} = 100 * \left(\frac{G_{se} - G_{sb}}{G_{sb} * G_{se}} \right) * G_b \quad (22)$$

Donde,

G_{se} Gravedad específica efectiva de la mezcla.

G_{sb} Gravedad específica bulk de los agregados combinada.

G_b Gravedad específica del cemento asfáltico AC-20.

i) Contenido de Asfalto Efectivo (P_{be})

Corresponde a la cantidad neta de cemento asfáltico que permanece de forma superficial del agregado, disponible para recubrir y proporcionar cohesión de los agregados [9], [11]. Se calculó de la diferencia del porcentaje de cemento asfáltico absorbido en la mezcla y el contenido asfáltico total de la mezcla, mediante la fórmula [11]:

$$P_{be} = P_b - \left(\frac{P_{ba}}{100} * P_s \right) \quad (23)$$

Donde,

P_b Gravedad específica efectiva de la mezcla.

G_{ba} Gravedad específica bulk de los agregados combinada.

G_b Gravedad específica del cemento asfáltico AC-20.

j) Estabilidad

En este ensayo se evalúa la resistencia máxima a la rotura por compresión radial que tiene la briqueta compactada a una temperatura establecida en la normativa ASTM D6927. Se sumergieron las briquetas a baño maría durante un periodo de 30 minutos a una temperatura constante de 60 ± 1 °C. Una vez transcurrido este tiempo, fueron colocadas rápidamente en las mordazas de la prensa Marshall (marca Humbolt), se aplicó una velocidad de deformación constante y uniforme de 2 pulgadas por minutos (50.8 mm/min) hasta alcanzar su punto de rotura.



Fig. 30. Prensa Marshall

Con el propósito de cumplir con los requisitos de desempeño establecido para tráfico pesado, los valores de estabilidad deben ser igual o superior a 1800 lb según la norma ecuatoriana MOP-001-F-2002 tal como se muestran en la TABLA VIII [4].

La norma establece que las briquetas deben tener una altura nominal de 63.5 mm (2.5 pulg), sin embargo, ya que puede existir variaciones al momento de compactar y pueden presentar ciertas diferencias con respecto al volumen y dimensiones. Por ese motivo, los valores de estabilidad fueron corregidos mediante el factor de ajuste por altura indicado en el Anexo que corresponde a la tabla de corrección de la norma. Para esto se tomaron los espesores reales de cada briqueta, con la ayuda de un calibrador.

k) Flujo

Este parámetro mide de manera simultánea la deformación plástica vertical de la briqueta al aplicarse una carga hasta el punto exacto en el que se registra su rotura o falla. Durante el ensayo, la lectura de esta deformación se registró mediante un medidor de flujo digital (dial) del equipo Marshall, expresándolo en unidades de centésimas de pulgada (1/100 pulg) o en milímetros, conforme con las especificaciones de la norma ASTM D6927

Para el cumplimiento de los requisitos para la mezcla, está entre los rangos de 8 a 16 (“/100) impuesto por la normativa ecuatoriana MOP-001-F-2002, tal como se muestran en la TABLA VIII [4].

l) Contenido Óptimo del Cemento Asfáltico AC-20

Se determina mediante el análisis gráfico de las curvas realizadas a partir de los resultados volumétricos obtenidos en el Método Marshall. Se realizó las curvas de Gmb, Gmm, vacíos de aire, VMA, VFA, estabilidad y flujo en función del porcentaje de cemento asfáltico empleado para cada diseño. Según el Instituto de Asfalto se considera el porcentaje de cemento óptimo como el valor proyectado al 4% de volumen de vacíos, a su vez mediante el máximo valor que marca la curva de gravedad específica bulk, asimismo según el máximo valor de la curva de estabilidad [11]. Para esta investigación se determinó mediante el promedio de los valores proyectados en las gráficas.

C. FASE III

En esta última fase de la investigación se enfoca en comparar los resultados obtenidos para el Contenido óptimo de cemento asfáltico para cada diseño de mezcla: mezcla convencional con 100% agregados nuevos y la mezcla modificada que incorpora el 20% de agregado reciclado. Una vez obtenido el porcentaje óptimo se procedió a evaluar el comportamiento de ambos diseños, se desarrolló un análisis gráfico mediante diagramas de barras, esto para identificar de manera más sencilla cuál de las dos dosificaciones ofrece un mejor desempeño mecánico y volumétrico.

CAPÍTULO III.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

I. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

La fase experimental de esta investigación se centró en determinar la propiedades físico-mecánicas y volumétricas de una mezcla asfáltica modificada en caliente al incorporar un 20% de Pavimento Asfáltico Reciclado (RAP), comparándola con un diseño convencional que contempla el 100% de agregados vírgenes. Se analizaron seis contenidos de cemento asfáltico por cada mezcla mediante el Método Marshall conforme a las normas ASTM D6926 y ASTM D6927, los porcentajes de cemento asfáltico utilizados corresponden a un rango del 5% al 7.5%, en incrementos de 0.5%.

Los resultados obtenidos se analizaron de acuerdo con las exigencias establecidas en la especificación técnica ecuatoriana MOP-001-F-2002 [4].

A. FASE I

1) *Caracterización de los Agregados Nuevos y Reciclados*

a) *Contenido de Asfalto en el agregado reciclado (Método de la Centrifuga)*

TABLA XI
RESULTADOS DEL ENSAYO DE EXTRACCIÓN CONTENIDO DE ASFALTO EN LOS AGREGADOS RECICLADOS

<i>ENSAYO DE EXTRACCIÓN DE CONTENIDO DE ASFALTO EN LOS AGREGADOS RECICLADOS</i>	
<i>NORMA ASTM D2172</i>	
<i>Muestra 1</i>	6,24%
<i>Muestra 2</i>	6,15%
<i>Muestra 3</i>	5,43%
<i>Muestra 4</i>	4,94%
<i>Promedio</i>	5,69%

Los resultados y memorias de cálculo se encuentran detalladas en el Anexo 1.

Análisis: Los resultados obtenidos mediante el método de la centrífuga (ASTM D2172) determinaron que el pavimento asfáltico reciclado (RAP) obtenido de la Vía Jaloa - El Guasmo posee un porcentaje de contenido de asfalto del 5,69%. Se optó por tomar el valor promediado

debido a la pequeña variación que existe entre las muestras que se observa en la TABLA XI, la cual es una respuesta clara de que el material ha experimentado un desgaste por tráfico y cambios climáticos a lo largo del tiempo. Resulta ser un indicador positivo para el diseño, ya que este asfalto envejecido actúa como un pre-recubrimiento en el agregado reciclado, lo cual se deduce como menor porosidad y cantidad de cemento asfáltico virgen necesario para elaborar las briquetas mediante el Método Marshall.

b) Análisis granulométrico de los agregados

i) Agregados Nuevos

Este análisis se realizó de manera independiente a cada uno de los agregados para entender su distribución de partículas.

TABLA XII
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE AGREGADO GRUESO 3/4" NUEVO

<i>ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE AGREGADO GRUESO 3/4"</i>					
<i>NORMA ASTM C136</i>					
<i>TMN =</i>		<i>12,7 mm</i>		<i>o</i>	
				<i>1/2 pulg</i>	
<i>Nº</i>	<i>Tamiz</i>	<i>Peso Ret.</i>	<i>Peso Ret.</i>	<i>% Retenido</i>	<i>% Que pasa</i>
<i>pulg</i>	<i>Abertura</i>	<i>Parcial</i>	<i>Acumulado</i>	<i>[%]</i>	<i>[%]</i>
	<i>[mm]</i>	<i>[gr]</i>	<i>[gr]</i>		
<i>3/4 in</i>	<i>19,00</i>	0,0	0,0	0,00	100,0
<i>1/2 in</i>	<i>12,70</i>	1945,0	1945,0	40,71	59,29
<i>3/8 in</i>	<i>9,50</i>	2059,0	4004,0	83,80	16,20
<i>No. 4</i>	<i>4,75</i>	685,0	4689,0	98,14	1,86
<i>No. 8</i>	<i>2,36</i>	25,0	4714,0	98,66	1,34
<i>No. 50</i>	<i>0,30</i>	0,0	4778,0	100,0	0,00
<i>No. 200</i>	<i>0,075</i>	0,0	4778,0	100,0	0,00
<i>FONDO</i>					
<i>Total</i>		4778,0	gr		

TABLA XIII
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE AGREGADO GRUESO 3/8" NUEVO

<i>ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE AGREGADO GRUESO 3/8"</i>					
<i>NORMA ASTM C136</i>					
<i>TMN =</i>		<i>12,7 mm</i>		<i>o</i>	
				<i>1/2 pulg</i>	
<i>Tamiz</i>	<i>Abertura</i>	<i>Peso Ret. Parcial</i>	<i>Peso Ret. Acumulado</i>	<i>% Retenido</i>	<i>% Que pasa</i>
<i>Nº</i>	<i>pulg</i>	<i>[gr]</i>	<i>[gr]</i>	<i>[%]</i>	<i>[%]</i>
<i>1/2 in</i>	<i>12,70</i>	0,0	0,0	0,00	100,00
<i>3/8 in</i>	<i>9,50</i>	5,0	5,0	0,11	99,89
<i>No. 4</i>	<i>4,75</i>	3604,0	3609,0	82,06	17,94
<i>No. 8</i>	<i>2,36</i>	630,0	4239,0	96,38	3,62
<i>No. 50</i>	<i>0,30</i>	0,0	4398,0	100,0	0,00
<i>No. 200</i>	<i>0,075</i>	0,0	4398,0	100,0	0,00
<i>FONDO</i>					
<i>Total</i>		<i>4398,0 gr</i>			

TABLA XIV
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE AGREGADO FINO POLVO DE PIEDRA

<i>ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE AGREGADO FINO - POLVO DE PIEDRA</i>					
<i>NORMA ASTM C136</i>					
<i>Peso seco inicial</i>		<i>3662,8 gr</i>		<i>MF =</i>	
				<i>8,16</i>	
<i>Tamiz</i>	<i>Abertura</i>	<i>Peso Ret. Parcial</i>	<i>Peso Ret. Acumulado</i>	<i>% Retenido</i>	<i>% Que pasa</i>
<i>Nº</i>	<i>pulg</i>	<i>[gr]</i>	<i>[gr]</i>	<i>[%]</i>	<i>[%]</i>
<i>3/4 in</i>	<i>19,00</i>	0	0	0	100
<i>1/2 in</i>	<i>12,70</i>	0	0	0	100
<i>3/8 in</i>	<i>9,50</i>	0	0	0	100
<i>No. 4</i>	<i>4,75</i>	78	78	2	98
<i>Pasa No. 4</i>		3585	3585	98	
<i>No. 8</i>	<i>2,36</i>	86	86	17	81
<i>No. 16</i>	<i>1,18</i>	109	196	38	60
<i>No. 30</i>	<i>0,60</i>	90	286	56	42
<i>No. 50</i>	<i>0,30</i>	67	352	69	29
<i>No. 100</i>	<i>0,15</i>	48	401	78	19
<i>No. 200</i>	<i>0,08</i>	34	435	85	13
<i>Pasa No. 200</i>		65	500	13	
<i>Total</i>		<i>499,9</i>			
<i>Peso antes de lavado</i>		<i>499,9</i>	<i>Peso cuarteo antes del lavado</i>		<i>499,90</i>
<i>Peso despues de lavado</i>			<i>Peso cuarteo despues de lavado</i>		<i>434,80</i>
<i>Total- diferencia</i>			<i>Diferencia o pasa el tamiz # 200</i>		<i>65,10</i>

Los resultados de los ensayos y las curvas granulométricas de cada agregado se detallan en los Anexos 2,3 y 4.

Análisis: El análisis de cada granulometría se realizó por tamizado conforme la norma ASTM C136, se lo ejecutó para las tres fracciones disponibles en la MINA KUMOCHI:

agregado grueso de 3/4" (19.0 mm), agregado de 3/8" (9.50 mm) y agregado fino (polvo de piedra). El ensayo de granulometría permitió identificar el Tamaño Máximo (TM) y el Tamaño Máximo Nominal (TMN) de los materiales para la mezcla. Para la fracción mayor, se consideró el tamiz de abertura de 3/4" (19.0 mm) como el Tamaño Máximo debido a que pasó el 100% del material, mientras que para el Tamaño Máximo Nominal se optó por el tamiz de abertura de 1/2" (12.70 mm) al ser el primer tamiz que retiene $\geq 10\%$ de material. Se identificó la gradación de cada una de las fracciones para combinarlos, de modo que cumpla con los requisitos para el diseño de una mezcla asfáltica en caliente según las especificaciones de la MOP.

ii) Agregados Reciclados (RAP)

Las tablas completas de los análisis granulométricos de cada muestra se detallan en los Anexo 5 y Anexo 6.

TABLA XV
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO AGREGADOS RECICLADOS – MUESTRA 1-2

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO AGREGADOS RECICLADOS				
NORMA ASTM C136				
AGREGADOS RECICLADOS MUESTRAS 1-2				
Nº	Tamiz Abertura [mm]	% Que pasa [%]	Especificaciones MOP- [% Que pasa]	
			Inferior	Superior
3/4 in	19,0	100,00	100	100
1/2 in	12,7	93,11	90	100
No. 4	4,75	65,51	44	74
No. 8	2,36	55,29	28	58
No. 50	0,30	19,20	5	21
No. 200	0,075	2,55	2	10

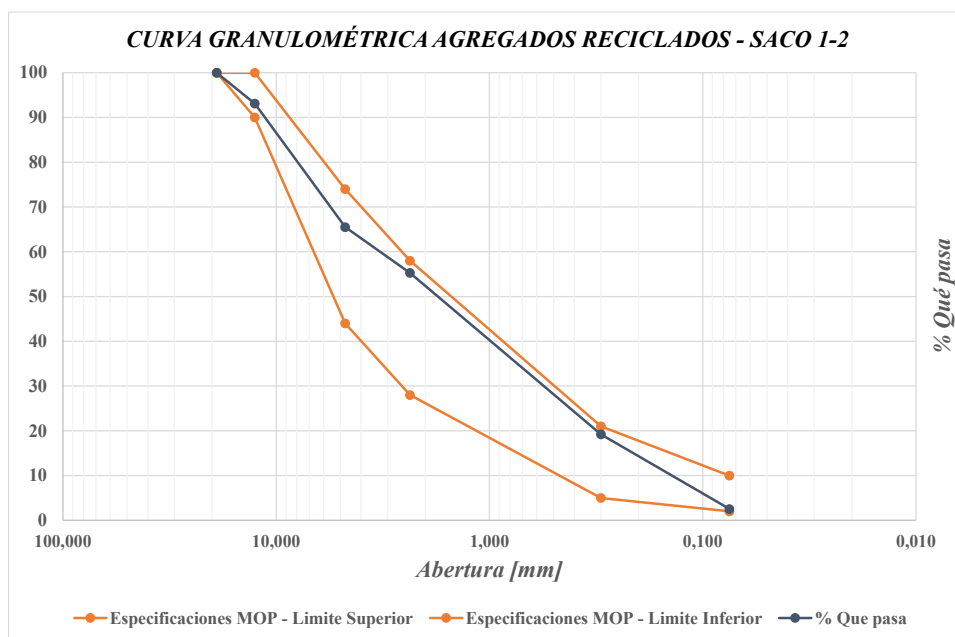


Fig. 31. Curva granulométrica del agregado RAP – Muestra 1-2

Análisis: El ensayo de granulometría del agregado grueso reciclado de la muestra 1 y 2 cumple con las especificaciones de la norma MOP-001-F-2002. En la Fig. 31 se puede visualizar que la curva granulométrica se encuentra entre los límites fijados para esta investigación, lo que indica una correcta distribución de tamaños de los agregados para obtener una mezcla asfáltica en caliente que cumpla frente a las solicitudes de tráfico pesado.

TABLA XVI
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO AGREGADOS RECICLADOS – MUESTRA 3-4

<i>ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO AGREGADOS RECICLADOS</i>				
<i>NORMA ASTM C136</i>				
<i>AGREGADOS RECICLADOS MUESTRAS 3-4</i>				
<i>Tamiz</i>	<i>Abertura [mm]</i>	<i>% Que pasa [%]</i>	<i>Especificaciones MOP-001- [% Que pasa]</i>	
<i>Nº pulg</i>			<i>Inferior</i>	<i>Superior</i>
<i>3/4 in</i>	<i>19,0</i>	100,00	100	100
<i>1/2 in</i>	<i>12,6</i>	91,17	90	100
<i>No. 4</i>	<i>4,75</i>	65,38	44	74
<i>No. 8</i>	<i>2,36</i>	46,88	28	58
<i>No. 50</i>	<i>0,30</i>	14,05	5	21
<i>No. 200</i>	<i>0,075</i>	2,28	2	10

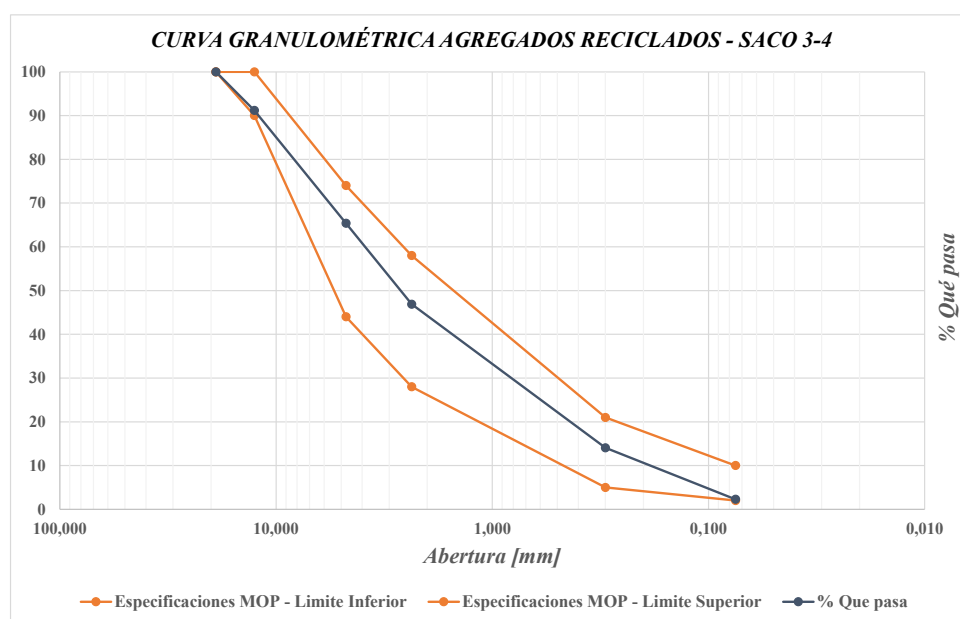


Fig. 32 Curva granulométrica del agregado RAP – Muestra 3-4

Análisis: Se observó que el agregado grueso reciclado de la muestra 3 y 4 también cumple con las especificaciones de la norma MOP-001-F-2002. En la Fig 32 se visualiza que la curva granulométrica se encuentra dentro de los límites fijados, lo que indica una distribución adecuada de tamaños de los agregados ideal para obtener una mezcla asfáltica en caliente que cumpla con las solicitudes necesarias para disipar las cargas por tráfico deseado.

c) *Gravedad Específica y Absorción de los Agregados*

i) *Gravedad Específica y Absorción de los Agregados Gruesos*

- *Gravedad Específica y Absorción del Agregado Grueso 3/4" (19.0 mm)*

TABLA XVII
RESULTADOS DE LA GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN AGREGADO GRUESO 3/4"

GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN AGREGADO GRUESO 3/4				
NORMA ASTM C127 ; NTE INEN 857:2010				
Gravedad específica de los agregados	Muestra 1	Muestra 2	Promedio	
<i>Gravedad específica seca Bulk</i>	2,546	2,538	2,542	gr/cm ³
<i>Gravedad específica saturada con superficie seca</i>	2,608	2,602	2,605	gr/cm ³
<i>Gravedad específica seca aparente</i>	2,715	2,711	2,713	gr/cm ³
<i>Absorción</i>	2,452	2,511	2,482	%

Los datos y resultados obtenidos en este ensayo se detallan en el Anexo 7.

Análisis: A partir de los resultados obtenidos en la TABLA XVII del agregado grueso de 3/4", indica que se obtuvo una gravedad específica bulk de 2.542 gr/cm³, una gravedad saturada superficialmente seca (SSS) de 2.605 gr/cm³, una gravedad aparente de 2.713 gr/cm³ y un porcentaje de absorción promedio de 2.48 %. Su valor de absorción ligeramente alto se debe a que el agregado presenta pequeños poros propios de sí misma.

- *Gravedad Específica y Absorción del Agregado Grueso 3/8" (9.50 mm)*

TABLA XVIII
RESULTADOS DE LA GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN AGREGADO GRUESO 3/8"

GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN AGREGADO GRUESO 3/8				
NORMA ASTM C127 ; NTE INEN 857:2010				
Gravedad específica de los agregados	Muestra 1	Muestra 2	Promedio	
<i>Gravedad específica seca Bulk</i>	2,517	2,510	2,514	gr/cm ³
<i>Gravedad específica saturada con superficie seca</i>	2,598	2,595	2,597	gr/cm ³
<i>Gravedad específica seca aparente</i>	2,740	2,744	2,742	gr/cm ³
<i>Absorción</i>	3,244	3,412	3,328	%

Los datos y resultados obtenidos en este ensayo se detallan en el Anexo 8.

Análisis: Con base a los datos del agregado grueso de 3/8", se establecieron una gravedad específica seca bulk de 2.541 gr/cm³, una gravedad saturada superficialmente seca de 2.597 gr/cm³, una gravedad aparente de 2.742 gr/cm³ y una absorción de 3.33 %. En comparación

con el valor de absorción del agregado de 3/4", es mayor debido a que en el proceso de trituración cuando la roca se rompe en pequeñas fracciones, los poros quedan expuestos de manera superficial provocando que absorba más.

- *Gravedad Específica y Absorción del Agregado Grueso RAP*

TABLA XIX
RESULTADOS DE LA GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN AGREGADO FINO POLVO DE PIEDRA

GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN AGREGADO FINO POLVO DE PIEDRA				
NORMA ASTM C128 ; NTE INEN 856:2010				
Gravedad específica de los agregados	Muestra 1	Muestra 2	Promedio	
<i>Gravedad específica seca Bulk</i>	2,398	2,493	2,446	gr/cm ³
<i>Gravedad específica saturada con superficie seca</i>	2,432	2,537	2,485	gr/cm ³
<i>Gravedad específica seca aparente</i>	2,482	2,607	2,545	gr/cm ³
<i>Absorción</i>	1,403	1,750	1,577	%

Los datos y resultados obtenidos en este ensayo se detallan en el Anexo 9.

Análisis: A partir de los resultados obtenidos para el polvo de piedra, se determinó una gravedad específica seca bulk de 2.4446 gr/cm³, una gravedad saturada (SSS) de 2.485 gr/cm³, una gravedad aparente de 2.545 gr/cm³ y una absorción de 1.57 %. Esto indica que el material tiene una estructura poco porosa, lo que asegura que funcionará para rellenar los espacios vacíos entre el agregado grueso.

ii) *Gravedad Específica y Absorción de los Agregados Finos*

- *Gravedad Específica y Absorción del Agregado Fino Polvo de piedra*

TABLA XX
RESULTADOS DE LA GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN AGREGADO GRUESO RAP

GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN AGREGADO GRUESO RAP				
NORMA ASTM C127 ; NTE INEN 857:2010				
Gravedad específica de los agregados	Muestra 1	Muestra 2	Promedio	
<i>Gravedad específica seca Bulk</i>	2,609	2,646	2,628	gr/cm ³
<i>Gravedad específica saturada con superficie seca</i>	2,659	2,707	2,683	gr/cm ³
<i>Gravedad específica seca aparente</i>	2,747	2,817	2,782	gr/cm ³
<i>Absorción</i>	1,928	2,29	2,109	%

Los datos y resultados obtenidos en este ensayo se detallan en el Anexo 10.

Análisis: Tomando los datos de la TABLA XX del agregado grueso reciclado, se calculó una gravedad específica seca bulk de 2.628 gr/cm³, una gravedad saturada superficialmente seca de 2.683 gr/cm³, una gravedad aparente de 2.782 gr/cm³ y una absorción de 2.109 %. Sus gravedades específicas altas se deben a que las partículas de RAP ya conservan una capa de asfalto envejecido adherida que altera su volumen.

- *Gravedad Específica y Absorción del Agregado Fino RAP*

TABLA XXI
RESULTADOS DE LA GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN AGREGADO FINO RAP

GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN AGREGADO FINO RAP			
NORMA ASTM C128 ; NTE INEN 856:2010			
Gravedad específica de los agregados	Muestra 1	Muestra 2	Promedio
<i>Gravedad específica seca Bulk</i>	2,446	2,432	2,439 gr/cm ³
<i>Gravedad específica saturada con superficie seca</i>	2,495	2,485	2,49 gr/cm ³
<i>Gravedad específica seca aparente</i>	2,571	2,567	2,569 gr/cm ³
<i>Absorción</i>	1,99	2,162	2,076 %

Los datos y resultados obtenidos en este ensayo se detallan en el Anexo 11.

Análisis: Analizando el material reciclado, se determinó una gravedad específica seca bulk de 2.439 gr/cm³, una gravedad saturada (SSS) de 2.49 gr/cm³, una aparente de 2.569 gr/cm³ y una absorción de 2.076%.

d) *Ensayo de Resistencia al desgaste por Abrasión (Máquina de los Ángeles)*

TABLA XXII
RESULTADO DEL ENSAYO DE RESISTENCIA AL DESGASTE POR ABRASIÓN

DETERMINACIÓN DEL VALOR DE LA DEGRADACIÓN DEL ÁRIDO GRUESO MEDIANTE EL USO DE LA MÁQUINA DE LOS ÁNGELES.	
NORMA ASTM C131	
Agregado Grueso	27,90%

Los resultados detallados se presentan en el Anexo 12.

Análisis: Se determinó un porcentaje del 27.90% del ensayo de desgaste para agregado grueso, conforme la normativa ASTM C131. Se encuentra por debajo del límite máximo permitido del 40% para carpetas asfálticas según las especificaciones de la MOP-001-F-2002.

2) Cemento Asfáltico

a) Propiedades del Cemento Asfáltico

TABLA XXIII
RESULTADOS DE LAS PROPIEDADES DEL CEMENTO ASFÁLTICO AC-20

<i>Propiedades del Cemento Asfáltico AC-20</i>	<i>Norma ASTM</i>	<i>Especificación MOP</i>		<i>Resultados</i>
		<i>Mín</i>	<i>Máx</i>	
<i>Gravedad Específica (gr/cm³)</i>	ASTM D70	1	-	1,0142
<i>Punto de Ablandamiento (°C)</i>	ASTM D36	48	57	55
<i>Punto de Inflamación, Copa Cleveland (°C)</i>	ASTM D92	232	-	292

Los datos y resultados obtenidos en este ensayo se detallan en los Anexos 14, 15 y 16.

Análisis: Mediante los resultados obtenidos para las propiedades del cementos asfáltico AC-20, se determinó una gravedad específica de 1.0142 gr/cm³, un punto de ablandamiento de 55 C y un punto de inflamación de 292 °C. Estos resultados cumplen con las especificaciones mínimas de la normativa ecuatoriana MOP-001-F-2002, clasificándolo como un material apto para su uso en el diseño de las mezclas.

B. FASE II

1) Método Marshall de Diseño de la Mezcla Convencional (ASTM D6926)

a) Diseño de la Mezcla Convencional

TABLA XXIV
DOSIFICACIÓN PATA MEZCLA CONVENCIONAL

<i>Mezcla Convencional 100% Agregado nuevo</i>		
<i>3/4"</i>	<i>12,0%</i>	<i>100%</i>
<i>3/8"</i>	<i>31,0%</i>	
<i>Polvo de piedra</i>	<i>57,0%</i>	

TABLA XXV
DISEÑO DE LA MEZCLA CONVENCIONAL

DISEÑO DE LA MEZCLA CONVENCIONAL - 100% AGREGADOS NUEVOS								
ASTM D6926								
Tamiz		Granulometría	Granulometría	Granulometría	Mezcla de Diseño	Media	Especificaciones MOP- 001-F-2002 [% Que pasa]	
Nº	Abertura	3/4"	3/8"	finos			Inferior	Superior
pulg	[mm]	12%	31%	57%				
3/4 in	19,00	12,00	31,00	57,00	100,00	100,00	100	100
1/2 in	12,700	7,12	31,00	57,00	95,12	95,00	90	100
No. 4	4,75	0,22	5,56	55,79	61,57	59,00	44	74
No. 8	2,360	0,16	1,12	46,15	47,43	43,00	28	58
No. 50	0,300	0,00	0,00	16,47	16,47	13,00	5	21
No. 200	0,08	0,00	0,00	7,27	7,27	6,00	2	10

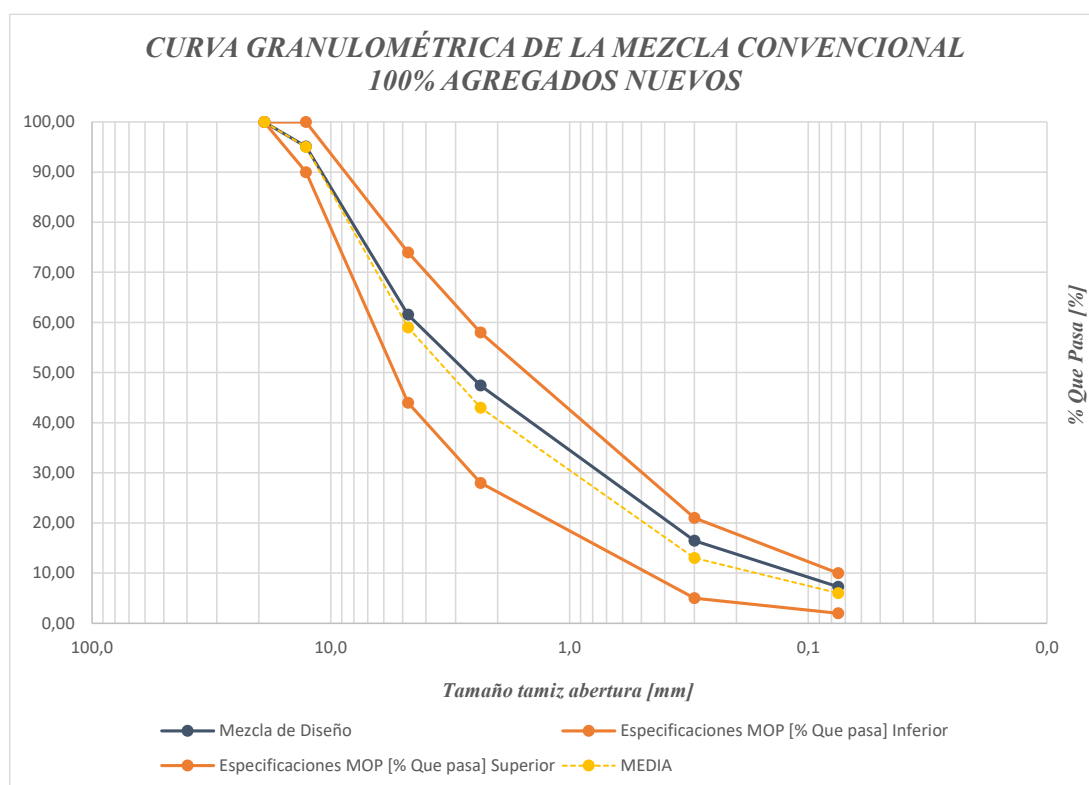


Fig. 33. Curva Granulométrica de la mezcla convencional.

Los resultados detallados se presentan en el Anexo 17.

Análisis: Para el diseño de la mezcla convencional constituida por el 100% de agregados vírgenes, se estableció una dosificación de los agregados para obtener una combinación que cumpla con las especificaciones, compuesta por un 12% de agregados de la fracción de 3/4", un 31% de 3/8" y el 57% de polvo de piedra. Al contrastar la curva granulométrica de la mezcla frente a las especificaciones de la MOP-001-F-2002 se observó que cumple conforme a lo establecido, porque se encuentra dentro de los rangos límites exigidos. Esto indica que la mezcla

tiene una distribución de agregados equilibrada y bien graduada, lo que garantiza que la mezcla final tenga la estabilidad necesaria para resistir las deformaciones.

b) Gravedad Específica Teórica Máxima (Gmm)

TABLA XXVI
RESULTADOS DEL ENSAYO RICE PARA CADA PORCENTAJE DE CEMENTO ASFÁLTICO

GRAVEDAD ESPECÍFICA TEÓRICA MÁXIMA DE LA MEZCLA CONVENCIONAL	
NORMA ASTM D 2041	
% Asfalto	Resultado
5,0%	2,393
5,5%	2,388
6,0%	2,383
6,5%	2,372
7,0%	2,354
7,5%	2,344

Los resultados detallados se presentan en el Anexo 19.

Análisis: Al evaluar los resultados obtenidos en el ensayo Rice. Se observa que los valores van disminuyendo a medida que se incrementa el porcentaje de asfalto. Para un 5% de asfalto se obtuvo un valor de 2.393, mientras que para un 7.5% de asfalto el valor disminuye a 2.344. Esto indica que al agregar más porcentaje de asfalto a la mezcla menor es su gravedad, lo cual es lo que se espera de la mezcla.

c) Tabla Método Marshall de mezcla convencional para obtener el porcentaje óptimo

TABLA XXVII
TABLA MÉTODO MARSHALL DE MEZCLA CONVENCIONAL

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL																							
DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL EN CALIENTE MÉTODO MARSHALL																									
NORMA ASTM D 6927																									
Ensayado por:		Camila Monserrath Montesdeoca																							
Tutor:		Ing. Rodrigo Iván Acosta Lozada, M.Sc																							
Gravedad Específica del Asfalto Gb =						1,0142 gr/cm3								Gsb de los Agregados =			2,478 gr/cm3			Gsa de los Agregados =			2,623 gr/cm3		
Nº Briqueta	% Asfalto	% Agregado	Altura mm	Altura cm	Volumen cm3	Peso de Briqueta			Gravedad Específica de la Mezcla					Volumen Total (Briquetas)			% Volumen de Vacíos			% Asfalto		Estabilidad			
						Aire gr	SSS gr	Agua gr	Bulk g/cm3	Teórica Máxima g/cm3	Efectiva g/cm3	Agregado	Vacíos (Va)	Asfalto VCA	Aire Va	Agregado Mineral VMA	Llenos de Asfalto VFA	Absorbido Pba	Efectivo Pbe	Estabilidad Ensayo kg	Corrección por altura	Estabilidad Corregida	Estabilidad Corregida Lb		
1	5,0	95,0	62,7	6,3	489,4	1104,8	1114,2	624,8	2,257	2,393	2,577	86,41	5,810	7,781	5,810	13,591	57,254	1,578	3,501	1669	1,020	1702,4	3745,2	10	
2			61,6	6,2	488,8	1097,4	1109,4	620,6	2,245											1217	1,049	1277,1	2809,6	13	
3			61,3	6,1	490,7	1108,6	1115,4	624,7	2,259											1073	1,059	1136,0	2499,3	11	
Promedio			61,9	6,2	489,6	1103,6	1113,0	623,4	2,254										Promedio				3018,0	11	
1	5,5	94,5	62,4	6,2	495,6	1120,8	1124,7	629,1	2,262	2,388	2,593	86,76	4,739	8,505	4,739	13,244	64,219	1,808	3,792	1902	1,028	1954,3	4299,5	11	
2			62,7	6,3	491,5	1124,5	1130,1	638,6	2,288											1106	1,020	1128,1	2481,9	12	
3			61,9	6,2	492	1119,5	1123,3	631,3	2,275											1461	1,040	1519,4	3342,8	14	
Promedio			62,3	6,2	493,0	1121,6	1126,0	633,0	2,275										Promedio				3374,7	12	
1	6,0	94,0	62,1	6,2	494,4	1118,2	1123,0	628,6	2,262	2,383	2,608	86,58	4,223	9,201	4,223	13,424	68,541	2,033	4,089	1617	1,035	1673,6	3681,9	13	
2			62,4	6,2	495,4	1143,8	1148,0	652,6	2,309											1928	1,028	1981,0	4358,2	15	
3			64,1	6,4	509,6	1160	1163,4	653,8	2,276											1950	0,985	1920,8	4225,7	16	
Promedio			62,9	6,3	499,8	1140,7	1144,8	645,0	2,282										Promedio				4088,6	15	
1	6,5	93,5	62,8	6,3	496,8	1130,3	1136,7	639,9	2,275	2,372	2,615	85,90	4,023	10,076	4,023	14,099	71,469	2,151	4,489	1507	1,018	1533,4	3373,4	18	
2			61,7	6,2	491,9	1119,7	1126,8	634,9	2,276											1748	1,046	1828,8	4023,5	17	
3			60,3	6,0	463	1054,9	1061,4	598,4	2,278											1081	1,090	1178,3	2592,2	13	
Promedio			61,6	6,2	483,9	1101,6	1108,3	624,4	2,277										Promedio				3329,7	16	
1	7,0	93,0	61,3	6,1	476,7	1077,2	1082,5	605,8	2,260	2,354	2,614	84,88	3,922	11,196	3,922	15,118	74,056	2,129	5,020	1252	1,059	1325,6	2916,2	18	
2			62,9	6,3	486,7	1098,1	1108,8	622,1	2,256											1081	1,015	1097,2	2413,9	17	
3			62,5	6,3	485,1	1100,8	1111,5	626,4	2,269											1217	1,025	1247,4	2744,3	19	
Promedio			62,2	6,2	482,8	1092,0	1100,9	618,1	2,262										Promedio				2691,5	18	
1	7,5	92,5	64,5	6,5	489,4	1104,8	1121,1	631,7	2,257	2,344	2,622	84,07	3,897	12,033	3,897	15,930	75,537	2,250	5,419	875	0,975	853,1	1876,9	20	
2			64,7	6,5	489	1106,9	1118,6	629,6	2,264											1156	0,970	1121,3	2466,9	19	
3			66,9	6,7	515,5	1152,4	1160,3	644,8	2,235											1141	0,925	1055,4	2321,9	21	
Promedio			65,4	6,5	498,0	1121,4	1133,3	635,4	2,252										Promedio				2221,9	20	

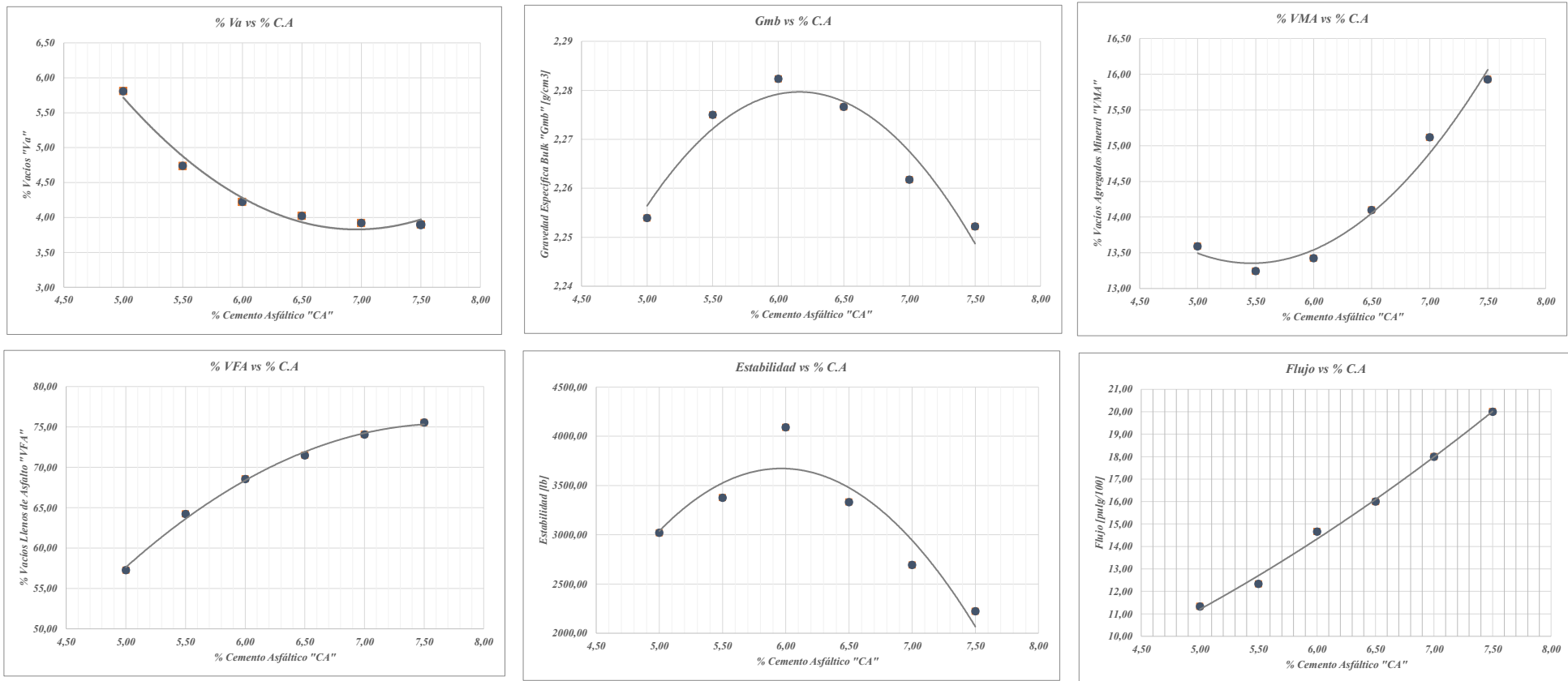


Fig. 34. Propiedades mecánicas y volumétricas de la mezcla asfáltica convencional.

Análisis: Con la finalidad de evaluar las propiedades volumétricas de la mezcla asfálticas convencional, elaborada con material 100% nuevo, se obtuvieron los resultados mostrados en la TABLA XXVI a partir de los ensayos de laboratorio tras el proceso de compactación y rotura de las briquetas. Los datos mostrados y las curvas de la Fig. 34 exponen el comportamiento de los seis parámetros fundamentales del método Marshall agregando un rango entre 5% a 7.5% de porcentaje de cemento asfáltico a la mezcla.

d) *Porcentaje de Vacíos de Aire (Va) vs Porcentaje de Cemento Asfáltico*

TABLA XXVIII
% DE VACIOS DE AIRE VS % DE CEMENTO ASFÁLTICO MEZCLA CONVENCIONAL

<i>% C.A</i>	<i>Mezcla Convencional</i>
<i>Pb</i>	<i>Va</i>
5,00	5,40
5,50	4,48
6,00	4,02
6,50	3,96
7,00	4,00
7,50	3,76

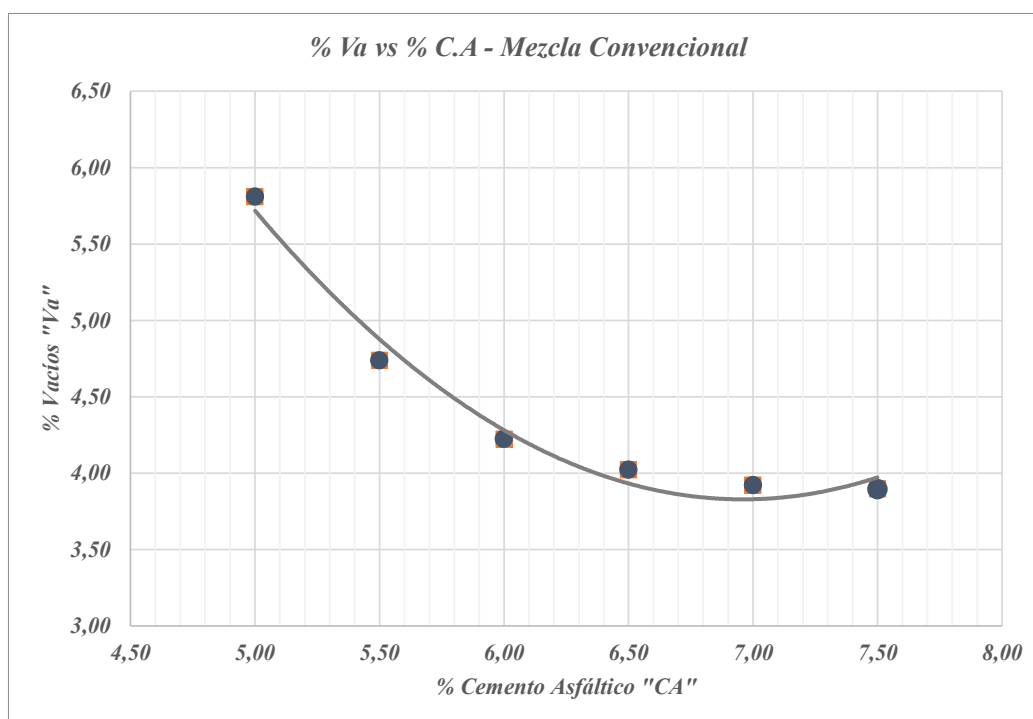


Fig. 35. Comportamiento de %Va vs %C.A

Los resultados obtenidos se muestran en la TABLA XXVII

Análisis: La proporción de vacíos de aire en la mezcla asfáltica muestra una clara tendencia decreciente conforme se incrementa la cantidad de cemento asfáltico, este es un parámetro de durabilidad, ya que garantiza el espacio necesario para que el asfalto se reacomode internamente cuando sea sometida a cargas de tráfico. Los resultados muestran que para el 5% su valor de vacíos es de 5.810%, mientras que para el 7.5% su valor disminuye hasta un 3.897%. Es fundamental mantener este parámetro dentro de los rangos exigidos por la norma, si la mezcla presentara porcentajes de vacíos mayor al 5%, se entiende como que facilita el ingreso de agua y aire en la mezcla, acelerando la oxidación y el desprendimiento de los agregados. Por el contrario, un contenido menor a 3% saturaría la estructura del espécimen, provocando el fenómeno de exudación. Se puede visualizar en la Fig. 35 que los valores obtenidos oscilan entre esos rangos, a excepción del 5.5% de cemento asfáltico cumpliendo con las especificaciones de la MOP-001-F-2002 entre 3% a 5%.

e) Gravedad Específica Bulk de la Mezcla (Gmb) vs Porcentaje de Cemento Asfáltico

TABLA XXIX
Gmb VS % DE CEMENTO ASFÁLTICO MEZCLA CONVENCIONAL

<i>% C.A</i>	<i>Mezcla Convencional</i>
<i>Pb</i>	<i>Gmb</i>
<i>5,00</i>	<i>2,254</i>
<i>5,50</i>	<i>2,275</i>
<i>6,00</i>	<i>2,282</i>
<i>6,50</i>	<i>2,277</i>
<i>7,00</i>	<i>2,262</i>
<i>7,50</i>	<i>2,252</i>

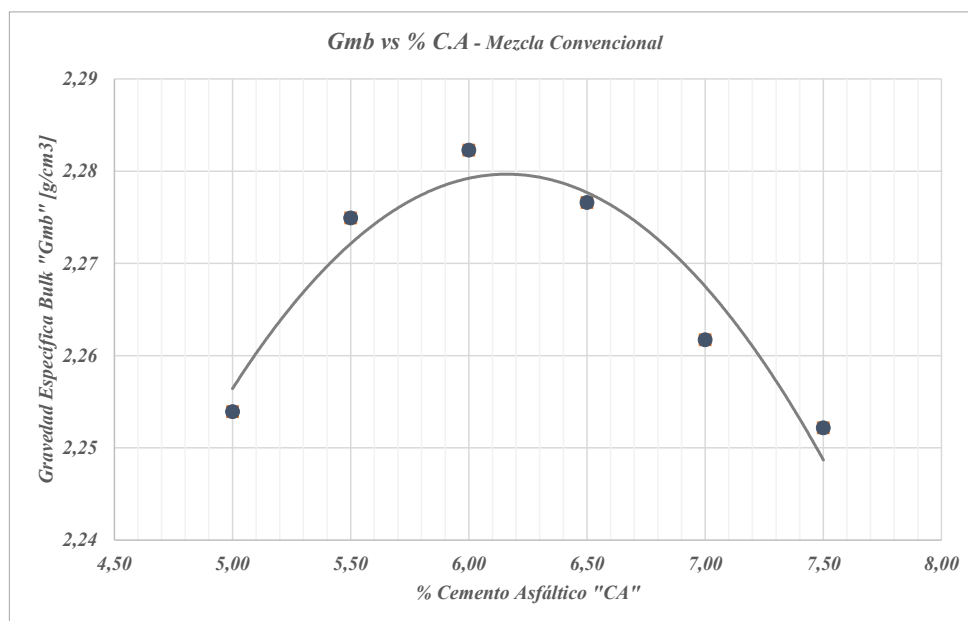


Fig. 36. Comportamiento de Gmb vs %C.A

Los resultados obtenidos se muestran en la TABLA XXVIII.

Análisis: El peso específico bulk de la mezcla representa la densidad real, la curva describe para el 6% es su punto máximo con un valor de 2.282 gr/cm³. Una vez superado este valor, la densidad empieza a decaer paulatinamente hasta llegar a 2.252 gr/cm³ con un 7%. Esto demuestra que en los puntos iniciales el asfalto actúa como un lubricante que ayuda a los agregados a acomodarse estrechamente al momento de compactación, sin embargo, al agregar más cantidad de asfalto hace el efecto de separar los agregados, aumentando el volumen provocando así el efecto de ahuellamiento.

f) Vacíos en el Agregado Mineral (VMA) vs Porcentaje de Cemento Asfáltico

TABLA XXX
VMA VS % DE CEMENTO ASFÁLTICO MEZCLA CONVENCIONAL

% C.A	Mezcla Convencional
Pb	VMA
5,00	13,591
5,50	13,244
6,00	13,424
6,50	14,099
7,00	15,118
7,50	15,930

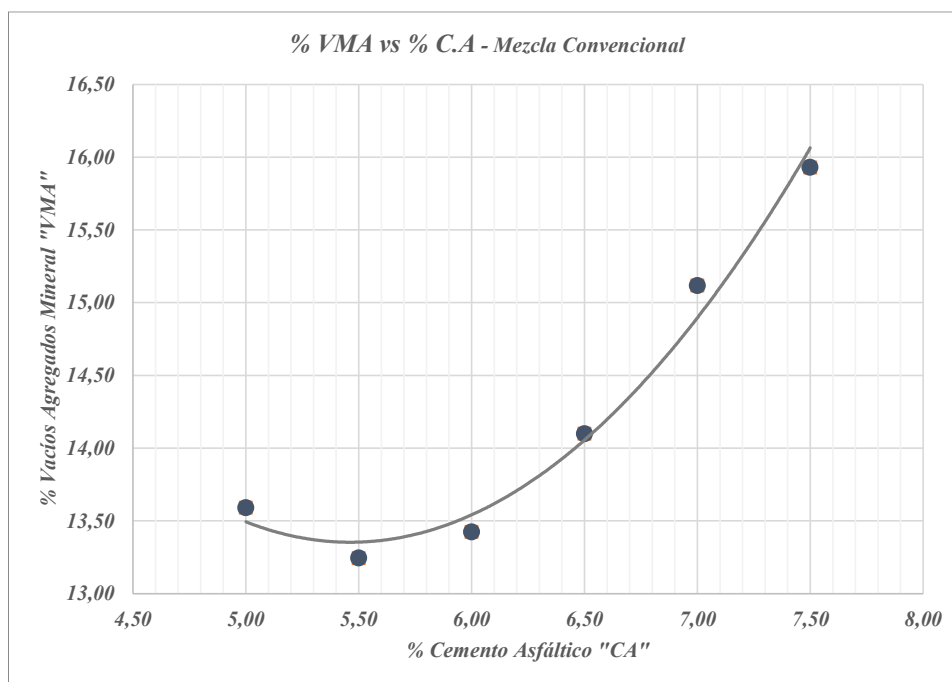


Fig. 37. Comportamiento de VMA vs %C.A

Los resultados obtenidos se presentan en la TABLA XXIX.

Análisis: Este parámetro está ligado al TMN de la mezcla de diseño, en este caso para este diseño el TMN es de 1/2", los resultados describen que el punto más bajo se da con el 5.5% con un valor de 13.244%, que representa cuando la mezcla se vuelve más densa por si sola, antes de que el exceso de cemento asfáltico comience a separar los agregados, donde su porcentaje empieza a aumentar, teniendo valores para 7.5% de 15.930%, como se puede visualizar en la Fig. 37. Según las especificaciones el valor mínimo para agregados de 1/2" es del 13%, cumpliendo así con lo requerido para el diseño.

g) Vacíos Llenos de Asfalto (VFA) vs Porcentaje de Cemento Asfáltico

TABLA XXXI
VFA VS % DE CEMENTO ASFÁLTICO MEZCLA CONVENCIONAL

% C.A	Mezcla Convencional
Pb	VFA
5,00	57,254
5,50	64,219
6,00	68,541
6,50	71,469
7,00	74,056
7,50	75,537

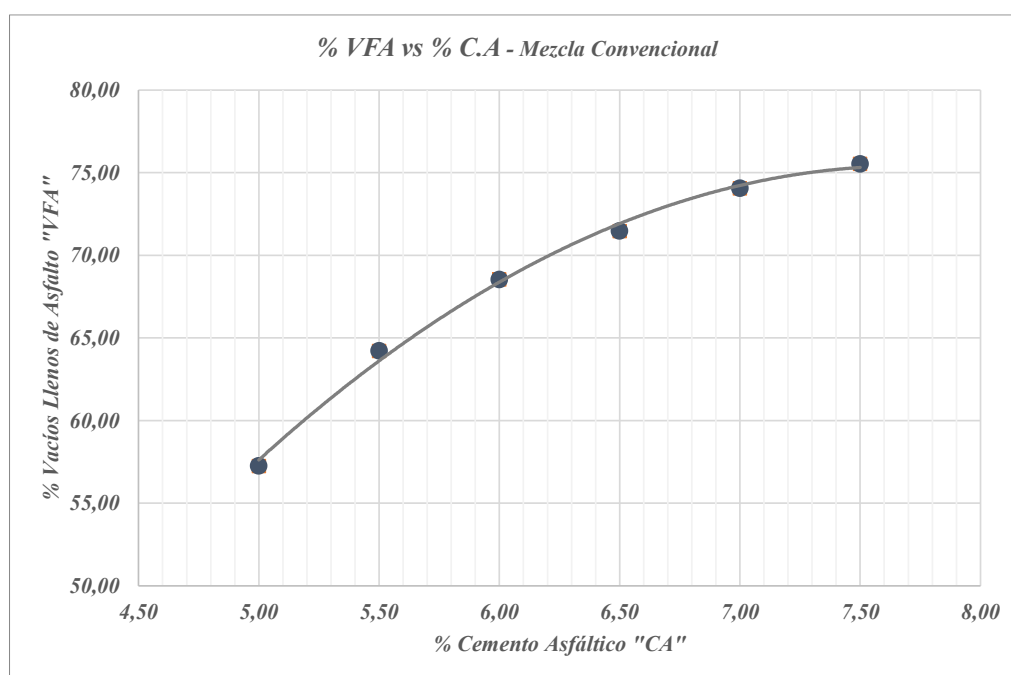


Fig. 38. Comportamiento de VFA vs %C.A

Los resultados obtenidos se detallan en la TABLA XXX.

Análisis: El parámetro de vacíos llenos de asfalto (VFA) mide de forma matemática el porcentaje de espacio libre que el VMA y el asfalto ya han ocupado en la mezcla. Los datos reflejan que mientras más incrementa el porcentaje mayor será su VFA, obteniendo el punto más bajo de 57.254% para el 5% que indica que es una estructura porosa y seca, mientras que

para el 7.5% aumenta a 75.537%. De acuerdo con el Instituto de Asfalto, para un tráfico pesado el VFA debe estar en un rango del 65% al 75% para resistir la fatiga.

h) Estabilidad vs Porcentaje de Asfalto

TABLA XXXII
ESTABILIDAD VS % DE CEMENTO ASFÁLTICO MEZCLA CONVENCIONAL

<i>% C.A</i>	<i>Mezcla Convencional</i>
<i>Pb</i>	<i>Estabilidad</i>
5,00	3018,0
5,50	3374,7
6,00	4088,6
6,50	3329,7
7,00	2691,5
7,50	2221,9

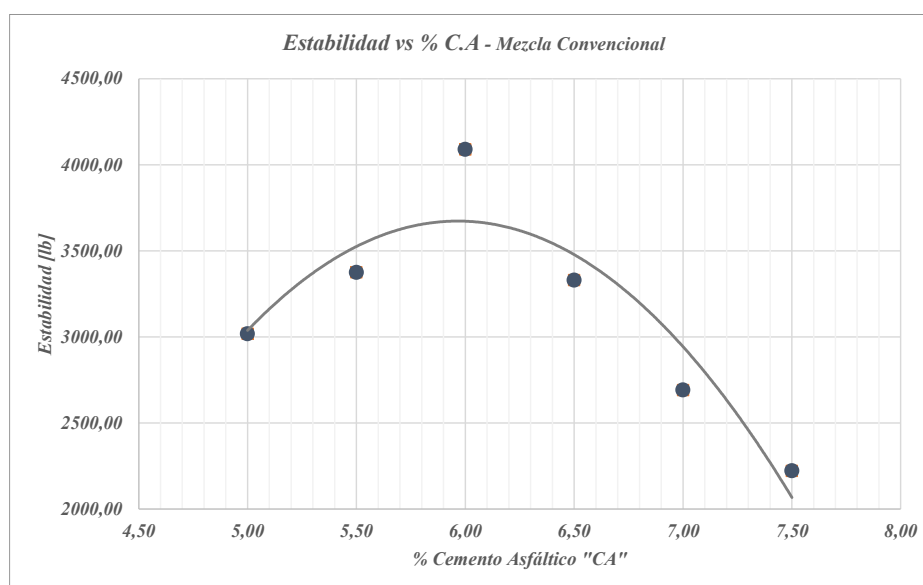


Fig. 39. Comportamiento de Estabilidad vs %C.A

Los resultados obtenidos se detallan en la TABLA XXXI.

Análisis: La estabilidad Marshall mide la capacidad para resistir a desplazamientos y deformaciones para cargas por tráfico, en este caso tráfico pesado. Estos resultados demuestran que la máxima resistencia es de 4088 lb con el 6% de cemento asfáltico, superado este valor la estabilidad empieza decaer hasta 2221.9 lb con el 7.5%. Al contrastar estos valores con las

exigencias de la MOP-001-F-2002, establece que para tráfico pesado la estabilidad mínima es de 1800 lb, lo cual cumple con lo establecido.

i) *Flujo vs Porcentaje de Asfalto*

TABLA XXXIII
FLUJO VS % DE CEMENTO ASFÁLTICO MEZCLA CONVENCIONAL

<i>% C.A</i>	<i>Mezcla Convencional</i>
<i>Pb</i>	<i>Flujo</i>
5,00	11
5,50	12
6,00	15
6,50	16
7,00	18
7,50	20

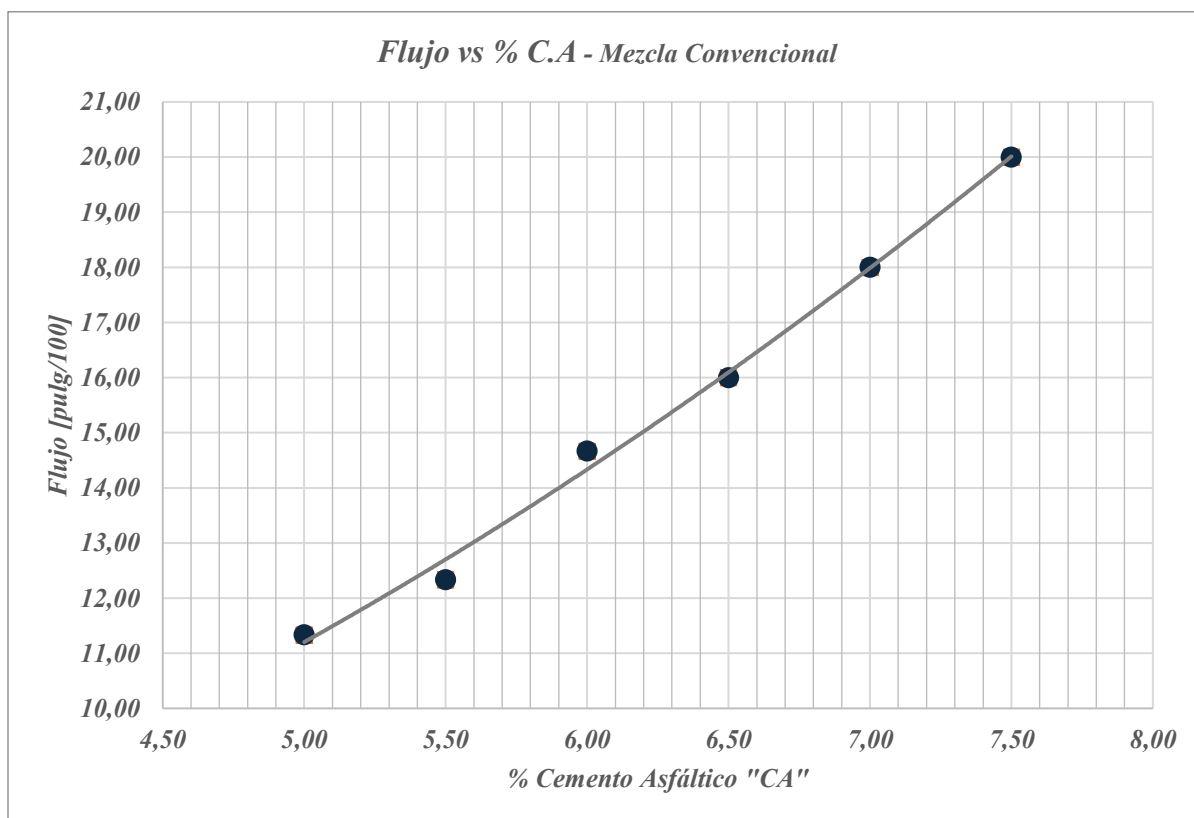


Fig. 40. Comportamiento de Flujo vs %C.A

Los resultados obtenidos se detallan en la TABLA XXXII.

Análisis: Las lecturas del dial muestran una tendencia lineal de forma ascendente, incrementando desde 11 pulg/100 para un 5% hasta su máxima deformación de 20 pulg/100. Para cargas de tráfico pesado, las especificaciones técnicas sugieren que se mantenga dentro de un rango de 8 a 14 pulg/100 para evitar falla estructurales.

j) *Determinación del Porcentaje Óptimo de Cemento Asfáltico para la Mezcla Convencional*

TABLA XXXIV
PORCENTAJE ÓPTIMO DE CEMENTO ASFÁLTICO PARA MEZCLA CONVENCIONAL

% Óptimo de Cemento Asfáltico en la Mezcla según el Instituto del Asfalto		
Parámetro	Valor	%C.A
% Va	4%	6,4
Gmb	2,28 gr/cm ³	6,2
Estabilidad	3675 lb	6,0
Promedio		6,2

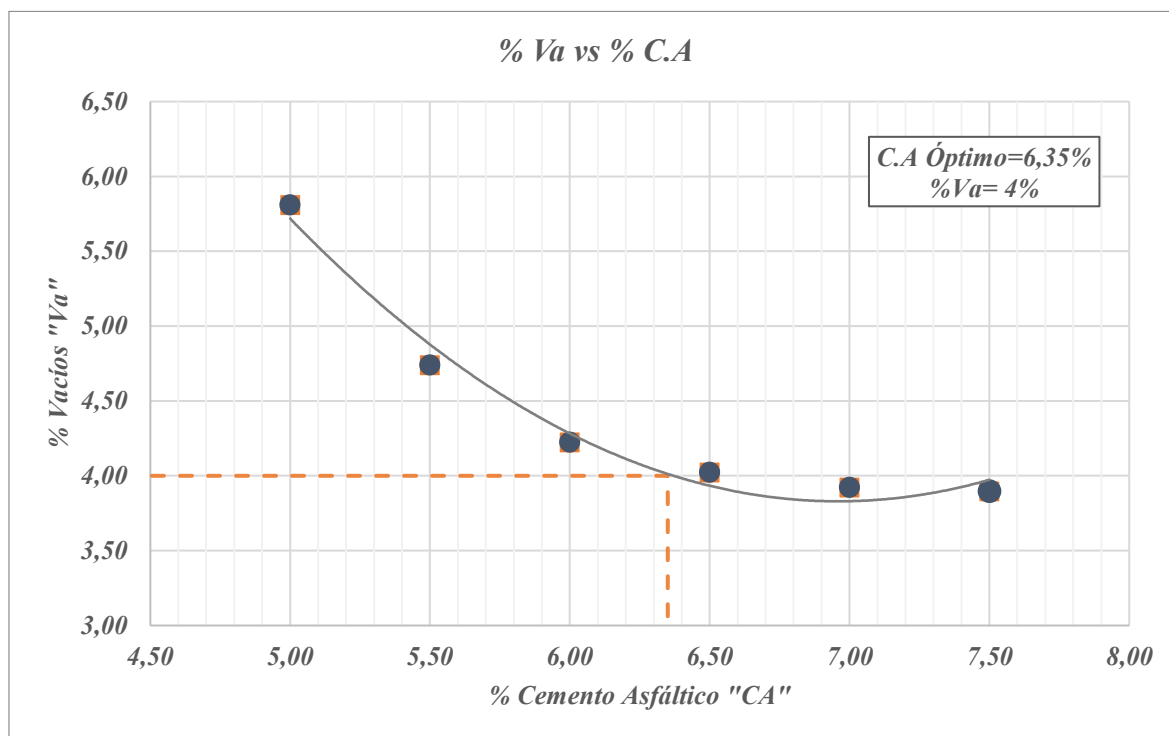


Fig. 41. Criterio %Va para obtener el %Óptimo de Cemento Asfáltico

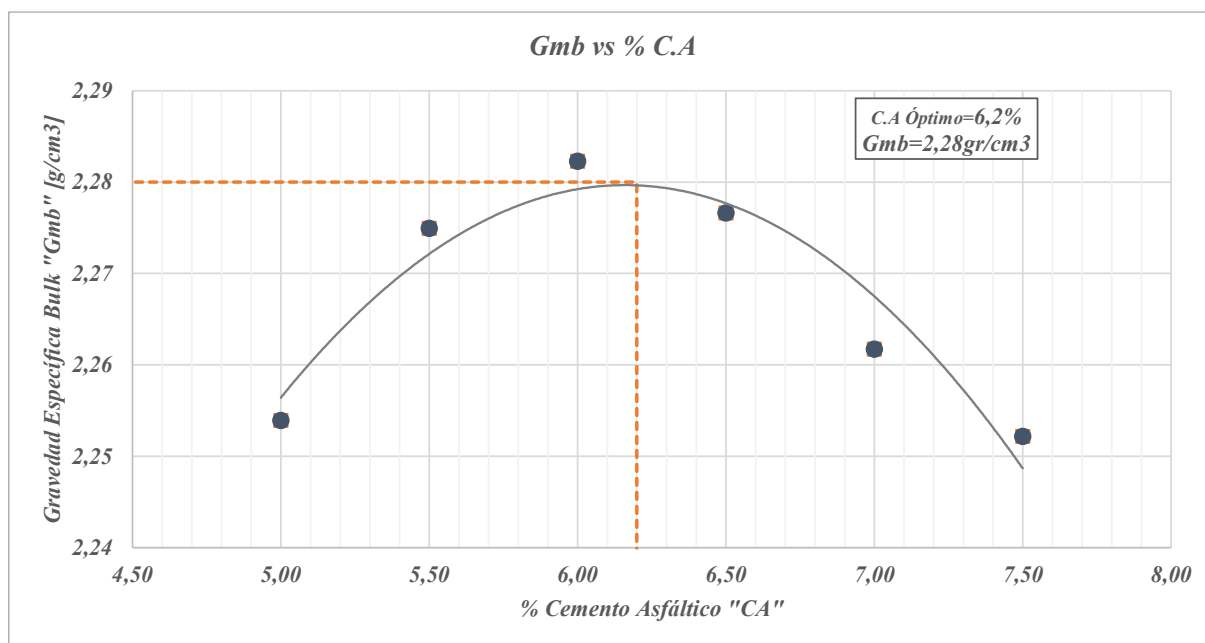


Fig. 42. Criterio Gmb para obtener el %Óptimo de Cemento Asfáltico

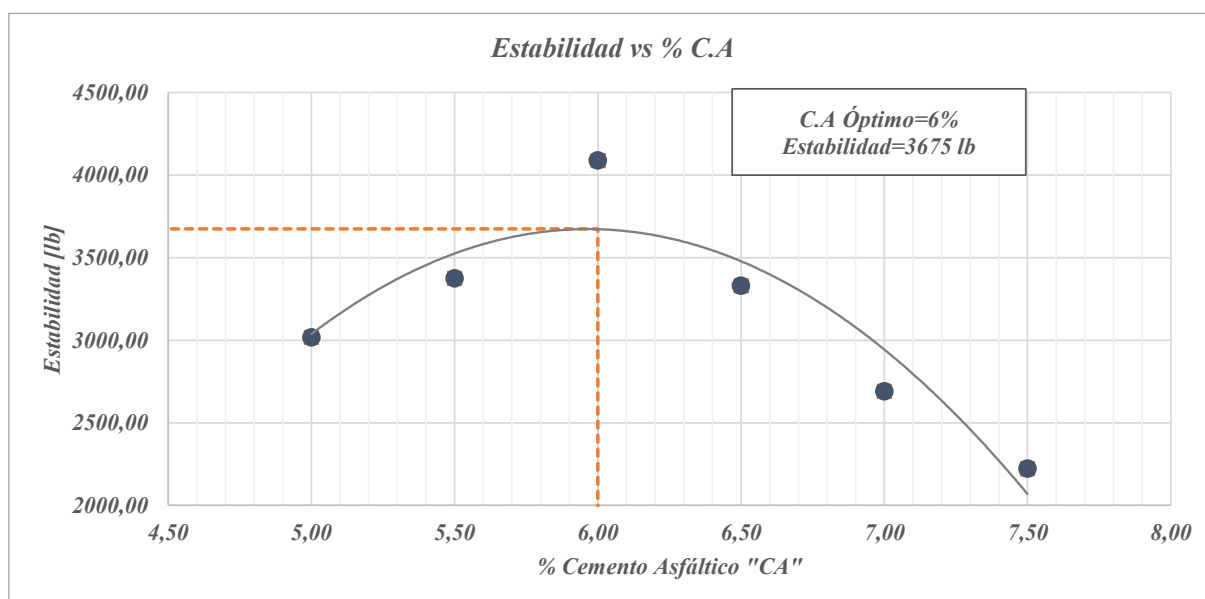


Fig. 43. Criterio de Estabilidad para obtener el %Óptimo de Cemento Asfáltico

Análisis: Para la mezcla convencional, se determinó el contenido óptimo de cemento asfáltico según el Manual MS-2 del Instituto del Asfalto. Se proyectaron los puntos críticos de diseño, el contenido óptimo se alcanza cuando el porcentaje de vacíos de aire es igual a 4%, en la Fig 41 se puede visualizar que este criterio se da cuando tiene un 6.40% de asfalto; en cambio se proyectó el valor máximo de la densidad bulk que se localizó en 6.20% como en la Fig. 42, y finalmente se tomó el punto de estabilidad máxima con un 6.0% de asfalto tal como se muestra

en la Fig. 43. Obteniendo un promedio de 6.2% como contenido óptimo de asfalto para el diseño de la mezcla convencional.

2) Método Marshall de Diseño de la Mezcla Modificada (ASTM D6926)

a) Diseño de la Mezcla Modificada

TABLA XXXV
DOSIFICACIÓN PARA MEZCLA MODIFICADA

<i>Mezcla Modifica 80% Agregado nuevo + 20% Rap</i>		
<i>3/4"</i>	<i>9,6%</i>	80,0%
<i>3/8"</i>	<i>24,8%</i>	
<i>Polvo de piedra</i>	<i>45,6%</i>	
<i>Rap grueso</i>	<i>10,0%</i>	20%
<i>Rap fino</i>	<i>10,0%</i>	

TABLA XXXVI
DISEÑO DE LA MEZCLA MODIFICADA

<i>DISEÑO DE LA MEZCLA MODIFICADA - 80% AGREGADOS NUEVOS + 20% RAP</i>									
<i>NORMA ASTM D6926</i>									
<i>Tamiz</i>	<i>Nº</i>	<i>Abertura</i>	<i>Granulometría</i>	<i>Granulometría</i>	<i>Granulometría</i>	<i>Mezcla de</i>	<i>Media</i>	<i>Especificaciones MOP-001-F-2002</i>	
			<i>RAP</i>	<i>3/4"</i>	<i>3/8"</i>				
<i>pulg</i>	<i>[mm]</i>	<i>20,0%</i>	<i>9,6%</i>	<i>24,8%</i>	<i>45,6%</i>			<i>Inferior</i>	<i>Superior</i>
<i>3/4 in</i>	<i>19,00</i>	20,00	9,60	24,80	45,60	<i>100,00</i>	<i>100,00</i>	<i>100</i>	<i>100</i>
<i>1/2 in</i>	<i>12,700</i>	18,43	5,69	24,80	45,60	<i>94,52</i>	<i>95,00</i>	<i>90</i>	<i>100</i>
<i>No. 4</i>	<i>4,75</i>	13,09	0,18	4,45	44,63	<i>62,35</i>	<i>59,00</i>	<i>44</i>	<i>74</i>
<i>No. 8</i>	<i>2,360</i>	10,22	0,13	0,90	36,92	<i>48,16</i>	<i>43,00</i>	<i>28</i>	<i>58</i>
<i>No. 50</i>	<i>0,300</i>	3,32	0,00	0,00	13,18	<i>16,50</i>	<i>13,00</i>	<i>5</i>	<i>21</i>
<i>No. 200</i>	<i>0,08</i>	0,48	0,00	0,00	5,81	<i>6,29</i>	<i>6,00</i>	<i>2</i>	<i>10</i>

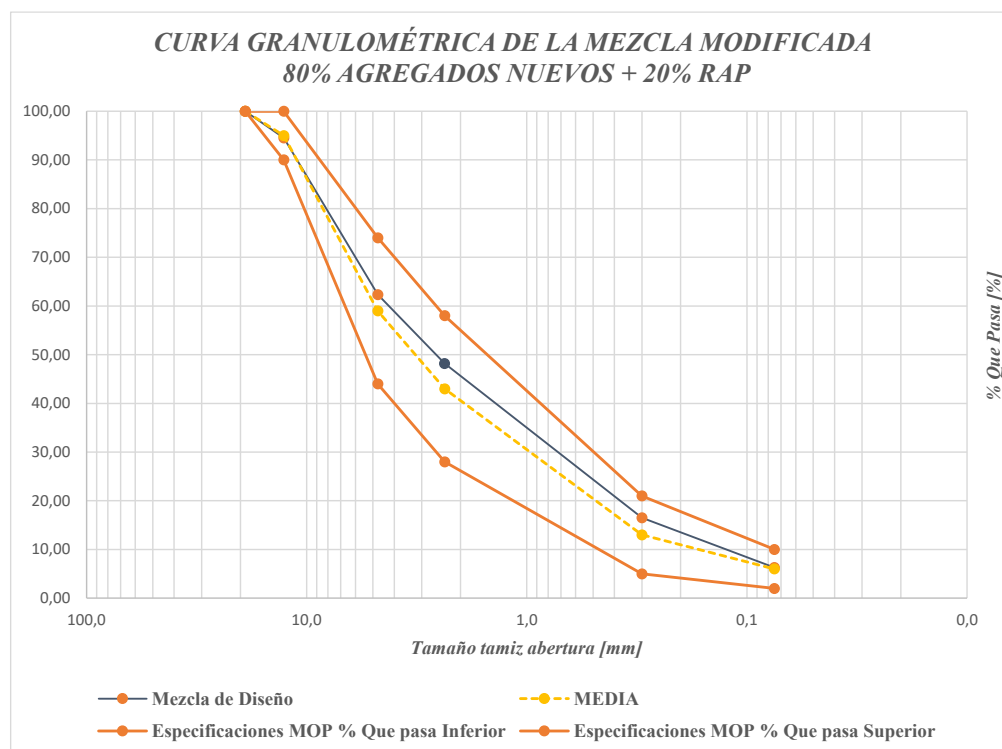


Fig. 44. Curva Granulométrica de la mezcla modificada.

El diseño de la mezcla se encuentra de forma detallada en el Anexo 21.

Análisis: Con base a los resultados registrados en la TABLA XXXVI y la curva granulométrica de la mezcla modificada, se estableció una dosificación del 20% de RAP para la mezcla, complementando con un 9.6% de agregado de 3/4", el 24.8% de 3/8" y el 45.6% de polvo de piedra. Se optó una combinación que cumpla con los requisitos de la MOP-001-F-2002, como se puede visualizar en la Fig. 44 la curva granulométrica se encuentra entre los rangos permitidos.

b) Gravedad Específica Teórica Máxima (Gmm)

TABLA XXXVII
RESULTADOS DE ENSAYO RICE PARA CADA PORCENTAJE DE CEMENTOS ASFÁLTICO.

GRAVEDAD ESPECÍFICA TEÓRICA MÁXIMA DE LA MEZCLA CONVENCIONAL	
NORMA ASTM D 2041	
% Asfalto	Resultado
5,0%	2,385
5,5%	2,377
6,0%	2,372
6,5%	2,368
7,0%	2,364
7,5%	2,356

Los resultados detallados se presentan en el Anexo 23.

Análisis: Al evaluar los resultados obtenidos en el ensayo Rice se observa que los valores van disminuyendo a medida que se incrementa el porcentaje de asfalto. Para un 5% de asfalto se obtuvo un valor de 2.385, mientras que para un 7.5% de asfalto el valor disminuye a 2.356. Esto indica que al agregar más porcentaje de asfalto a la mezcla menor es su gravedad, lo cual es lo que se espera de la mezcla. Considerando que la mezcla ya tiene un 20% de RAP, indica que el agregado ya tiene cierto porcentaje de asfalto envejecido, por lo tanto, se deduce a que los poros ya están saturados del ligante, haciendo que los valores sean menores a comparación a una mezcla convencional.

c) Tabla de Método Marshall de Mezcla Modificada

TABLA XXXVIII
TABLA MÉTODO MARSHALL PARA MEZCLA MODIFICADA



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL



DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA EN CALIENTE

MÉTODO MARSHALL

NORMA ASTM D6926

Ensayado por:

Camila Monserrath Montesdeoca

Tutor:

Ing. Rodrigo Iván Acosta Lozada, M.Sc

Gravedad Específica del Asfalto Gb =

1,0142 gr/cm3

Gsb de los Agregados =

2,487 gr/cm3

Gsa de los Agregados =

2,629 gr/cm3

Nº Briqueta	% Asfalto			% Agregado	Altura mm	Altura cm	Volumen cm3	Peso de Briqueta			Gravedad Específica de la Mezcla			Volumen Total (Briquetas)			% Volumen de Vacíos			% Asfalto		Estabilidad				Flujo pulg/100
	% C.A	% C.A RAP 20%	% C.A Faltante					Aire gr	SSS gr	Agua gr	Bulk g/cm3	Teórica Máxima gr/cm3	Efectiva g/cm3	Agregado	Vacíos (Va)	Asfalto VCA	Aire Va	Agregado Mineral VMA	Llenos de Asfalto VFA	Absorbido Pba	Efectivo Pbe	Estabilidad Ensayo kg	Corrección por altura	Estabilidad Corregida	Estabilidad Corregida Lb	
1	5,0	1,14	3,86	96,14	66,7	6,7	508,3	1137	1148,7	640,4	2,237	2,385	2,567	87,23	5,398	7,374	5,398	12,771	57,736	1,285	2,626	1626	0,930	1512,2	3326,8	9
2					61,7	6,2	475,3	1058,3	1064,3	589	2,227											1540	1,046	1611,2	3544,7	8
3					67,1	6,7	488,5	1125,9	1133	644,5	2,305											1950	0,920	1794,0	3946,8	9
Promedio					65,2	6,5	490,7	1107,1	1115,3	624,6	2,256										Promedio				3606,1	9
1	5,5	1,14	4,36	95,64	62,9	6,3	483,2	1102	1108,1	624,9	2,281	2,377	2,578	86,28	4,478	9,246	4,478	12,684	64,701	1,449	4,114	1830	1,015	1857,5	4086,4	10
2					62,4	6,2	474,4	1079,6	1094	619,6	2,276											1605	1,028	1649,1	3628,1	10
3					64,0	6,4	495,5	1116,9	1124,7	629,2	2,254											1904	0,987	1880,2	4136,4	9
Promedio					63,1	6,3	484,4	1099,5	1108,9	624,6	2,270										Promedio				3950,3	10
1	6,0	1,14	4,86	95,14	65,1	6,5	506,4	1156,6	1167,8	661,4	2,284	2,372	2,594	86,07	4,022	9,911	4,022	12,891	68,801	1,686	4,396	1986	0,960	1906,6	4194,4	12
2					63,7	6,4	494,7	1128,7	1138,6	643,9	2,282											1990	0,995	1980,1	4356,1	11
3					63,9	6,4	481,4	1090,1	1106,7	625,3	2,264											1867	0,990	1848,3	4066,3	12
Promedio					64,2	6,4	494,2	1125,1	1137,7	643,5	2,277										Promedio				4205,6	12
1	6,5	1,14	5,36	94,64	62,2	6,2	494,2	1132,1	1137	642,8	2,291	2,368	2,610	85,51	3,961	10,525	3,961	13,446	70,541	1,931	4,672	1532	1,033	1581,8	3479,9	11
2					63,4	6,3	504,7	1149,6	1154,4	649,7	2,278											1856	1,003	1860,6	4093,4	12
3					61,9	6,2	492,1	1109,1	1116,5	624,4	2,254											1720	1,040	1788,8	3935,4	12
Promedio					62,5	6,3	497,0	1130,3	1136,0	639,0	2,274										Promedio				3836,2	12
1	7,0	1,14	5,86	94,14	60,8	6,1	487,4	1110,4	1112,8	625,4	2,278	2,364	2,627	84,89	3,996	11,115	3,996	14,072	71,605	2,187	4,942	1413	1,074	1518,1	3339,8	13
2					62,5	6,3	498,4	1138,1	1140,8	642,4	2,284											1632	1,025	1672,8	3680,2	12
3					62,5	6,3	499,4	1122,3	1130,1	630,7	2,247											1220	1,025	1250,5	2751,1	13
Promedio					61,9	6,2	495,1	1123,6	1127,9	632,8	2,270										Promedio				3257,0	13
1	7,5	1,14	6,36	93,64	64,8	6,5	510,6	1165,3	1167	656,4	2,282	2,356	2,639	84,36	3,758	11,886	3,758	14,606	74,269	2,361	5,289	1326	0,967	1282,9	2822,4	14
2					64,9	6,5	515,5	1168,4	1170	654,5	2,267											1493	0,965	1440,7	3169,6	12
3					64,6	6,5	516,1	1163,3	1168,6	652,5	2,254											1640	0,972	1594,9	3508,8	15
Promedio					64,8	6,5	514,1	1165,7	1168,5	654,5	2,268										Promedio				3166,9	14

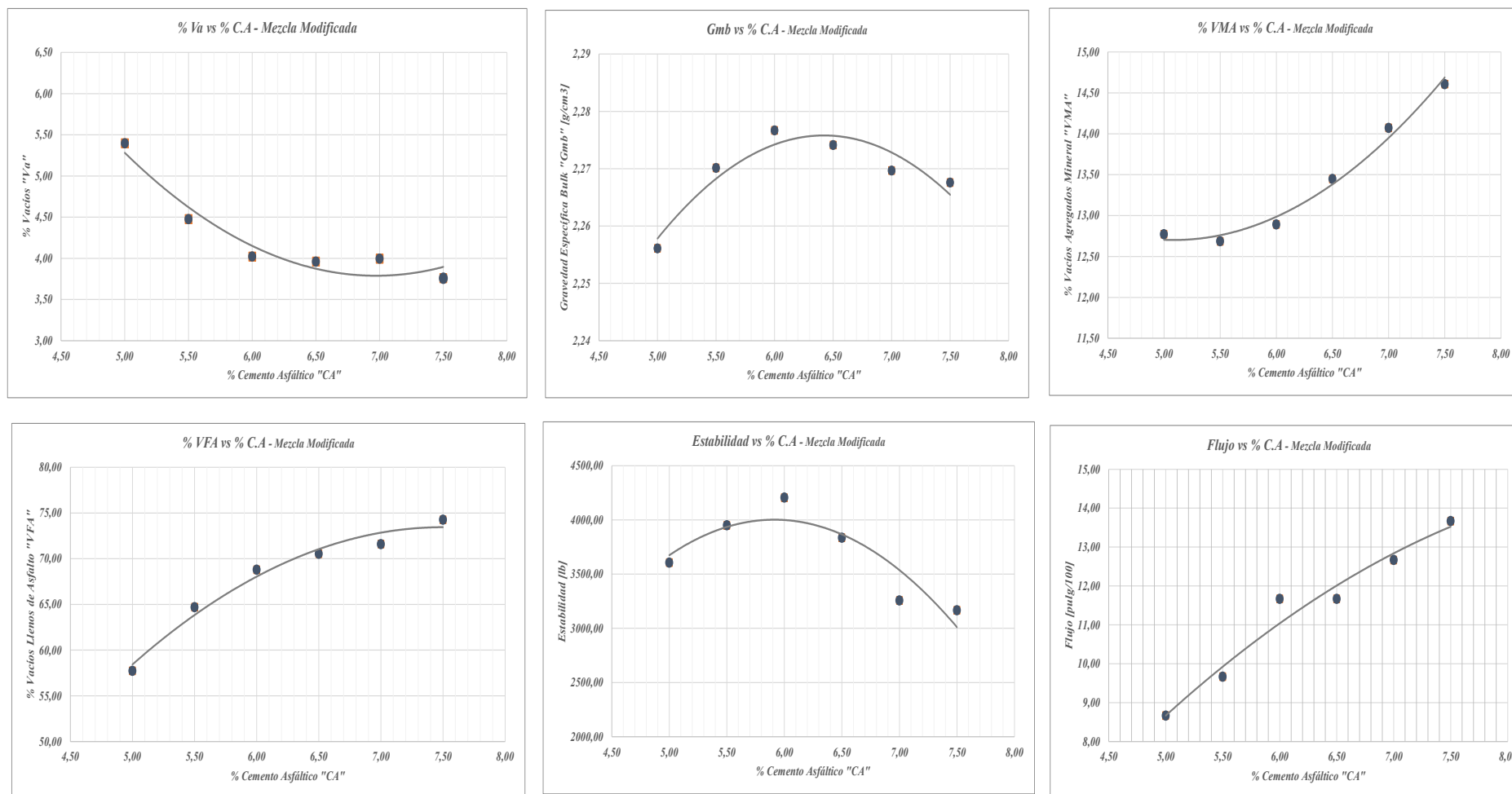


Fig. 45. Propiedades mecánicas y volumétricas de la mezcla modificada

Análisis: Los resultados obtenidos en la TABLA XXXVIII y las gráficas corresponden a sus propiedades volumétricas, donde se puede apreciar el comportamiento de las briquetas compactadas a 75 golpes para tráfico pesado, en un rango de 5% al 7.5% de cemento asfáltico. La incorporación del 20% de RAP altera en sus resultados debido al aporte de rigidez del asfalto envejecido, el cual va a interactuar con el cemento asfáltico añadido. Para el diseño de la mezcla modificada, se optó por incorporar el 20% de este material reciclado, aportando de manera intrínseca un 1.14% de asfalto envejecido según el porcentaje de cemento asfáltico residual que tiene el RAP calculado en la TABLA XI del 5.69%.

d) Porcentaje de Vacíos de Aire (Va) vs Porcentaje de Cemento Asfáltico

TABLA XXXIX
% DE VACIOS DE AIRE VS % DE CEMENTO ASFÁLTICO MEZCLA MODIFICADA

<i>% C.A</i>	<i>% Asf residual</i>	<i>% C.A final</i>	<i>Mezcla Modificada</i>
<i>Pb</i>			<i>Va</i>
5,00	1,14	3,86	5,81
5,50	1,14	4,36	4,74
6,00	1,14	4,86	4,22
6,50	1,14	5,36	4,02
7,00	1,14	5,86	3,92
7,50	1,14	6,36	3,90

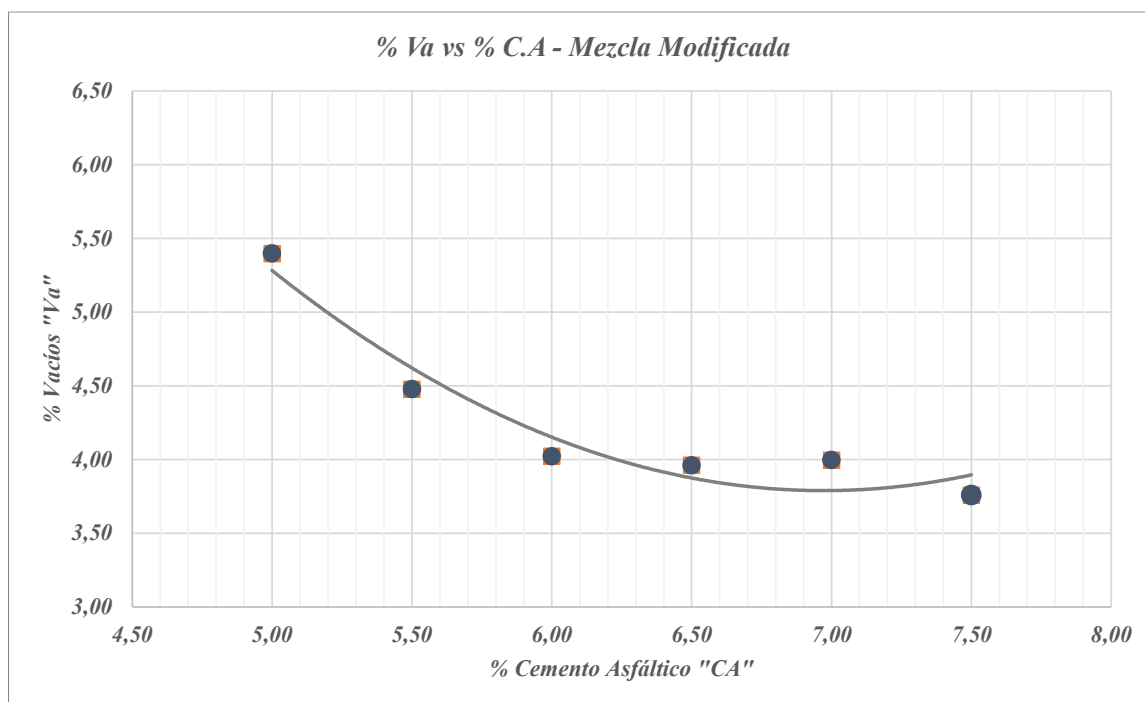


Fig. 46. Comportamiento de %Va vs %C.A

Los resultados obtenidos se detallan en la TABLA XXXIX

Análisis: Los vacíos de aires disminuyen de forma progresiva desde un 5% de cemento asfáltico con valor de 5.398% hasta el 7.5% con un valor de 3.758%. A partir del 5.5% de asfalto, los valores de vacíos de aire se encuentran dentro de los rangos establecidos por la norma (3% a 5%) para tráfico pesado. Los valores superiores al 5% presentarían una estructura propensa a que ingrese agua y que el RAP se oxide de forma acelerada, mientras que para valores menor al 3% provocaría el fenómeno de exudación superficial.

e) *Gravedad Específica Bulk de la Mezcla (Gmb) vs Porcentaje de Cemento Asfáltico*

TABLA XL
Gmb VS % DE CEMENTO ASFÁLTICO MEZCLA MODIFICADA

% C.A	% Asf residual	% C.A final	Mezcla Modificada
<i>Pb</i>			<i>Gmb</i>
5,00	1,14	3,86	2,256
5,50	1,14	4,36	2,270
6,00	1,14	4,86	2,277
6,50	1,14	5,36	2,274
7,00	1,14	5,86	2,270
7,50	1,14	6,36	2,268

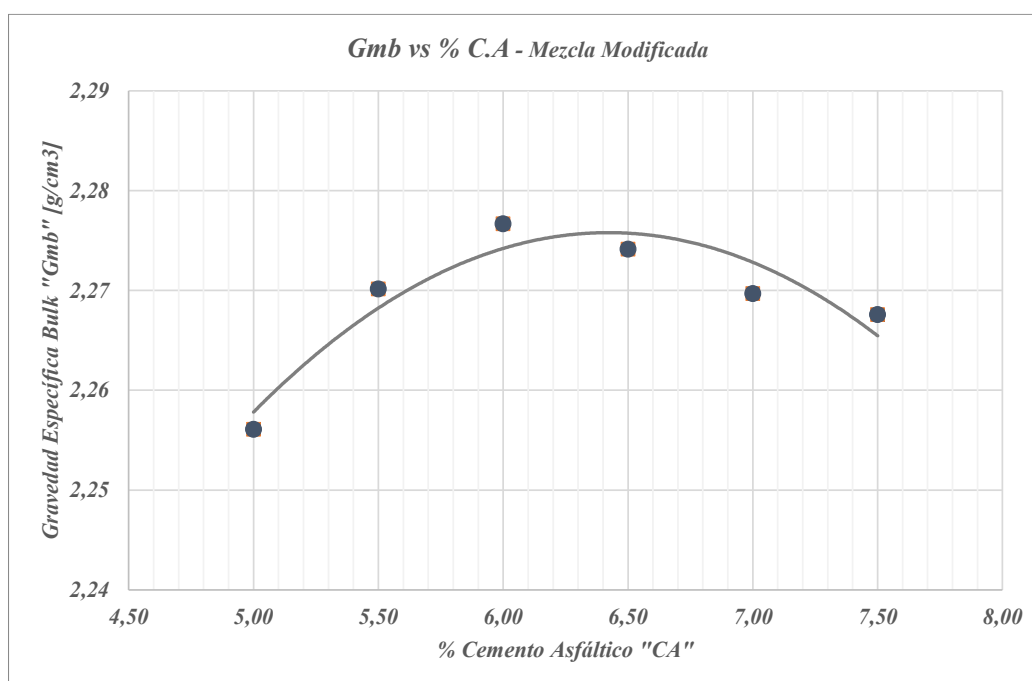


Fig. 47. Comportamiento de Gmb vs %C.A

Los resultados obtenidos se muestran en la TABLA XL.

Análisis: Los valores obtenidos de la densidad se presentan en forma de una trayectoria parabólica, teniendo como pico máximo de 2.277 gr/cm³ cuando se añade el 6% de asfalto equivalente en realidad al 4.86% de asfalto nuevo, para llegar a una gravedad del 2.268 gr/cm³ con un 7.5% (6.36% asfalto nuevo). El cemento asfáltico añadido actúa como un lubricante

para facilitar que la combinación de agregados se acomode correctamente, a su vez, mientras más incrementa el porcentaje de asfalto mayor será su volumen que genera una presión interna que separa los agregados, siendo susceptible al ahuellamiento.

f) Vacíos en el Agregado Mineral (VMA) vs Porcentaje de Cemento Asfáltico

TABLA XLI
VMA VS % DE CEMENTO ASFÁLTICO MEZCLA MODIFICADA

<i>% C.A</i>	<i>% Asf residual</i>	<i>% C.A final</i>	<i>Mezcla Modificada</i>
<i>Pb</i>			<i>VMA</i>
5,00	1,14	3,86	12,771
5,50	1,14	4,36	12,684
6,00	1,14	4,86	12,891
6,50	1,14	5,36	13,446
7,00	1,14	5,86	14,072
7,50	1,14	6,36	14,606

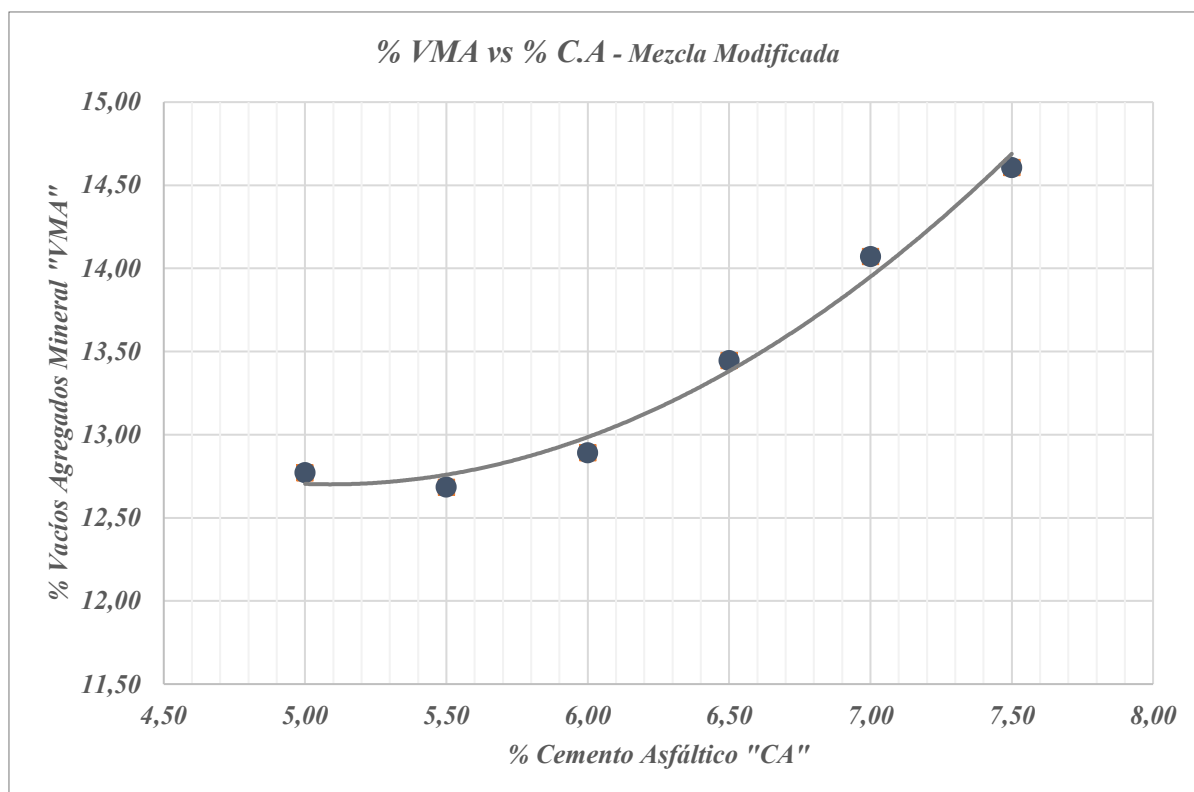


Fig. 48. Comportamiento de VMA vs %C.A

Los resultados obtenidos se muestran en la TABLA XLI.

Análisis: Según los valores obtenidos el VMA alcanza su valor mínimo de 12.684% con el 5.5% de asfalto total, equivalente al 3.86% de asfalto residual. Este valor indica el acomodo mecánico más cerrado de la briqueta bajo los 75 golpes de compactación. Mientras que, su máximo valor alcanza un 14.606% de VMA al usar 7.5% de asfalto total. Cumplir con el valor mínimo según la norma evita que una mezcla sea seca y propensa a agrietamiento por fatiga.

g) *Vacios Llenos de Asfalto (VFA) vs Porcentaje de Cemento Asfáltico*

TABLA XLII
VFA VS % DE CEMENTO ASFÁLTICO MEZCLA MODIFICADA

% C.A	% Asf residual	% C.A final	Mezcla Modificada
<i>Pb</i>			<i>VFA</i>
5,00	1,14	3,86	57,736
5,50	1,14	4,36	64,701
6,00	1,14	4,86	68,801
6,50	1,14	5,36	70,541
7,00	1,14	5,86	71,605
7,50	1,14	6,36	74,269

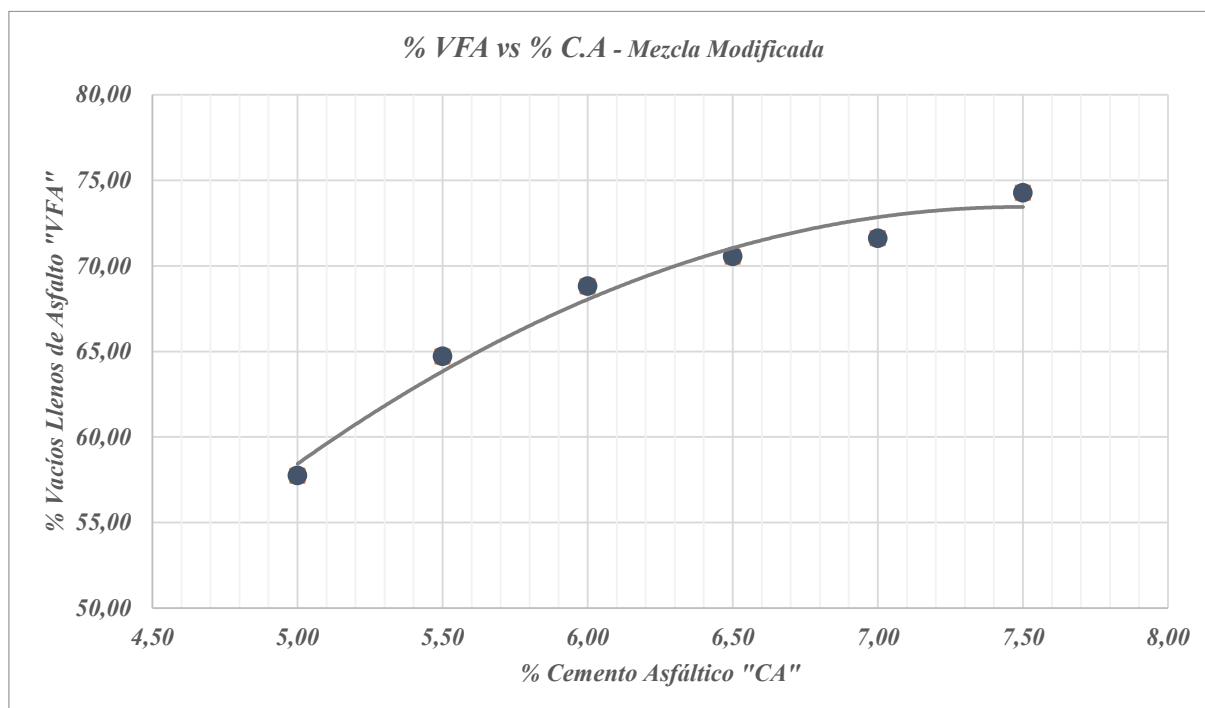


Fig. 49. Comportamiento de VFA vs %C.A

Los resultados obtenidos se muestran en la TABLA XLII.

Análisis: Se puede visualizar gráficamente un crecimiento lineal, variando desde un 57.736% hasta 74.269%. Esto indica que el incremento del cemento asfáltico residual va llenando los espacios de los agregados, para tráfico pesado la norma exige que el VMA este entre los rangos del 65% al 75% para garantizar la impermeabilidad. A partir del 6% de cemento asfáltico total entra en este rango normativo.

h) Estabilidad vs Porcentaje de Cemento Asfáltico

TABLA XLIII
ESTABILIDAD VS % DE CEMENTO ASFÁLTICO MEZCLA MODIFICADA

<i>% C.A</i>	<i>% Asf residual</i>	<i>% C.A final</i>	<i>Mezcla Modificada</i>
<i>Pb</i>			<i>Estabilidad</i>
5,00	1,14	3,86	3606,1
5,50	1,14	4,36	3950,3
6,00	1,14	4,86	4205,6
6,50	1,14	5,36	3836,2
7,00	1,14	5,86	3257,0
7,50	1,14	6,36	3166,9

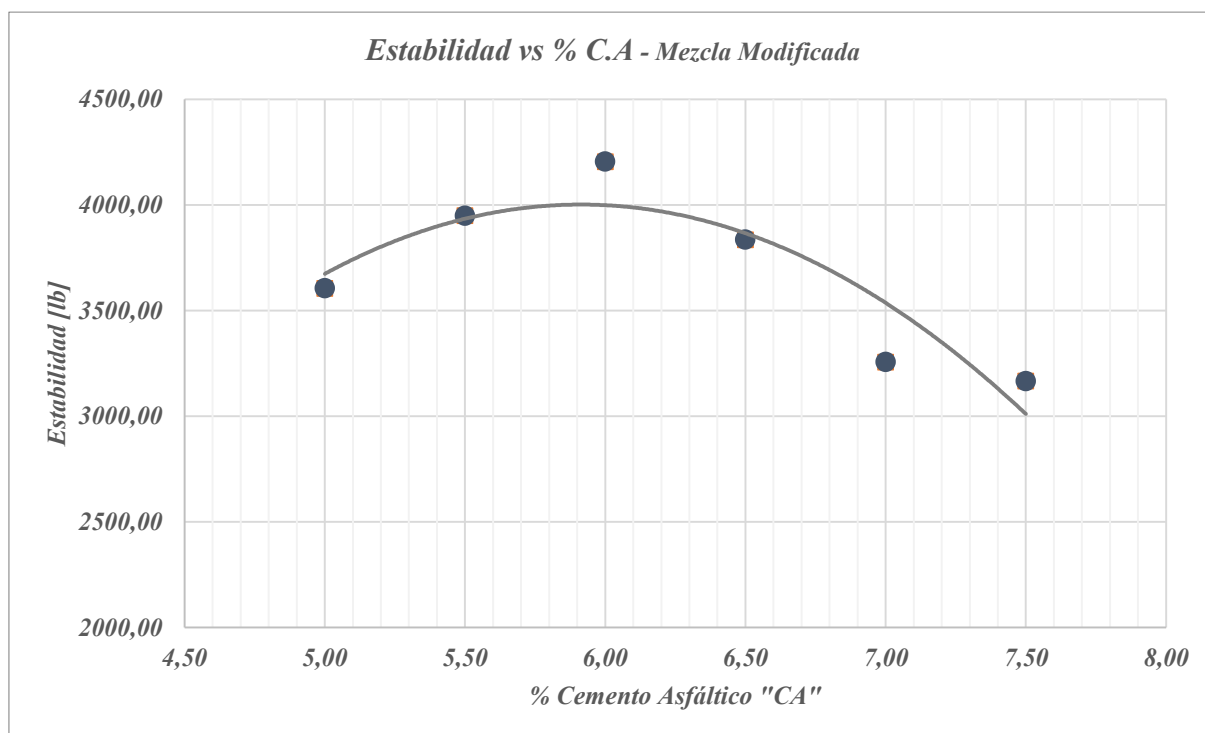


Fig. 50. Comportamiento de Estabilidad vs %C.A

Los resultados obtenidos se muestran en la TABLA XLIII.

Análisis: Se puede visualizar en la Fig. 50 que el valor máximo de resistencia equivale a 4205.6 lb para el 6% de asfalto total, se debe a que el RAP ya aporta cierta rigidez a la mezcla compactada por el asfalto envejecido preexistente; no obstante, llega un punto donde adquiere un exceso de asfalto nuevo que sobresatura la mezcla, haciendo que los agregados floten y pierdan su capacidad de confinamiento para soportar cargas pesadas por tráfico. Los valores obtenidos cumplen con lo establecido en la MOP-001-F-2002, que exige que el valor mínimo sea de 1800 lb.

i) *Flujo vs Porcentaje de Cemento Asfáltico*

TABLA XLIV
FLUJO VS % DE CEMENTO ASFÁLTICO MEZCLA MODIFICADA

% C.A	% Asf residual	% C.A final	Mezcla Modificada
<i>Pb</i>			<i>Flujo</i>
5,00	1,14	3,86	9
5,50	1,14	4,36	10
6,00	1,14	4,86	12
6,50	1,14	5,36	12
7,00	1,14	5,86	13
7,50	1,14	6,36	14

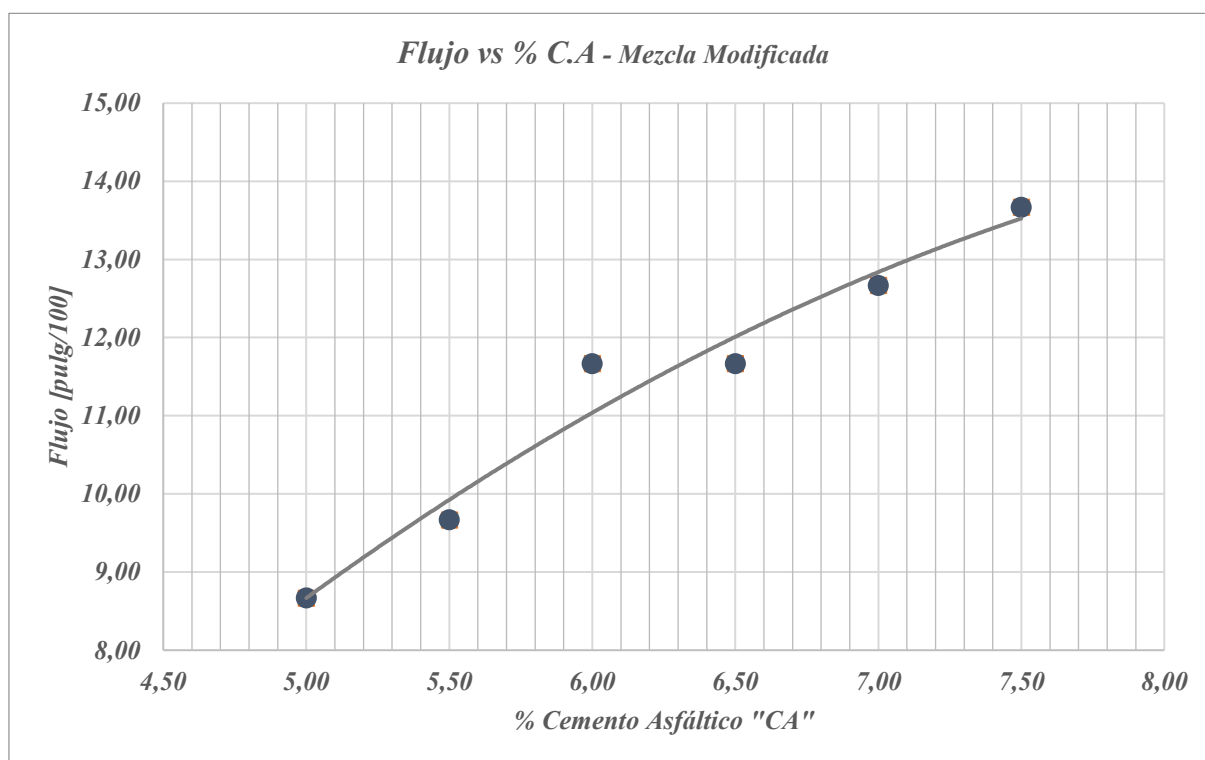


Fig. 51. Comportamiento de Flujo vs %C.A

Los resultados obtenidos se muestran en la TABLA XLIV.

Análisis: Los valores disminuyen a diferencia de una mezcla convencional debido a que el RAP al ya estar expuesto a cambios climáticos y cargas de tráfico, sufre un proceso llamado oxidación. Esto indica que el material es más rígido que un agregado convencional. Provoca

que no fluya de manera esperada bajo el esfuerzo de compresión, disminuyendo la deformación de la briqueta. El menor valor equivale a 9 pulg/100 para el 5% y adquiere valor de flujo máximo de 14 pulg/100 con el 7.5% asfalto total. Los resultados obtenidos se mantienen dentro de los rangos permitidos de 8 a 14 pulg/100 exigidos por la normativa MOP-011-F-2002.

j) *Determinación del Porcentaje de Cemento Asfáltico para la Mezcla Modificada*

TABLA XLV
PORCENTAJE ÓPTIMO DE CEMENTO ASFÁLTICO PARA MEZCLA MODIFICADA

<i>% Óptimo de Cemento Asfáltico en la Mezcla según el Instituto del Asfalto</i>		
<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>	<i>%C.A</i>
<i>% Va</i>	4%	6,2
<i>Gmb</i>	2,276 gr/cm ³	6,4
<i>Estabilidad</i>	4000 lb	5,9
<i>Promedio</i>		6,2

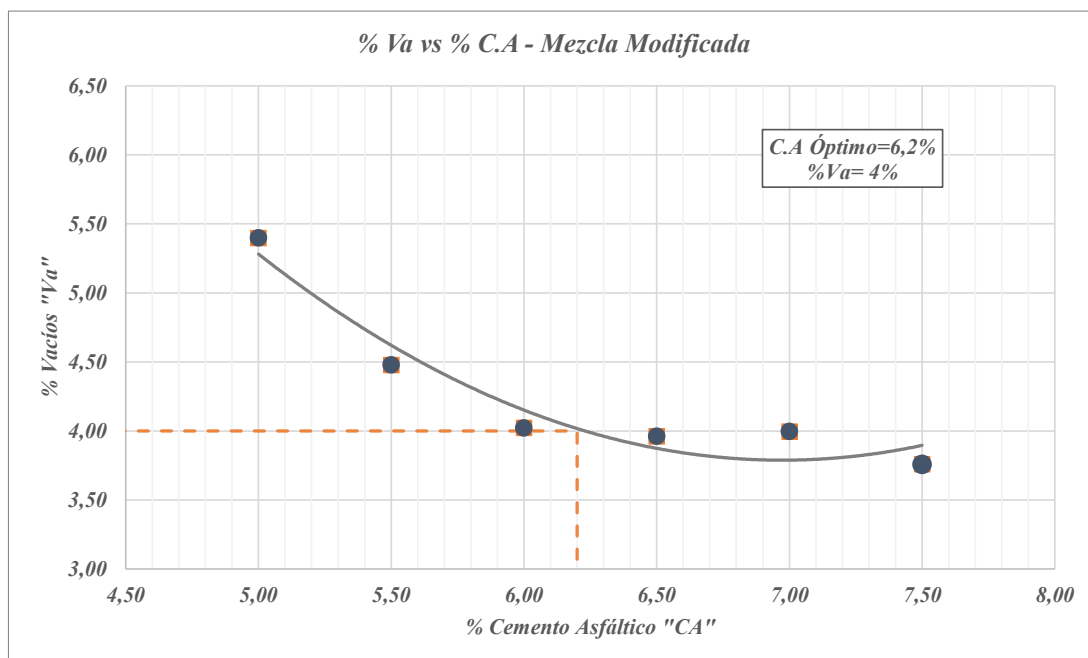


Fig. 52. Criterio %Va para obtener el %Óptimo de Cemento Asfáltico

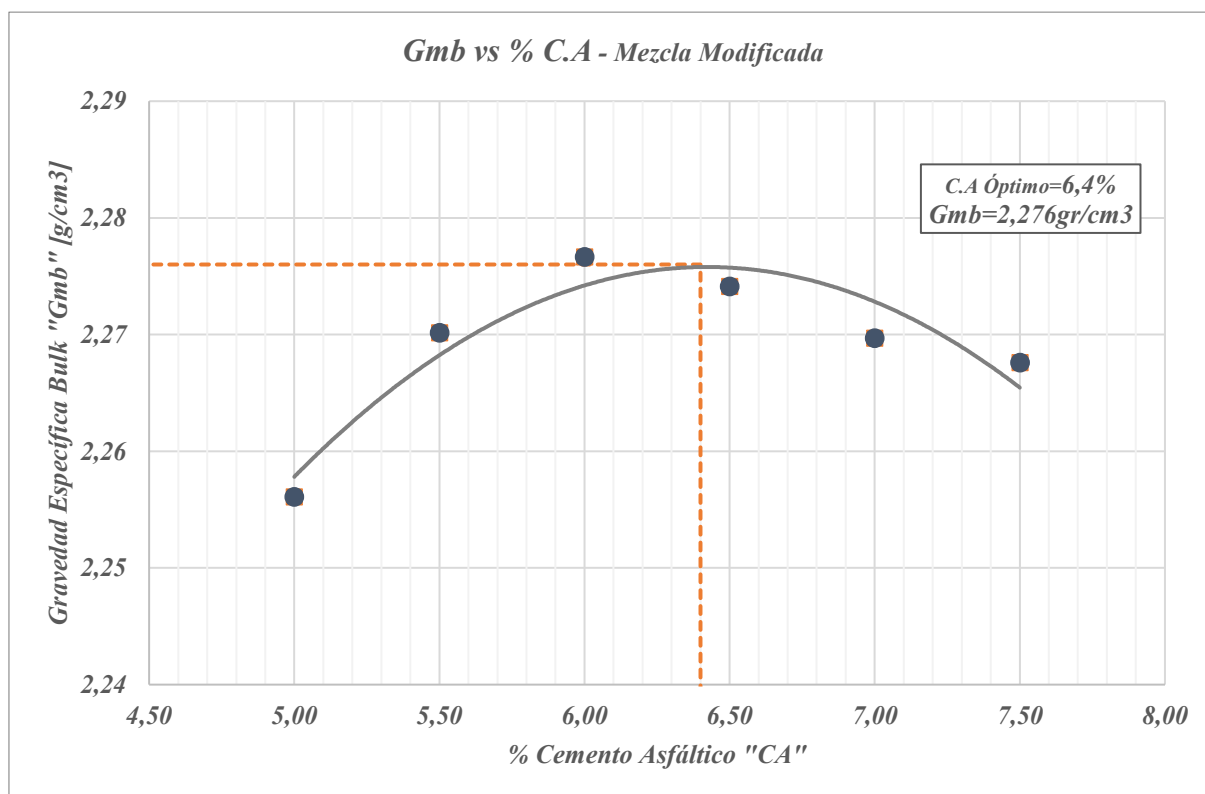


Fig. 53. Criterio Gmb para obtener el %Óptimo de Cemento Asfáltico

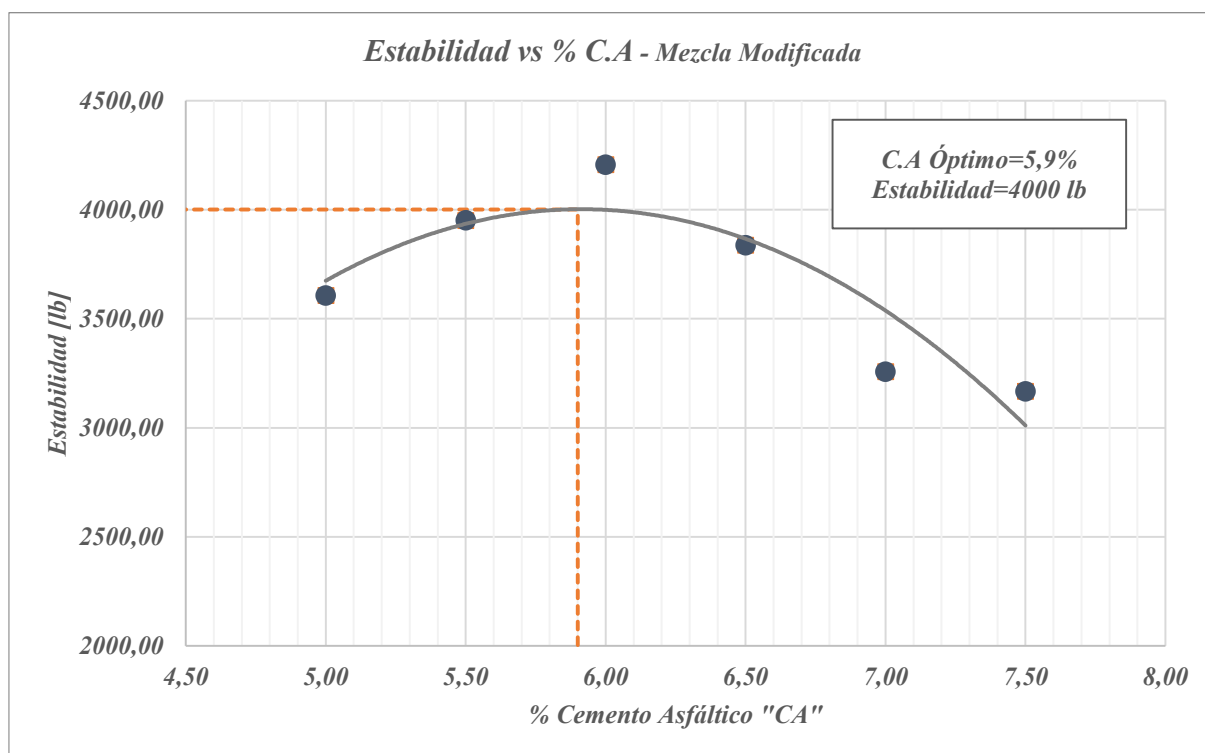


Fig. 54. Criterio de Estabilidad para obtener el %Óptimo de Cemento Asfáltico

Análisis: Para la mezcla modificada, se determinó el contenido óptimo de cemento asfáltico según el Manual MS-2 del Instituto del Asfalto. Se proyectaron los puntos críticos de diseño, como que el contenido óptimo se alcanza cuando el porcentaje de vacío de aire es igual a 4%, en la Fig 52 se puede visualizar que este criterio se da cuando tiene un 6.2% asfalto; en cambio se proyectó el valor máximo de la densidad bulk que se localizó en 6.4% como en la Fig. 53, y finalmente se tomó el punto de estabilidad máxima con un 5.9% de asfalto tal como se muestra en la Fig. 54. 49. Obteniendo un promedio de 6.2% como contenido óptimo de asfalto para el diseño de la mezcla modificada. Esto realmente representa a un 5.06% de cemento asfáltico nuevo, ya que el RAP ya tiene un porcentaje del 1.14% de asfalto residual.

C. FASE III

Se obtuvo para ambos diseños de mezclas el valor de 6.20% de Cemento Asfáltico Óptimo

1) Comparativa del % Va vs % Contenido Óptimo de Cemento Asfáltico

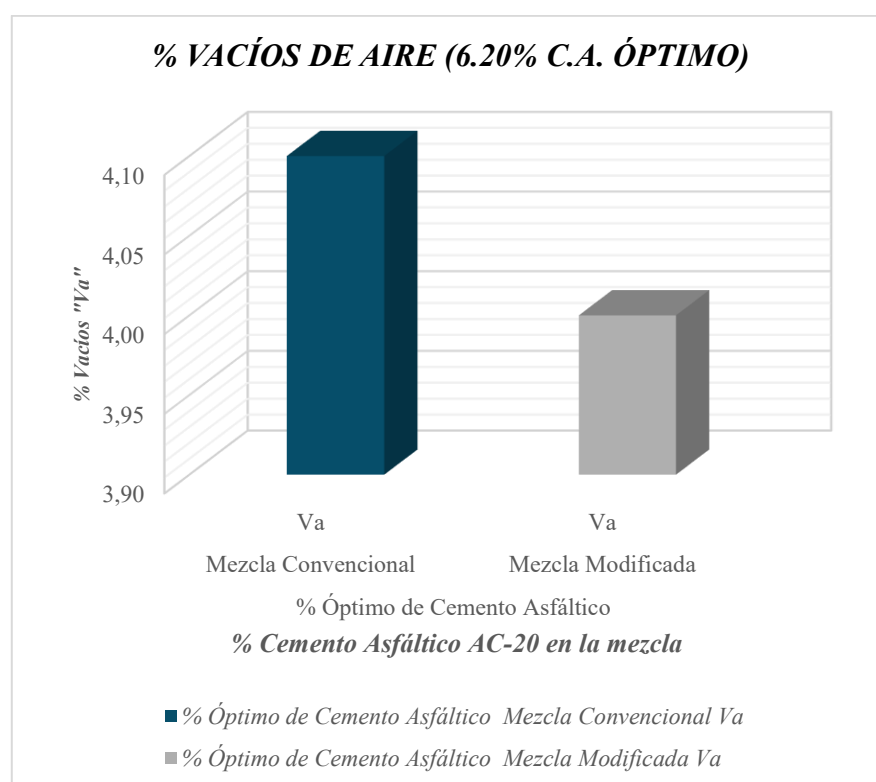


Fig. 55. Comparación %Va vs %Óptimo C.A

Análisis: Para el 6.20% de cemento asfáltico óptimo, se observa que para la mezcla convencional el porcentaje de vacíos de aires es del 4.1%, mientras que la mezcla modificada

con el 20% de RAP registra un valor de 4.0%. Esta similitud demuestra que la incorporación del agregado reciclado (RAP) no altera la capacidad de la mezcla para consolidarse de forma correcta bajo cargas de tráfico pesado. Debido a que el RAP ya considera el 1.14% de asfalto envejecido preexistente en el agregado, reduciendo la cantidad de poros en los materiales permitiendo que el asfalto nuevo consolide con mayor homogeneidad y eficiencia.

Ambas mezclas cumplen con los rangos establecidos por la norma MOP-001-F-2002 del 3% al 5%, sin embargo, el Instituto del Asfalto considera que el valor óptimo es el 4% para vacíos de aire en una mezcla ya que reduce el riesgo de infiltración de agua y oxidación, lo cual la mezcla modificada con 20% RAP se considera la ideal.

2) Comparativa del Gmb vs % Contenido Óptimo de Cemento Asfáltico

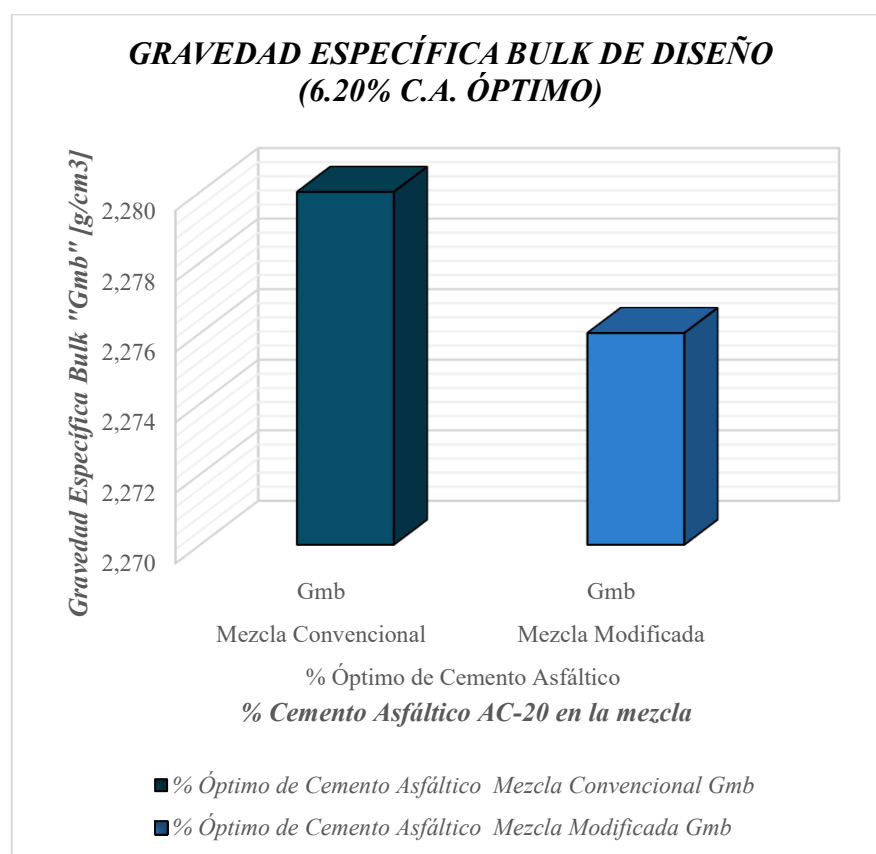


Fig. 56. Comparación Gmb vs %Óptimo C.A

Análisis: Para el 6.20% de cemento asfáltico óptimo, se contempla para la mezcla convencional una densidad de 2.280 gr/cm³, mientras que para la mezcla modificada disminuye a 2.276 gr/cm³. Esto se debe a la rigidez que los agregados reciclados ya adquieren por el asfalto

residual que cubre el agregado, genera una fricción que hace más difícil que los agregados se consoliden de forma correcta al momento de compactar a diferencia de un agregado virgen. Aun así, la mezcla modificada no altera el diseño, cumpliendo con los requerimientos para resistir cargas por tráfico pesado.

3) Comparativa del VMA vs % Contenido Óptimo de Cemento Asfáltico

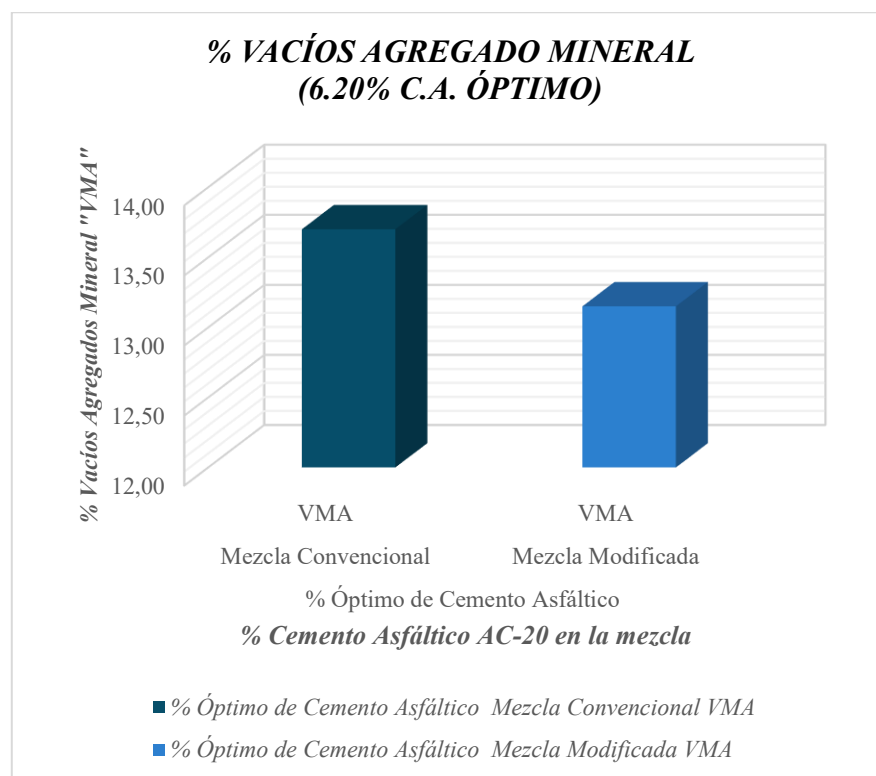


Fig. 57. Comparación VMA vs %Óptimo C.A

Análisis: Para el 6.20% de cemento asfáltico óptimo, se observó que para la mezcla convencional es de 13.70%, mientras que para la modificada disminuye a 13.15%. Aun así, ambos no cumplen con el mínimo exigido del 14% para un TMN de 1/2" según lo establecido en la norma. Se debe a que hay mucha cantidad de finos en ambas mezclas, ambas dosificaciones superan el 50% de agregado fino en la mezcla: 57% para la mezcla convencional, y 45.6% agregado fino nuevo y 10% de agregado fino reciclado, haciendo que la mezcla se vuelva más densa y cerrada.

4) Comparativa del VFA vs % Contenido Óptimo de Cemento Asfáltico

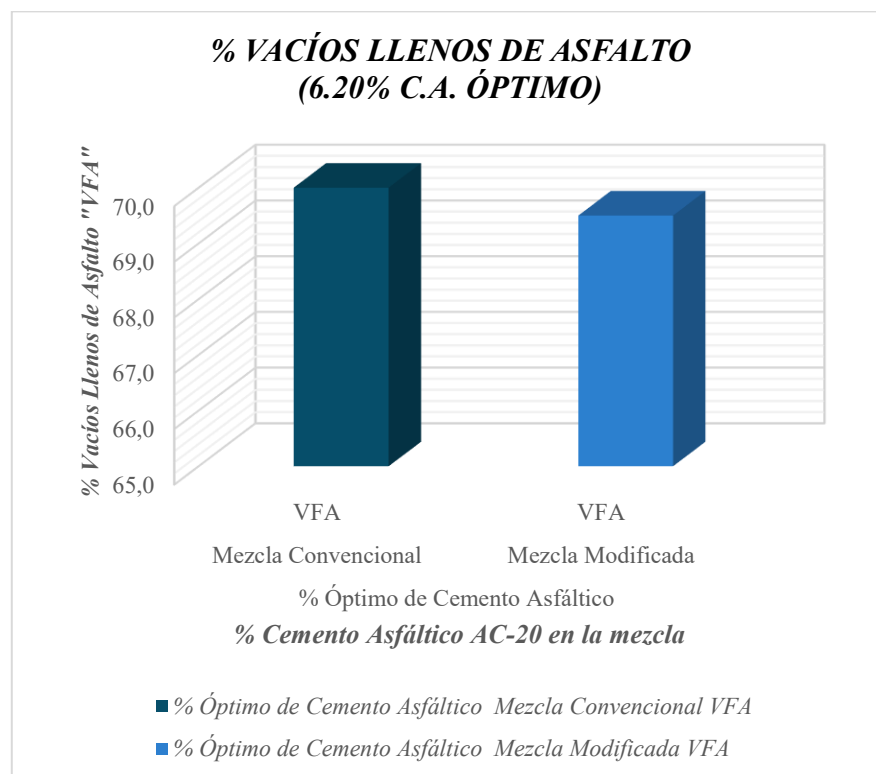


Fig. 58. Comparación VFA vs %Óptimo C.A

Análisis: Para el 6.20% de cemento asfáltico óptimo, los valores de los vacíos llenos de asfalto son muy parecidos en ambos casos con el 70% y 69.50% para la mezcla convencional y modificada respectivamente. En ambos casos el volumen de asfalto llega a cubrir cerca del 70% de espacios vacíos en los agregados. Asimismo, ambos cumplen con el rango estipulado en la norma MOP-001-F-2002 entre el 65% a 75%, lo que se traduce a que ninguno de los diseños será susceptible al ahuellamiento o exudación superficial.

5) Comparativa de la Estabilidad vs % Contenido Óptimo de Cemento Asfáltico

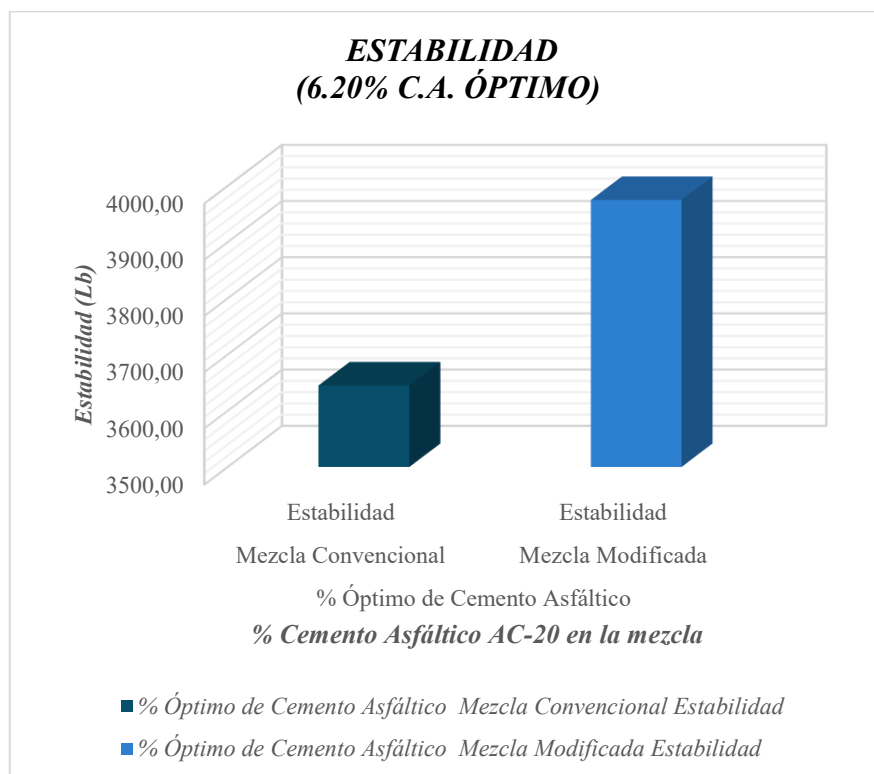


Fig. 59. Comparación Estabilidad vs %Óptimo C.A

Análisis: Para el 6.20% de cemento asfáltico óptimo, la mezcla modificada alcanza una estabilidad de 3975 lb a comparación de la mezcla convencional que resiste 3645 lb. Este incremento se da gracias a que el RAP aporta cierta rigidez por el asfalto envejecido que lo cubre, contrastando estos resultados, ambos cumplen con el mínimo de estabilidad exigido por la norma de 1800 lb para tráfico pesado. No obstante, la mezcla modificada responde a una mayor resistencia estructural frente a las deformaciones plásticas.

6) Comparativa del Flujo vs % Contenido Óptimo de Cemento Asfáltico

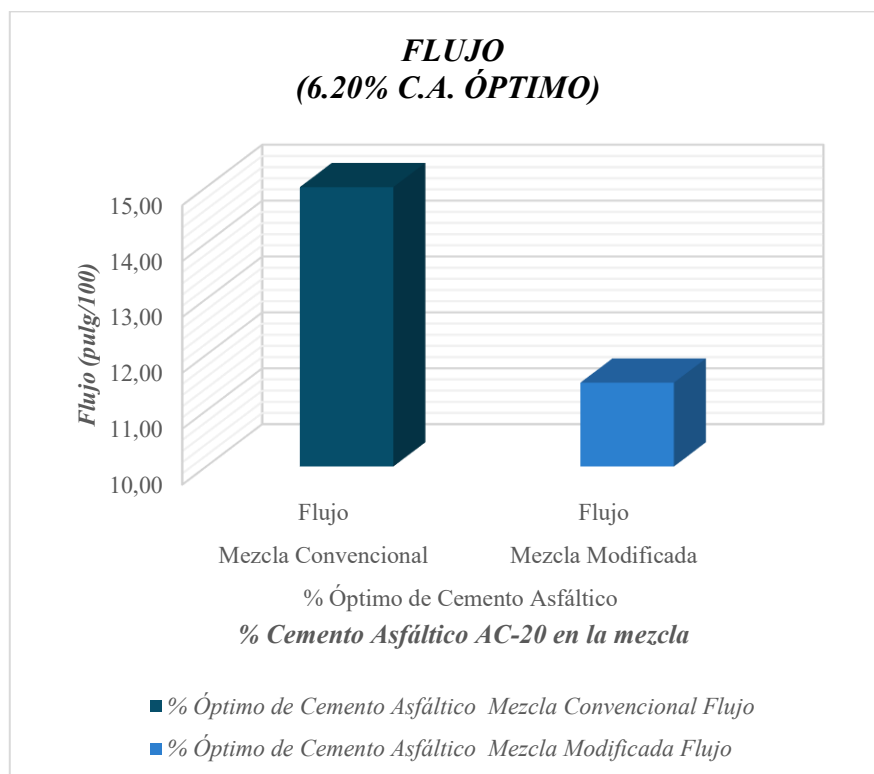


Fig. 60. Comparación Flujo vs %Óptimo C.A

Análisis: Para el 6.20% de cemento asfáltico óptimo, se puede observar una diferencia entre ambas mezclas, una lectura de 11.50 pulg/100 para la mezcla modificada a comparación de 15 pulg/100 de la mezcla convencional. La normativa MOP-001-F-2002 establece un rango entre 8 pulg/100 a 14 pulg/100, donde el valor de flujo de la mezcla convencional supera el límite superior, evidenciando que es más susceptible a deformarse bajo cargas de tráfico pesado y al ahuellamiento. En cambio, para la mezcla modificada el RAP ya aporta rigidez a la misma, por lo cual reduce la deformación plástica, y a su vez cumple con lo estipulado en la norma.

II. VERIFICACIÓN DE HIPÓTESIS

A. HIPÓTESIS

La incorporación del 20% de pavimento asfáltico reciclado (RAP), modifica de manera significativa las propiedades físico-mecánicas como el flujo y estabilidad, asimismo las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica en caliente mediante el método Marshall, lo

cual permitirá determinar un porcentaje óptimo de cemento asfáltico que cumpla con todas las especificaciones según lo exigido en la MOP-001-F-2002.

B. VERIFICACIÓN DE HIPÓTESIS

Se acepta parcialmente la hipótesis de investigación. La incorporación del 20% de agregado reciclado (RAP) modifica las propiedades físico-mecánicas de la mezcla asfáltica en caliente. El método Marshall permitió determinar el porcentaje óptimo de cemento asfáltico del 6.20%, cumpliendo con el porcentaje de vacíos de aire (V_a), el vacío llenos de asfalto (VFA), estabilidad y flujo. Sin embargo, en el parámetro de los vacíos en el Agregado Mineral (VMA) no cumple, ya que se mantuvo por debajo del límite de 14% establecido por la normativa.

CAPÍTULO VI.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

I. CONCLUSIONES

- Se determinó que los agregados nuevos de la MINA KUMOCHI y el cemento asfáltico AC-20 cumplen con los parámetros para una mezcla asfáltica en caliente establecidos por la norma MOP-001-F-2002. Se obtuvo un porcentaje de desgaste del 27.90% manteniéndose bajo el límite máximo de 40% establecido en la norma, punto de ablandamiento de 55 °C y punto de inflamación de 292°C.
- Se demostró mediante el ensayo de extracción de contenido de asfalto que el agregado reciclado tiene un 5.69% de asfalto residual, a su vez, cumple con las especificaciones granulométricas exigidas por la normativa para ser utilizadas en el diseño de una mezcla asfáltica. Debido al porcentaje de asfalto residual se optó por utilizar una dosificación del 20% de RAP.
- Se determinó mediante el método Marshall el porcentaje óptimo de cemento asfáltico de 6.20% tanto para la mezcla convencional como para la mezcla modificada con 20% de RAP. Esto indica que el agregado reciclado se integró de forma correcta y equilibrada sin absorber demasiado asfalto ni alterar el diseño, en comparación del agregado virgen.
- Se observó en la gráfica de VMA que para ambas mezclas no cumple con lo establecido por la MOP, debido a que se encuentran bajo los límites de lo mínimo para el TMN de 1/2" de 14%. Para la mezcla convencional se observó un valor del 13.70% a diferencia de la modificada que es aún menor 13.15%, se puede deducir que estos valores disminuyen por la cantidad de agregado fino que se dosifico para ambos casos. Aun así, no compromete la estructura de la mezcla.
- A partir del análisis comparativo entre la mezcla convencional y la mezcla modificada con 20% de RAP, alcanzó una estabilidad de 3975 lb que representa una diferencia significativa a comparación de la mezcla convencional de 3645 lb. Mientras que se evidenció que el flujo disminuyó en un 23.33% en comparación con la mezcla convencional, siendo capaz de mitigar el fenómeno de ahuellamiento ante cargas por tráfico pesado
- Los resultados obtenidos al comparar indicaron que la mezcla modificada con 20% de RAP, si afecta en el comportamiento frente a las cargas por tráfico pesado. Siendo una excelente alternativa para el diseño, ya que representa un ahorro al reutilizar el agregado proveniente del fresado y la cantidad de cemento asfáltico, debido a que el RAP ya representa el 1.14%

de asfalto en la mezcla. Asimismo, genera un impacto ambiental positivo dándole una segunda vida útil a este material que generalmente queda como escombros.

II. RECOMENDACIONES

- Se recomienda ajustar la dosificación de agregados nuevos y reciclados, disminuyendo la cantidad de polvo de piedra, ya que esto compensará el exceso de finos del material reciclado y el VMA se mantendrá por encima del valor mínimo exigido en la normativa.
- Se recomienda controlar la temperatura al calentar el RAP, ya que aporta cierto porcentaje de asfalto envejecido, y si se sobrecaliente podría oxidarse demás, arriesgando la flexibilidad y afectando el flujo.
- Para garantizar la correcta compactación de las briquetas, se recomienda controlar la temperatura a la que se está calentando el material, evitando que se sobrecaliente o que no alcance la temperatura mínima de compactación.
- Para que los agregados se adhieran de forma homogénea a la mezcla, se recomienda que el agregado pétreo nuevo adquiera una temperatura mayor a la del RAP antes de mezclar, evitando un choque térmico que afecte la trabajabilidad de la mezcla.
- Se recomienda complementar esta investigación realizando estudios avanzados que permitirán verificar con exactitud la resistencia real del diseño modificado frente a otros fenómenos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] O. D. Durán Plata and G. G. Gil Vergara, “Estudio del comportamiento de mezclas asfálticas con 100% RAP y adición de cal hidratada,” Programa de Especialización en Ingeniería de Pavimentos, Universidad Católica de Colombia, Bogotá D.C., Colombia, 2021.
- [2] J. González Cruz, A. Castellanos Cordero, G. Hernández Padrón, and M. de la L. Pérez Rea, “Diseño balanceado de mezcla asfáltica en caliente con pavimento recuperado (RAP) y agregado virgen,” Querétaro, Apr. 2025.
- [3] Instituto Nacional de Vías de Colombia, “Sección 200 - Agregados Pétreos: Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras,” Bogotá, Colombia, 2013.
- [4] Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones, “ESPECIFICACIONES GENERALES PARA LA CONSTRUCCION DE CAMINOS Y PUENTES,” Quito, 2002.
- [5] J. Morales Fournier, A. Alonso Aenlle, D. Ácosta Alvarez, A. J. Tenza Abril, and S. Ivorra Chorro, “Influence of the Addition of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) on the Performance of Hot Mix Asphalt Mixes,” *Ingeniería y Desarrollo*, vol. 43, no. 2, pp. 155–176, Jul. 2025, doi: 10.14482/inde.43.02.451.789.
- [6] M. Abdel-Jaber, R. A. Al-shamayleh, R. Ibrahim, T. Alkhriissat, and A. Alqatamin, “Mechanical properties evaluation of asphalt mixtures with variable contents of reclaimed asphalt pavement (RAP),” *Results in Engineering*, vol. 14, p. 100463, Jun. 2022, doi: 10.1016/J.RINENG.2022.100463.
- [7] F. Russo, R. Veropalumbo, G. Alfano, G. D’Addio, and C. Oreto, “Comparative sustainability analysis of RAP and recycled sand from solid urban waste into porous asphalt mixtures,” *Results in Engineering*, vol. 30, p. 110323, Jun. 2026, doi: 10.1016/J.RINENG.2026.110323.
- [8] A. S. Figueroa Infante and E. Fonseca Santanilla, “Desempeño del pavimento con mezcla reciclada-RAP y grano de caucho reciclado-GCR,” *Infraestructura Vial*, vol. 22, no. 39, pp. 20–28, Jul. 2020, doi: 10.15517/iv.v22i39.41205.

- [9] D. A. Ponce Del Peso, D. R. Campoverde Campoverde, and K. M. Mejillones Panchana, “ANÁLISIS DE NUEVA MEZCLA ASFÁLTICA A PARTIR DE MATERIAL ASFALTICO RECICLADO MEDIANTE LA PRUEBA MARSHALL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR,” *La Libertad*, Dec. 2023. Accessed: Jun. 02, 2026. [Online]. Available: <https://repositorio.upse.edu.ec/items/0107a48c-3112-4bb5-8a7b-3e49aab71245/full>
- [10] Instituto Ecuatoriano de Normalización, *NTE INEN 2060: Productos Derivados del Petróleo. Cementos Asfálticos (Asfaltos de Penetración). Requisitos*. Ecuador, 1996, pp. 1–6.
- [11] Asphalt Institute, *Asphalt Mix Design Methods*, 7th ed., Manual Series No. 2 (MS-2), Lexington, KY, USA: Asphalt Institute, 2014.
- [12] ASTM International, *Standard Test Methods for Quantitative Extraction of Asphalt Binder from Asphalt Mixtures*. West Conshohocken, PA, USA, 2023.
- [13] ASTM International, *Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*. West Conshohocken, PA, USA, 2024.
- [14] ASTM International, *Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate*. West Conshohocken, PA, USA, 2024.
- [15] ASTM International, *Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate*. West Conshohocken, PA, USA, 2024.
- [16] American Society for Testing and Materials, *ASTM C131 - 01: Método de Ensayo Normalizado para la Resistencia a la Degradación de los Áridos Gruesos de Tamaño Pequeño por el Método de Abrasión e Impacto en la Máquina Los Angeles*. United States, 2001.
- [17] EP Petroecuador - Gerencia de Refinación, “Informe de Resultados de Ensayo de Asfalto AC-20, Muestra ECC-26-0344 (Planta JEAL Construcciones),” 2026. Accessed: May 30, 2026. [Online]. Available: Acreditación SAE LEN 13-002

- [18] C. Guzman, “Peso específico de materiales bituminosos: Ensayo de laboratorio,” SlideShare.
- [19] ASTM International, *Standard Test Method for Density of Semi-Solid Bituminous Materials (Pycnometer Method)*. West Conshohocken, PA, USA, 2021.
- [20] ASTM International, *Standard Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus)*. West Conshohocken, PA, USA, 2020.
- [21] ASTM International, *Standard Test Method for Flash and Fire Points by Cleveland Open Cup Tester*. 2024.
- [22] Laboratorio de Pavimentos, Facultad de Ingeniería, Ciencias Físicas y Matemática, “*Práctica de ensayo para el peso específico máximo de mezclas asfálticas (Método Rice) AASHO T 209*,” Universidad Central del Ecuador, Quito, Ecuador
- [23] Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador, *Norma Ecuatoriana Vial (NEVI-12): Volumen N° 3, Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos y Puentes*. Quito, Ecuador, 2013.
- [24] J. B. Iñiguez, C. Flores, and M. Vásquez, “Marshall parameters for quality control of hot mix asphalt after pavement construction,” *Revista de la Construcción*, vol. 18, no. 1, pp. 178–185, Apr. 2019, doi: 10.7764/RDLC.18.1.178.

ANEXOS

Anexo 1: Contenido de Asfalto de los Agregados Reciclados



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL



ENSAYO DE EXTRACCIÓN DE CONTENIDO DE ASFALTO EN LOS AGREGADOS RECICLADOS

NORMA ASTM D2172

Ensayado por:

Camila Monserrath Montesdeoca Chafila

Tutor:

Ing. Rodrigo Iván Acosta Lozada, M.Sc

Muestra:

JEAL CONSTRUCCIONES

Muestra	Datos (g)	Resultado	Muestra	Datos	Resultado
Muestra 1	A = 775,6	6,24%	Muestra 3	A = 761,8	5,43%
	B = 724,8			B = 717,3	
	C = 14,0			C = 14,8	
	D = 15,1			D = 15,2	
	E = -1,1			E = -0,4	
	F = 3,5			F = 3,5	
Muestra 2	A = 790,7	6,15%	Muestra 4	A = 751,7	4,94%
	B = 739,9			B = 711,7	
	C = 14,0			C = 14,2	
	D = 15,3			D = 14,8	
	E = -1,3			E = -0,6	
	F = 3,5			F = 3,5	
PROMEDIO					
5,69%					

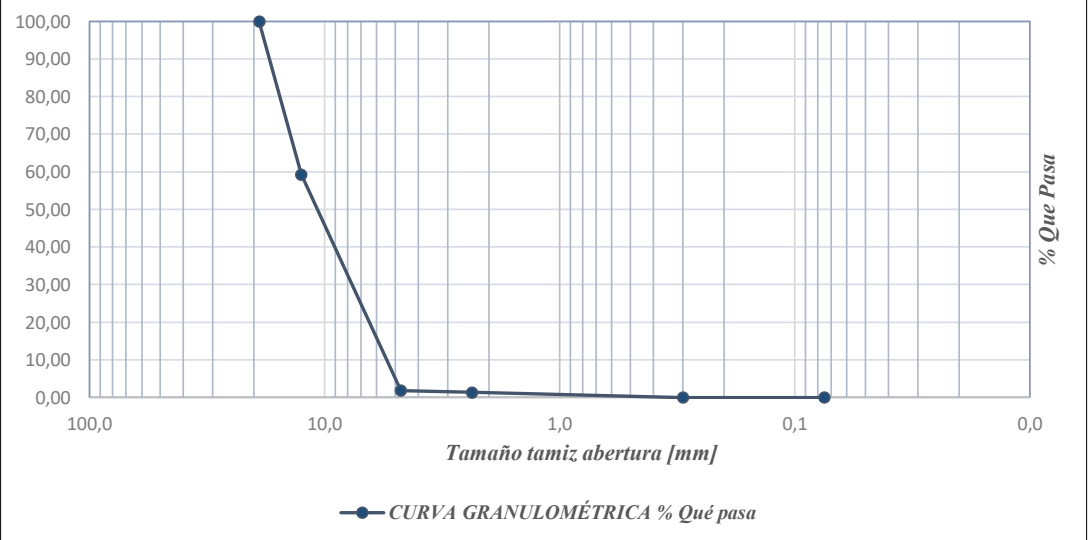
Anexo 2: Granulometría de los Agregados Gruesos 3/4"

	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL	
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE AGREGADO GRUESO 3/4" NUEVO		
NORMA ASTM C136		
Ensayado por:	Camila Monserrath Montesdeoca	
Tutor:	Ing. Rodrigo Iván Acosta Lozada, M.Sc	
Muestra:	JEAL Construcciones	

TMN =	12,7 mm	o	1/2 pulg
--------------	---------	---	----------

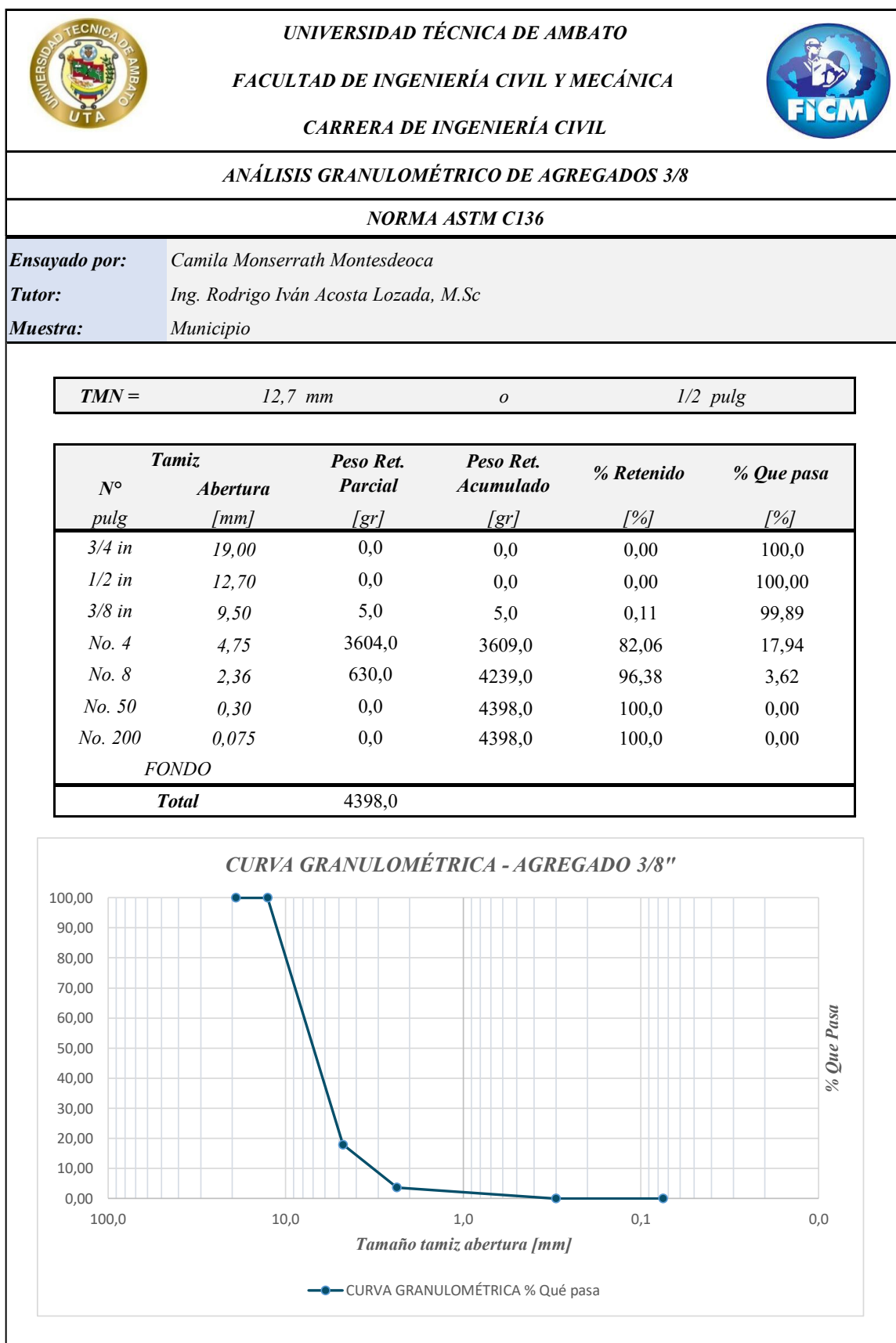
Nº	Tamiz Abertura [mm]	Peso Ret. Parcial [gr]	Peso Ret. Acumulado [gr]	% Retenido [%]	% Que pasa [%]
3/4 in	19,00	0,0	0,0	0,00	100,0
1/2 in	12,70	1945,0	1945,0	40,71	59,29
3/8 in	9,50	2059,0	4004,0	83,80	16,20
No. 4	4,75	685,0	4689,0	98,14	1,86
No. 8	2,36	25,0	4714,0	98,66	1,34
No. 50	0,30	0,0	4778,0	100,0	0,00
No. 200	0,075	0,0	4778,0	100,0	0,00
<i>FONDO</i>					
Total		4778,0			

CURVA GRANULOMÉTRICA - AGREGADO 3/8"

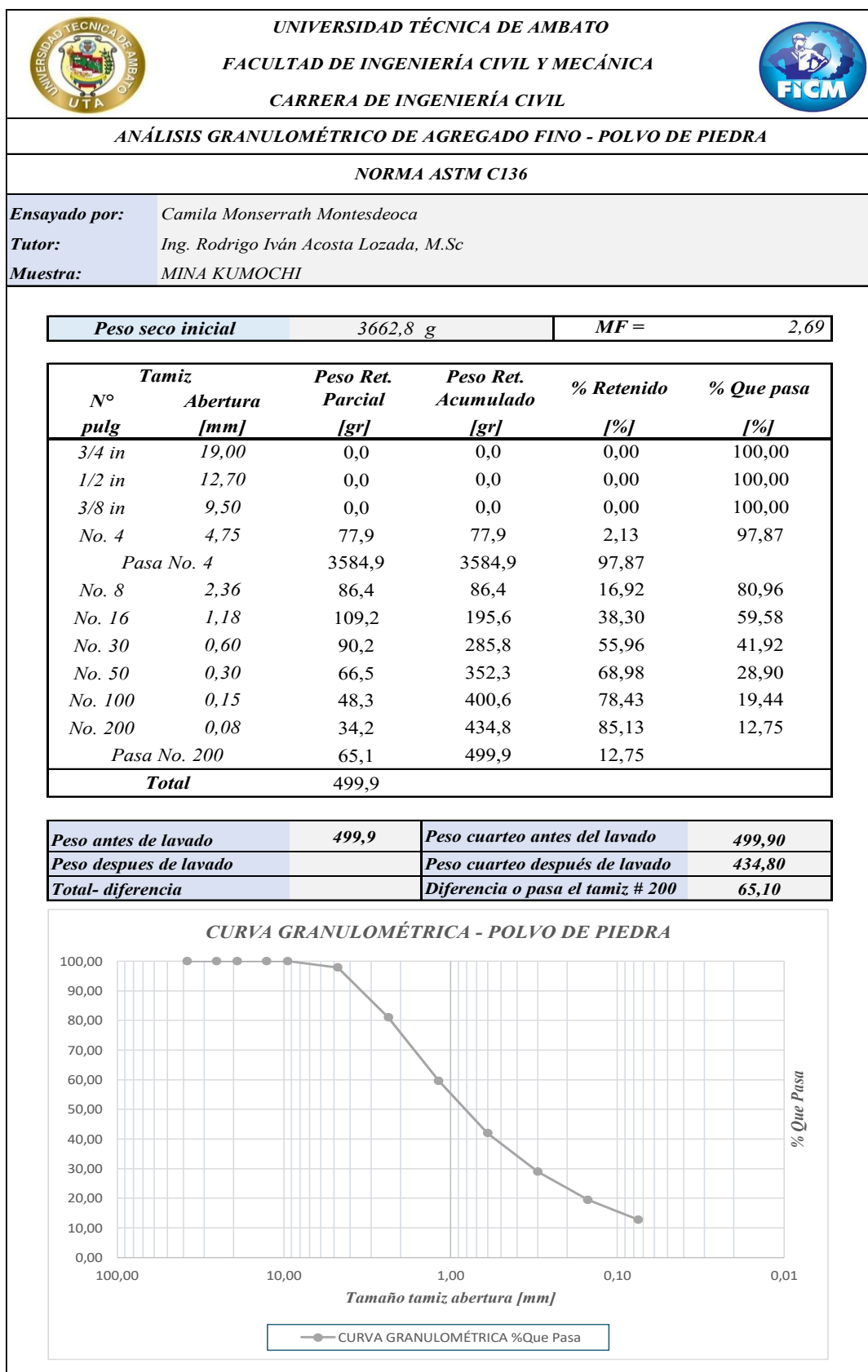


—●— CURVA GRANULOMÉTRICA % Que pasa

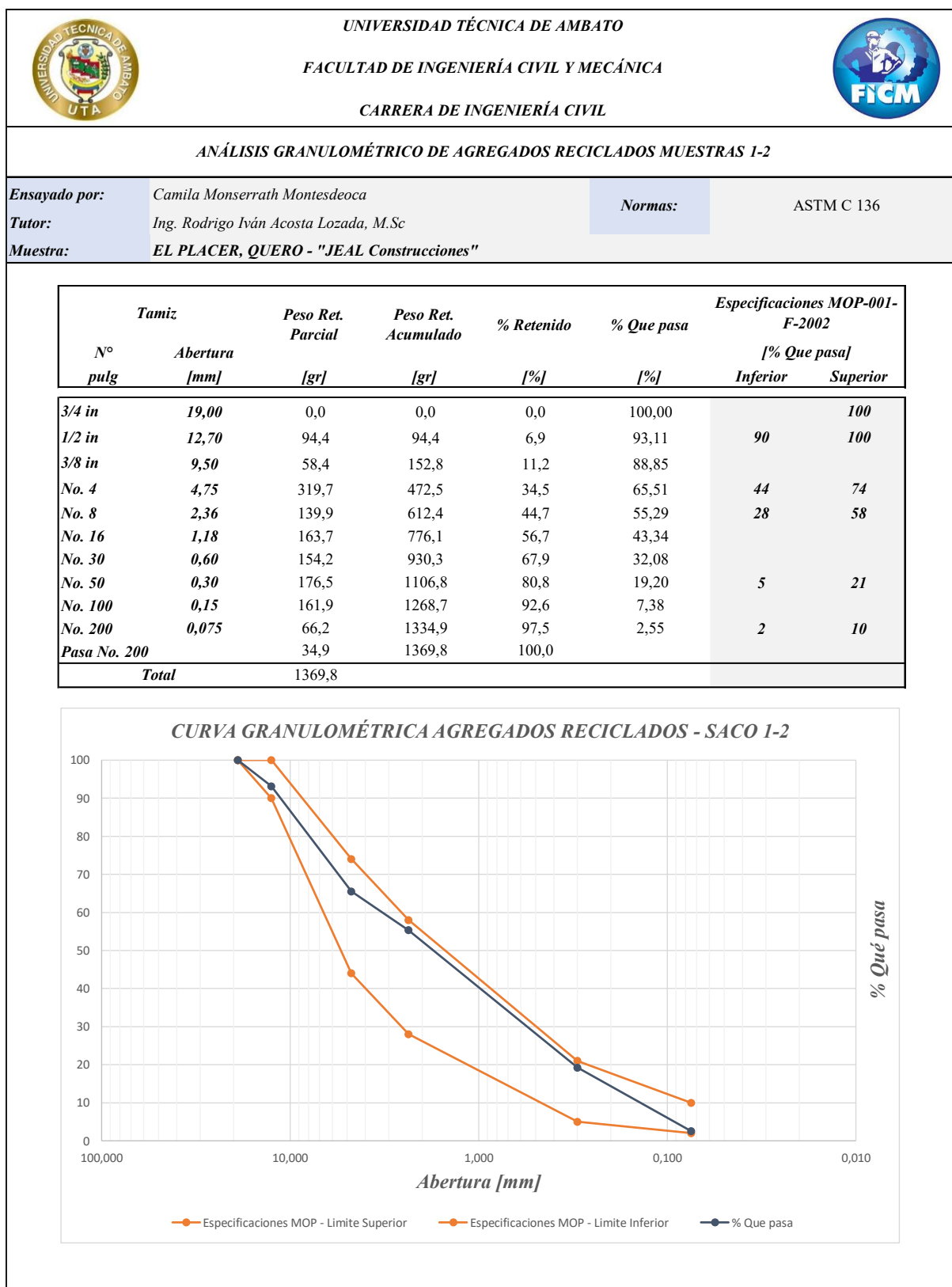
Anexo 3: Granulometría de los Agregados Gruesos 3/8"



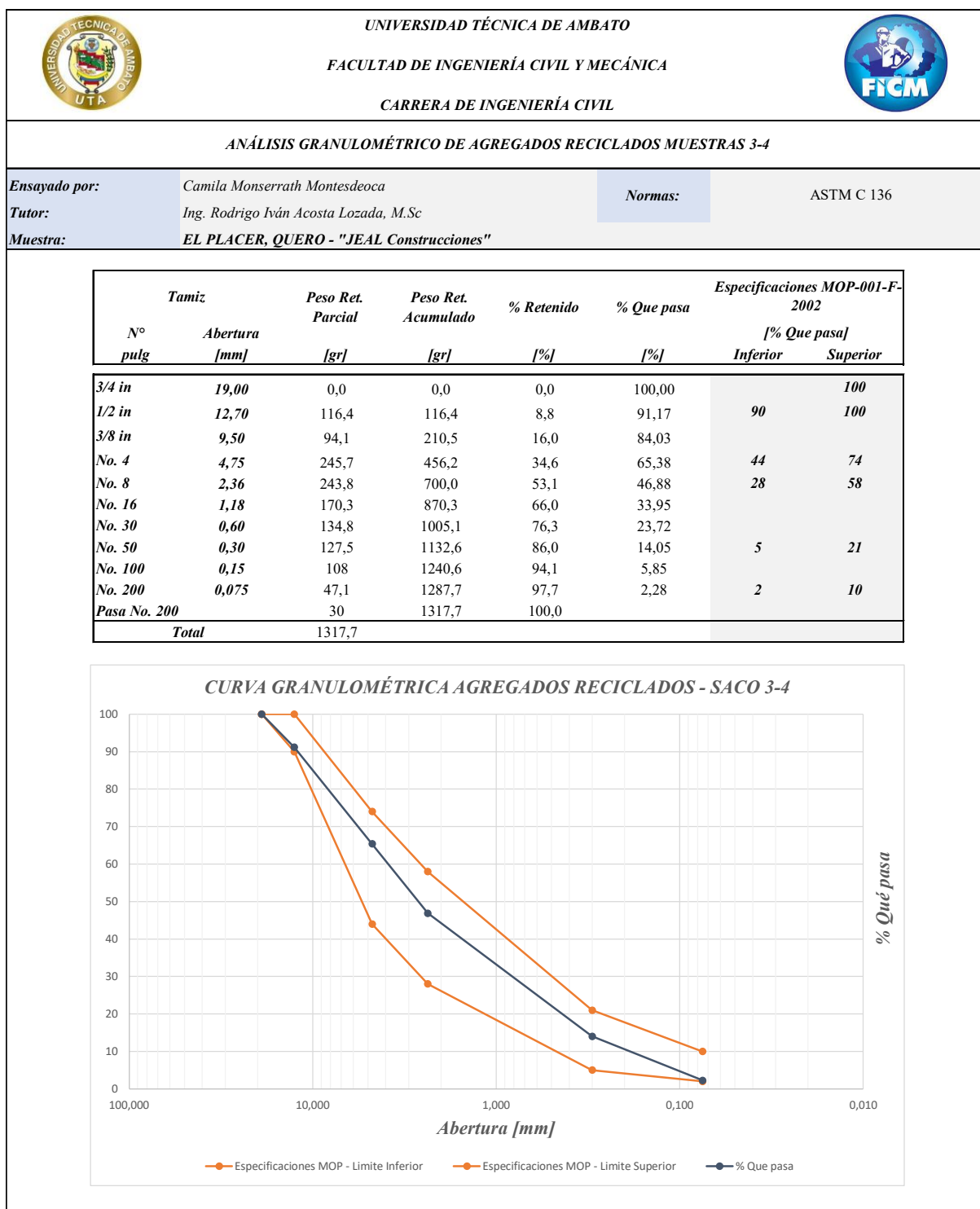
Anexo 4: Granulometría de las Agregados Finos - Polvo de Piedra



Anexo 5: Granulometría de los Agregados Reciclados Muestra 1-2



Anexo 6: Granulometría de los Agregados Reciclados Muestra 3-4



Anexo 7: Gravedad Específica y Absorción Agregado Grueso 3/4 Nuevo

	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL																																				
GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN AGREGADO GRUESO 3/4 NUEVO																																					
Ensayado por: Tutor: Muestra:	Camila Monserrath Montesdeoca Ing. Rodrigo Iván Acosta Lozada, M.Sc Grava triturada 3/4 MINA KUMOCHI	Norma: ASTM C 127 ; NTE INEN 857:2010																																			
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 30%;">Tamaño nominal</td> <td style="width: 35%;">19 mm</td> <td style="width: 10%; text-align: center;">o</td> <td style="width: 25%;">3/4 pulg</td> </tr> </table>			Tamaño nominal	19 mm	o	3/4 pulg																															
Tamaño nominal	19 mm	o	3/4 pulg																																		
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 15%;"></td> <td style="width: 35%; text-align: center;">Muestra 1</td> <td style="width: 10%;"></td> <td style="width: 35%; text-align: center;">Muestra 2</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Datos</td> <td>A = 2680,3 gr</td> <td></td> <td>A = 2405,6 gr</td> </tr> <tr> <td></td> <td>B = 2746 gr</td> <td></td> <td>B = 2466 gr</td> </tr> <tr> <td></td> <td>C = 1693 gr</td> <td></td> <td>C = 1518 gr</td> </tr> </table>				Muestra 1		Muestra 2	Datos	A = 2680,3 gr		A = 2405,6 gr		B = 2746 gr		B = 2466 gr		C = 1693 gr		C = 1518 gr																			
	Muestra 1		Muestra 2																																		
Datos	A = 2680,3 gr		A = 2405,6 gr																																		
	B = 2746 gr		B = 2466 gr																																		
	C = 1693 gr		C = 1518 gr																																		
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 20%;">Fórmulas</td> <td colspan="2" style="width: 20%; text-align: center;">Muestra 1</td> <td colspan="2" style="width: 20%; text-align: center;">Muestra 2</td> <td colspan="2" style="width: 20%; text-align: center;">Promedio</td> </tr> <tr> <td>$G_s = \frac{A}{B - C}$</td> <td style="text-align: center;">2,546</td> <td style="text-align: center;">gr/cm³</td> <td style="text-align: center;">2,538</td> <td style="text-align: center;">gr/cm³</td> <td style="text-align: center;">2,542</td> <td style="text-align: center;">gr/cm³</td> </tr> <tr> <td>$G_{sss} = \frac{B}{B - C}$</td> <td style="text-align: center;">2,608</td> <td style="text-align: center;">gr/cm³</td> <td style="text-align: center;">2,602</td> <td style="text-align: center;">gr/cm³</td> <td style="text-align: center;">2,605</td> <td style="text-align: center;">gr/cm³</td> </tr> <tr> <td>$G = \frac{A}{A - C}$</td> <td style="text-align: center;">2,715</td> <td style="text-align: center;">gr/cm³</td> <td style="text-align: center;">2,711</td> <td style="text-align: center;">gr/cm³</td> <td style="text-align: center;">2,713</td> <td style="text-align: center;">gr/cm³</td> </tr> <tr> <td>$\%Abs = \frac{B - A}{A} \times 100$</td> <td style="text-align: center;">2,452</td> <td style="text-align: center;">%</td> <td style="text-align: center;">2,511</td> <td style="text-align: center;">%</td> <td style="text-align: center;">2,482</td> <td style="text-align: center;">%</td> </tr> </table>			Fórmulas	Muestra 1		Muestra 2		Promedio		$G_s = \frac{A}{B - C}$	2,546	gr/cm ³	2,538	gr/cm ³	2,542	gr/cm ³	$G_{sss} = \frac{B}{B - C}$	2,608	gr/cm ³	2,602	gr/cm ³	2,605	gr/cm ³	$G = \frac{A}{A - C}$	2,715	gr/cm ³	2,711	gr/cm ³	2,713	gr/cm ³	$\%Abs = \frac{B - A}{A} \times 100$	2,452	%	2,511	%	2,482	%
Fórmulas	Muestra 1		Muestra 2		Promedio																																
$G_s = \frac{A}{B - C}$	2,546	gr/cm ³	2,538	gr/cm ³	2,542	gr/cm ³																															
$G_{sss} = \frac{B}{B - C}$	2,608	gr/cm ³	2,602	gr/cm ³	2,605	gr/cm ³																															
$G = \frac{A}{A - C}$	2,715	gr/cm ³	2,711	gr/cm ³	2,713	gr/cm ³																															
$\%Abs = \frac{B - A}{A} \times 100$	2,452	%	2,511	%	2,482	%																															

Anexo 8: Gravedad Específica y Absorción Agregado Grueso 3/8 Nuevo

	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL																																				
GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN AGREGADO GRUESO 3/8 NUEVO																																					
Ensayado por: Tutor: Muestra:	Camila Monserrath Montesdeoca Ing. Rodrigo Iván Acosta Lozada, M.Sc Grava triturada 3/8 MINA KUMOCHI	Norma: ASTM C 127 ; NTE INEN 857:2010																																			
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 30%;">Tamaño nominal</td> <td style="width: 35%;">9,5 mm</td> <td style="width: 10%; text-align: center;">o</td> <td style="width: 25%;">3/8 pulg</td> </tr> </table>			Tamaño nominal	9,5 mm	o	3/8 pulg																															
Tamaño nominal	9,5 mm	o	3/8 pulg																																		
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 15%;"></td> <td style="width: 35%; text-align: center;">Muestra 1</td> <td style="width: 10%;"></td> <td style="width: 35%; text-align: center;">Muestra 2</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Datos</td> <td>A = 2290,8 gr</td> <td></td> <td>A = 2090 gr</td> </tr> <tr> <td></td> <td>B = 2365,1 gr</td> <td></td> <td>B = 2161,3 gr</td> </tr> <tr> <td></td> <td>C = 1454,7 gr</td> <td></td> <td>C = 1328,3 gr</td> </tr> </table>				Muestra 1		Muestra 2	Datos	A = 2290,8 gr		A = 2090 gr		B = 2365,1 gr		B = 2161,3 gr		C = 1454,7 gr		C = 1328,3 gr																			
	Muestra 1		Muestra 2																																		
Datos	A = 2290,8 gr		A = 2090 gr																																		
	B = 2365,1 gr		B = 2161,3 gr																																		
	C = 1454,7 gr		C = 1328,3 gr																																		
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 20%;">Fórmulas</td> <td colspan="2" style="width: 20%; text-align: center;">Muestra 1</td> <td colspan="2" style="width: 20%; text-align: center;">Muestra 2</td> <td colspan="2" style="width: 20%; text-align: center;">Promedio</td> </tr> <tr> <td>$G_s = \frac{A}{B - C}$</td> <td style="text-align: center;">2,517</td> <td style="text-align: center;">gr/cm³</td> <td style="text-align: center;">2,510</td> <td style="text-align: center;">gr/cm³</td> <td style="text-align: center;">2,514</td> <td style="text-align: center;">gr/cm³</td> </tr> <tr> <td>$G_{sss} = \frac{B}{B - C}$</td> <td style="text-align: center;">2,598</td> <td style="text-align: center;">gr/cm³</td> <td style="text-align: center;">2,595</td> <td style="text-align: center;">gr/cm³</td> <td style="text-align: center;">2,597</td> <td style="text-align: center;">gr/cm³</td> </tr> <tr> <td>$G = \frac{A}{A - C}$</td> <td style="text-align: center;">2,740</td> <td style="text-align: center;">gr/cm³</td> <td style="text-align: center;">2,744</td> <td style="text-align: center;">gr/cm³</td> <td style="text-align: center;">2,742</td> <td style="text-align: center;">gr/cm³</td> </tr> <tr> <td>$\%Abs = \frac{B - A}{A} \times 100$</td> <td style="text-align: center;">3,244</td> <td style="text-align: center;">%</td> <td style="text-align: center;">3,412</td> <td style="text-align: center;">%</td> <td style="text-align: center;">3,328</td> <td style="text-align: center;">%</td> </tr> </table>			Fórmulas	Muestra 1		Muestra 2		Promedio		$G_s = \frac{A}{B - C}$	2,517	gr/cm ³	2,510	gr/cm ³	2,514	gr/cm ³	$G_{sss} = \frac{B}{B - C}$	2,598	gr/cm ³	2,595	gr/cm ³	2,597	gr/cm ³	$G = \frac{A}{A - C}$	2,740	gr/cm ³	2,744	gr/cm ³	2,742	gr/cm ³	$\%Abs = \frac{B - A}{A} \times 100$	3,244	%	3,412	%	3,328	%
Fórmulas	Muestra 1		Muestra 2		Promedio																																
$G_s = \frac{A}{B - C}$	2,517	gr/cm ³	2,510	gr/cm ³	2,514	gr/cm ³																															
$G_{sss} = \frac{B}{B - C}$	2,598	gr/cm ³	2,595	gr/cm ³	2,597	gr/cm ³																															
$G = \frac{A}{A - C}$	2,740	gr/cm ³	2,744	gr/cm ³	2,742	gr/cm ³																															
$\%Abs = \frac{B - A}{A} \times 100$	3,244	%	3,412	%	3,328	%																															

Anexo 9: Gravedad Específica y Absorción Agregado Fino Nuevo "Polvo de piedra"



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL



GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN AGREGADO FINO NUEVO "POLVO DE PIEDRA"

Ensayado por:

Camila Monserrath Montesdeoca

Norma:

ASTM C 128; NTE INEN 856:2010

Tutor:

Ing. Rodrigo Iván Acosta Lozada, M.Sc

Muestra:

AGREGADO FINO MINA KUMUCHI

Datos	Muestra 1			Muestra 2		
	A =	769,9	gr	A =	819,1	gr
	B =	1326,1	gr	B =	1370,4	gr
	C =	1785,7	gr	C =	1875,2	gr
	D =	780,7	gr	D =	833,4	gr

Fórmulas	Muestra 1		Muestra 2		Promedio	
$G_{sb} = \frac{A}{B + D - C}$	2,398	gr/cm3	2,493	gr/cm3	2,446	gr/cm3
$G_{sss} = \frac{D}{B + D - C}$	2,432	gr/cm3	2,537	gr/cm3	2,485	gr/cm3
$G_{sa} = \frac{A}{B + A - C}$	2,482	gr/cm3	2,607	gr/cm3	2,545	gr/cm3
$\%Abs = \frac{D - A}{A} \times 100$	1,403	%	1,75	%	1,577	%

Anexo 10: Gravedad Específica y Absorción Agregado Grueso RAP



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL



GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN AGREGADO GRUESO RAP

Ensayado por:

Camila Monserrath Montesdeoca

Normas:

ASTM C 127 ; NTE INEN 857:2010

Tutor:

Ing. Rodrigo Iván Acosta Lozada, M.Sc

Muestra:

EL PLACER, QUERO

Datos	Muestra 1			Muestra 2		
	A =	2142,5	gr	A =	2218,6	gr
	B =	2183,8	gr	B =	2269,4	gr
	C =	1362,4	gr	C =	1430,9	gr

Fórmulas	Muestra 1		Muestra 2		Promedio	
$G_s = \frac{A}{B - C}$	2,609	gr/cm3	2,646	gr/cm3	2,628	gr/cm3
$G_{sss} = \frac{B}{B - C}$	2,659	gr/cm3	2,707	gr/cm3	2,683	gr/cm3
$G = \frac{A}{A - C}$	2,747	gr/cm3	2,817	gr/cm3	2,782	gr/cm3
$\%Abs = \frac{B - A}{A} \times 100$	1,928	%	2,290	%	2,109	%

Anexo 11: Gravedad Específica y Absorción Agregado Fino RAP

	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL	
GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN AGREGADO FINO RAP		
Ensayado por:	Camila Monserrath Montesdeoca	Normas: ASTM C 128; NTE INEN 856:2010
Tutor:	Ing. Rodrigo Iván Acosta Lozada, M.Sc	
Muestra:	EL PLACER, QUERO	

	Muestra 1			Muestra 2		
Datos	A =	492,6	gr	A =	495,1	gr
	B =	1317,3	gr	B =	1325,3	gr
	C =	1618,3	gr	C =	1627,5	gr
	D =	502,4	gr	D =	505,8	gr

Fórmulas	Muestra 1		Muestra 2		Promedio	
$G_{sb} = \frac{A}{B + D - C}$	2,446	gr/cm3	2,432	gr/cm3	2,439	gr/cm3
$G_{sss} = \frac{D}{B + D - C}$	2,495	gr/cm3	2,485	gr/cm3	2,49	gr/cm3
$G_{sa} = \frac{A}{B + A - C}$	2,571	gr/cm3	2,567	gr/cm3	2,569	gr/cm3
$\%Abs = \frac{D - A}{A} \times 100$	1,990	%	2,162	%	2,076	%

Anexo 12: Cálculo del desgaste del Agregado Grueso mediante el uso de la Máquina de los Ángeles

	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL	
DETERMINACIÓN DEL VALOR DE LA DEGRADACIÓN DEL ÁRIDO GRUESO DE PARTÍCULAS MENORES A 37,5mm MEDIANTE EL USO DE LA MÁQUINA DE LOS ÁNGELES.		
NORMA ASTM C131		
Ensayado por: Camila Monserrath Montesdeoca		
Tutor: Ing. Rodrigo Iván Acosta Lozada, M.Sc		
Muestra: MINA KUMUCHI		

Tamaño del tamiz (Aberturas cuadradas)		Masa de los tamaños indicados (g)								DEGRADACIÓN	27,90%
		Granulometría									
Pasa	Retenido	A	A	B	B	C	C	D	D	Pesos muestra para ensayar (g)	
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	2500,5						
12,5 mm (1/2")	9,5 mm (3/8")	1250 ± 10		2500 ± 10	2500,5						
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	5001	5000 ± 10		5000 ± 10			
No. esferas:		12		11		8		6			
Revoluciones:		500									

DATOS:	
Masa inicial de la muestra de ensayo [A] =	5001,0 g
Masa de la muestra retenida en el tamiz No. 12 (1,70 mm) [B] =	3605,5 g
Masa de la carga (pesar el conjunto de esferas) =	4953,5 g

CÁLCULO DE LA DEGRADACIÓN (D)
$D(\%) = \left(\frac{A - B}{A} \right) * 100$

Anexo 13: Características del Cemento Asfáltico AC-20 Petroecuador

Datos de Análisis							
Temperatura Ambiente	23,7 °C			Presión Barométrica	100,9 kPa		
Humedad Relativa Ambiente	71,4 %HR						
Fecha de inicio	22/2/2026 17:55			Fecha de finalización	22/2/2023 22:30		
Fecha de emisión del informe	23/2/2026						
Resultados							
Parámetro	Método		Especificación		Resultado	Unidad de Medida	U ²
	(ASTM_INEN)	Mín.	Máx.				
Viscosidad Absoluta 140°F(60°C)	ASTM D2171_NTE INEN 810		160	240	235	Pa s	± 4,3 %
Viscosidad Cinemática 275°F(135°)	ASTM D2170_NTE INEN 810/1981		300	-	413	mm ² /s	-
Penetración 77°F(25°c,100Gr,5s)	ASTM D5_NTE INEN 918		60	-	73	dmm	± 4 dmm
Punto de Inflamación	ASTM D92_NTE INEN 808		232	-	326	°C	-
Solubilidad en tricloroetileno	ASTM D2042_NTE INEN 915		99	-	99,98	%P	-
Residuo de ensayo de película fina en horno rotatorio	N/A		-	-	-	-	-
Viscosidad Absoluta 60°C	ASTM D2171_NTE INEN 810		-	800	669	Pa s	-
Ductilidad 77°F(25°C)5cm/min	ASTM D113_NTE INEN 916		50	-	68	cm	-
Gravedad API a 60°F(15.6°C)	ASTM D1298_NTE INEN2319		REPORTE	REPORTE	7	°API	-
Gravedad Relativa 15.6°C/15.6°C	ASTM D1298_NTE INEN2319		REPORTE	REPORTE	1,0217	-	-
Gravedad específica 25/25°C	ASTM 70		REPORTE	REPORTE	1,013	-	± 0,002
Punto de ablandamiento	ASTM D36		-	-	49,9	°C	± 2,1 °C
Índice de penetración	ASTM D5		-1,5	1	-0,29	-	-
Cambio de masa	ASTM D2872		-	1	-0,23	%P	-
API Observado: 15,359							
Temperatura Observada: 104,0 °C							

Anexo 14: Gravedad Específica del Cemento Asfáltico

	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL																	
DETERMINACIÓN DE LA GRAVEDAD ESPECÍFICA DEL CEMENTO ASFÁLTICO																		
NORMA ASTM D70																		
Ensayado por:	Camila Monserrath Montesdeoca Chafila																	
Tutor:	Ing. Rodrigo Iván Acosta Lozada, M.Sc																	
Muestra:	JEAL "Construcciones"																	
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <th style="width: 40%;"></th> <th style="width: 60%; text-align: center;">Muestra 1</th> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Datos</td> <td> <table style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 30%;">A =</td> <td style="width: 30%;">22,45</td> <td style="width: 40%;">gr</td> </tr> <tr> <td>B =</td> <td>46,38</td> <td>gr</td> </tr> <tr> <td>C =</td> <td>33,95</td> <td>gr</td> </tr> <tr> <td>D =</td> <td>46,54</td> <td>gr</td> </tr> </table> </td> </tr> </table>				Muestra 1	Datos	<table style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 30%;">A =</td> <td style="width: 30%;">22,45</td> <td style="width: 40%;">gr</td> </tr> <tr> <td>B =</td> <td>46,38</td> <td>gr</td> </tr> <tr> <td>C =</td> <td>33,95</td> <td>gr</td> </tr> <tr> <td>D =</td> <td>46,54</td> <td>gr</td> </tr> </table>	A =	22,45	gr	B =	46,38	gr	C =	33,95	gr	D =	46,54	gr
	Muestra 1																	
Datos	<table style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 30%;">A =</td> <td style="width: 30%;">22,45</td> <td style="width: 40%;">gr</td> </tr> <tr> <td>B =</td> <td>46,38</td> <td>gr</td> </tr> <tr> <td>C =</td> <td>33,95</td> <td>gr</td> </tr> <tr> <td>D =</td> <td>46,54</td> <td>gr</td> </tr> </table>	A =	22,45	gr	B =	46,38	gr	C =	33,95	gr	D =	46,54	gr					
A =	22,45	gr																
B =	46,38	gr																
C =	33,95	gr																
D =	46,54	gr																
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <th style="width: 40%; text-align: center;">Fórmulas</th> <th style="width: 60%; text-align: center;">Resultado</th> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"> $\delta_{asf} = \frac{C - A}{(B - A) - (D - C)}$ </td> <td style="text-align: center;"> <table style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 60%;">1,0142</td> <td style="width: 40%;">gr/cm³</td> </tr> </table> </td> </tr> </table>			Fórmulas	Resultado	$\delta_{asf} = \frac{C - A}{(B - A) - (D - C)}$	<table style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 60%;">1,0142</td> <td style="width: 40%;">gr/cm³</td> </tr> </table>	1,0142	gr/cm ³										
Fórmulas	Resultado																	
$\delta_{asf} = \frac{C - A}{(B - A) - (D - C)}$	<table style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 60%;">1,0142</td> <td style="width: 40%;">gr/cm³</td> </tr> </table>	1,0142	gr/cm ³															
1,0142	gr/cm ³																	

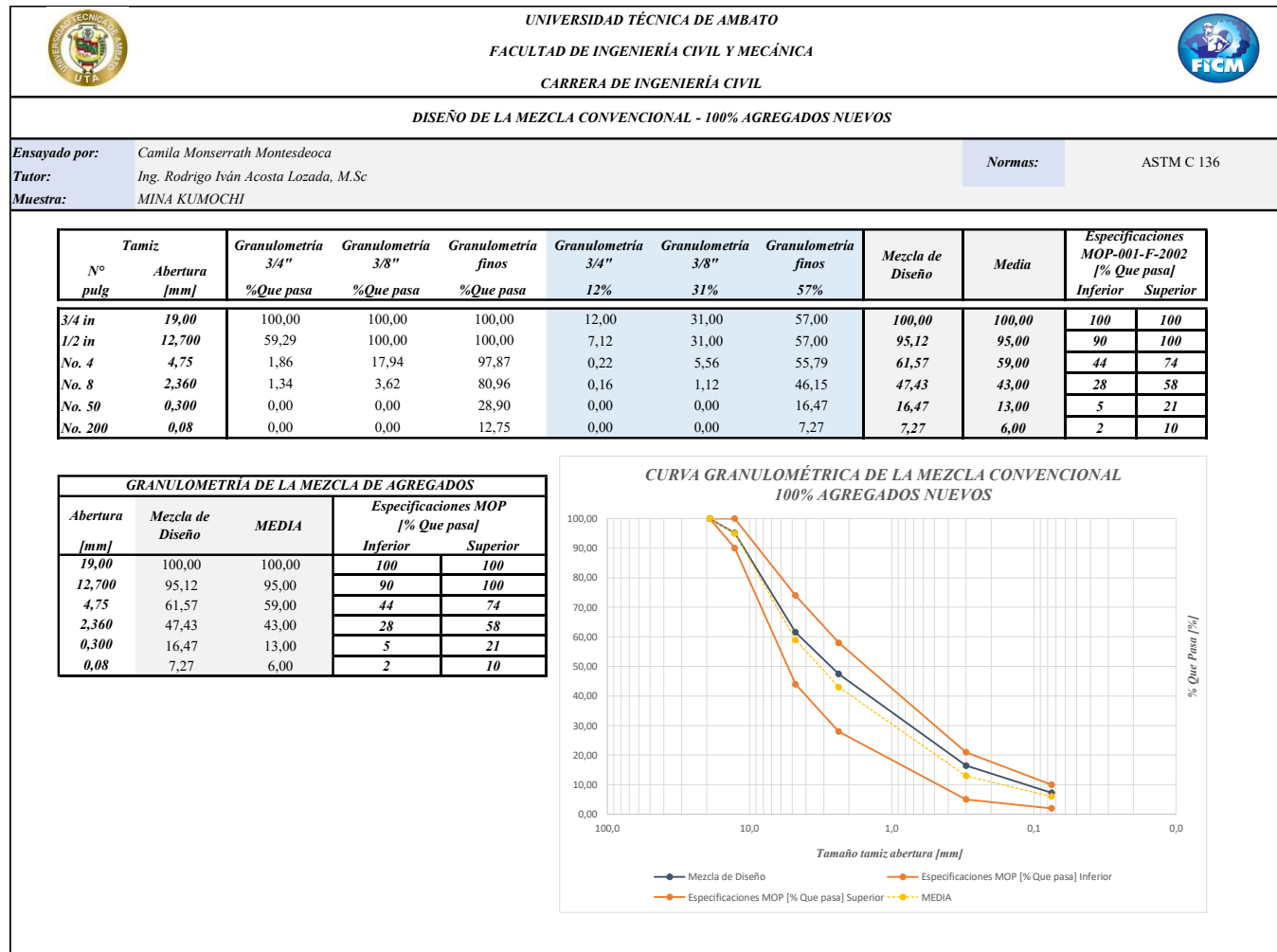
Anexo 15: Punto de Ablandamiento del Cemento Asfáltico

	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL															
DETERMINACIÓN DEL PUNTO DE ABLANDAMIENTO DEL CEMENTO ASFÁLTICO																
NORMA ASTM D36																
Ensayado por:	Camila Monserrath Montesdeoca Chafila															
Tutor:	Ing. Rodrigo Iván Acosta Lozada, M.Sc															
Muestra:	JEAL "Construcciones"															
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <th style="width: 15%; text-align: center;">Muestra No.</th> <th style="width: 20%; text-align: center;">Tiempo min</th> <th style="width: 20%; text-align: center;">Temperatura °C</th> <th style="width: 45%; text-align: center;">Promedio °C</th> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">1</td> <td style="text-align: center;">08:24,2</td> <td style="text-align: center;">56</td> <td rowspan="3" style="text-align: center; vertical-align: middle;">55</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">2</td> <td style="text-align: center;">07:37,0</td> <td style="text-align: center;">54</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">3</td> <td style="text-align: center;">07:27,2</td> <td style="text-align: center;">55</td> </tr> </table>			Muestra No.	Tiempo min	Temperatura °C	Promedio °C	1	08:24,2	56	55	2	07:37,0	54	3	07:27,2	55
Muestra No.	Tiempo min	Temperatura °C	Promedio °C													
1	08:24,2	56	55													
2	07:37,0	54														
3	07:27,2	55														

Anexo 16: Punto de Inflamación del cemento asfáltico Ac-20

	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL																
DETERMINACIÓN DEL PUNTO DE INFLAMACIÓN DEL CEMENTO ASFÁLTICO																	
NORMA ASTM D92																	
Ensayado por:	Camila Monserrath Montesdeoca																
Tutor:	Ing. Rodrigo Iván Acosta Lozada, M.Sc																
Muestra:	JEAL "Construcciones"																
<table border="1"> <thead> <tr> <th data-bbox="421 712 558 784"><i>Muestra No.</i></th> <th data-bbox="564 712 871 784"><i>Punto de inflamación °C</i></th> <th data-bbox="877 712 1177 784"><i>Punto de combustión °C</i></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td data-bbox="475 792 504 819">1</td> <td data-bbox="692 792 743 819">288</td> <td data-bbox="1002 792 1053 819">302</td> </tr> <tr> <td data-bbox="475 828 504 855">2</td> <td data-bbox="692 828 743 855">295</td> <td data-bbox="1002 828 1053 855">316</td> </tr> <tr> <td colspan="3" data-bbox="734 887 855 913" style="text-align: center;">Promedio</td> </tr> <tr> <td></td> <td data-bbox="619 945 813 972">292 °C</td> <td data-bbox="928 945 1123 972">309 °C</td> </tr> </tbody> </table>			<i>Muestra No.</i>	<i>Punto de inflamación °C</i>	<i>Punto de combustión °C</i>	1	288	302	2	295	316	Promedio				292 °C	309 °C
<i>Muestra No.</i>	<i>Punto de inflamación °C</i>	<i>Punto de combustión °C</i>															
1	288	302															
2	295	316															
Promedio																	
	292 °C	309 °C															

Anexo 17: Diseño de la mezcla convencional



Anexo 18: Gravedad Específica Combinada de los Agregados.

	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL	
GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO MEZCLA CONVENCIONAL		
Ensayado por: Tutor: Muestra:	Camila Monserrath Montesdeoca Ing. Rodrigo Iván Acosta Lozada, M.Sc. MINA KUMUCHI	

Agregados	Dosificación
Grueso 3/4"	12%
Grueso 3/8"	31%
Polvo de piedra	57%

Gravedad específica de los agregados	3/4"	3/8"	Polvo de piedra
Gravedad específica seca Bulk	2,542	2,514	2,446
Gravedad específica saturada con superficie seca	2,605	2,597	2,485
Gravedad específica seca aparente	2,713	2,742	2,545
Absorción	2,48	3,33	1,577

Gravedad específica bulk de la mezcla de los agregados

$$P E \text{ BULK AGREG } G_{sb} = \frac{100}{\frac{\% \text{ AGREG } 3/4''}{G_{sb} \text{ } 3/4''} + \frac{\% \text{ AGREG } 3/8''}{G_{sb} \text{ } 3/8''} + \frac{\% \text{ AGREG POLVO DE PIEDRA } G_{sb} \text{ POLVO DE PIEDRA}}$$

$$P E \text{ BULK AGREG } G_{sb} = \frac{100}{\frac{12\%}{2,542} + \frac{31\%}{2,514} + \frac{57,00\%}{2,446}}$$

P E BULK AGREG G_{sb} = 2,478 gr/cm³

Gravedad específica aparente de la mezcla de los agregados

$$P E \text{ APAR AGREG } G_{sa} = \frac{100}{\frac{\% \text{ AGREG } 3/4''}{G_{sa} \text{ } 3/4''} + \frac{\% \text{ AGREG } 3/8''}{G_{sa} \text{ } 3/8''} + \frac{\% \text{ AGREG POLVO DE PIEDRA } G_{sa} \text{ POLVO DE PIEDRA}}$$

$$P E \text{ APAR AGREG } G_{sa} = \frac{100}{\frac{12\%}{2,713} + \frac{31\%}{2,742} + \frac{57,00\%}{2,545}}$$

P E APAR AGREG G_{sa} = 2,623 gr/cm³

% Absorción

$$\% \text{ Abs } = \frac{100}{\frac{\% \text{ AGREG } 3/4''}{\% \text{ Abs } 3/4''} + \frac{\% \text{ AGREG } 3/8''}{\% \text{ Abs } 3/8''} + \frac{\% \text{ AGREG POLVO DE PIEDRA } \% \text{ Abs POLVO DE PIEDRA}}$$

$$\% \text{ Abs } = \frac{100}{\frac{12\%}{2,48} + \frac{31\%}{3,33} + \frac{57,00\%}{1,58}}$$

% Abs = 1,988 %

Anexo 19. Ensayo de RICE

	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL																																																	
GRAVEDAD ESPECÍFICA TEÓRICA MÁXIMA DE LA MEZCLA CONVENCIONAL																																																		
Ensayado por:	Camila Monserrath Montesdeoca	Normas:																																																
Tutor:	Ing. Rodrigo Iván Acosta Lozada, M.Sc	ASTM D 2041																																																
Muestra:	CONSTRUCTORA JEAL																																																	
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 10%;">% Asfalto</th> <th style="width: 15%;">Datos</th> <th style="width: 10%;">Resultado</th> <th style="width: 10%;">% Asfalto</th> <th style="width: 15%;">Datos</th> <th style="width: 10%;">Resultado</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="3" style="text-align: center;">5,0%</td> <td style="text-align: center;">A</td> <td style="text-align: center;">1010,3</td> <td rowspan="3" style="text-align: center;">6,5%</td> <td style="text-align: center;">A</td> <td style="text-align: center;">1048,2</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">B</td> <td style="text-align: center;">7820,2</td> <td style="text-align: center;">B</td> <td style="text-align: center;">7820,9</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">C</td> <td style="text-align: center;">8408,3</td> <td style="text-align: center;">C</td> <td style="text-align: center;">8427,2</td> </tr> <tr> <td rowspan="3" style="text-align: center;">5,5%</td> <td style="text-align: center;">A</td> <td style="text-align: center;">1132,2</td> <td rowspan="3" style="text-align: center;">7,0%</td> <td style="text-align: center;">A</td> <td style="text-align: center;">1045,9</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">B</td> <td style="text-align: center;">7819,6</td> <td style="text-align: center;">B</td> <td style="text-align: center;">7818,9</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">C</td> <td style="text-align: center;">8477,7</td> <td style="text-align: center;">C</td> <td style="text-align: center;">8420,5</td> </tr> <tr> <td rowspan="3" style="text-align: center;">6,0%</td> <td style="text-align: center;">A</td> <td style="text-align: center;">1138,8</td> <td rowspan="3" style="text-align: center;">7,5%</td> <td style="text-align: center;">A</td> <td style="text-align: center;">1059,5</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">B</td> <td style="text-align: center;">7825,2</td> <td style="text-align: center;">B</td> <td style="text-align: center;">7821,5</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">C</td> <td style="text-align: center;">8486,1</td> <td style="text-align: center;">C</td> <td style="text-align: center;">8428,9</td> </tr> </tbody> </table>			% Asfalto	Datos	Resultado	% Asfalto	Datos	Resultado	5,0%	A	1010,3	6,5%	A	1048,2	B	7820,2	B	7820,9	C	8408,3	C	8427,2	5,5%	A	1132,2	7,0%	A	1045,9	B	7819,6	B	7818,9	C	8477,7	C	8420,5	6,0%	A	1138,8	7,5%	A	1059,5	B	7825,2	B	7821,5	C	8486,1	C	8428,9
% Asfalto	Datos	Resultado	% Asfalto	Datos	Resultado																																													
5,0%	A	1010,3	6,5%	A	1048,2																																													
	B	7820,2		B	7820,9																																													
	C	8408,3		C	8427,2																																													
5,5%	A	1132,2	7,0%	A	1045,9																																													
	B	7819,6		B	7818,9																																													
	C	8477,7		C	8420,5																																													
6,0%	A	1138,8	7,5%	A	1059,5																																													
	B	7825,2		B	7821,5																																													
	C	8486,1		C	8428,9																																													

Anexo 20: Tabla Marshall Diseño Convencional

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL EN CALIENTE

MÉTODO MARSHALL

NORMA ASTM D 6927

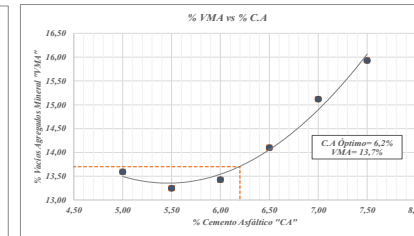
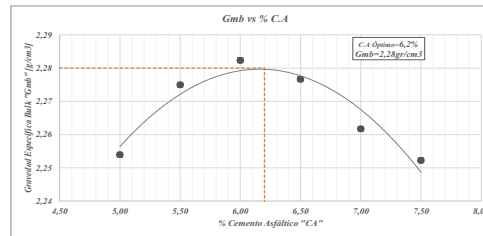
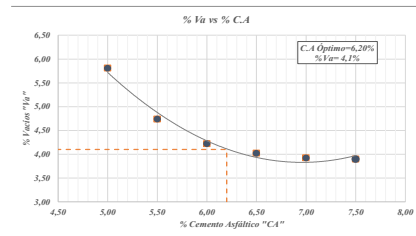
Ensayado por:

Tutor:

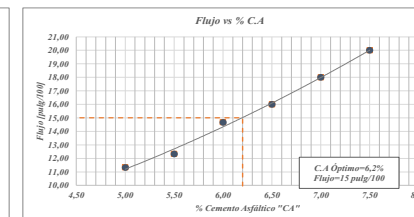
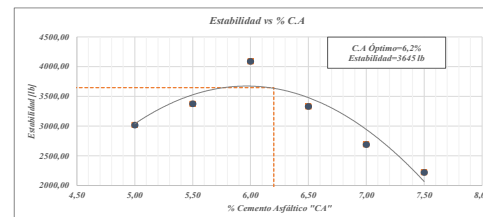
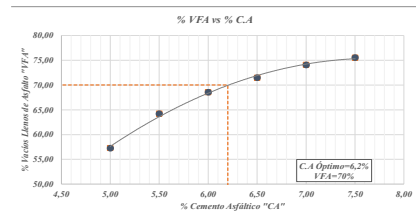
Camila Monserrath Montesdeoca

Ing. Rodrigo Iván Acosta Lozada, M.Sc

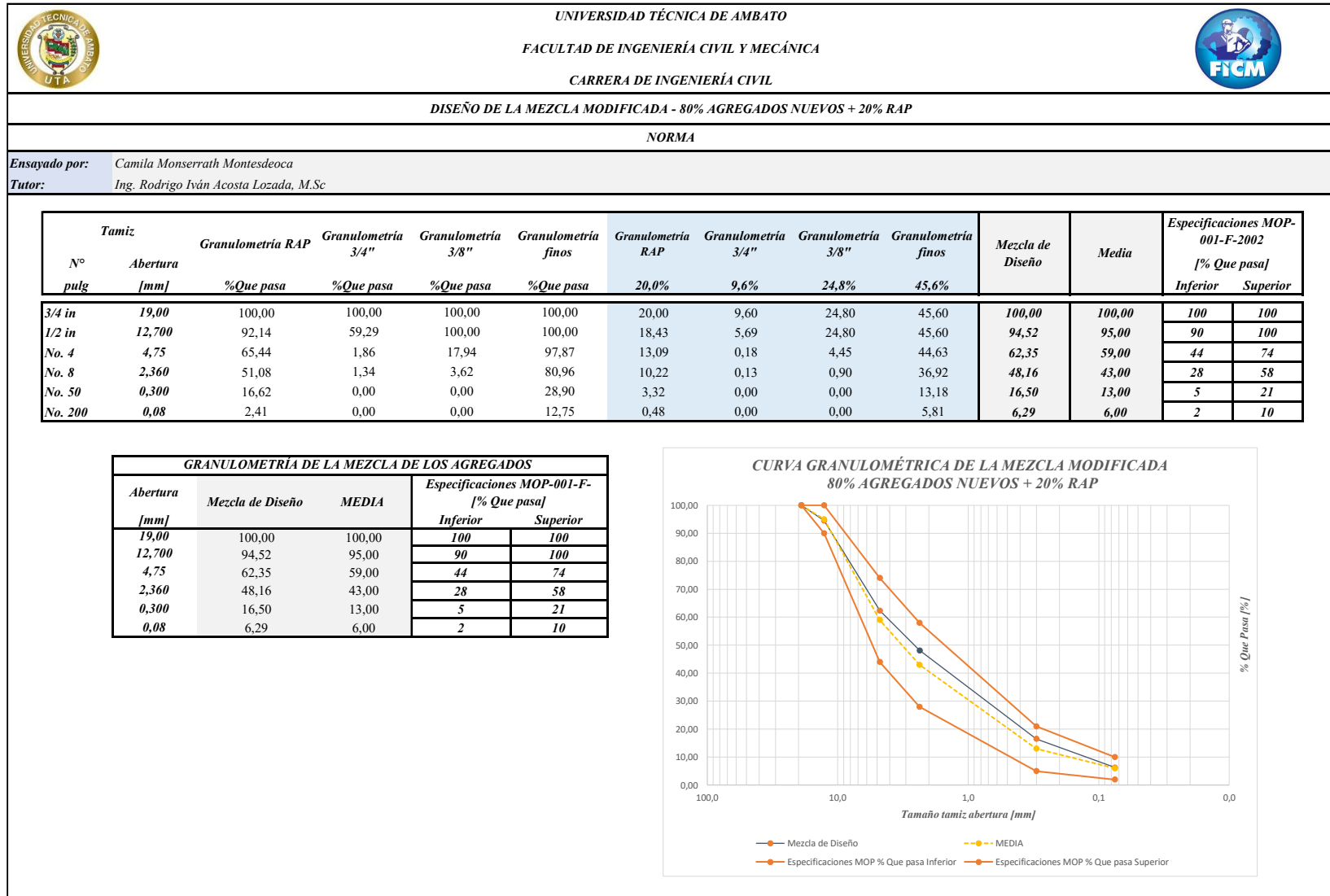
Gravedad Específica del Asfalto Gb = 1,0142 gr/cm3						Gsb de los Agregados = 2,478 gr/cm3						Gua de los Agregados = 2,623 gr/cm3												
Nº Briqueta	% Asfalto	% Agregado	Altura mm	Altura cm	Volumen cm3	Peso de Briqueta			Gravedad Específica de la Mezcla			Volumen Total (Briquetas)			% Volumen de Vacíos			% Asfalto		Estabilidad				Flujo pulg/100
						Aire gr	SSS gr	Agua gr	Bulk g/cm3	Teórica Máxima gr/cm3	Efectiva g/cm3	Agregado	Vacíos (Va)	Asfalto VCA	Aire Va	Agregado Mineral VMA	Llenos de Asfalto VFA	Absorbido Pba	Efectivo Pbe	Estabilidad Ensayo kg	Corrección por altura	Estabilidad Corregida	Estabilidad Corregida Lb	
1	5,0	95,0	62,7	6,3	489,4	1104,8	1114,2	624,8	2,257	2,393	2,577	86,41	5,810	7,781	5,810	13,591	57,254	1,578	3,501	1669	1,020	1702,4	3745,2	10
2			61,6	6,2	488,8	1097,4	1109,4	620,6	2,245											1217	1,049	1277,1	2809,6	13
3			61,3	6,1	490,7	1108,6	1115,4	624,7	2,259											1073	1,059	1136,0	2499,3	11
Promedio			61,9	6,2	489,6	1103,6	1113,0	623,4	2,254											Promedio		3018,0	11	
1	5,5	94,5	62,4	6,2	495,6	1120,8	1124,7	629,1	2,262	2,388	2,593	86,76	4,739	8,505	4,739	13,244	64,219	1,808	3,792	1902	1,028	1954,3	4299,5	11
2			62,7	6,3	491,5	1124,5	1130,1	638,6	2,288											1106	1,020	1128,1	2481,9	12
3			61,9	6,2	492	1119,5	1123,3	631,3	2,275											1461	1,040	1519,4	3342,8	14
Promedio			62,3	6,2	493,0	1121,6	1126,0	633,0	2,275											Promedio		3374,7	12	
1	6,0	94,0	62,1	6,2	494,4	1118,2	1123,0	628,6	2,262	2,383	2,608	86,58	4,223	9,201	4,223	13,424	68,541	2,033	4,089	1617	1,035	1673,6	3681,9	13
2			62,4	6,2	495,4	1143,8	1148,0	652,6	2,309											1928	1,028	1981,0	4358,2	15
3			64,1	6,4	509,6	1160	1163,4	653,8	2,276											1950	0,985	1920,8	4225,7	16
Promedio			62,9	6,3	499,8	1140,7	1144,8	645,0	2,282											Promedio		4088,6	15	
1	6,5	93,5	62,8	6,3	496,8	1130,3	1136,7	639,9	2,275	2,372	2,615	85,90	4,023	10,076	4,023	14,099	71,469	2,151	4,489	1507	1,018	1533,4	3373,4	18
2			61,7	6,2	491,9	1119,7	1126,8	634,9	2,276											1748	1,046	1828,8	4023,5	17
3			60,3	6,0	463	1054,9	1061,4	598,4	2,278											1081	1,090	1178,3	2592,2	13
Promedio			61,6	6,2	483,9	1101,6	1108,3	624,4	2,277											Promedio		3329,7	16	
1	7,0	93,0	61,3	6,1	476,7	1077,2	1082,5	605,8	2,260	2,354	2,614	84,88	3,922	11,196	3,922	15,118	74,056	2,129	5,020	1252	1,059	1325,6	2916,2	18
2			62,9	6,3	486,7	1098,1	1108,8	622,1	2,256											1081	1,015	1097,2	2413,9	17
3			62,5	6,3	485,1	1100,8	1111,5	626,4	2,269											1217	1,025	1247,4	2744,3	19
Promedio			62,2	6,2	482,8	1092,0	1100,9	618,1	2,262											Promedio		2691,5	18	
1	7,5	92,5	64,5	6,5	489,4	1104,8	1121,1	631,7	2,257	2,344	2,622	84,07	3,897	12,033	3,897	15,930	75,537	2,250	5,419	875	0,975	853,1	1876,9	20
2			64,7	6,5	489	1106,9	1118,6	629,6	2,264											1156	0,970	1121,3	2466,9	19
3			66,9	6,7	515,5	1152,4	1160,3	644,8	2,235											1141	0,925	1055,4	2321,9	21
Promedio			65,4	6,5	498,0	1121,4	1133,3	635,4	2,252											Promedio		2221,9	20	



% Óptimo de Cemento Asfáltico en la Mezcla según el Instituto del Asfalto		
Parámetro	Valor	%C.A
% Va	4,0%	6,4
Gmb	2,28 gr/cm ³	6,2
Estabilidad	3675 lb	6,0
Promedio		6,2



Anexo 21: Diseño de la mezcla modificada



Anexo 22: Gravedad Específica Combinada de los Agregados.

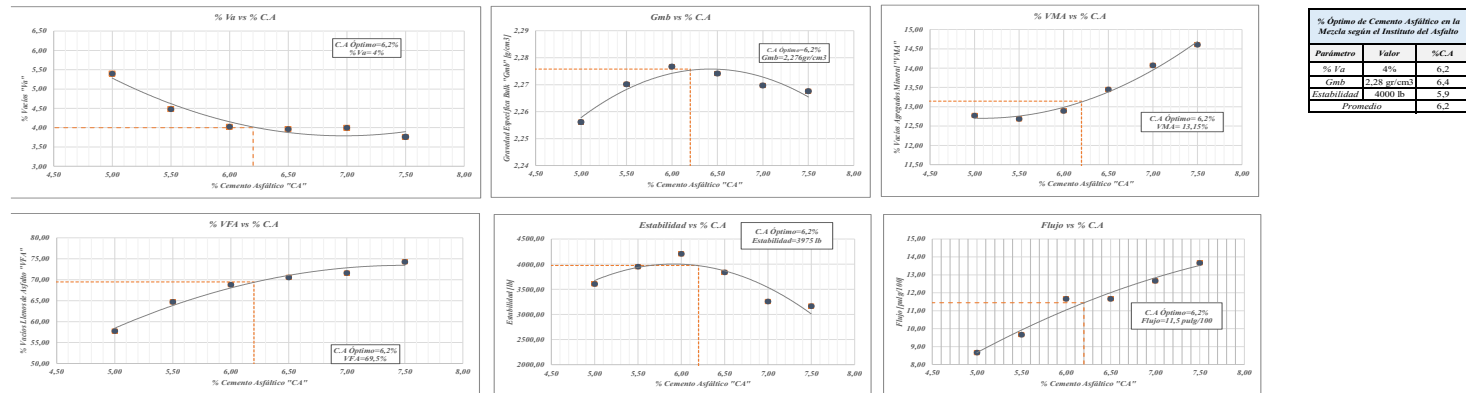
UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL																															
GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN DE LOS AGREGADOS MEZCLA MODIFICADA NORMA ASTM																															
Ensayado por:	Camila Monserrath Montesdeoca																														
Tutor:	Ing. Rodrigo Iván Acosta Lozada, M.Sc.																														
<table border="1" style="margin: auto;"> <tr> <th>Agregados</th> <th>Dosificación</th> </tr> <tr> <td>Grueso 3/4"</td> <td>9,6%</td> </tr> <tr> <td>Grueso 3/8"</td> <td>24,8%</td> </tr> <tr> <td>Pulvo de piedra</td> <td>45,6%</td> </tr> <tr> <td>Grueso RAP</td> <td>10%</td> </tr> <tr> <td>Fino RAP</td> <td>10%</td> </tr> </table>		Agregados	Dosificación	Grueso 3/4"	9,6%	Grueso 3/8"	24,8%	Pulvo de piedra	45,6%	Grueso RAP	10%	Fino RAP	10%																		
Agregados	Dosificación																														
Grueso 3/4"	9,6%																														
Grueso 3/8"	24,8%																														
Pulvo de piedra	45,6%																														
Grueso RAP	10%																														
Fino RAP	10%																														
<table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <tr> <th>Gravedad específica de los agregados</th> <th>3/4"</th> <th>3/8"</th> <th>Pulvo de piedra</th> <th>Grueso RAP</th> <th>Fino RAP</th> </tr> <tr> <td>Gravedad específica seca Bulk</td> <td>2,542</td> <td>2,514</td> <td>2,446</td> <td>2,609</td> <td>2,439</td> </tr> <tr> <td>Gravedad específica saturada con superficie seca</td> <td>2,605</td> <td>2,597</td> <td>2,485</td> <td>2,659</td> <td>2,49</td> </tr> <tr> <td>Gravedad específica seca aparente</td> <td>2,713</td> <td>2,742</td> <td>2,545</td> <td>2,747</td> <td>2,569</td> </tr> <tr> <td>Absorción</td> <td>2,482</td> <td>3,328</td> <td>1,577</td> <td>1,928</td> <td>2,076</td> </tr> </table>		Gravedad específica de los agregados	3/4"	3/8"	Pulvo de piedra	Grueso RAP	Fino RAP	Gravedad específica seca Bulk	2,542	2,514	2,446	2,609	2,439	Gravedad específica saturada con superficie seca	2,605	2,597	2,485	2,659	2,49	Gravedad específica seca aparente	2,713	2,742	2,545	2,747	2,569	Absorción	2,482	3,328	1,577	1,928	2,076
Gravedad específica de los agregados	3/4"	3/8"	Pulvo de piedra	Grueso RAP	Fino RAP																										
Gravedad específica seca Bulk	2,542	2,514	2,446	2,609	2,439																										
Gravedad específica saturada con superficie seca	2,605	2,597	2,485	2,659	2,49																										
Gravedad específica seca aparente	2,713	2,742	2,545	2,747	2,569																										
Absorción	2,482	3,328	1,577	1,928	2,076																										
Gravedad específica bulk de la mezcla de los agregados																															
$P.E. BULK AGREG Gsb = \frac{100}{\frac{\% AGREG 3/4''}{Gsb 3/4''} + \frac{\% AGREG 3/8''}{Gsb 3/8''} + \frac{\% AGREG POLVO DE PIEDRA}{Gsb POLVO DE PIEDRA} + \frac{\% AGREG GRUESO RAP}{Gsb GRUESO RAP} + \frac{\% AGREG FINO RAP}{Gsb FINO RAP}}$																															
$P.E. BULK AGREG Gsb = \frac{100}{\frac{9,6\%}{2,542} + \frac{24,8\%}{2,514} + \frac{45,6\%}{2,446} + \frac{10,0\%}{2,609} + \frac{10,0\%}{2,439}}$																															
P.E. BULK AGREG Gsb = 2,487 gr/cm³																															
Gravedad específica aparente de la mezcla de los agregados																															
$P.E. APAR AGREG Gsa = \frac{100}{\frac{\% AGREG 3/4''}{Gsa 3/4''} + \frac{\% AGREG 3/8''}{Gsa 3/8''} + \frac{\% AGREG POLVO DE PIEDRA}{Gsa POLVO DE PIEDRA} + \frac{\% AGREG GRUESO RAP}{Gsa GRUESO RAP} + \frac{\% AGREG FINO RAP}{Gsa FINO RAP}}$																															
$P.E. APAR AGREG Gsa = \frac{100}{\frac{10\%}{2,713} + \frac{25\%}{2,742} + \frac{45,6\%}{2,545} + \frac{10,0\%}{2,747} + \frac{10,0\%}{2,569}}$																															
P.E. APAR AGREG Gsa = 2,629 gr/cm³																															
% Absorción																															
$\% Abs = \frac{100}{\frac{\% AGREG 3/4''}{\% Abs 3/4''} + \frac{\% AGREG 3/8''}{\% Abs 3/8''} + \frac{\% AGREG POLVO DE PIEDRA}{\% Abs POLVO DE PIEDRA} + \frac{\% AGREG GRUESO RAP}{\% Abs GRUESO RAP} + \frac{\% AGREG FINO RAP}{\% Abs FINO RAP}}$																															
$\% Abs = \frac{100}{\frac{10\%}{2,48} + \frac{25\%}{3,33} + \frac{45,6\%}{1,577} + \frac{10,0\%}{1,928} + \frac{10,0\%}{2,076}}$																															
% Abs = 1,990 %																															

Anexo 23: Ensayo de RICE RAP

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL																																																	
GRAVEDAD ESPECÍFICA TEÓRICA MÁXIMA DE LA MEZCLA CONVENCIONAL + RAP																																																	
Ensayado por:	Camila Monserrath Montesdeoca																																																
Tutor:	Ing. Rodrigo Iván Acosta Lozada, M.Sc.																																																
Muestra:	CONSTRUCTORA JEAL																																																
Normas: ASTM D 2041																																																	
<table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <tr> <th>% Asfalto</th> <th>Datos</th> <th>Resultado</th> <th>% Asfalto</th> <th>Datos</th> <th>Resultado</th> </tr> <tr> <td rowspan="3">5,0%</td> <td>A</td> <td>1020,7</td> <td rowspan="3">6,5%</td> <td>A</td> <td>1090,9</td> </tr> <tr> <td>B</td> <td>7820,5</td> <td>B</td> <td>7820,5</td> </tr> <tr> <td>C</td> <td>8413,2</td> <td>C</td> <td>8450,7</td> </tr> <tr> <td rowspan="3">5,5%</td> <td>A</td> <td>1031,9</td> <td rowspan="3">7,0%</td> <td>A</td> <td>1118,0</td> </tr> <tr> <td>B</td> <td>7820,5</td> <td>B</td> <td>7822,2</td> </tr> <tr> <td>C</td> <td>8418,2</td> <td>C</td> <td>8467,3</td> </tr> <tr> <td rowspan="3">6,0%</td> <td>A</td> <td>1030,9</td> <td rowspan="3">7,5%</td> <td>A</td> <td>1112,1</td> </tr> <tr> <td>B</td> <td>7820,5</td> <td>B</td> <td>7822,2</td> </tr> <tr> <td>C</td> <td>8416,8</td> <td>C</td> <td>8462,3</td> </tr> </table>		% Asfalto	Datos	Resultado	% Asfalto	Datos	Resultado	5,0%	A	1020,7	6,5%	A	1090,9	B	7820,5	B	7820,5	C	8413,2	C	8450,7	5,5%	A	1031,9	7,0%	A	1118,0	B	7820,5	B	7822,2	C	8418,2	C	8467,3	6,0%	A	1030,9	7,5%	A	1112,1	B	7820,5	B	7822,2	C	8416,8	C	8462,3
% Asfalto	Datos	Resultado	% Asfalto	Datos	Resultado																																												
5,0%	A	1020,7	6,5%	A	1090,9																																												
	B	7820,5		B	7820,5																																												
	C	8413,2		C	8450,7																																												
5,5%	A	1031,9	7,0%	A	1118,0																																												
	B	7820,5		B	7822,2																																												
	C	8418,2		C	8467,3																																												
6,0%	A	1030,9	7,5%	A	1112,1																																												
	B	7820,5		B	7822,2																																												
	C	8416,8		C	8462,3																																												

Anexo 24: Tabla Marshall mezcla modificada

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL																											
DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA EN CALIENTE MÉTODO MARSHALL																													
NORMA ASTM D6926																													
Ensayado por:		Camila Monserrath Montesdeoca																											
Tutor:		Ing. Rodrigo Iván Acosta Lozada, M.Sc.																											
Gravedad Específica del Asfalto Gb =										1.0142 g/cm ³				G _{sb} de los Agregados =				2.487 g/cm ³				G _{sa} de los Agregados =				2.629 g/cm ³			
Nº Briqueta	% Asfalto			% Agregado	Altura mm	Altura cm	Volumen cm ³	Peso de Briqueta			Gravedad Específica de la Mezcla			Volumen Total (Briquetas)			% Volumen de Vacíos			% Asfalto		Estabilidad				Flujo pulg/100			
	% C.A	% C.A RAP 20%	% C.A Faltante					Aire gr	SSS gr	Agua gr	Bulk g/cm ³	Teórica Máxima g/cm ³	Efectiva g/cm ³	Agregado	Vacíos (Va)	Asfalto VCA	Aire Va	Agregado Mineral VMA	Llenos de Asfalto VFA	Absorbido Pba	Efectivo Pbe	Estabilidad Ensayo kg	Corrección por altura	Estabilidad Correjada	Estabilidad Correjada Lb				
1	5.0	1.14	3.86	96.14	66.7	6.7	508.3	1137	1148.7	640.4	2.237											1626	0.930	1512.2	3326.8	9			
2					61.7	6.2	475.3	1058.3	1064.3	589	2.227											1540	1.046	1611.2	3544.7	8			
3					67.1	6.7	488.5	1125.9	1133	644.5	2.305	2.385	2.567	87.23	5.398	7.374	5.398	12.771	57.736	1.285	2.626	1950	0.920	1794.0	3946.8	9			
Promedio					65.2	6.5	490.7	1107.1	1115.3	624.6	2.256											Promedio			3606.1	9			
1	5.5	1.14	4.36	95.64	62.9	6.3	483.2	1102	1108.1	624.9	2.281											1830	1.015	1857.5	4086.4	10			
2					62.4	6.2	474.4	1079.6	1094	619.6	2.276	2.377	2.578	86.28	4.478	9.246	4.478	12.684	64.701	1.449	4.114	1605	1.028	1649.1	3628.1	10			
3					64.0	6.4	495.5	1116.9	1124.7	629.2	2.254												1904	0.987	1880.2	4136.4	9		
Promedio					63.1	6.3	484.4	1099.5	1108.9	624.6	2.270											Promedio			3950.3	10			
1	6.0	1.14	4.86	95.14	65.1	6.5	506.4	1156.6	1167.8	661.4	2.284											1986	0.960	1906.6	4194.4	12			
2					63.7	6.4	494.7	1128.7	1138.6	643.9	2.282	2.372	2.594	86.07	4.022	9.911	4.022	12.891	68.801	1.686	4.396	1990	0.995	1980.1	4356.1	11			
3					63.9	6.4	481.4	1090.1	1106.7	625.3	2.264												1867	0.990	1848.3	4066.3	12		
Promedio					64.2	6.4	494.2	1125.1	1137.7	643.5	2.277											Promedio			4205.6	12			
1	6.5	1.14	5.36	94.64	62.2	6.2	494.2	1132.1	1137	642.8	2.291											1532	1.033	1581.8	3479.9	11			
2					63.4	6.3	504.7	1149.6	1154.4	649.7	2.278												1856	1.003	1860.6	4093.4	12		
3					61.9	6.2	492.1	1109.1	1116.5	624.4	2.254	2.368	2.610	85.51	3.961	10.525	3.961	13.446	70.541	1.931	4.672	1720	1.040	1788.8	3935.4	12			
Promedio					62.5	6.3	497.0	1130.3	1136.0	639.0	2.274											Promedio			3856.2	12			
1	7.0	1.14	5.86	94.14	60.8	6.1	487.4	1110.4	1112.8	625.4	2.278											1413	1.074	1518.1	3339.6	13			
2					62.5	6.3	498.4	1138.1	1140.8	642.4	2.284	2.364	2.627	84.89	3.996	11.115	3.996	14.072	71.605	2.187	4.942	1632	1.025	1672.8	3680.2	12			
3					62.5	6.3	499.4	1122.3	1130.1	630.7	2.247												1220	1.025	1250.5	2751.1	13		
Promedio					61.9	6.2	495.1	1123.6	1127.9	632.8	2.270											Promedio			3257.0	13			
1	7.5	1.14	6.36	93.64	64.8	6.5	510.6	1165.3	1167	656.4	2.282											1326	0.967	1282.9	2822.4	14			
2					64.9	6.5	515.5	1168.4	1170	654.5	2.267	2.356	2.639	84.36	3.758	11.886	3.758	14.606	74.269	2.361	5.289	1493	0.965	1440.7	3169.6	12			
3					64.6	6.5	516.1	1163.3	1168.6	652.5	2.254												1640	0.972	1594.9	3508.8	15		
Promedio					64.8	6.5	514.1	1165.7	1168.5	654.5	2.268											Promedio			3166.9	14			



Anexo 25: Factor de corrección de estabilidad

Altura, mm	Factor	Altura, mm	Factor	Altura, mm	Factor	Altura, mm	Factor	Altura, mm	Factor
58,7	1,140	61,2	1,062	63,7	0,995	66,2	0,939	68,7	0,883
58,8	1,137	61,3	1,059	63,8	0,993	66,3	0,937	68,8	0,881
58,9	1,134	61,4	1,056	63,9	0,990	66,4	0,936	68,9	0,879
59,0	1,131	61,5	1,053	64,0	0,987	66,5	0,934	69,0	0,877
59,1	1,128	61,6	1,049	64,1	0,985	66,6	0,932	69,1	0,875
59,2	1,124	61,7	1,046	64,2	0,982	66,7	0,930	69,2	0,873
59,3	1,121	61,8	1,043	64,3	0,980	66,8	0,928	69,3	0,871
59,4	1,118	61,9	1,040	64,4	0,977	66,9	0,925	69,4	0,869
59,5	1,115	62,0	1,038	64,5	0,975	67,0	0,923	69,5	0,868
59,6	1,112	62,1	1,035	64,6	0,972	67,1	0,920	69,6	0,866
59,7	1,109	62,2	1,033	64,7	0,970	67,2	0,918	69,7	0,864
59,8	1,106	62,3	1,030	64,8	0,967	67,3	0,915	69,8	0,862
59,9	1,103	62,4	1,028	64,9	0,965	67,4	0,913	69,9	0,860
60,0	1,099	62,5	1,025	65,0	0,963	67,5	0,910		
60,1	1,096	62,6	1,023	65,1	0,960	67,6	0,908		
60,2	1,093	62,7	1,020	65,2	0,958	67,7	0,905		
60,3	1,090	62,8	1,018	65,3	0,956	67,8	0,903		
60,4	1,087	62,9	1,015	65,4	0,954	67,9	0,900		
60,5	1,084	63,0	1,013	65,5	0,952	68,0	0,898		
60,6	1,081	63,1	1,010	65,6	0,951	68,1	0,895		
60,7	1,078	63,2	1,008	65,7	0,949	68,2	0,893		
60,8	1,074	63,3	1,005	65,8	0,947	68,3	0,890		
60,9	1,071	63,4	1,003	65,9	0,945	68,4	0,888		
61,0	1,068	63,5	1,000	66,0	0,943	68,5	0,886		
61,1	1,065	63,6	0,998	66,1	0,941	68,6	0,884		

Anexos Fotográficos



Fotografía 1: Muestra asfáltica en caliente.



Fotografía 2: Proceso de compactación.



Fotografía 3: Toma de medidas de las briquetas



Fotografía 4: Briquetas según su porcentaje de asfalto.



Fotografía 5: Ensayo de Marshall.



Fotografía 6: Briquetas a baño maría.



Fotografía 7: Briquetas de mezcla modificada



Fotografía 8: Extractor de briquetas