



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

**TRABAJO EXPERIMENTAL
PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

TEMA:

**“EFECTOS DE LA ADICIÓN DE ACEITE USADO DE MOTOR EN LAS
PROPIEDADES MECÁNICAS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE”**

AUTOR: Carlos Jefferson Martínez Herrera

TUTOR: Ing. Mg. Galo Wilfrido Núñez Aldaz

AMBATO - ECUADOR

Julio - 2021

CERTIFICACIÓN

En mi calidad de Tutor del Trabajo Experimental, previo a la obtención del título de Ingeniero Civil, con el tema: **“EFECTOS DE LA ADICIÓN DE ACEITE USADO DE MOTOR EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE”**, elaborado por el Sr. Carlos Jefferson Martínez Herrera, portador de la cédula de ciudadanía: C.I. 050423550-8, 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.

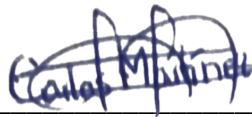
Ambato, Julio 2021.

Ing. Mg. Galo Wilfrido Núñez Aldaz
TUTOR

AUTORÍA DE LA INVESTIGACIÓN

Yo, Carlos Jefferson Martínez Herrera, con C.I. 050423550-8, declaro que todas las actividades y contenidos expuestos en el presente trabajo experimental con el tema: **“EFECTOS DE LA ADICIÓN DE ACEITE USADO DE MOTOR EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CLAIENTE”**, así como también los análisis estadísticos, gráficos, conclusiones y recomendaciones son de mi exclusiva responsabilidad como autor del proyecto, a excepción de las referencias bibliográficas citadas en el mismo.

Ambato, Julio 2021.



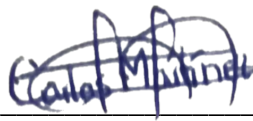
Carlos Jefferson Martínez Herrera
C.I. 050423550-8
AUTOR

DERECHOS DE AUTOR

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

Cedo los derechos en línea patrimonial 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, Julio 2021.



Carlos Jefferson Martínez Herrera
C.I. 050423550-8
AUTOR

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

Los miembros del Tribunal de Grado aprueban el informe del Trabajo Experimental, realizado por el estudiante **Carlos Jefferson Martínez Herrera** de la Carrera de Ingeniería Civil bajo el tema: **“EFECTOS DE LA ADICIÓN DE ACEITE USADO DE MOTOR EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CLAIENTE”**.

Ambato, Julio 2021

Por constancia firman.

Ing. Mg. Favio Paúl Portilla Yandún
Miembro Calificador

Ing. Mg. Byron Genaro Cañizares Proaño
Miembro Calificador

DEDICATORIA

El presente trabajo está dedicado a Dios por la salud, fuerza física y mental durante toda mi vida académica, a toda mi familia por el apoyo económico y moral durante el camino recorrido.

A mis padres por inculcarme los valores de trabajo y respeto, así también el ejemplo de superación y responsabilidad desde muy niño.

A mis hermanos por el apoyo incondicional en todas las circunstancias que se presentaron durante el transcurso de mi carrera universitaria.

A mis compañeros que durante la carrera universitaria compartimos anécdotas, risas y también contribuyeron de manera participativa en los trabajos asignados durante toda la carrera.

Carlos Martínez

AGRADECIMIENTO

A la Universidad Técnica de Ambato, de manera especial a la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica, por ayudarme a realizar este trabajo experimental.

A mi profesor tutor Ingeniero Galo Núñez, por guiarme con su experiencia en la realización del presente trabajo experimental.

A los docentes de la Carrera de Ingeniería Civil de la Universidad Técnica de Ambato, por los conocimientos impartidos durante mi formación profesional.

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS

CERTIFICACIÓN	ii
AUTORÍA DE LA INVESTIGACIÓN	iii
DERECHOS DE AUTOR	iv
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO	v
DEDICATORIA	vi
AGRADECIMIENTO	vii
ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS.....	viii
ÍNDICE DE TABLAS	xv
ÍNDICE DE GRÁFICOS	xviii
RESUMEN.....	xx
ABSTRACT.....	xxi
CAPÍTULO I.....	1
ANTECEDENTES.....	1
1. Tema del trabajo experimental	1
1.1. Antecedentes Investigativos	1
1.1.1. Antecedentes	1
1.1.2. Justificación.....	4
1.1.3. Fundamentación Teórica.....	6
1.1.4. Hipótesis.....	7
1.2. Objetivos	8
1.2.1. Objetivo General	8
1.2.2. Objetivos Específicos.....	8
CAPÍTULO II	9
METODOLOGÍA	9
2.1. Descripción de la Metodología.....	9

2.2.	Nivel o Tipo de Investigación	9
2.3.	POBLACIÓN Y MUESTRA	10
2.4.	Operacionalización de Variables	12
2.4.1.	Variable Independiente	12
2.4.2.	Variable Dependiente.....	13
2.5.	Materiales y Equipos	13
2.5.1.	Asfalto	13
2.4.1.2.	Definición	13
2.4.2.	Asfalto AC-20	15
2.4.3.	Propiedades Físicas del Asfalto	17
2.4.3.2.	Adhesión y cohesión	17
2.4.3.3.	Susceptibilidad térmica	18
2.4.3.4.	Durabilidad	19
2.4.3.5.	Ductilidad	19
2.4.3.6.	Solubilidad.....	19
2.4.3.7.	Peso Específico.....	20
2.4.4.	Propiedades Químicas del Asfalto	21
2.5.	Viscosidad	23
2.5.1.	Medición de Viscosidad.....	23
2.5.2.	Tipos de fluidos.....	25
2.5.2.1.	Fluidos newtonianos.....	25
2.5.3.	Fluidos no newtonianos	26
2.5.4.	Fluidos visco elásticos	26
2.6.	Sistemas de clasificación del cemento asfáltico	26
2.6.1.	Sistema de clasificación por penetración	26
2.6.2.	Sistema de Clasificación por Viscosidad	27
2.6.3.	Asfalto Modificado	29

2.6.4.	Materiales Pétreos	30
2.6.5.	Clasificación de Agregados.....	31
2.6.6.	Clasificación de los Agregados por su Gravedad Específica (Gs).....	33
2.6.7.	Propiedades del Agregado.....	34
2.6.7.1.	Graduación y Tamaño Máximo de Partícula.....	34
2.6.7.2.	Tenacidad	34
2.6.7.3.	Tamaño máximo de partícula	35
2.6.7.4.	Limpieza	35
2.6.7.5.	Dureza	36
2.6.7.6.	Forma de las partículas	36
2.6.7.7.	Textura superficial.....	37
2.6.7.8.	Capacidad de absorción.....	37
2.6.7.9.	Afinidad con el Asfalto:	38
2.7.	Caracterización de Agregados	39
2.7.1.	Muestreo de Agregados (ASTM D-75)	39
2.7.2.	Importancia y aplicación	41
2.7.3.	Análisis Granulométrico de los Agregados (Norma ASTM D 3515 y Especificación MTOP)	41
2.7.4.	Abrasión del Agregado grueso (ASTM C-131).....	44
2.7.5.	Equivalente de Arena (Norma ASTM D 2419)	47
2.7.6.	Gravedad específica y absorción de agregado grueso (ASTM D-127)	48
2.7.7.	Gravedad específica y Absorción del Agregado Fino (ASTM D 128)	52
2.7.8.	Límites de consistencia (ASTM D-427)	55
2.7.9.	Aceites de motor	56
2.7.9.1.	Aceites Minerales	56
2.7.9.2.	Aceite Sintético	57
2.8.	Propiedades de aceite de motor degradado	57

2.8.1.	Oxidación del aceite	57
2.8.2.	Contaminantes Químicos	58
2.8.3.	Degradación del aceite lubricante mineral	59
2.8.4.	Temperatura de operación	59
2.8.4.1.	Composición del aceite usado	60
2.8.4.2.	Impactos al medio ambiente	62
2.8.4.3.	Usos del Aceite de Motor usado.....	62
2.8.5.	Ordenanza Nacional	63
2.8.6.	LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS	64
2.8.7.	DEFINICIÓN DE MEZCLA ASFÁLTICA	65
2.8.7.1.	CLASIFICACIÓN DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS	65
2.8.7.2.	Por Fracciones de Agregado Pétreo Empleado	65
2.8.7.3.	Por la Temperatura de Puesta en Obra	66
2.8.7.4.	Por la porción de vacíos en la mezcla asfáltica	67
2.8.7.5.	Por el Tamaño Máximo del Agregado Pétreo	67
2.8.7.6.	Por la Estructura del Agregado Pétreo	68
2.8.7.7.	Por la Granulometría	68
2.8.8.	Tipología de las mezclas asfálticas	69
2.8.8.1.	Mezcla asfáltica en Frío	69
2.8.8.2.	Mezclas Asfálticas Tibias.....	69
2.8.8.3.	Mezcla Asfáltica en Caliente.....	70
2.8.9.	SELECCIÓN DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA	70
2.8.10.	Métodos de Mezclado	72
2.8.10.1.	Mezcla en Planta	72
2.8.10.2.	Mezcla en Sitio	75
2.8.11.	Impacto ambiental de una planta de asfalto	76
2.8.12.	Ensayos del Cemento Asfáltico	77

2.8.12.1.	Gravedad Específica (Norma ASTM D 70-09 E-1) (NTE INEN 923) 77	
2.8.12.2.	Punto de Reblandecimiento Método de Anillo y Bola (Norma ASTM D 36) (NTE INEN 920)	80
2.8.12.3.	Penetración (Norma ASTM D 5) (NTE INEN 0917)	82
2.8.12.4.	Índice de Penetración (Norma INV E-724-07)	86
2.8.12.5.	Punto de Inflamación Mediante la Copa Abierta de Cleveland (Norma ASTM D 92).....	87
2.8.12.6.	Ductilidad (Norma ASTM D 113)	88
2.8.12.7.	Viscosidad Saybolt de Materiales Bituminosos (ASTM D 88-07) (NTE INEN 1981:94)	91
2.8.13.	Diseño de Mezcla Asfáltica	96
2.8.14.	Mezcla de Agregados	97
2.8.15.	Tamaño Máximo Nominal, a utilizar en la estabilización granulométrica	98
2.8.16.	Cálculo de los porcentajes retenidos en cada tamiz para realizar briquetas.....	98
2.8.17.	Uso de la mezcla en la estructura del pavimento.....	101
2.9.	Tipo de mezcla asfáltica	102
2.9.1.	Gravedad o Densidad específica de la mezcla (G _m).	102
2.9.2.	Vacíos de Aire (V _a)	103
2.9.3.	Vacíos en el Agregado mineral (VMA).	103
2.9.4.	Vacíos llenos de asfalto (VFA).....	104
2.9.5.	Contenido de asfalto (P _b)	104
2.9.6.	Porcentaje teórico óptimo de asfalto para briquetas	105
2.10.	Preparación y Fabricación de Briquetas Cilíndricas ensayo Marshall ..	107
2.11.	Proceso de Cálculo, Método Marshall.....	109
2.11.1.	Gravedad Específica Bulk agregados.....	109

2.11.2.	Gravedad Específica Teórica Máxima (Gmm), Ensayo RICE (Norma ASTM D 2041)	109
2.11.3.	Gravedad Específica Bulk de la Mezcla Asfáltica Compactada (Norma ASTM D 2726)	110
2.11.4.	Gravedad Específica Efectiva de la Mezcla (Gse).....	111
2.11.5.	Porcentaje de Vacíos (Va).....	111
2.11.6.	Porcentaje de vacíos de Agregado mineral (VAM)	112
2.11.7.	Contenido de asfalto efectivo.....	112
2.11.8.	Porcentaje de vacíos llenos de Asfalto (VFA)	113
2.11.9.	Determinación de Estabilidad y flujo (ASTM D-1559).....	113
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	115
3.1.	Contenido de Humedad Agregado Grueso 3/4"	115
3.2.	Contenido de Humedad Agregado 3/8"	115
3.3.	Contenido de Humedad Agregado Fino	116
3.4.	Resultado ensayo de Abrasión Agregado 3/4"	116
3.5.	Resultado Ensayo de Abrasión Agregado 3/8"	117
3.6.	Granulometría Agregado 3/4"	118
3.7.	Granulometría Agregado 3/8"	119
3.8.	Granulometría Agregado Fino.....	120
3.9.	Gravedades Específicas y Absorción Agregado 3/4"	121
3.10.	Gravedades Específicas y Absorción Agregado 3/8"	122
3.11.	Gravedades Específicas y Absorción Agregado Fino.....	123
3.12.	Resumen Gravedades Específicas Agregados	124
3.13.	Peso Unitario Agregado 3/4"	124
3.14.	Peso Unitario Agregado 3/8"	124
3.15.	Peso Unitario Agregado Fino	125
3.16.	Peso Específico Asfalto	125

3.17.	Gravedades Específicas Combinadas Agregados	126
3.18.	Ensayo Rice 5,0 Asfalto (0% Aceite)	127
3.19.	Ensayo Rice 5,5% Asfalto (0% Aceite).....	127
3.20.	Ensayo Rice 6,0% Asfalto (0% Aceite).....	128
3.21.	Ensayo Rice 6,5% Asfalto (0% Aceite).....	128
3.22.	Ensayo Rice 7,0% Asfalto (0% Aceite).....	129
3.23.	Ensayo Rice 5,0% Asfalto (1% Aceite).....	129
3.24.	Ensayo Rice 5,5% Asfalto (1% Aceite).....	130
3.25.	Ensayo Rice 6,0% Asfalto (1% Aceite).....	130
3.26.	Ensayo Rice 6,5% Asfalto (1% Aceite).....	131
3.27.	Ensayo Rice 7,0% Asfalto (1% Aceite).....	131
3.28.	Ensayo Rice 5,0% Asfalto (2% Aceite).....	132
3.29.	Ensayo Rice 5,5% Asfalto (2% Aceite).....	132
3.31.	Ensayo Rice 6,5% Asfalto (2% Aceite).....	133
3.32.	Ensayo Rice 7,0% Asfalto (2% Aceite).....	134
3.33.	Diseño de Mezcla Asfáltica Convencional Método Marshall	135
3.35.	Diseño Mezcla Asfáltica con 1.0 % de Aceite.....	139
3.37.	Diseño Mezcla Asfáltica con 2,0% de Aceite.....	144
3.40.	Resumen resultados Ensayos Densidad Bulk.	148
3.41.	Resumen resultados Ensayos Estabilidad.	149
3.42.	Resumen resultados ensayos de Flujo.	150
3.43.	Resultados cálculo de vacíos	150
3.44.	Resumen Cálculo de porcentajes óptimos de Asfalto.....	151
C.	MATERIALES DE REFERENCIA.....	155
1.	Bibliografía.....	155
2.	Anexos	159
2.1.	Factor de corrección para la Estabilidad Marshall.	159

2.2. Anexos Fotográficos.....	162
-------------------------------	-----

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Investigaciones previas	4
Tabla 2. Determinación de la Población y Muestra	11
Tabla 3. Operacionalización Variable Independiente	12
Tabla 4. Operacionalización Variable Dependiente.....	13
Tabla 5. Grados de penetración del asfalto	15
Tabla 6. Viscosidades del Asfalto según el grado de Penetración.....	16
Tabla 7. Propiedades y ensayos asfalto AC-20.....	17
Tabla 8. Requisitos para clasificar el asfalto según especificación ASTM D 946-8227	
Tabla 9. Requisitos para clasificar el asfalto según especificación ASTM D 3381 ..	28
Tabla 10. Coordenadas UTM Cantera Alvarado.....	39
Tabla 11. Graduación de Agregados.....	40
Tabla 12. Graduaciones propuestas para mezclas cerradas	42
Tabla 13. Tamaño máximo nominal de Agregado.....	43
Tabla 14. Requisitos ensayo de abrasión	45
Tabla 15. Requisito de Masa mínima de la Muestra para Ensayo de gravedad específica	50
Tabla 16. Composición química del asfalto.....	57
Tabla 17. Composición química del aceite de motor usado.....	58
Tabla 18. Concentración en ppm de aceite de motor usado.....	61
Tabla 19. Clasificación de mezclas asfálticas según la temperatura.....	67
Tabla 20. Clasificación de mezclas asfálticas según la granulometría	69
Tabla 21. Densidad del agua a temperatura del ensayo	79
Tabla 22. Característica Termómetros de Mercurio	81
Tabla 23. Dimensiones del Recipiente.....	84
Tabla 24. Termómetros utilizados en el ensayo.....	84
Tabla 25. Condiciones especiales de ensayo de penetración	85
Tabla 26. Termómetros que pueden utilizarse en el ensayo.	90
Tabla 27. Dimensiones de la briqueta de ensayo	90

Tabla 28. Temperatura del baño termostático.....	93
Tabla 29. Estándares de viscosidad de aceites para viscosímetro Saybolt Universal	94
Tabla 30. Requisitos de Graduación para Agregados en Mezclas Asfálticas Densas	97
Tabla 31. Resultados granulométricos agregados.....	100
Tabla 32. Combinación de Agregados en planta	100
Tabla 33. Vacíos en el Agregado mineral en la mezcla asfáltica.....	104
Tabla 34. Dosificación Agregados y Asfalto mezcla asfáltica convencional	107
Tabla 35. Dosificación Agregados y Asfalto mezcla modificada con 1% ACM.....	108
Tabla 36. Dosificación Agregados y Asfalto mezcla modificada con 2% ACM.....	108
Tabla 37. Gravedad específica teórica máxima de acuerdo al tamaño máximo nominal de partícula.....	110
Tabla 38. Resultados Ensayo de Humedad Agregado 3/4"	115
Tabla 39. Resultado Ensayo de Humedad Agregado 3/8"	115
Tabla 40. Resultado Ensayo de Humedad Agregado Fino	116
Tabla 41. Resultado Ensayo de Abrasión Agregado 3/4"	116
Tabla 42. Resultado ensayo de Abrasión Agregado 3/8".....	117
Tabla 43. Resultado Granulometría Agregado 3/4".....	118
Tabla 44. Resultado Granulometría Agregado 3/8".....	119
Tabla 45. Resultado Granulometría Agregado Fino	120
Tabla 46. Resultados Gravedades Específicas y Absorción Agregado 3/4"	121
Tabla 47. Resultado Gravedades Específicas y Absorción Agregado 3/8"	122
Tabla 48. Resultado Gravedades Específicas y Absorción Agregado fino.....	123
Tabla 49. Resumen de Resultados Gravedades Específicas	124
Tabla 50. Resultado peso unitario Agregado 3/4"	124
Tabla 51. Resultado Peso unitario Agregado 3/8"	124
Tabla 52. Resultado peso unitario Agregado Fino.....	125
Tabla 53. Resultado Peso Específico del Asfalto	125
Tabla 54. Resultado Gravedades Específicas combinadas de Agregados	126
Tabla 55. Resultados ensayo Rice 5,0% de Asfalto.....	127
Tabla 56. Resultado ensayo Rice 5,5% de Asfalto	127
Tabla 57. Resultado ensayo Rice 6,0% de Asfalto	128
Tabla 58. Resultados ensayo Rice 6,5% de Asfalto.....	128
Tabla 59. Resultado ensayo Rice 7,0% de Asfalto	129

Tabla 60. Resultado ensayo Rice 5,0% de Asfalto-1,0% de Aceite de Motor Usado	129
Tabla 61. Resultado ensayo Rice 5,5% de Asfalto-1,0% de Aceite de Motor Usado	130
Tabla 62. Resultado ensayo Rice 6,0% de Asfalto-1,0% de Aceite de motor usado	130
Tabla 63. Resultado ensayo Rice 6,5% de Asfalto-1,0% de Aceite de motor usado	131
Tabla 64. Resultado ensayo Rice 7,0% de Asfalto-1,0% de Aceite de motor usado	131
Tabla 65. Resultado ensayo Rice 5,0% de Asfalto-2,0% de Aceite de motor usado	132
Tabla 66. Resultado ensayo Rice 5,5% de Asfalto-2,0% de Aceite de motor usado	132
Tabla 67. Resultados ensayo Rice 6,0% de Asfalto-2,0% de Aceite de motor usado	133
Tabla 68. Resultados ensayo Rice 6,5% de Asfalto-2,0% de Aceite de motor usado	133
Tabla 69. Resultados ensayo Rice 7,0% de Asfalto-2,0% de Aceite de motor usado	134
Tabla 70. Diseño mezcla Asfáltica Método Marshall	135
Tabla 71. Determinación del Contenido óptimo de Asfalto mezcla Convencional.	138
Tabla 72. Comparación de Resultados obtenidos y la Norma NEVI-12, mezcla de asfalto convencional.....	138
Tabla 73. Diseño Mezcla Asfáltica Método Marshall 1% Aceite de motor usado ..	139
Tabla 74. Determinación del Contenido óptimo de Asfalto mezcla con 1% de AMU	142
Tabla 75. Comparación de los Resultados obtenidos y la Norma Nevi-12 1% AMU	142
Tabla 76. Diseño mezcla Asfáltica Método Marshall 2% Aceite de motor usado ..	144
Tabla 77. Determinación del Contenido óptimo de Asfalto mezcla con 2% de AMU	147
Tabla 78. Comparación de los Resultados obtenidos y la Norma Nevi-12 2% AMU	147
Tabla 79. Resumen resultados Densidad Bulk.....	148
Tabla 80. Resumen resultados ensayos Estabilidad.....	149
Tabla 81. Resumen resultados flujo	150
Tabla 82. Resumen resultados Vacíos	150

Tabla 83. Resumen resultados porcentajes óptimos de Asfalto.....	151
Tabla 84. Factor de corrección de la Estabilidad Marshall de acuerdo al espesor de la briqueeta.....	161
Tabla 85. Anexos fotográficos	167

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Colocación de tipos de mezclas asfálticas	7
Gráfico 2. Asfalto en obra.....	15
Gráfico 3. Adhesión y Cohesión del Asfalto	18
Gráfico 4. Relación entre Viscosidad y Temperatura	18
Gráfico 5. Ensayo de ductilidad del Asfalto	19
Gráfico 6. Composición Química del Asfalto.....	21
Gráfico 7. Composición Química del Asfalto.....	22
Gráfico 8. Subclasificación Química del Asfalto.....	22
Gráfico 9. Gráfico de Viscosidad vs. Temperatura.....	23
Gráfico 10. Comportamiento de la Viscosidad	25
Gráfico 11. Clasificación de los Fluidos	25
Gráfico 12. Carga de Ruedas al Asfalto.....	29
Gráfico 13. Asfalto modificado con fibra de vidrio.....	30
Gráfico 14. Agregado sintético (Triturado)	31
Gráfico 15. Clasificación de Rocas	32
Gráfico 16. Estados de absorción Agregados	38
Gráfico 17. Ubicación Cantera Alvarado.....	39
Gráfico 18. Clasificación de mezclas asfálticas según la temperatura de compactación.....	66
Gráfico 19. Planta de asfalto continua de flujo paralelo	73
Gráfico 20. Planta asfáltica discontinua.....	73
Gráfico 21. Planta Asfáltica de secado a contra flujo	74
Gráfico 22. Planta asfáltica de mezclado en frío.....	74
Gráfico 23. Planta asfáltica tipo drum-mix	75
Gráfico 24. Compactado de asfalto en sitio	75
Gráfico 25. Gases generados en la compactación del asfalto	77

Ilustración 26. Granulometría combinada de agregados.....	101
Gráfico 27. Recomendaciones generales para Selección del tipo mezcla asfáltica	102
Gráfico 28. Composición mezcla asfáltica.....	105
Gráfico 29. Granulometría Agregado ¾”.....	118
Gráfico 30. Granulometría Agregado 3/8”.....	119
Gráfico 31. Granulometría Agregado fino.....	120
Gráfico 32. Densidad Bulk vs. Contenido de Asfalto.....	136
Gráfico 33. Estabilidad vs. Contenido de Asfalto.....	136
Gráfico 34. Flujo vs. Contenido de Asfalto.....	136
Gráfico 35. Vacíos de Aire vs. Contenido de Asfalto.....	137
Gráfico 36. Vacíos Agregado Mineral vs. Contenido de Asfalto.....	137
Gráfico 37. Vacíos Llenos de Asfalto vs. Contenido de Asfalto.....	137
Gráfico 38. Densidad Bulk vs. Contenido de Asfalto 1%.....	140
Gráfico 39. Estabilidad vs. Contenido de Asfalto 1%.....	140
Gráfico 40. Flujo vs. Contenido de Asfalto 1%.....	140
Gráfico 41. Vacíos con Aire vs. Contenido de Asfalto 1%.....	141
Gráfico 42. Vacíos Agregado Mineral vs. Contenido de Asfalto 1%.....	141
Gráfico 43. Vacíos Llenos de Asfalto vs. Contenido de Asfalto 1%.....	141
Gráfico 44. Densidad Bulk vs. Contenido de Asfalto 2%.....	145
Gráfico 45. Estabilidad vs. Contenido de Asfalto 2%.....	145
Gráfico 46. Flujo vs. Contenido de Asfalto 2%.....	145
Gráfico 47. Vacíos de aire vs. Contenido de Asfalto 2%.....	146
Gráfico 48. Vacíos Agregado Mineral vs. Contenido de Asfalto 2%.....	146
Gráfico 49. Vacíos Llenos de Asfalto vs. Contenido de Asfalto 2%.....	146
Gráfico 50. Porcentajes óptimos de Asfalto.....	151

RESUMEN

En el presente trabajo se elaboraron mezclas asfálticas en caliente mediante el método Marshall con la adición de aceite de motor usado en la Cantera Alvarado, en primera instancia se realizó el muestreo y transporte de agregados, posteriormente los ensayos de propiedades físicas y mecánicas y luego el muestreo del cemento asfáltico.

Se elaboraron cuarenta y cinco probetas de ensayo (briquetas), con contenidos de aceite del 0 al 2 por ciento, elaborando quince probetas para cada porcentaje consecutivo, el aceite de motor usado fue añadido a la mezcla asfáltica en como una fracción del cemento asfáltico en peso, bajo el procedimiento establecido en la norma ASTM D 1559, AASHTO T 245 y AASHTO T 225.

Una vez realizadas las briquetas se procedió al ensayo de las mismas en donde se obtuvieron los porcentajes de estabilidad y flujo, en donde se determinó que el porcentaje óptimo de asfalto de la mezcla convencional es 6,07 por ciento y cumple con los requerimientos de la Norma Nevi-12, mientras que el porcentaje óptimo de las mezclas modificadas con aceite de motor usado en 1 y 2 por ciento fueron 6,35 y 6,42 por ciento, las mezclas satisfacen parámetros de estabilidad, sin embargo los valores de flujo son elevados, así también se evidenció un incremento en el contenido de vacíos conforme al incremento de aceite de motor usado.

ABSTRACT

In the present work, hot asphalt mixtures were prepared using the Marshall method with the addition of used motor oil in the Alvarado Quarry. First, the aggregates were sampled and transported, then the physical and mechanical properties were tested, and then the asphalt cement was sampled.

Forty-five test specimens (briquettes) were made, with oil contents from 0 to 2 percent, making fifteen specimens for each consecutive percentage. The used motor oil was added to the asphalt mix as a fraction of the asphalt cement by weight, following the procedure established in ASTM D 1559, AASHTO T 245 and AASHTO T 225.

Once the briquettes were made, they were tested to obtain the percentages of stability and flow, where it was determined that the optimum percentage of asphalt in the conventional mix is 6.07 percent and complies with the requirements of the Nevi-12 Standard, while the optimum percentage of the mixes modified with used motor oil at 1 and 2 percent were 6.35 and 6.42 percent, the mixes satisfy stability parameters, however, the flow values are high, and an increase in the void content was also evidenced as the used motor oil content increased.

CAPÍTULO I

ANTECEDENTES

1. Tema del trabajo experimental

“Efectos de la adición de aceite de motor usado en las propiedades mecánicas de mezclas asfálticas en caliente”

1.1. Antecedentes Investigativos

1.1.1. Antecedentes

El cemento asfáltico ha tenido gran demanda en la construcción de carreteras en los últimos años, con ello también el parque automotor a nivel mundial ha tenido un crecimiento exponencial. Sin embargo, la producción de asfalto conlleva el consumo de excesiva energía y emisiones contaminantes al medio ambiente, principalmente gases contaminantes a la atmósfera. Por otro lado, los desechos generados por el parque automotor, principalmente lubricantes, en nuestro país no presentan un adecuado manejo que minimice sus efectos al medio ambiente.

Desde el punto de vista ambiental la industria del asfalto ha realizado investigaciones con el fin de reducir costos y mitigar la contaminación ambiental, mediante la implementación de nuevos productos, sustitutos o modificadores. El pavimento asfáltico es visto como un sistema de encapsulamiento para los desechos producidos por el sector automotriz.

Un ejemplo de ello es la utilización del caucho de llantas triturado por INVIAS, en varias mezclas asfálticas como también en la reutilización de pavimentos utilizados (RAP). En nuestro país en las principales ciudades: Guayaquil, Quito, Cuenca, se ha tratado seguir el modelo de países que le dan un adecuado tratamiento y comercialización de los aceites usados. Sin embargo, este intento ha sido muy incipiente, debido a que la comercialización se realiza sin ningún control o criterio de manejo ambiental [1].

Los establecimientos que realizan actividades de comercialización y cambio de aceite están sujetas a ordenanzas municipales que impiden la descarga directa de este tipo de desechos al alcantarillado público sin un tratamiento previo, generalmente una trampa de grasas. En Quito se comercializan aproximadamente 223.000 galones mensuales de aceite, apenas el 42%, se recuperan en calidad de aceite usado, mientras que el 58% tienen un final desconocido. El aceite que ha tenido un pretratamiento en su mayoría se destina a los hornos en industrias de cemento, mientras que porcentajes inferiores entre el 1 y 2% se emplean como comburente, tratamiento de madera, fabricación de bloques de madera e impedir el crecimiento de madera.

Desde finales de la década de los 90's se han venido desarrollando investigaciones de asfaltos modificados con desechos y aceites con el fin de disminuir las temperaturas de fabricación y aplicación de mezclas asfálticas, disminuyendo el riesgo ambiental y minimizando los costos de producción y tendido.

Existen investigaciones previas basadas en el uso de aceite motor usado en mezclas asfálticas en caliente entre las que destacan tenemos: DeDene en el año 2011 desarrollo la "Investigación del uso del aceite usado de motor en RAP, para mejorar la reciclabilidad de estos", en donde se concluye que el aceite actúa como un rejuvenecedor del asfalto. Sin embargo, en porcentajes elevados incrementa la probabilidad de desprendimientos en la mezcla [2].

En el año 2013 Golaipur realizó la investigación titulada "Efecto de la adición de aceite usado en las características críticas de las carpetas asfálticas", en la investigación se destaca que la adición de aceite tiene un efecto positivo sobre la resistencia del aglutinante en un amplio rango de temperatura, así también en el año 2014 Abdullah investigó la "Evaluación de las propiedades de rigidez de HMA modificadas con aceite de motor usado, se utilizaron porcentajes de asfalto del 0, 1, 2 y 3 por ciento, concluyendo que en concentraciones de aceite por debajo del 2% no se afectan las propiedades de resistencia en forma significativa y puede ser utilizado como agente ablandador en asfaltos pesados [3] .

La investigación más reciente fue realizada en el año 2017 por Cárdenas Constanza “Evaluación de la resistencia mecánica de mezclas asfálticas elaboradas con asfalto modificado con aceites lubricantes usados”, se utilizó aceite de motor en porcentajes del 0 al 6 por ciento en peso, en donde se concluyó que el porcentaje máximo a utilizar es del 2 por ciento, ya que en porcentajes superiores el cemento asfáltico pierde sus propiedades ligantes [4].

Año	Tema	Conclusiones	Autor
2012	Implementación de mezclas asfálticas tibias en Colombia	La principal ventaja en relación a las mezclas asfálticas calientes es la reducción de costos operativos, menor consumo energético, lo que conlleva a menor generación de gases de efecto invernadero	(Ortega, y otros, 2012)
	Uso de aceite usado en cementos asfálticos	En la Universidad de Queens durante cinco años realizó estudios en dos tramos de la autopista de la ciudad del mismo nombre, con la adición del aceite de motor usado, los resultados obtenidos no fueron satisfactorios, debido a la presencia de agrietamientos en los cinco primeros años de servicio, debido a la presencia de metales pesados en el aceite acelerando los	(Shurvell, 2012)

		procesos de envejecimiento.	
2013	Aplicación de aceite usado como componente de mezclas asfálticas frías y calientes	La adición de aceites usados en mezclas frías puede ocasionar disminución en propiedades de estabilidad y resistencia, debilitando la propiedad aglutinante entre los agregados y asfalto.	(Nurul, y otros, 2013)
	Efecto de la adición de aceite usado en las características críticas de las carpetas asfálticas	El estudio indica que el aceite usado, influye en el comportamiento reológico y térmico de las carpetas asfálticas debido a la reducción de la rigidez. Así también los resultados mostraron que la adición del aceite tiene un efecto positivo sobre la resistencia aglutinante del asfalto en un amplio rango de temperatura	(Golalipour, 2013)

Tabla 1. Investigaciones previas

1.1.2. Justificación

El crecimiento poblacional a nivel mundial se ha caracterizado por ser exponencial, así surge la necesidad de creación de nuevas ciudades y servicios entre ellos se destacan las vías como medio de comunicación y comercio, siendo los estudios y diseños de ingeniería esenciales para garantizar la seguridad en los usuarios de las vías.

La construcción sostenible es uno de los principales objetivos de los egresados de la Carrera de ingeniería civil, investigando métodos de reducción en la emisión de gases contaminantes o el reciclaje de materiales utilizados en labores de ingeniería, enfocándose además en la reutilización de materiales contaminantes que constituyen una amenaza directa al medio ambiente.

La presente investigación tiene como objetivo implementar el uso de aceite de motor usado en la elaboración de mezclas asfálticas en caliente, la producción de este tipo de lubricantes ha incrementado a partir de la revolución industrial, utilizando aceites en un inicio limpios para reducir la fricción entre componentes de máquinas o el uso muy común en los motores de vehículos.

Los aceites lubricantes en su mayoría contienen en su composición metales pesados, los cuales al ser utilizados pierden sus propiedades iniciales y sin un adecuado tratamiento resultan perjudiciales, sin embargo, al incorporar este componente en porcentajes adecuados presenta beneficios en la elaboración de mezclas asfálticas.

Entre las principales ventajas de esta mezcla asfáltica se detallan, la reducción en el uso de combustibles para la producción en planta, facilidad en la compactación de pavimentos asfálticos, mejor ambiente de trabajo para los operarios del sitio.

Eliminación del envejecimiento prematuro del ligante asfáltico, permite una apertura más rápida al tránsito, el asfalto tradicional modificado con aceite es una tecnología competente capaz de reducir la mezcla y la temperatura de producción alrededor de 10-40°C de la temperatura real, menos combustible requerido para calentar los agregados, menores emisiones contaminantes en la planta de asfaltos, menor envejecimiento del betún durante la construcción que alarga la vida útil de la carretera.

De acuerdo con los datos de la compañía quiteña Arc y Pieper, que se dedica a esta labor, se desechan 54 millones de litros de aceite usados al año en el Ecuador. El 70% corresponde a uso doméstico y el resto al sector automotriz y ambiental. En su mayoría los aceites son arrojados directamente a las alcantarillas, sólo un pequeño porcentaje

es comprado por la Unión Andina de Cementos, que previo a un tratamiento, utilizan el aceite como combustible para producir Clinker, esto como iniciativa de cinco municipios del país quienes realizan la recolección.

1.1.3. Fundamentación Teórica

Una de las principales preocupaciones mundiales que van a la par con el desarrollo económico y social, es el deterioro del medio ambiente, siendo los factores influyentes el desarrollo de proyectos entre ellos los de vialidad cuyos procesos involucran la quema de combustibles fósiles causantes de lluvias ácidas, agujeros en la capa de ozono y efecto invernadero, así también el incremento de la temperatura global, contribuyen al cambio climático generalizado del siglo XXI.

Por otro lado, la generación del dióxido de carbono proveniente en gran parte del sector automotriz e industrial son responsables del 80% de las emisiones totales, dichas cifras se han incrementado desde la revolución industrial, en los años 1750 los niveles de CO₂ alcanzaban 280 ppm. Sin embargo, en la actualidad esta cifra ha alcanzado las 430 ppm [5].

La comunidad económica Europea en el año 1997 mediante el tratado de Kyoto comenzó a desarrollar nuevas tecnologías de asfalto encaminadas a disminuir la contaminación ambiental denominadas mezclas asfálticas tibias (MAT O WMA), contrarrestando los gases de efecto invernadero producidas por las mezclas asfálticas convencionales.

Las mezclas tibias se describen como aquellas que se producen a temperaturas menores que las mezclas en caliente entre 100 °C y 135 °C, así mismo es posible producir y colocar concretos asfálticos a temperaturas sensiblemente inferiores a las convencionales. Por los factores mencionados anteriormente debemos interesarnos en el ámbito de producción de mezclas asfálticas amigables con el medio ambiente.

Al hablar en seguridad ocupacional en este tipo de mezclas asfálticas además de disminuir el consumo de combustible, también se reduce la cantidad de partículas finas, el humo generado por el asfalto y consecuentemente la cantidad de combustibles fósiles no renovables utilizados.

La producción de mezclas asfálticas consta de los siguientes componentes: agregado grueso, fino, asfalto y llenante mineral o filler. En mezclas asfálticas convencionales se debe calentar el asfalto hasta una temperatura entre 150 y 180 °C, ya que el asfalto debe tener una viscosidad suficiente para fluir y cubrir las partículas de los agregados empleados en la producción de la mezcla asfáltica, para así acomodar los agregados y compactar la mezcla [6].

Por otro lado, en las mezclas asfálticas modificadas con aceite de motor usado, investigaciones previas indican que la viscosidad del asfalto se reduce y por ende la temperatura de compactación también, debido a que hay disminución en la viscosidad del asfalto fluido y puede cubrir con mayor facilidad las partículas de agregado que conforman la muestra a ser compactada [7].



Gráfico 1. Colocación de tipos de mezclas asfálticas

Fuente: ADVERA (2012).

(1) Hot Mix Asphalt (HMA).

(2) Warm Mix Asphalt (WMA).

1.1.4. Hipótesis

Variable independiente

Adición de aceite de motor usado en la mezcla asfáltica convencional.

Variable dependiente

Ensayos de las briquetas de mezclas asfálticas y su cumplimiento con la normativa de la norma NEVI 12.

1.2.Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Analizar los efectos de la adición de aceite usado de motor en las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas en caliente.

1.2.2. Objetivos Específicos

- a) Diseñar mezclas asfálticas en caliente, de acuerdo con el método Marshall establecido en la norma NEVI-12, en porcentajes del 0 al 2 por ciento de aceite de motor usado en peso considerando los efectos de la adición de aceite de motor usado.
- b) Determinar las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas con y sin adición de aceite usado de motor.
- c) Comparar las propiedades mecánicas de mezclas asfálticas en caliente mediante la adición de aceite de motores con las propiedades de una mezcla tradicional.
- d) Determinar la variación de los espesores de la estructura de un pavimento flexible, utilizando mezclas asfálticas estabilizadas con aceite de motor.

CAPÍTULO II METODOLOGÍA

2.1. Descripción de la Metodología

En el presente trabajo, se realizó mediante un proceso experimental, el asfalto tradicional utilizado en la elaboración de mezclas asfálticas en caliente fue mezclado con aceite de motor usado en porcentajes que van del 0 al 5% en peso, la utilidad del mismo en mejorar propiedades en la producción, compactación y tendido, así también en su influencia en los costos asociados a las propiedades mencionadas anteriormente fueron validados mediante ensayos de laboratorio.

Para la sistematización de los datos se utilizó como base normativas ASTM y AASHTO desde el muestreo de los materiales, asfalto, la determinación de las propiedades físicas y mecánicas de los agregados, todo ello se plasma en los reportes, informes y tablas elaboradas en su respectivo ítem.

El cumplimiento de los objetivos planteados se logró con búsqueda bibliográfica constante de trabajos previos relacionados en cuestiones de materiales y aditivos adicionales empleados en mezclas asfálticas, de manera especial la bibliografía del Instituto del Asfalto en la cual se detallan los procedimientos para la elaboración de mezclas asfálticas.

2.2. Nivel o Tipo de Investigación

INVESTIGACIÓN APLICADA

Una vez estudiado y comprendido los beneficios del aceite de motor usado en mezclas asfálticas. Se va a poner en práctica con la finalidad de encontrar características que comprueben la mejor calidad del asfalto modificado con aceite de motor usado.

INVESTIGACIÓN DE LABORATORIO

La aplicación de esta investigación es necesaria para realizar las briquetas de asfalto común y las briquetas con asfalto modificado con aceite de motor usado en porcentajes del 0% al 5%, en sustitución parcial del asfalto, para cumplir el

nivel de investigación será necesario utilizar equipo adecuado para obtener porcentajes exactos.

INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL

La investigación realizada en el presente estudio contempla el nivel exploratorio, descriptivo y correlacional.

- El nivel exploratorio, implica variables en el análisis de dosificación de aceite de motor de estudio.
- El nivel descriptivo, mediante la elaboración de varias muestras se determinará el porcentaje óptimo que cumpla con normativas de construcción vigentes.
- El nivel correlacional, se diferencia la mezcla asfáltica convencional con la mezcla modificada con aceite de motor, en cuantificación de energía y costos de producción y tendido.

2.3. POBLACIÓN Y MUESTRA

En el presente trabajo se basa en datos de carácter experimental. Por lo tanto, no es necesario calcular una muestra, es decir si se elaboran mayor cantidad de muestras, los resultados serán más acertados. Entonces la población contemplada para el trabajo de investigación contempla 45 briquetas, de las cuales las quince primeras serán elaboradas sin aceite de motor usado, mientras que las restantes se emplearán porcentajes de aceite en porcentajes de 1 y 2 por ciento en base a investigaciones realizadas anteriormente. Se realizaron los ensayos de estabilidad y flujo de las probetas elaboradas de acuerdo con la norma ASTM D 1559-89 con el objetivo de conseguir resultados confiables, los mismos que permitirán tomar decisiones en cuanto al contenido óptimo de aceite con el cual no existen efectos adversos en la elaboración, producción, compactación y por su puesto el servicio al cual estará expuesto el asfalto elaborado.

REEMPLAZO DE ACEITE DE MOTOR USADO EN PORCENTAJE DE ASFALTO	
Número de Muestras	Porcentaje de Cemento Asfáltico
3	5,0%
3	5,5%
3	6,0%
3	6,5%
3	7,0%
Porcentaje de Aceite de Motor Usado en 1%	
3	5,0%
3	5,5%
3	6,0%
3	6,5%
3	7,0%
Porcentaje de Aceite de Motor Usado en 2%	
3	5,0%
3	5,5%
3	6,0%
3	6,5%
3	7,0%
Total	45 briquetas

Tabla 2. Determinación de la Población y Muestra

Fuente: Carlos Martínez

2.4.Operacionalización de Variables

2.4.1. Variable Independiente

Adición de aceite de motor usado en la mezcla asfáltica tradicional.

Concepto	Categoría	Indicador	Ítems	Técnicas e Instrumentos
El asfalto empleado en la elaboración de mezclas asfálticas es reemplazado en pequeños porcentajes por aceite de motor usado, se analiza el cumplimiento de la normativa de construcción vigente.	Asfalto	Estabilidad y flujo	¿En qué proporciones los agregados y el cemento asfáltico deben combinarse para obtener resistencias normadas?	Ensayos de laboratorio. Normas INEN ASTM, AASHTO.
	Aceite de Motor Usado	Cantidad	¿Cuál es el porcentaje recomendable a incorporar en mezclas asfálticas?	Ensayos de laboratorio. Análisis y comparación de resultados.
		Calidad	¿Posee ventajas con respecto a la mezcla asfáltica tradicional?	Investigación bibliográfica y experimental.

Tabla 3. Operacionalización Variable Independiente

Fuente: Carlos Martínez

2.4.2. Variable Dependiente

Ensayos de las briquetas de mezclas asfálticas y su cumplimiento con la normativa NEVI 12.

Concepto	Categoría	Indicador	Ítems	Técnicas e Instrumentos
El cumplimiento de las propiedades físicas y mecánicas de la mezcla asfáltica dependen de la dosificación y calidad en la elaboración de briquetas.	Calidad del Asfalto	Cantidad	¿Cuál es el porcentaje óptimo de asfalto a combinarse con los agregados?	Ensayos de Laboratorio.
	Ensayo de Estabilidad	Densidad y Peso	¿Cuál es la densidad y peso de las briquetas?	Ensayos de Laboratorio.
		Carga Axial	¿Cuál es la carga máxima que soporta cada briqueta?	Ensayos de laboratorio. Análisis y comparación de resultados.

Tabla 4. Operacionalización Variable Dependiente

Fuente: Carlos Martínez

2.5. Materiales y Equipos

2.5.1. Asfalto

2.4.1.2. Definición

El asfalto desde la antigüedad ha sido considerado un material de particular interés debido a sus características cementantes, adhesivas, impermeabilizantes y flexibilizantes, han promovido su uso en la pavimentación de caminos, fabricación de impermeabilizantes, etc. En nuestro país se obtiene artificialmente, como un subproducto del proceso de refinación del petróleo, en consecuencia, los asfaltos difieren en sus propiedades físicas principalmente debido a la naturaleza del crudo fuente y a las operaciones relacionadas con su producción. Por tal motivo es

posible encontrar asfaltos característicos muy diversas, que van desde los sólidos rígidos y quebradizos hasta los fluidos de muy baja viscosidad [8].

Químicamente, el asfalto puede definirse como una mezcla de compuestos hidrocarbonados, cuya composición es aproximadamente 84% carbón, 10% hidrógeno, 1% oxígeno y 5% trazas de elementos como azufre, níquel, vanadio y hierro.

El asfalto es un material negro, cementante, que varía ampliamente en consistencia, entre sólido y semisólido (sólido blando), a temperaturas ambientales normales. Cuando se calienta lo suficiente, el asfalto se ablanda y se vuelve líquido, lo cual permite cubrir las partículas de agregado durante la producción de mezclas en caliente [9].

Asfalto Natural

Se forma normalmente por la mitigación de petróleos hacia la superficie terrestre, el mismo que es combinado con la volatilización de sus componentes más ligeros y que se encuentran mezclados, en mayor o menor proporción con materia mineral. En nuestro país es muy conocido el procedente del Lago Trinidad, así también los afloramientos en la ciudad del Tena y la Tierra Brea de la Península de Santa Elena.

Asfalto Rebajado

Es un cemento asfáltico, líquido a la temperatura ambiente, que se obtiene durante el proceso de refinación del petróleo o calentado y diluyendo un cemento asfáltico, mediante la adición de un destilado volátil del mismo petróleo: Nafta, gasolina, kerosén, aceites combustibles, aceites diésel o combustibles para propulsión a chorro.

Según la velocidad de curado del agente diluyente, generalmente se pueden producir tres tipos generales de Asfaltos líquidos: En presencia de diluyentes ligeros que se evaporan rápidamente, tales como la Nafta y la Gasolina, se denominan de Curado Rápido (RC): Si contienen diluyentes menos ligeros como Kerosén o combustibles para propulsión a chorro, se conocen como de curado

Medio (MC); y si contienen aceite diésel u otros aceites combustibles, se los llama de Curado Lento (SC).

En los tipos de asfalto líquido mencionados anteriormente, la viscosidad (Resistencia a la deformación del líquido), depende de la cantidad y clase de diluyente, se representa mediante un número entre cero (0) y cinco (5). A menor viscosidad (Mayor porcentaje de diluyente) [10].



Gráfico 2. Asfalto en obra
Fuente: Autocasion

2.4.2. Asfalto AC-20

Es un material que se obtiene en procesos de refinación de petróleo, presenta un comportamiento viscoso y de excelentes cualidades cementantes. De acuerdo con el Asphalt Institute la sigla AC-20 es una asignación del cemento asfáltico de acuerdo a su penetración (milésimas de milímetro), explicada en la siguiente tabla:

ASFALTO PARA PAVIMENTO	
PENETRACIÓN 1/10 mm	DESIGNACIÓN
40-50	AC - 40
60-70	AC -20
85-100	AC – 10
120-150	AC – 5
200-300	AC -2.5

Tabla 5. Grados de penetración del asfalto
Fuente: Asphalt Institute 7 th edition

El cemento asfáltico AC-20 se utiliza en la elaboración de carpetas de mezcla en caliente, así como para elaborar emulsiones asfálticas utilizadas en carpetas y morteros de mezcla en frío y carpetas por el sistema de riegos. Entre las propiedades para asfaltos comprendidos entre 220 dmm a 40 dmm de penetración:

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

Tabla 6. Viscosidades del Asfalto según el grado de Penetración
Fuente: Asphalt Institute 7 th edition

En la siguiente tabla se muestran los requisitos de cementos asfálticos, para los tipos comprendidos de 220 dmm a 40 dmm de penetración [11].

Ensayo	Unidad	AC-20		Norma de Ensayo
		Min.	Max.	
Viscosidad Absoluta a 60°C	Pa s	200 ± 40		ASTM D 2171
Viscosidad cinemática a 135 °C	mm ² s ⁻¹	300	-	ASTM D 2170
Penetración a 25 °C, 100 g.5s	dmm	60	-	NTE INEN 917

Punto de Inflamación	°C	232	-	NTE INEN 808
Solubilidad en tricloroetileno	%	99	-	NTE INEN 915

Tabla 7. Propiedades y ensayos asfalto AC-20

Fuente: Escuela Politécnica del Ejército (2013).

2.4.3. Propiedades Físicas del Asfalto

El asfalto es un material aglomerante, resistente, muy adhesivo, altamente impermeable y duradero; capaz de resistir altos esfuerzos instantáneos y fluir bajo acción de calor o cargas permanentes, cuyo componente natural de la mayor parte de los petróleos, en los que existe en disolución y que se obtiene como residuo de la destilación al vacío del crudo pesado.

Las propiedades físicas del asfalto, de mayor importancia para el diseño, construcción, y mantenimiento de carreteras son: adhesión, cohesión, susceptibilidad a la temperatura y durabilidad. El ligante asfáltico debe envolver los áridos y dar cohesión a la mezcla de tal manera que resista a la acción de desmenuamiento del agua (Fig.), tal efecto produce la separación del ligante y el árido disminuyendo la cohesión de la mezcla [12].

2.4.3.2. Adhesión y cohesión

La adhesión es la capacidad del asfalto para unirse al agregado, en la mezcla de pavimentación, mientras que la cohesión es la capacidad del asfalto de mantener firmemente unidas las partículas del agregado, una vez que el pavimento esté terminado.

El ensayo de ductilidad no mide directamente la adhesión o la cohesión, sino examina la relación con la cohesión y adhesión.

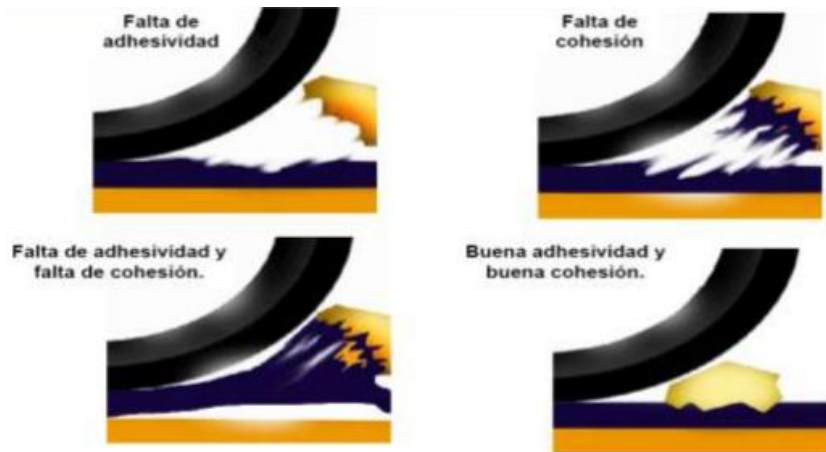


Gráfico 3. Adhesión y Cohesión del Asfalto
Fuente: Linares 2012

2.4.3.3. Susceptibilidad térmica

El asfalto es un material termoplástico, es decir se vuelven más duros (más viscosos) a medida que su temperatura disminuye y más blandos (menos viscosos) a medida que su temperatura aumenta. Esta característica se conoce como susceptibilidad térmica, y es una de las propiedades más valiosa de un asfalto.

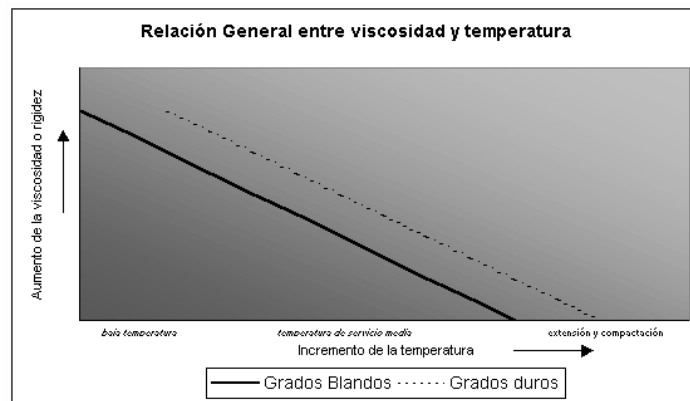


Gráfico 4. Relación entre Viscosidad y Temperatura
Fuente: Cepeda (2014)

Esta propiedad física principalmente nos indica la temperatura a la cual se debe efectuar la mezcla con el agregado y la temperatura a la cual se debe compactar la mezcla sobre la base de la carretera. Debe tener suficiente fluidez a altas temperaturas para que sea capaz de cubrir todas las partículas del agregado durante el mezclado y así permitir que estas partículas se desplacen unas con respecto a otras durante el proceso de compactación. Posteriormente deberá mantenerse lo suficientemente viscoso a temperaturas normales para mantener unidas las partículas del agregado.

2.4.3.4. Durabilidad

Es la medida en la cual un asfalto puede mantener sus características originales cuando está expuesto a procesos de degradación y envejecimiento en condiciones normales de servicio. Esta propiedad depende principalmente del diseño de la mezcla, las características del agregado, la mano de obra de construcción, temperatura del ambiente, tráfico excesivo, entre otros factores. Por lo tanto, es una propiedad juzgada a partir del comportamiento del pavimento. Sin embargo, existen pruebas que permiten cuantificar la durabilidad, entre ellas:

- Prueba de Película Delgada en Horno (TFO).
- Prueba de Película Delgada en Horno Rotatorio (RTFO).

2.4.3.5. Ductilidad

Es la medida de cuánto puede ser estirada una muestra de asfalto antes de que se rompa en dos. Se mide mediante la prueba de “extensión” en donde una probeta de cemento asfáltico es extendida o estirada a una velocidad y a una temperatura específica. La prueba termina cuando el hilo de cemento asfáltico se rompe, la longitud de hilo del material en el momento de corte se mide en centímetros y se denomina ductilidad de la muestra.

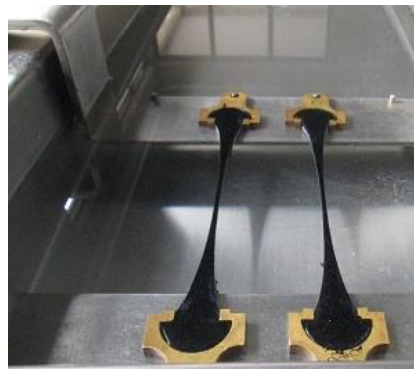


Gráfico 5. Ensayo de ductilidad del Asfalto
Fuente: aconstructoras

2.4.3.6. Solubilidad

Es un procedimiento que consiste en medir la pureza de un cemento asfáltico. En el ensayo la muestra se sumerge en un solvente (tricloroetileno) en donde se disuelven sus componentes cementantes activos. Las impurezas como sales,

carbonos libres y contaminantes inorgánicos, no se disuelven, sino que se depositan en forma de partículas. Estas impurezas son filtradas fuera de la solución y medidas como una proporción de la muestra original. El ensayo se realiza bajo los estándares y procedimientos de la norma ASTM D 7553, como una alternativa a la reducción de la destrucción de la capa de ozono.

En ensayo tiene como objetivo detectar la cantidad máxima de materia insoluble, para que no se mezclen materiales no deseados con los productos. Sin embargo, en la actualidad no se utiliza con frecuencia porque el tricloroetileno es un clorofluorocarbono (CFC) prohibido en el tratado de Kyoto. Por otro lado en la norma ASTM D 7553 indica que el bromuro de n-propilo, ha sido aprobado por la Agencia de protección ambiental de los EE.UU, como una alternativa a los fluorocarbonos, sin embargo la normativa ASTM aún se encuentra en revisión de la propuesta [14].

2.4.3.7. Peso Específico

El peso específico es la proporción del peso de cualquier volumen de material al peso de un volumen igual de agua, ambos a una temperatura determinada. Como ejemplo, una sustancia con un peso específico de 1.6 pesa 1.6 veces más que el agua.

Generalmente el peso específico de un cemento asfáltico no se indica en las especificaciones de la obra. Sin embargo, hay dos razones importantes por las cuales se debe conocer el peso específico del cemento asfáltico usado:

- El asfalto se expande cuando es calentado y se contrae cuando es enfriado, lo que nos da a entender que el volumen dado de una cierta cantidad de cemento asfáltico sería mayor a altas temperaturas, las medidas de peso específico proveen un patrón para efectuar correcciones de temperatura-volumen.
- El peso específico de un asfalto es esencial en la determinación del porcentaje de vacíos (espacios de aire) de un pavimento compactado [13].

2.4.4. Propiedades Químicas del Asfalto

El asfalto es un material muy versátil para la construcción. Sin embargo, su composición es diferente de acuerdo al proceso de destilación del petróleo o a la fuente del petróleo. Químicamente en plantas de refinación se dice que el asfalto está compuesto por varios hidrocarburos parafínicos, aromáticos y compuestos heterocíclicos que contienen azufre, nitrógeno y oxígeno; casi en su totalidad solubles en sulfuro de carbono. Al ser disuelto en solvente como el heptano, puede separarse en: Asfáltenos y Máltenos.



Gráfico 6. Composición Química del Asfalto

Fuente: Ortiz (2010)

- a) **Los asfáltenos**, son compuestos químicos orgánicos y representan los metales más pesados con mayor punto de ebullición, son estructuras de compuestos aromáticos de color negro o marrón se parecen al polvo grueso de grafito, los elementos químicos que prevalecen son el nitrógeno, azufre, oxígeno y alto contenido de carbón. Por lo tanto, presentan alto contenido de moléculas, generalmente se encuentran disueltos en los máltenos, es decir en la fase discontinua del asfalto.
- b) **Los máltenos**, son líquidos viscosos formando la fase continua del asfalto, vinculan las propiedades mecánicas del asfalto. Su contenido se asocia a las propiedades mecánicas mostradas por el asfalto. Estas sustancias son solubles en hidrocarburos saturados y está compuesto por resinas, saturados y aromáticos, solubles en normal h-heptano [14].

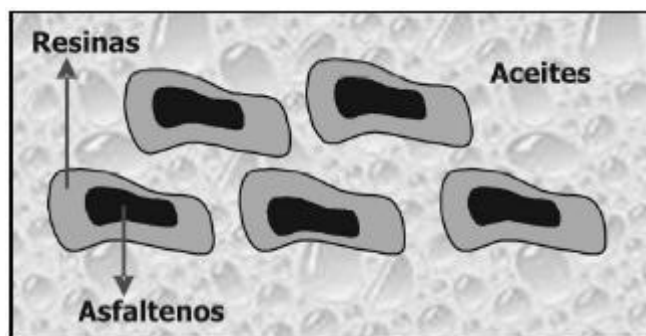


Gráfico 7. Composición Química del Asfalto
Fuente: Cartilla de Asfalto-ASOPAC

- **Resinas:** Son moléculas oscuras que proporcionan las cualidades adhesivas (viscosidad) en el asfalto, afectada extremadamente por la temperatura, actúan como agentes que dispersan los asfaltenos en los aceites.
- **Saturados:** Presentan coloración amarillenta, en el cual flotan como islas los máltenos y asfaltenos, afectan a la susceptibilidad térmica, a temperatura ambiente se encuentra líquida.
- **Aromáticos:** Su color es negruzco, contienen aquellos pesos moleculares menores en la estructura del asfalto, actúan como disolventes de otras cadenas en los hidrocarburos de alto peso molecular, constituyen del 40%-65% del total de asfalto. Influyen directamente en la capacidad del asfalto para admitir polímeros modificadores.

En la estructura coloide del asfalto se puede observar que las resinas circundan en forma inmediata a los asfaltenos y los aceites rodean a ese compuesto.



Gráfico 8. Subclasificación Química del Asfalto
Fuente: Cepeda (2014)

Las proporciones en las que están involucrados los asfáltenos y máltenos pueden variar de un asfalto a otro debido a un sin número de factores, entre los que se destacan están: Altas temperaturas, exposición a la luz y al oxígeno, tipo de agregado usado en la mezcla de pavimento, y espesor de la película de asfalto en las partículas de agregado [15].

2.5. Viscosidad

El asfalto al ser un fluido es de fundamental importancia conocer su viscosidad, de esta manera se determina si el aceite de motor usado influye en el comportamiento de la mezcla asfáltica tanto en la producción y posterior colocación. En mezclas asfálticas calientes tradicionales debe alcanzar altas temperaturas para que el ligante disminuya su viscosidad y sea capaz de cubrir por completo los agregados que conforman la mezcla asfáltica.

La viscosidad es muy importante, ya que en ocasiones el asfalto necesita ser bombeado, mezclado o vertido, al poseer baja viscosidad optimizará el tiempo empleado en ejecutar estas operaciones.

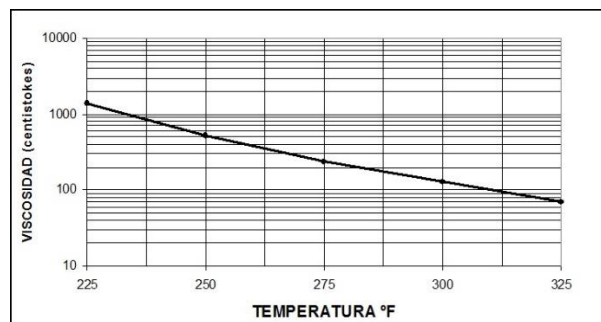


Gráfico 9. Gráfico de Viscosidad vs. Temperatura

Fuente: Asphalt Institute MS-2

2.5.1. Medición de Viscosidad

El aparato utilizado para medir la viscosidad de un asfalto es el viscosímetro capilar, similar a la que se miden los aceites lubricantes, básicamente se relaciona el esfuerzo cortante con la velocidad de deformación.

$$\tau = \mu * D$$

Donde:

τ = Esfuerzo cortante [Mpa]

μ = Viscosidad [Mpa. S]

D = Velocidad de deformación [s^{-1}]

Se distinguen dos tipos de viscosidad.

- **Viscosidad dinámica (μ):** También llamada absoluta medida en centipoises (cp), y puede obtenerse multiplicando la viscosidad cinemática por la densidad a una determinada temperatura.
- **Viscosidad cinemática (ν):** Es una medida de la resistencia interna de un fluido a fluir bajo fuerzas gravitacionales, se reporta en centistokes (cSt) o milímetros cuadrados por segundo, por definición es el cociente entre la viscosidad absoluta y la densidad [15].

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

Donde:

ν = Viscosidad cinemática.

μ = Viscosidad absoluta.

ρ = Densidad.

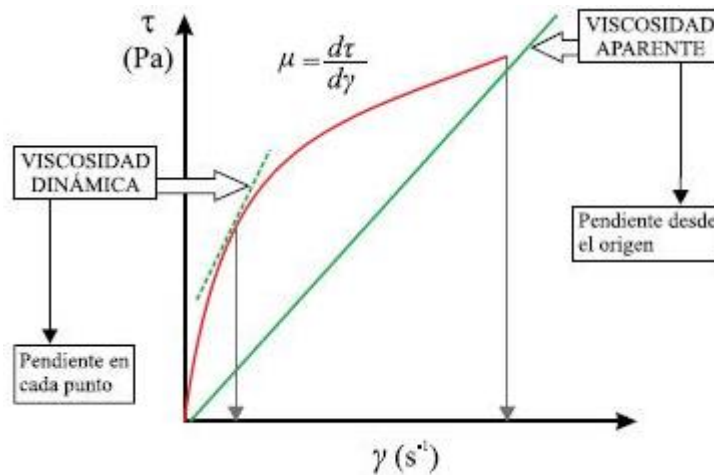


Gráfico 10. Comportamiento de la Viscosidad
Fuente: Linares 2010

2.5.2. Tipos de fluidos

En estudios basados en viscosidad, se ha establecido que existen tres tipos de fluidos: Newtonianos, No newtonianos y visco elásticos, cuyas subclasificaciones se detallan a continuación.

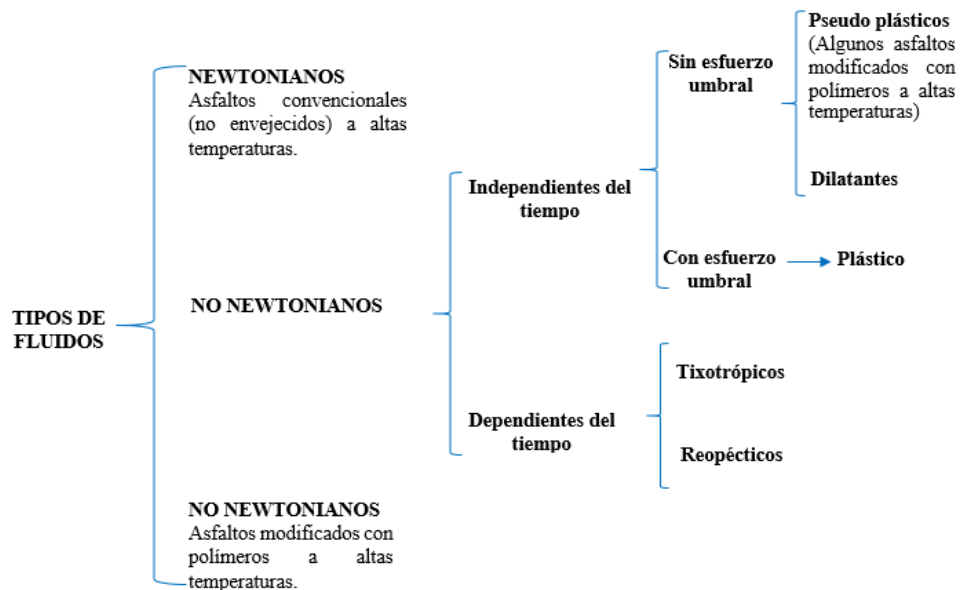


Gráfico 11. Clasificación de los Fluidos
Fuente: Ortega (2010)

2.5.2.1. Fluidos newtonianos

Este tipo de fluidos se caracterizan por cumplir la ley de Newton, es decir, existe una relación lineal entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación. Así también la viscosidad no depende del tiempo durante la aplicación del esfuerzo. Sin embargo,

factores como la temperatura y presión pueden influir en el comportamiento del fluido. El asfalto convencional a altas temperaturas, describe muy bien a este tipo de fluido.

2.5.3. Fluidos no newtonianos

En contraste a los fluidos newtonianos no cumplen con la ley de Newton, es decir la relación entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación no es lineal. Se subdividen en dependientes e independientes del tiempo.

2.5.4. Fluidos visco elásticos

Se caracterizan por presentar dos tipos de comportamientos, como fluidos con propiedades viscosas y elásticas, radica en la presencia en el fluido de moléculas muy largas y flexibles, en ocasiones es debido a la presencia de partículas líquidas o sólidos dispersos.

Los asfaltos modificados con polímeros son el tipo de fluido que describe el comportamiento visco elástico [16].

2.6. Sistemas de clasificación del cemento asfáltico

La clasificación de los cementos asfálticos ha girado alrededor de las propiedades físicas de los mismos, determinados a través de los métodos de ensayos en su mayoría empíricos, debido a la complejidad y variabilidad de las propiedades químicas de los asfaltos.

Los sistemas utilizados para la clasificación de los asfaltos corresponden a:

- 1) Sistema de Clasificación por Penetración y
- 2) Sistema de clasificación por Viscosidad.

2.6.1. Sistema de clasificación por penetración

El método de penetración fue el primer sistema desarrollado y todavía es utilizado por diferentes agencias de carreteras. Este sistema fue desarrollado en el año 1918 por el Bureau of Public Works (ahora Federal Highway Administration, FHWA), mientras que en 1931 la AASHTO publicó las primeras especificaciones técnicas para la

clasificación de asfaltos por penetración. Por su parte el ASTM en 1921, desarrolló su propio sistema con propósitos de pavimentación.

En los últimos años la clasificación del asfalto por penetración conlleva el desarrollo de una serie de ensayos de laboratorio contemplados en la norma ASTM D 946, “Standard Specification for Penetration-Graded Asphalt Cement for Use in Pavement Construction”. La clasificación mencionada se muestra en la tabla perteneciente a la norma ASTM D 946.

Ensayo	Norma de ensayo ASTM	Clasificación por Penetración (Grados de Penetración)									
		40-50		60-70		85-70		120-150		200-300	
		Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx
Penetración (0.1 mm)	D 5	40	50	60	70	85	100	120	150	200	300
Flash Point (°C)	D 92	232	---	232	---	232	---	218	---	177	---
Ductilidad (cm)	D 113	100	---	100	---	100	---	100	---	100	---
Solubilidad (%)	D 2042	99.0	---	99.0	---	99.0	---	99.0	---	99.0	---
Ensayos en Residuo asfáltico, después del ensayo de Película delgada ASTM D 1754											
Penetración (%)	D 5	55+	---	52+	---	47+	---	42+	---	37+	---
Ductilidad (cm)	D 113	---	---	50	---	75	---	100	---	100	---

Tabla 8. Requisitos para clasificar el asfalto según especificación ASTM D 946-82

Fuente: ASTM D 946-82

2.6.2. Sistema de Clasificación por Viscosidad

Este sistema fue introducido a principios de la década de 1960, permite clasificar cementos asfálticos en estado virgen y residuos asfálticos, el sistema fue concebido debido a las limitaciones que presentaba el sistema de clasificación por penetración que presentaba imposibilidad de evaluar la susceptibilidad térmica del asfalto, no poder evaluar el comportamiento del mismo a temperaturas normales de operación asfáltica.

Los ensayos requeridos para la clasificación del asfalto están contemplados en la norma ASTM D 3381, “Standar Specification for Viscosity-Graded Asphalt Cement for Use in Pavement Construction”. Se detalla la clasificación por Viscosidad (AC) y Residuo asfáltico (AR):

- a) **Viscosidad (AC):** Los asfaltos se realizan en el asfalto original (virgen), tenemos los siguientes: AC 5, AC 10, AC 20, AC 30, AC40.

En la siguiente tabla se presentan las características físicas que deben cumplir estos asfaltos.

- b) **Residuo (AR):** Son asfaltos clasificados por viscosidad después de envejecido, entre los que se destacan se encuentran los siguiente: AR-1000, AR-2000, AR.-4000, AR-8000 Y AR-16000. En la siguiente tabla se presentan las características que deben cumplir los asfaltos [17].

Ensayo	Norma de ensayo ASTM	Clasificación por Viscosidad (Grados basados en asfalto original)									
		AR-1000		AR-2000		AR-4000		AR-8000		AR-16000	
		Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Viscosidad Absoluta (Poise)	D 2171	750	1250	1500	2500	3000	5000	6000	10000	12000	20000
Viscosidad Cinemática (cSt)	D 2170	140	---	200	---	275	---	400	---	550	---
Penetración (0.1 mm)	D 5	65	---	40	---	25	---	20	---	20	---
% de penetración original		---		40		45		50		52	
Ductilidad		100		100		75		75		75	
Pruebas sobre el asfalto original											
Flash Point (°C)	D 92	205	---	219	---	227	---	232	---	238	---
Solubilidad (%)	D 2042	99.0		99.0		99.0		99.0		99.0	

Tabla 9. Requisitos para clasificar el asfalto según especificación ASTM D 3381

Fuente: ASTM D 3381

2.6.3. Asfalto Modificado

Se denominan asfaltos modificados, al asfalto en el cual se ha añadido una muestra homogénea y estable en un porcentaje previamente analizado, algún aditivo que mejore o modifique sus propiedades reológicas, así también disminuya sus costos en producción o puesta en obra.

El asfalto convencional es un material susceptible a cambios de temperatura, cuando es puesto en obra sufre envejecimiento, oxidación y degradación, consecuencias del intemperismo. Para evitar lo mencionado al asfalto convencional se le añaden propiedades adicionales para mejorar su comportamiento y lograr altos desempeños al momento de estar en servicio, recibiendo cargas del tráfico, así como gradientes de temperatura elevados.

El término aditivo es general está asociado a nuevas tecnologías, en el mercado existen numerosos productos que pueden tener efectos beneficiosos si se utilizan en proporciones adecuadas y dependiendo de las condiciones de servicio del pavimento asfáltico.



Gráfico 12. Carga de Ruedas al Asfalto

Fuente: Infotaller (2015)

Según García (2009), los principales tipos de adiciones de un cemento asfáltico son las siguientes:

- **Mejoradores de adherencia:** Son agentes de superficie, que incorporados al asfalto convencional optimizan su interacción con los áridos que conforman la mezcla asfáltica.

- **Filler: Polvos calcáreos o espesantes:** Son partículas finas en las mezclas asfálticas que hacen que se conforme con el ligante asfáltico, cuya función es aglomerar los agregados gruesos de las mezclas asfálticas.
- **Asfaltitas:** Poseen un alto contenido de asfaltenos aproximadamente en un 95%, en estado sólido, utilizan muy poca energía para su mezclado. Presenta un gran desempeño a altas temperaturas, mientras que a bajas temperaturas tiende a rigidizarse.
- **Fibras:** Su objetivo es dotar a las mezclas mayor capacidad de retención, que se traduce en mayor durabilidad e impermeabilidad, protegiendo así a las capas subyacentes que brindan aporte estructural.
- **Polímeros:** Se busca contar con ligantes más viscosos a temperaturas elevadas y lograr reducir las deformaciones permanentes de las mezclas que componen las capas de rodadura, aumentando la rigidez y disminuyendo el fisuramiento a bajas temperaturas, brinda al ligante mejores características adhesivas y de mayor durabilidad.



Gráfico 13. Asfalto modificado con fibra de vidrio
Fuente: Texdelta (2017)

2.6.4. Materiales Pétreos

También conocido como roca, material granular o agregado mineral, cualquier material duro e inerte usado en forma de partículas o fragmentos, como parte de un pavimento de mezcla asfáltica en caliente. Los agregados típicos incluyen arena, grava, piedra triturada, escoria y polvo de roca.

En las estructuras de pavimento el agregado constituye entre el 90 y 95%, en peso y entre el 75 y 85%, en volumen, el comportamiento de un pavimento se ve altamente

influenciado por la selección apropiada del agregado, ya que el mismo proporciona la mayoría de las características de capacidad portante.



Gráfico 14. Agregado sintético (Triturado)

Fuente: Arena San Martín

2.6.5. Clasificación de Agregados

Las rocas se dividen en tres tipos generales: sedimentarias, ígneas y metamórficas, esta clasificación está basada en el tipo de formación de cada roca.

- **Rocas sedimentarias:** Se forman por la acumulación de sedimentos, partículas finas dispuestas en el agua, puede consistir de partículas minerales o fragmentos (areniscas y arcilla esquistosa), de residuos animales (ciertas calizas), en ocasiones de productos finales de una acción química o evaporación (sal, yeso).
- **Rocas Ígneas:** Están formadas a partir de magma que se ha enfriado y solidificado. Se distinguen dos tipos de rocas ígneas: extrusivas e intrusivas. El material que forma este tipo de rocas tiene su origen en las erupciones volcánicas cuando el magma está en la superficie terrestre. Al enfriarse el magma tiene una apariencia y estructura vidriosa. Las rocas ígneas extrusivas más comunes son la riolita, la andesita y el basalto. Las rocas ígneas intrusivas por otro lado se forman a partir del magma que queda atrapado en el interior, así también al enfriarse este tipo de roca tiene una estructura y apariencia cristalina, algunos ejemplos de este tipo de rocas son el granito, la diorita y el gabro.

- **Rocas Metamórficas:** Generalmente son rocas sedimentarias o ígneas que han sido transformadas por procesos de intensa presión y calor dentro del subsuelo o en ocasiones por reacciones químicas.

Los agregados utilizados en pavimentos asfálticos se clasifican, generalmente de acuerdo a su origen, se distinguen agregados naturales, agregados procesados y agregados sintéticos o artificiales.



Gráfico 15. Clasificación de Rocas
Fuente: Universidad Peruana Unión (2015)

- **Agregados Naturales:** Son utilizados en forma natral con muy poco o ningún procesamiento, originados por procesos naturales de erosión y degradación.

Los principales tipos de agregado natural utilizados en la construcción de pavimento son la grava y la arena. Se conoce como grava a las partículas cuyo tamaño igual o mayor que 6.35 mm (1/4”), mientras que la arena son las partículas cuyo tamaño es menor de 6.35 mm (1/4”), pero mayor de 0.075 mm (No. 200). Aquellas partículas menores que 0.075 mm (No. 200), son conocidas como relleno mineral (filler), consistentes de limo y arcilla.

- **Agregados Procesados:** Son aquellos que han pasado por procesos de trituración o tamizado antes de ser usados. Existen dos fuentes naturales de agregados procesados:

Gravas naturales, son trituradas para volverlas más apropiadas para pavimento de mezclas asfáltica y fragmento de lecho de roca.

La roca se tritura por tres razones:

- Cambiar la textura de las partículas de lisa a rugosa.
- Cambiar la forma de la partícula de redonda a angular.
- Mejorar la distribución del rango (graduación) de tamaño de las partículas.

- **Agregado Sintético:** Su existencia en la naturaleza es nula, son producto del procesamiento físico o químico de materiales, algunos son subproductos de procesos industriales de producción como refinamiento de metales o producidos mediante el procesamiento de materia prima [18].

2.6.6. Clasificación de los Agregados por su Gravedad Específica (Gs)

Su estudio es muy importante, ya que afecta directamente la densidad de la mezcla asfáltica. De acuerdo con la gravedad específica los agregados se clasifican en:

- ✓ **Ligeros $G_s < 2.5$.**- Los agregados ligeros son de origen volcánico, se utilizan para elaborar rellenos y para mampostería no estructural que pesa entre 400 y 2000 Kg/m³. Entre los cuales se puede mencionar: arcilla expansiva, arcilla esquistosa, perlita y piedra pómez.
- ✓ **Normales ($2.5 < G_s < 2.75$).** - Los agregados normales provienen de rocas superficiales, son los principales materiales que se usan para elaborar hormigón y mezclas asfálticas, cuyo peso varía de 2300 a 2500 kg/m³. Entre estos materiales se tiene: arena, grava y roca triturada.
- ✓ **Pesados $G_s > 2.75$.**- Los agregados pesados se usan para elaborar hormigón de 2900 a 3500 Kg/m³ y están constituidos de materiales de hierro como: magnetita, pirita e ilmenita. Se emplea para pantalla contra la radiación y para contrapesos de hormigón.

2.6.7. Propiedades del Agregado

El agregado conforma del 90 al 95 por ciento en peso de un pavimento densamente graduado de una mezcla asfáltica en caliente, esto hace que el agregado sea un factor crítico en el comportamiento del pavimento.

Entre los principales criterios a considerar dentro de la selección además de la calidad, se destaca el costo y la disponibilidad del agregado. Al hablar de calidad el agregado debe cumplir con características como:

- Graduación y tamaño de partícula.
- Tenacidad.
- Limpieza.
- Dureza.
- Forma de la partícula.
- Textura de la superficie.
- Capacidad de absorción.
- Afinidad con el asfalto.
- Peso específico.

2.6.7.1. Graduación y Tamaño Máximo de Partícula

Las especificaciones de pavimento asfáltico en mezcla en caliente requieren que las partículas del agregado estén dentro de un margen de tamaño y que cada tamaño de partícula esté presente en proporciones adecuadas. Es necesario entender cómo se mide el tamaño de partículas y la graduación para determinar que el agregado cumple o no con las especificaciones.

2.6.7.2. Tenacidad

También conocida como resistencia de falla por impacto de un agregado tiene relación directa con la roca de origen y con el manejo de los agregados, ya que si son débiles ante las cargas de impacto, se puede alterar su granulometría, aparte de indicar una baja calidad para ser utilizados en mezclas asfálticas.

En relación a los agregados, la resistencia a ser rayados y la resistencia al desgaste (abrasión) son las propiedades mecánicas que interesa determinar, en primera instancia en relación al equipo de explotación de agregados y en el segundo caso para los efectos de resistencia en mezclas asfálticas sobre todo cuando el agregado se use en pavimentos. Para determinar la resistencia al desgaste de los agregados se emplea el ensayo en la máquina de Los Ángeles de acuerdo con la norma ASTM C-131.

2.6.7.3. Tamaño máximo de partícula

El tamaño de las partículas más grades debe ser determinado, en las normas de mezclas asfálticas en caliente se menciona un tamaño máximo de partículas de cada agregado usado. Para determinar los tamaños máximos de partículas existen dos formas:

- *Tamaño máximo nominal de partícula*, es designado como un tamiz más grande que el primer tamiz que retiene más del 10% de las partículas de agregado, en una serie de tamices dada.
- *Tamaño máximo de partícula*, es el tamiz más grande que el tamaño máximo nominal de partícula. Conocido como el tamiz más pequeño por el cual pasa el 100% de las partículas del agregado.

2.6.7.4. Limpieza

Los agregados para emplearse deben cumplir con límites de materiales indeseables como: vegetación, arcilla, partículas blandas, etc. Una cantidad excesiva de este tipo de materiales puede afectar desfavorablemente el comportamiento del pavimento, para evitar dichas falencias en el pavimento se realizan procesos destinados a minimizar la presencia de partículas nocivas, entre las más usuales tenemos: Inspección visual, tamizado por lavado (Se compara las cantidades de material antes y después del lavado). El ensayo equivalente de arena es un método para eliminar proporciones indeseables de polvo fino y arcilla en cantidades del agregado que pase el tamiz de 4.75 mm (No. 4).

2.6.7.5. Dureza

Los agregados utilizados en la mezcla asfáltica deben ser capaces de resistir la abrasión, traducida como desgaste irreversible, también la degradación durante la producción, colocación y compactación de la mezcla, sobre todo durante la vida de servicio del pavimento. Por esta razón los agregados que se encuentren cerca de la superficie deberán ser más duros, debido a que reciben mayores esfuerzos y por ende mayor desgaste debido a las cargas de tránsito, el ensayo de desgaste de los ángeles mide la resistencia del agregado al desgaste y abrasión.

2.6.7.6. Forma de las partículas

La trabajabilidad de la mezcla de pavimentación durante su colocación es un fenómeno afectado por la forma de las partículas, así también la cantidad de fuerza necesaria para compactar la mezcla y la densidad requerida, la forma de las partículas también afecta la resistencia del pavimento durante su vida útil. Partículas irregulares y angulares resisten el movimiento en el pavimento, se entrelazan cuando se compactan. El mejor entrelazamiento se da generalmente con partículas con bordes puntiagudos y de forma cúbica (trituradas).

La forma y textura superficial de las partículas de un agregado influyen en las propiedades de las mezclas asfálticas en estado fresco más que las de las de una mezcla en estado endurecido, siendo aquellas partículas que tienen texturas ásperas, angulares o alongadas requieren más ligante para producir mezclas más trabajables que agregados lisos, redondeados y compactos. Además, las partículas angulares requieren más cemento asfáltico para mantener proporciones de trabajabilidad.

Sin embargo, con la granulometría satisfactoria, tanto los agregados triturados como los no triturados (de un mismo tipo de roca), generalmente producen mezclas asfálticas con la misma resistencia, si se mantiene el contenido de ligante.

2.6.7.7. Textura superficial

Es un factor que determina a más de la trabajabilidad y resistencia final de la mezcla de pavimentación las características de resistencia al deslizamiento en la superficie del pavimento. Una textura áspera, aumenta la resistencia del pavimento debido a que evita que las partículas se muevan unas con respecto a otras, proporcionando un coeficiente de fricción alto, favoreciendo al tránsito más seguro.

La adherencia entre la pasta de cemento y un determinado agregado generalmente aumenta con el cambio de partículas lisas y redondeadas por las ásperas y angulares. La cantidad de vacíos de los agregados fino y grueso compactados se puede usar como un índice de las diferencias en la forma y la textura de los agregados con la misma granulometría, así la demanda de ligante normalmente aumenta con el aumento de la cantidad de vacíos. Los vacíos entre las partículas de agregados aumentan con la angularidad del agregado. La redondez está en función de la resistencia a la compresión y la abrasión de la roca original, del tipo de trituradora que se usa y de la relación de la reducción (relación entre el tamaño del material que entra y el tamaño del producto terminado).

2.6.7.8. Capacidad de absorción

La cantidad de líquido que absorbe un agregado cuando se sumerge en un determinado líquido determina su porosidad, esta es la característica de todos los agregados unos más que otros. Si un agregado es altamente absorbente, éste continuará absorbiendo asfalto después del mezclado inicial en planta, dejando menos asfalto en su superficie para ligar las demás partículas de agregado, incrementando así la cantidad de asfalto que las que requiere un agregado menos poroso. La escoria de alto horno y ciertos agregados sintéticos son considerados agregados no porosos.



Gráfico 16. Estados de absorción Agregados

Fuente: <http://es.scribd.com/doc/63890994/Propiedades-Fisicas-de-los-Agregados>

- **Seco al Horno:** Partículas que no contiene nada de humedad, secadas al horno a 110 ± 5 °C durante 24 ± 4 horas.
- **Seco al Aire:** Partículas con un cierto grado de humedad, secadas con la temperatura del ambiente.
- **Saturado con Superficie Seca (SSS):** Partículas con los poros permeables llenos de agua, pero con superficie exterior seca.
- **Sobresaturado:** Partículas con los poros permeables llenos de agua y además con humedad adherida a la superficie.

2.6.7.9. Afinidad con el Asfalto:

Es la tendencia del asfalto a aceptar y retener una capa de asfalto. Las dolomitas (sedimentarias calcáreas) tienen alta afinidad con el asfalto y son conocidas como hidrofóbicas (repelen el agua). Por otro lado, los agregados hidrofílicos (atraen el agua), es decir tienen poca afinidad con el asfalto, un ejemplo de ello son los agregados silíceos, deben ser usados con precaución. Existen ensayos para determinar esta afinidad entre los que se destacan tenemos: El ensayo agregado-asfalto, la mezcla sin compactar es sumergida en agua, las partículas cubiertas son observadas visualmente. El ensayo de inmersión-compresión, se preparan dos muestras y una de ellas se sumerge en el agua, posteriormente se ensayan la diferencia en resistencia es considerada un indicativo de la susceptibilidad del agregado al desprendimiento [19].

2.7. Caracterización de Agregados

2.7.1. Muestreo de Agregados (ASTM D-75)

Los agregados naturales se clasifican en finos y gruesos, los finos o arenas pasan por el tamiz N° 4 y el agregado grueso se retiene en el tamiz N° 4 y se conocen como gravas.

El proceso de trituración se lleva a cabo para obtener agregados de diferentes tamaños, los mismos que presentan mejores propiedades de adherencia de acuerdo a la forma del agregado triturado, para realizar el muestreo del agregado primero se debe realizar una inspección general de la fuente material o del lugar a muestrear el agregado, para la presente investigación se escogió la cantera Alvarado, cuya ubicación se detalla a continuación:



Gráfico 17. Ubicación Cantera Alvarado

Fuente: Google Earth

Zona	Este	Norte
17 M	769177.46	9863054.08

Tabla 10. Coordenadas UTM Cantera Alvarado

Fuente: Google Earth

Para el muestreo se seleccionan los materiales directamente de las pilas de almacenamiento de agregados, las muestras deben ser tomadas en un lugar apropiado de manera que representen un buen muestreo, en el caso de muestreo en pilas se debe tomar la muestra en tres partes, la primera de la parte superior, la segunda en el punto medio y la última en el fondo de la pila.

Previo al muestreo se debe conocer el tamaño máximo nominal en las pilas de almacenamiento, debido a que en la mezcla asfáltica se utilizan dos tamaños de

agregado: Para un tamaño de 3/4" (19 mm) la masa de muestra mínimo es de 25 kg, para la presente investigación se muestrearon aproximadamente 50 kg, de igual manera para el agregado de 3/8", en la norma ASTM D 75 especifica que para un tamaño de agregado de 3/8" o menor, la masa mínima es de 10 kg, para fines de ensayo y elaboración de briquetas, se muestrea una masa de 70 kg aproximadamente, debido a que el agregado fino entra en mayor proporción, cabe indicar que el número de muestras de campo deben ser suficientes para dar la confianza deseada en los resultados del ensayo.

Tamaño máximo nominal del agregado		Masa mínima aproximada de muestra de campo	
		(kg)	(lb)
Agregado fino			
2.36 mm	N° 8	10	22
4.75 mm	N° 4	10	22
Agregado grueso			
9.5 mm	3/8"	10	22
12.5 mm	1/2"	15	33
19.0 mm	3/4"	25	55
25.0 mm	1"	50	110
37.5 mm	1 1/2"	75	165
50.0 mm	2"	100	220
63.0 mm	2 1/2"	125	275
75.0 mm	3"	150	330
90.0 mm	3 1/2"	175	385

Tabla 11. Graduación de Agregados

Fuente: ASTM D 75

2.7.2. Importancia y aplicación

El muestreo es importante como el ensayo, y el técnico que los realiza debe tomar las precauciones necesarias para obtener muestras que reflejen la naturaleza y condiciones de los materiales que representan.

Si la especificación o la descripción no indican el tamaño máximo nominal (un tamaño de tamiz pasando de 90-100%), use el tamaño máximo nominal que indique un tamaño de tamiz pasando el 100 %. Para combinaciones de agregado grueso y fino (agregados a utilizar en base o sub-base), la masa mínima para el agregado grueso más 10 kg (22 lb) [20].

2.7.3. Análisis Granulométrico de los Agregados (Norma ASTM D 3515 y Especificación MTOP)

La granulometría de los agregados pétreos determina la distribución de las partículas que quedan distribuidas en los tamices de cada uno de los agregados que se utilizan en una mezcla asfáltica, el ensayo se realiza por vía seca.

La granulometría del agregado influye en el comportamiento de la mezcla asfáltica. Los resultados obtenidos son conjugados con los porcentajes en peso retenido en cada uno de los tamices utilizados en relación según la norma según el tamaño máximo nominal del agregado pétreo.

Graduaciones propuestas para mezclas cerradas (ASTM D 3515)										
Abertura de malla		Mezclas cerradas								
		Tamaño máximo nominal del agregado								
in	mm	2 in	1 ½ in	1 in	¾ in	½ in	3/8 in	N°4	N°8	N°16
		(50 mm)	(37.5 mm)	(25 mm)	(19 mm)	(12.5 mm)	(9.5 mm)	(4.75 mm)	2.36 mm)	(1.18 mm)
Graduaciones para mezclas de agregados (grueso, fino y filler)										
2 1/2	63	100								
2	50	90-100	100							

1 1/2	37.5		90-100	100						
1	25	60-80		90-100	100					
3/4	19		56-80		90-100	100				
1/2	12.5	35-65		56-80		90-100	100			
3/8	9.5				56-80		90-100	100		
N°4	4.75	17-47	23-53	29-59	35-65	44-74	55-85	80-100		100
N°8	2.36	10-36	15-41	19-45	23-49	28-58	32-67	65-100		95-100
N°16	1.16							40-60		65-100
N°30	600 um							35-65		70-95
N°50	300 um	3-15	4-16	5-17	5-19	5-21	7-23	7-40		45-75
N°100	150 um							3-20		20-40
N°200	75 um	0-5	0-6	1-7	2-8	2-10	2-10	2-10		9-20
Asfalto, Porcentaje con respecto al peso total de la mezcla										
		2-7	3-8	3-9	4-10	4-11	5-12	6-12	7-12	8-12

Tabla 12. Graduaciones propuestas para mezclas cerradas

Fuente: NEVI-12

Para realizar la granulometría del agregado fino, el tamaño de la muestra de prueba, después del secado, será de 500 gramos mínimos, mientras que para el agregado grueso el tamaño de la muestra de la prueba se conformará de acuerdo a la siguiente tabla:

Tamaño máximo nominal, Aberturas cuadradas, mm (in)	Prueba de muestra en tamaños mínimos, kg (lb)
9.5 (3/8)	1 (2)
12.5 (1/2)	2 (4)
19.0 (3/4)	5 (11)
25.0 (1)	10 (22)
37.5 (1 1/2)	15 (33)

50 (2)	20 (44)
63 (2 1/2)	35 (77)
75 (3)	60 (130)
90 (3 1/2)	100 (220)
100 (4)	150 (330)
125 (5)	300 (660)

Tabla 13. Tamaño máximo nominal de Agregado

Fuente: Reyes (2014)

El análisis granulométrico se realizó a cada uno de los materiales por separado, para conocer la distribución de los porcentajes de agregados, posteriormente se calculó los porcentajes óptimos de cada agregado pétreo para cumplir con la faja granulométrica requerida, considerando el tamaño máximo nominal del agregado y la función que vaya a desempeñar.

Procedimiento:

- Secar la muestra a masa constante en una temperatura de 110 ± 5 °C (230 ± 9 °F).
- Seleccionar los tamices con aberturas convenientes para suministrar la información requerida por las especificaciones que cubran el material ara la prueba.
- Limitar la cantidad de material en un tamiz dado de modo que las partículas tengan la oportunidad de alcanzar las aberturas del tamiz en un número de tiempo durante la operación de tamizado.
- Continuar el tamizado durante un periodo suficiente.
- Determinar la masa de cada incremento del tamaño en una escala o de la balanza al 0.1% más cercano de la masa seca original total de la muestra.

Cálculo

- Calcular los porcentajes que pasan, porcentajes retenidos, los porcentajes en diverso tamaño de fracciones al más cercano de 0.1% en base de la masa total de la muestra seca inicial.
- Calcular el módulo de finura, añadiendo cerca los porcentajes totales del material en la muestra que es más gruesa que cada uno de los tamices (porcentajes acumulativos retenidos), y la división de la suma por 100: 150 μm (N° 100), 300 μm (N° 50), 600 μm (N° 30), 1.18 mm (N° 16), 2.36 mm (N° 8), 4.75 mm (N° 4), 9.5 mm (3/8 in), 19.0 mm (3/4 in), 37.5 mm (1 1/2 in) y más grandes, aumentando el coeficiente de 2 a 1.

2.7.4. Abrasión del Agregado grueso (ASTM C-131)

El ensayo permite determinar el porcentaje de desgaste del agregado pétreo (grueso) cuando es sometido a fuerzas abrasivas, por medio de un tambor rotatorio conocido como (máquina de los ángeles) y esferas de acero. Este método de prueba cubre el procedimiento para probar tamaños de agregado grueso menores de 37.5 mm (1 1/2 in) para resistencia a la degradación usando la máquina de prueba de Los Ángeles.

El método ha sido ampliamente usado como un indicador de la calidad relativa o competencia de varias fuentes de agregados teniendo composiciones minerales similares. Los resultados no permiten automáticamente comparaciones válidas a ser hechas entre fuentes distintamente diferentes en origen, composición, o estructura. Asignar especificaciones límite con cuidado extremo en consideración de los tipos disponibles de agregados y su historial de desempeño en usos específicos.

En la tabla se muestra el número de revoluciones, cantidad de esferas de acero y peso del material a usar de acuerdo con lo establecido por la norma ASTM C-131.

DIÁMETRO				MÉTODO			
Pasa el Tamiz		Retenido en Tamiz		A	B	C	D
N°	“mm”	N°	“mm”	Cantidad de Material a Emplear			
1 ½	37.50	1	25.00	1250 ± 25			
1	25.00	¾	19.00	1250 ± 25			
¾	19.00	½	12.50	1250 ± 10	2500 ± 10		
½	12.50	3/8	9.50	1250 ± 10	2500 ± 10		
3/8	9.50	¼	6.25			2500 ± 10	
¼	6.25	N° 4	4.76			2500 ± 10	
N° 4	4.76	N° 8	2.38				5000 ± 10
Peso Total				5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10
Número de Esferas				12	11	8	6
Número de Revoluciones				500	500	500	500
Tiempo de Rotación “min”				15	15	15	15

Tabla 14. Requisitos ensayo de abrasión

Fuente: ASTM C-131

Posterior al ensayo, el agregado es cribado por el tamiz N° 12 para medir el porcentaje de desgaste del agregado pétreo, de acuerdo con la graduación obtenida. El porcentaje de desgaste se calcula con la siguiente expresión:

$$\%Desg. = \frac{W_{inicial} - W_{Final}}{W_{inicial}} * 100$$

Donde:

$W_{inicial}$ = Peso antes del ensayo.

W_{Final} = Peso después del ensayo.

$\%Desg.$ = Porcentaje de desgaste.

Equipo:

- Balanza de precisión ± 0.1 gr.
- Horno.
- Tamices (3/4", 1/2", 3/8" y N°12).
- Máquina de los Ángeles.
- Esferas de acero de diámetro de 46.38 mm y peso 390 gr.
- Agregado grueso

La máquina de Los Ángeles, conformada en todas las características esenciales, tendrá que ser usada, consistirá en un cilindro hueco, con un espesor de pares no menor de 12.4 mm cerrado en ambos extremos, teniendo un diámetro interior de 711 ± 5 mm (20 ± 2 in). El cilindro tendrá que ser montado en un eje de talón sujetando en los extremos al cilindro, pero no entrando en él. El giro que deberá describir será en posición horizontal. Una abertura en el cilindro tendrá que ser proporcionada para la introducción de la muestra de prueba, una adaptable cubierta contra el polvo proporcionada para las aberturas por medio de atornillar la placa en el lugar.

Una plataforma de acero removible extendiendo la longitud completa del cilindro y proyectando hacia adentro 89 ± 2 mm (3.5 ± 0.1 in) tendrá que ser montada en la superficie cilíndrica interior del cilindro, en tal forma que un plano centrado entre las caras mayores coincida con un plano axial, la plataforma tendrá que ser de tal espesor y así montada, por tornillos u otros medios adaptables, que sean firmes y rígidos. La posición de la plataforma tendrá que ser tal que la muestra y las esferas de acero no tendrán que impactar en o cerca a la abertura y su cubierta, y esa distancia desde la plataforma a la abertura, medida a lo largo de la circunferencia exterior del cilindro en la dirección de rotación, no tendrá que ser menor de 1270 mm (50 in).

La máquina tendrá que ser conducida y contrarrestada a fin de mantener una velocidad periférica sustancialmente uniforme. Si un ángulo es usado como la plataforma, la dirección de rotación tendrá que ser tal que la carga es atrapada en la superficie exterior del Ángulo.

Procedimiento:

- Lavar el agregado grueso y secarlo en el horno a una temperatura de 110 °C, separada por fracciones de cada tamaño y recombinadas con una de las granulometrías indicadas en la Tabla número catorce. El tipo de abrasión que se realizará será de tipo uno. La aproximación de registro será de 1 gramo.
- La muestra y la carga abrasiva correspondiente se colocan en la máquina de los ángeles y se hace girar el cilindro, el número total de vueltas será de 500.
- Descargar el material del cilindro, separar preliminarmente la muestra ensayada, en un tamiz más grueso que el N° 12. La fracción fina que pasa se tamiza a continuación empleando el tamiz N° 12. El material retenido en el tamiz N° 12 se lava y se seca en el horno, a temperatura comprendida entre 105 a 110 °C, y luego se pesa.
- Si el agregado es esencialmente libre de cubiertas adherentes y polvo, el requerimiento para lavado después de la prueba es opcional. Sin embargo, en el caso de pruebas de referencia, el procedimiento de lavado tendrá que ser desempeñado [21].

2.7.5. Equivalente de Arena (Norma ASTM D 2419)

El ensayo nos permite determinar aquellos agregados que pasen el tamiz 4.75 milímetros (N°4) correspondiente a partículas finas generalmente asociadas a limos o arcillas.

Equipos:

- Tamiz N°4.
- Embudo de boca ancha.
- Bandeja ancha para mezclado.
- Cronómetro.
- Cilindro de plástico transparente graduado, capacidad de 1000 ml y tapón plástico.
- Recipiente pequeño cilíndrico de estaño de 85 ± 5 ml de capacidad.
- 1 galón de capacidad, para almacenar las soluciones de Cloruro de Calcio (CaCl_2), con conductores en forma de sifón.

Reactivos y Materiales:

- Solución de Cloruro de Calcio.
- Agua destilada o desmineralizada.

Procedimiento:

- Obtener 1500 gramos del material que pase la malla N°4.
- Eliminar grumos con el fin de evitar la degradación significativa del material.
- Secar el material en el horno a 110 ± 5 °C.
- Cuando se tenga preparada la muestra de suelo, se coloca dentro de la probeta, hasta la marca 4 pulgadas.
- Introducir la manguera para colocar la solución de Cloruro de Calcio.
- Agitar el vaivén, 180 repeticiones (90 ciclos), en un tiempo aproximado de 30 segundos, para hacer que las partículas del suelo se dispersen por toda la solución.
- Completar con la solución hasta la altura de 15 pulgadas, dejar asentar la mezcla durante 20 minutos, con el fin de tomar la lectura de arcilla, registrando como lectura inicial.
- Colocar el contrapeso para dividir la arena de la arcilla, registrada como lectura final.
- El cálculo del equivalente de arena se utiliza la siguiente expresión:

$$\% \textit{Equivalente Arena} = \frac{\textit{Lectura de Arena}}{\textit{Lectura de Arcilla}} * 100$$

2.7.6. Gravedad específica y absorción de agregado grueso (ASTM D-127)

El agregado grueso consistirá en grava, grava triturada, roca triturada, escoria de hornos de explosión, concreto de cemento hidráulico triturado o una combinación de lo anterior, de acuerdo con los requerimientos que establece la norma ASTM C-33.

- **Graduación:** En los agregados gruesos, el tamaño del agregado se encuentra en función de las necesidades específicas para el diseño del concreto.

- **Sustancias perjudiciales:** Los agregados gruesos para la fabricación de concreto asfáltico deben estar libres de cantidades excesivas de sustancias como arcilla, carbón y lignito, cenizas y material fino. Los límites permisibles están en función del uso que se darán a los agregados. El agregado grueso para uso en asfalto estará expuesto con frecuencia al agua, debe estar libre de material que reaccione peligrosamente, en ocasiones pueden conllevar efectos adversos de desprendimiento.

El ensayo tiene como finalidad determinar los pesos específicos aparente y nominal, así como la absorción, después de 24 ± 4 horas de sumergidos en agua (SSS), de los agregados con tamaño igual o mayor a 4.75 mm (tamiz N°4). Las densidad SSS, densidad relativa SSS, y absorción son determinadas después de saturar el agregado en agua para una duración prescrita.

Subsecuentemente, el volumen de la muestra es determinado por el método de desplazamiento de agua. Finalmente la muestra es secada al horno y determinada la masa. Usando entonces los valores de masa obtenidos y las fórmulas en este método de ensayo, es posible calcular la densidad, densidad relativa (gravedad específica), y absorción.

La densidad relativa (gravedad específica) es la característica generalmente usada para el cálculo del volumen ocupado por el agregado en varias mezclas conteniendo agregados, los valores de absorción son usados para calcular el cambio en la masa de un agregado debido al agua absorbida en los espacios de poro con las partículas constituyentes, comparado con la condición seca, cuando es considerado que el agregado ha estado en contacto con el agua por un periodo suficiente para poder satisfacer la absorción potencial.

Muestreo:

Para el ensayo se debe muestrear el agregado de acuerdo con la Práctica ASTM D 7, se mezcla completamente la muestra de agregado y se procede a reducirlo a la cantidad aproximada necesaria usando los procedimientos aplicables de la Práctica ASTM C 702. Rechazar el material que pasa la malla de 4.75 mm (N° 4) por tamizado seco y

lavado completamente para remover el polvo y otros recubrimientos de la superficie. Alternativamente, separe el material más fino que la malla 4.75 mm y ensaye el material fino de acuerdo con el método ASTM C 128.

La masa mínima de la muestra de ensayo a ser usada está dada en la siguiente tabla. Es permitido ensayar el agregado grueso en algunas fracciones de tamaño. Si la muestra contiene más del 15% retenido en la malla de 37.5 mm (1 1/2 pulg), ensaye el material más grande que 37.5 mm en una o más fracciones de tamaño separadamente del menor tamaño de fracción.

Tamaño Máximo Nominal mm (pulg.)	Masa Mínima de la Muestra de Prueba, Kg (lb)
12.5 (1/2) o menos	2 (4.4)
19.0 (3/4)	3 (6.6)
25.0 (1)	4 (8.8)
37.5 (1 1/2)	5 (11)
50 (2)	8 (18)
63 (2 1/2)	12 (26)
75 (3)	18 (40)
90 (3 1/2)	25 (55)
100 (4)	40 (88)
125 (5)	75 (165)

Tabla 15. Requisito de Masa mínima de la Muestra para Ensayo de gravedad específica
Fuente: ASTM D 127

Equipo:

- Balanza con precisión ± 0.01 gramos.
- Tamiz N°4.
- Canastilla metálica.

- Agregado grueso.

Procedimiento:

- Cuartear y eliminar el material inferior al tamiz N°4, al tener un tamaño nominal de ¾ de pulgada, se considera una muestra de 3 kg.
- Lavar la muestra, se procede a secar en un horno a 110 ± 5 °C y se enfría a temperatura ambiente durante 1 a 3 horas, una vez fría, se sumerge en el agua, también a temperatura ambiente, durante 24 ± 4 horas.
- Sacar la muestra del agua y secar las partículas utilizando una franela absorbente de gran tamaño enrollar hasta que toda la película visible de agua sea removida, para determinar el peso de la muestra en el estado saturada con superficie seca (S.S.S), tenga cuidado para evitar la evaporación del agua de los poros del agregado durante la operación de secado superficial, determinar la masa de la muestra de ensayo en la condición saturado superficie seca, registrar esta y las subsecuentes masas (masas aire).
- Colocar la muestra en el interior de la canastilla metálica, se registra su peso sumergido en el agua a 23 ± 2.0 °C, tenga cuidado de eliminar todo el aire atrapado antes de pesar, agitando el recipiente mientras es sumergido para ello se toma la temperatura del ensayo y luego se corrige en los cálculos.
- Se seca la muestra a una temperatura constante de 110 ± 5 °C, enfriar al aire a la temperatura del cuarto durante 1 a 3 horas, o hasta que el agregado haya enfriado a una temperatura que es confortable de manejar (aproximadamente 50 °C) y se determina su peso seco hasta su peso constante.

Fórmulas para calcular las Gravedades Específicas y Absorción:

- ✓ Gravedad Específica Seca Bulk.

$$G_{sb} = \frac{A}{B - C}$$

- ✓ Gravedad Específica Saturada Superficialmente Seca Bulk.

$$G_{ssb} = \frac{B}{B - C}$$

- ✓ Gravedad Específica Seca Aparente.

$$G_{sa} = \frac{A}{A - C}$$

- ✓ Porcentaje de Absorción.

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

Donde:

A= Peso en el Aire del Agregado Secado al Horno.

B= Peso en el Aire del Agregado Saturado Superficialmente Seco.

C= Peso del Agregado Saturado Superficialmente Seco Sumergido [22].

2.7.7. Gravedad específica y Absorción del Agregado Fino (ASTM D 128)

El ensayo tiene como finalidad determinar las Gravedades Específicas Seca Bulk, Saturada Superficialmente Seca Bulk y Seca Aparente (sin incluir el volumen de vacíos entre partículas), así también el porcentaje de Absorción del agregado. El ensayo se realiza con el material que pasa el tamiz N°4.

La densidad relativa (gravedad específica) es la característica generalmente usada para cálculos del volumen ocupado por el agregado en varias mezclas, o aquellas que son proporcionadas o analizadas en una base de volumen absoluto.

Muestreo:

Se muestrea el agregado de acuerdo a la práctica ASTM D 75, se mezcla a fondo la muestra y se reduce hasta obtener un espécimen de prueba aproximadamente 1 kg usando el procedimiento aplicable descrito en la práctica ASTM C 702.

Equipo:

- Balanza con precisión de 0.01 gramos.
- Tamiz N°4.

- Picnómetro.
- Agregado fino.

Procedimiento:

- Seleccionar por cuarteo una cantidad aproximadamente 1000 gramos, la cual es previamente secada en el horno a 100 ± 5 °C, una vez fría se pesa, posteriormente se cubre la muestra completamente con agua durante 24 horas.
- Retirar cuidadosamente el agregado del agua, con el propósito de evitar pérdida de finos, se procede a extender la mezcla sobre una bandeja, se coloca al sol para que se evapore el agua y lograr la superficie saturada seca.
- Prueba de Humedad Superficial- Comprobar la condición obtenida en el paso anterior, se hace uso de un molde cónico metálico, se coloca la porción de agregado fino suelto parcialmente secado en el molde llenándolo hasta desbordar y amontonar el material adicional en lo alto del molde sosteniéndolo con la copa de los dedos de la mano sosteniendo el molde, compactar ligeramente 25 veces con el pisón de metal haciéndolo caer desde una altura de 5 milímetros sobre la superficie superior del agregado fino, remueva la arena suelta desde la base y levante el molde verticalmente. Si la humedad superficial todavía está presente, el agregado fino retendrá la forma del molde. Un ligero revenimiento del agregado fino moldeado indica que ha alcanzado una condición superficialmente seca.
- Llenar parcialmente el picnómetro con agua, procedemos a introducir 500 ± 10 gramos de agregado fino superficialmente seco, añadir agua adicional hasta aproximadamente un 90 por ciento de su capacidad, se debe eliminar el aire atrapado del picnómetro agitando el picnómetro manualmente o mecánicamente.
- Manualmente rota, invierte y agita el picnómetro para eliminar las burbujas de aire.
- Después de eliminar las burbujas de aire, ajustar la temperatura del picnómetro y su contenido a 23.0 ± 2.0 °C si es necesario por inmersión

parcial en agua circulando, y lleva el nivel de agua en el picnómetro a su capacidad calibrada. Determinar la masa total del picnómetro, espécimen y agua.

- Remover el agregado fino del picnómetro, secar a una masa constante a una temperatura de 110 ± 5 °C, enfría en aire a la temperatura de $1 \pm 1/2$ h, y determinar la masa.
- Determinar la masa del picnómetro lleno a su capacidad calibrada con agua a 23.0 ± 2.0 °C.
- Procedimiento Volumétrico (Matraz de le Chatelier): Se llena el matraz inicialmente con agua a un punto en el cuello entre la marca de 0 y 1 mL, registrar la lectura inicial con matraz y contenido de agua dentro del rango de temperatura de 23.0 ± 2.0 °C. Añadir 55 ± 5 gramos de agregado fino en la condición saturada superficialmente seca.
- Después que todo el agregado fino ha sido introducido, colocar el tapón en el matraz y girar el matraz en una posición inclinada, o suavemente arremolínalo en un círculo horizontal a fin de desalojar todo el aire atrapado, continuar hasta que no suban más burbujas a la superficie. Tomar la lectura final con el matraz y contenido dentro de 1°C de la temperatura original.
- Para determinar la absorción, utilizar una proporción separada de 500 ± 10 gramos de agregado fino saturado superficialmente seco, secar hasta una masa constante, y determinar la masa seca.

- ✓ Gravedad Específica Seca Bulk.

$$G_{sb} = \frac{A}{B + D - C}$$

- ✓ Gravedad Específica Saturada Superficialmente Seca Bulk.

$$G_{sssb} = \frac{D}{B + D - C}$$

- ✓ Gravedad Específica Seca Aparente.

$$G_{sa} = \frac{A}{B + A - C}$$

✓ Porcentaje de Absorción.

$$\%Abs = \frac{D - A}{A} * 100$$

Donde:

A= Peso en Aire del Agregado Secado al Horno.

B= Peso del Picnómetro lleno de Agua.

C= Peso del Picnómetro Calibrado con el Agregado y Agua hasta la marca.

D= Peso del Material en Estado Saturado Superficialmente seco [23].

2.7.8. Límites de consistencia (ASTM D-427)

El ensayo define la consistencia de suelos y agregados finos pasante del tamiz de 0.425 y 0.075 milímetros (N°40 y N°200 exigidos por la NEVI-12), con cambios de humedad. Cubre la determinación de límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad.

Procedimiento:

Secar la muestra al aire y se procede a cuartearla, del cual se obtiene una porción de material de ± 500 gramos del material que pasa por la malla N°40.

- **Límite líquido:**

La muestra previamente elaborada se coloca dentro de la copa de Casagrande y se golpea a una razón de 2 golpes/segundo. Previo al inicio del ensayo se debe dividir la muestra en dos partes, utilizando el ranurador, se debe registrar el número de golpes (N) para el cual la ranura de la muestra se cierra una longitud aproximada de 3 mm (1/2”) en su base.

- **Límite Plástico:**

El ensayo consiste en usar 250 gramos de la muestra con determinada humedad, sobre una superficie de vidrio se trata de formar un cilindro con el suelo de 1/8” de diámetro. Se procede a cortar en dos partes el cilindro formado, para determinar el porcentaje de agua. Se pesan las muestras y se obtiene el límite plástico.

2.7.9. Aceites de motor

El aceite de motor es toda sustancia capaz de reducir el rozamiento, la fricción, el desgaste y facilitar el movimiento entre dos piezas en movimiento trabajando a altas temperaturas y presiones, ya sea de origen mineral o sintético. Entre las principales funciones está mantener limpias las piezas del motor, formar una película continua y resistente y permitir la evacuación de calor.

En su mayoría los aceites lubricantes están compuestos por compuestos por un 75% de base lubricantes que provienen de la refinación del crudo de petróleo y 25% de aditivos que le dan las propiedades a cada tipo de lubricante. Éstos pueden clasificarse en mineral o sintético. En el Ecuador la mayoría de los aceites lubricantes son importados, mientras que las empresas internacionales realizan las importaciones de dos maneras: como primera opción importan el aceite base mineral, luego es llevado a plantas en donde agregan aditivos y se envasa, listo para ser comercializado.

La segunda forma de importación es como producto final listo para ser comercializado. En Ecuador los aditivos también son importados porque no existe una empresa que los manufacture.

2.7.9.1. Aceites Minerales

Proceden de la destilación del petróleo, debida a su composición 100% natural posee varios componentes de los cuales se pueden obtener distintas clases de productos, los aceites base de tipo mineral están constituidos por tres tipos de compuestos: parafínicos, nafténicos y aromáticos que aportan propiedades que no tienen las parafinas como el buen comportamiento a bajas temperaturas y el

poder disolvente, entre otros lo hace ideal para la elaboración de aceites lubricantes.

TIPO DE SUSTANCIA	HIDROCARBUROS	POCENTAJE EN PESO
Parafina	Alcanos	45-76%
Naftenos	Ciclo alcanos	13-45%
Aromáticos	Aromáticos	10-30%

Tabla 16. Composición química del asfalto

Fuente: Solpetroleo.com

2.7.9.2. Aceite Sintético

No provienen directamente del crudo de petróleo, para su elaboración requieren derivados del petróleo que pasan por diferentes procesos. Su elaboración es más compleja, pero presentan mejores ventajas comparados con el aceite mineral. Como la temperatura de operación a la que pueden trabajar, además de la resistencia a la oxidación.

- De acuerdo con la organización TERPEL, los aceites sintéticos tienen los siguientes beneficios:
- Superior control de depósitos y lodos asegurando una mayor limpieza,
- Resistencia a la viscosidad elevada contra esfuerzos de corte generados en el motor,
- Menor volatilidad disminuyendo el consumo de aceite,
- Protege al motor contra la corrosión y herrumbre,
- Menores drenajes de aceite, menos impactos nocivos al ambiente [24].

2.8. Propiedades de aceite de motor degradado

Los diferentes tipos de contaminación afectan al aceite de maneras distintas, algunas son propias del uso del uso del aceite:

2.8.1. Oxidación del aceite

Ocurre cuando la reserva alcalina en el aceite comienza a agotarse, elementos como el azufre entran en contacto con el oxígeno del ambiente y comienzan a oxidarse, formando óxidos de azufre que luego en presencia de agua forman ácidos, que en la mayoría de las ocasiones es causante del deterioro del motor.

Cuando la temperatura de operación del aceite supera los 50 °C, aumenta el proceso de oxidación del aceite, estudios han demostrado que por cada 10°C encima de los 50°C la tasa de oxidación se duplica.

2.8.2. Contaminantes Químicos

La combustión generada dentro del motor transforma la energía química en mecánica, por ello es inevitable la formación de compuestos químicos, formados a partir de elementos propios del aceite, principalmente la carbonilla producida por los tiempos de combustión del motor.

CONTAMINANTES QUÍMICOS	FUENTES
Óxido nítrico (NO) Dióxido de nitrógeno (NO ₂)	Combustión del nitrógeno atmosférico
Dióxido de Azufre (SO ₂) Trióxido de Azufre (SO ₃)	Azufre de la combustión del combustible
Olefinas R ₂ C=CR ₂ Diolefinas R ₂ C=CH-CH=CR ₂ Aromáticos R-Aromático Hidrocarburos R ₃ C-CR ₃	Productos de la Combustión incompleta
Formaldeídos H-CHO Superior aldeídos R-CHO Acetona R-CO-P Ácido R-COOH	Combustión parcial

Tabla 17. Composición química del aceite de motor usado

Fuente: Caracterización físico-química de aceites de usados de motor para reciclaje

El cobre, precedente del desgaste de rodamientos, tuberías y refrigerantes; compuestos ferrosos formados por la reacción del agua y de algunos compuestos

oxidados del aceite; materias extrañas suspendidas en el aceite y otros son catalizadores muy activos del proceso de oxidación.

2.8.3. Degradación del aceite lubricante mineral

Los lubricantes minerales, semi-sintética y sintéticos tienen su vida útil, es decir después de un periodo de tiempo adicionado a su utilización pierden sus propiedades de lubricación. La degradación de aceite de motor empieza desde que el mismo tiene contacto con el aire, es decir se oxida.

Este fenómeno químico se lo puede observar especialmente en tanques de 55 galones en donde se almacena el aceite, el mismo al contacto con el aire empieza a tomar un color oscuro, pero aún no ha perdido sus propiedades lubricantes. Sin embargo, manifiesta cambios leves en su composición.

Cuando se realiza el cambio de aceite del motor, a pesar de la aireación que existe entre el depósito de llenado y el orificio de desfogue del cárter, existen partículas residuales de aceite de motor usado, no dañará el aceite nuevo, pero significa un grado más de deterioro del aceite.

Se debe tomar en cuenta que, debido a la fricción entre partes metálicas del motor, existen partículas residuales como cobre, hierro y plomo, los aditivos presentes en el lubricante sufrirán una mayor degradación aumentando la velocidad de oxidación del aceite.

En condiciones ideales de funcionamiento no habría necesidad de cambiar el aceite lubricante, ya que el mismo no se gasta, se contamina y los aditivos son los que soportan las condiciones críticas de funcionamiento, en nuestro país un factor crítico es la calidad del combustible, debido a procesos de refinación no avanzados, causando mayor producción de ollín, contaminante del aceite. Diversos factores como la temperatura y el estado son los factores más influyentes para el deterioro del aceite.

2.8.4. Temperatura de operación

En su mayoría los lubricantes son hidrocarburos derivados del petróleo, los cuales se descomponen cuando son sometidos a altas temperaturas, ocasionando su oxidación y polimerización.

Un aceite descompuesto puede presentar productos solubles o insolubles, los productos solubles por lo general, son ácidos que forman emulsiones estables en presencia de agua y atacan químicamente las superficies metálicas, principalmente cuando son de plomo o cobre-plomo.

La oxidación y polimerización depende principalmente del tipo de base lubricante de que esté compuesto el aceite en mayor grado del refinamiento que posea, esta situación se puede minimizar con el uso de aditivos antioxidantes. A temperatura ambiente el aceite no puede presentar un índice apreciable de deterioro, así también a temperaturas menores de 50°C la velocidad de oxidación es bastante baja, por lo cual no es un factor determinante en la vida del aceite, mientras menores sean las temperaturas de operación del aceite, menores serán las posibilidades de deterioro [25].

Los aceites lubricantes usados, poseen compuestos saturados que no se pueden biodegradar y su persistencia puede durar hasta 20 años. Se ha estudiado que 1 litro de aceite lubricante usado puede contaminar hasta 1'000.000 de litros de agua y puede expandirse hasta cubrir una superficie de 400 metros cuadrados en el agua. Los metales pesados se disuelven fácilmente con el agua, cuando entran en contacto con el suelo contaminan aguas subterráneas.

2.8.4.1. Composición del aceite usado

Los aceites lubricantes están compuestos de dos partes, una parte de aceite mineral o sintética y otra parte de aditivos. Los aditivos son añadidos a las bases en relación al peso que se va a producir, da entre el 5 y 20%.

La organización CEMPRE (2013) argumenta que el aceite lubricante usado se genera por las siguientes causas mientras se encuentra en uso:

- Partículas metálicas ocasionadas por el desgaste de las piezas en movimiento y fricción.
- Compuestos de plomo procedentes de las naftas.
- Ácido orgánico o inorgánicos originados por oxidación o de azufre de los combustibles.
- Compuestos de azufre.
- Restos de aditivos: fenoles, compuestos de zinc, cloro y fósforo:
- Compuestos colorados: disolventes, PCB's y PCT's;
- Hidrocarburos poli nucleares aromáticos (PNA);
- Pesticidas;
- Residuos tóxicos de cualquier tipo.

Deproil S.A. (2013) menciona que “La cantidad de plomo presente en el aceite usado oscila del 1 al 1.5% en peso y proviene de las gasolinas y de los aditivos”.

Composición Aceite Lubricante Usado			
Contaminantes	Concentración en ppm		
	Aceites Lubricantes		Aceite Industrial
	Motor Diésel	Motor Gasolina	
Cadmio	1.1	1.7	6.1
Cromo	2.0	9.7	36.8
Plomo	29.0	2.2	217.7
Zinc	332.0	951.0	373.3
Cloro total	3600.0	3600.0	6100.0
PCB's	20.7	20.7	957.2

Tabla 18. Concentración en ppm de aceite de motor usado
Fuente: Juntadeandalucía.es

Generalmente los aceites de automoción poseen mucha mayor cantidad de plomo y zinc que los aceites de procedencia industrial y dentro de los de automoción los

procedentes de motores a gasolina, se ha observado que presentan mayor cantidad de metales pesados que los de motores diésel.

2.8.4.2. Impactos al medio ambiente

Los aceites de motor usados son potencialmente peligrosos, resultan tóxicos ya que tienen la habilidad de esparcirse en los suelos y cuerpos hídricos. Estos forman una película en la superficie del agua evitando el ingreso del oxígeno y la luz solar para que se produzca el proceso fotosintético.

Al contacto con la luz solar y el aire emiten sustancias tóxicas, liberando contaminantes, presentes en ellos como compuestos orgánicos volátiles VOC's y metales pesados. Cabe mencionar que en el aceite usado existen hidrocarburos que no se evaporan y permanecen en el suelo de manera indeterminada.

El aceite de motor usado tiene alcances potencialmente dañinos, al ser vertidos en cuerpos hídricos, un ejemplo muy común un río, se adhieren a pequeñas películas de agua, las mismas se depositan en el fondo permaneciendo por muchos años contaminando las especies acuáticas y su ambiente.

La presencia de metales pesados que son solubles con el agua, los mismos que pueden infiltrarse en los suelos, llegando a aguas superficiales, incluso a aguas subterráneas, al fluir debajo del suelo pueden llegar hasta ríos, pantanos o lagos.

2.8.4.3. Usos del Aceite de Motor usado

El aceite lubricante usado por lo general se lo reutiliza como un combustible alternativo para los hornos Clinker de las cementeras, fábricas de tejas y cerámicas, vidrio, secadoras de granos. Si las industrias que realizan estos procesos realizan una mala combustión, el impacto ambiental se incrementa. Existen emisiones de metales pesados como Cadmio (Cd), Plomo (Pb), Cromo (Cr), por mencionar los principales, dichos gases se pueden degradar mediante fotooxidación, degradando el medio ambiente y la salud.

Las personas están involucradas con los aceites lubricantes en diferentes formas, estas formas son:

- Utilizarlo como herbicida o insecticida;
- Bañarse o consumir agua de fuentes hídricas contaminadas como ríos;
- Jugar en suelos contaminados con aceite usado;
- Emisiones del sistema de escape de los vehículos.
- En carreteras de tercer orden, en ocasiones utilizan el aceite de motor usado como controlador de polvos.
- El aceite usado con sus emisiones en contacto con cuerpos hídricos puede contaminar las cosechas, animales y la vida acuática [26].

2.8.5. Ordenanza Nacional

En el Ecuador aún no se ha determinado una norma o reglamento nacional para la recolección y disposición final de los aceites lubricantes usados. Sin embargo el Ministerio del Ambiente se encuentra en el proceso de regular una ley que regule y tenga estándares mínimos para la recolección, manejo y disposición final de estos residuos peligrosos.

En el país existen tres ciudades que cuentan con ordenanzas municipales para la gestión de los aceites usados: Quito, Guayaquil y Loja. La ordenanza realizada en el año 2003 en el ilustre municipio de Guayaquil, con la finalidad de realizar un manejo integral de los aceites lubricantes usados, tuvo un cambio en el año 2004. En el artículo modificado se menciona que los aceites usados deben almacenarse temporalmente en tanques de 120 galones para ser retirados por las personas autorizadas por el Municipio para su transporte y al sitio para su disposición final.

Las personas deberán llevar un registro manual o computacional donde conste la cantidad y destino final de los aceites, con la obligación de emitir un informe bimensual a la dirección de Medio Ambiente otorgará un formato respectivo. La ordenanza está aplicada a personas naturales y jurídicas, así también se detalla los trámites para la obtención de la licencia ambiental para el transporte de aceites usados (Título II).

También se detalla el área de almacenamiento donde se encuentran los depósitos, deberán contar:

- Existencia de techo;
- Impermeabilidad en el piso;
- No debe existir conexiones directas al sistema de alcantarillado o de aguas;
- Disponer de un canal perimetral que sirva de contención en caso de desbordes;
- Medidas de control contra incendios;

El incumplimiento de esta ordenanza en el cantón Guayaquil tendrá sanciones monetarias entre \$500 a \$5000 dólares y la exclusión de la licencia ambiental, terminación de contratos [25].

2.8.6. LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS

La combinación de asfalto y agregados pétreos en proporciones exactas es a lo que generalmente se lo denomina una mezcla asfáltica. Las proporciones relativas de estos agregados determinan las propiedades físicas de la mezcla y, eventualmente, el rendimiento de la misma como mezcla terminada.

La mezcla asfáltica debe ser duradera, lo que se traduce en resistencia a las acciones de desprendimiento del asfalto del agregado por efectos del agua, resistencia a la abrasión del tránsito, etc. Una mezcla debe ser impermeable, para que los componentes del pavimento no estén bajo la acción directa de agentes atmosféricos, para que una mezcla sea ideal debe cumplir con las siguientes características:

- Baja rigidez a las temperaturas normales de manejo en planta y colocación en obra.
- Alta rigidez a las temperaturas altas de servicio para reducir el ahuellamiento.

- Baja rigidez y buenas características elásticas a temperaturas bajas de servicio para reducir el riesgo de aparición de fisuras por cambios de temperatura.
- Buenas características adherentes en presencia de humedad.

2.8.7. DEFINICIÓN DE MEZCLA ASFÁLTICA

Las mezclas asfálticas, también reciben el nombre de aglomerados, formadas por una combinación de agregados pétreos y un ligante hidrocarbonato, aquellos quedan cubiertos por una película continua de éste. Se fabrican en unas centrales fijas o móviles, se transportan después a la obra y allí se extienden y se compactan.

Las mezclas asfálticas se utilizan en la construcción de carreteras, aeropuertos, pavimentos industriales, en las capas inferiores de los pavimentos para tráfico pesados intensos, entre otros.

Las mezclas asfálticas están constituidas aproximadamente por un 90% de agregados pétreos grueso y fino, un 5% de polvo mineral (filler) y el otro 5% de ligante asfáltico. Los componentes mencionados influyen directamente en el correcto funcionamiento del pavimento y la falta de calidad en alguno de ellos afecta el conjunto. Entre los componentes que más influyen en la mezcla asfáltica son el ligante asfáltico y el polvo mineral, radican en la calidad de la mezcla asfáltica como en su costo total.

2.8.7.1. CLASIFICACIÓN DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS

Existen varios parámetros para establecer las diferencias entre distintas mezclas, las clasificaciones pueden ser diversas:

2.8.7.2. Por Fracciones de Agregado Pétreo Empleado

- Masilla asfáltica: Polvo mineral más ligante.
- Mortero asfáltico: Agregado fino más masilla.
- Concreto asfáltico: Agregado grueso más mortero.
- Macadam asfáltico: Agregado grueso más ligante asfáltico.

2.8.7.3. Por la Temperatura de Puesta en Obra

En la siguiente tabla se muestra la clasificación de las mezclas asfálticas de acuerdo a su gradiente calorífico y van desde frío hasta caliente, la gama de temperaturas es extensa y van desde los 0°C a 30°C, es decir temperatura ambiente hasta lograr los 180 °C en producción.

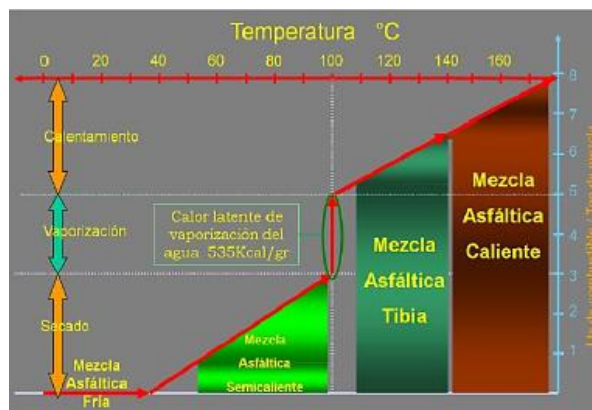


Gráfico 18. Clasificación de mezclas asfálticas según la temperatura de compactación
Fuente: Linares (2010)

Nombre de la Mezcla	Temperatura	Objetivo	Logro
Mezclas en frío	De 25°C a 60°C	Incorporación de proporciones de material reciclado.	Las mezclas en frío, los agregados se revisten a temperaturas bajas, se utiliza como capas intermedias, capas de refuerzo o rodadura.
Mezclas tibias WMA	100°C a 135 °C	Reducir requerimientos térmicos de las mezclas asfálticas.	Mejoran las características de rendimiento final de la mezcla asfáltica, la tecnología empleada reduce la

			viscosidad del ligante durante las fases de la mezcla y tendido. Sin efectos negativos en las temperaturas de uso.
Mezclas en caliente	135°C a 180°C	Producción de mezcla asfáltica convencional.	Son mezclas convencionales, con temperaturas de producción elevadas.

Tabla 19. Clasificación de mezclas asfálticas según la temperatura

Fuente: Cepeda 2014

2.8.7.4. Por la porción de vacíos en la mezcla asfáltica

Este parámetro es fundamental para que no se produzcan deformaciones plásticas como consecuencia de las cargas y variaciones térmicas en condiciones de servicio.

- Mezclas Cerradas o Densas: La porción de vacíos no supera el 6%.
- Mezclas Semi-cerradas o Semi-densas: La proporción de vacíos está entre el 6 y el 10 por ciento.
- Mezclas abiertas: La proporción de vacíos supera el 12 por ciento.
- Mezclas Porosas o Drenantes: La proporción de vacíos supera el 20 por ciento.

2.8.7.5. Por el Tamaño Máximo del Agregado Pétreo

- **Mezclas Gruesas:** El tamaño máximo del agregado pétreo excede los 10 milímetros.
- **Mezclas Finas:** Conocidas como micro aglomerados, son morteros asfálticos, se forman por un árido fino incluyendo polvo mineral y un

ligante asfáltico. El espesor mínimo con el que ha de tenderse una mezcla, depende del tamaño máximo del agregado pétreo.

2.8.7.6. Por la Estructura del Agregado Pétreo

- **Mezclas con Esqueleto Mineral:** El esqueleto mineral resistente se debe al rozamiento interno de los agregados. Ejemplo, los concretos asfálticos (mezclas abiertas), aunque una parte de la resistencia mencionada se debe a la masilla.
- **Mezclas sin Esqueleto mineral:** La resistencia se debe únicamente a la cohesión de la masilla, ya que no posee un esqueleto mineral resistente. Un ejemplo de ello son los diferentes tipos de masillas asfálticas.

2.8.7.7. Por la Granulometría

- **Mezclas Continuas:** Poseen una cantidad muy distribuida de diferentes tamaños de agregado en el huso granulométrico.
- **Mezclas Discontinuas:** Poseen una cantidad muy limitada de tamaños de agregado pétreo en el huso granulométrico [27].

Parámetros de Clasificación	Tipo de mezcla
Fracciones de agregado empleadas	Masilla
	Mortero
	Concreto
	Macadam
Temperatura de puesta en obra	En frío
	En caliente
Huecos en la mezcla (h)	Cerradas ($h < 6\%$)
	Semicerradas ($6\% < h < 12\%$)

	Abiertas ($h > 12\%$)
	Porosas ($h > 20\%$)
Tamaño máximo del Agregado (T_{máx})	Gruesas ($t_{\max} > 10 \text{ mm}$)
	Finas ($t_{\max} < 10 \text{ mm}$)
Estructura del agregado	Con esqueleto mineral
	Sin esqueleto mineral
Granulometría	Continuas
	Discontinuas

Tabla 20. Clasificación de mezclas asfálticas según la granulometría

Fuente: Linares (2010)

2.8.8. Tipología de las mezclas asfálticas

2.8.8.1. Mezcla asfáltica en Frío

Su principal campo de aplicación es en la construcción y conservación de las carreteras secundarias, para evitar su envejecimiento se realizan lechadas asfálticas. En nuestro medio tienen un uso muy común en bases y capas intermedias, participando como material reciclado, microsurfacing o estabilización.

Se caracterizan por poseer baja viscosidad, presentan gran trabajabilidad por su procedencia del asfalto fluidificado. En acopios el incremento de viscosidad es lento lo que hace viable su almacenamiento.

2.8.8.2. Mezclas Asfálticas Tibias

Es una tecnología que permite trabajar a bajas temperaturas en comparación con las mezclas asfálticas en caliente, tanto en su etapa de producción en planta, como en la etapa de extendido y compactación. La diferencia de temperaturas de producción y compactación baja entre 20 y 50 °C, entre 100 y 135 °C, lo cual permite colocar asfaltos a temperaturas sensiblemente inferiores a las técnicas tradicionales de producción y tendido de asfalto.

La mezcla asfáltica tibia surgió en Europa como una respuesta a la necesidad de una mezcla asfáltica que ofreciera economía en energía y con éstas características tuviera el mismo desempeño que las mezclas asfálticas tradicionales en caliente. Desde los años ochenta se han realizado una serie de investigaciones de tecnologías que mitiguen el cambio climático como problema de naturaleza compleja.

2.8.8.3. Mezcla Asfáltica en Caliente

Comprende la combinación de un ligante hidrocarbonado, agregados incluyendo polvo mineral, y eventualmente aditivos, con el fin de lograr que todas las partículas del agregado queden recubiertas por la película del ligante. El proceso de producción comprende calentar los agregados y el asfalto, su uso es variado, tanto en la construcción de carreteras, como de vías urbanas y aeropuertos.

Se utilizan en capas superiores de pavimento, así como también en capas inferiores, en ocasiones se fabrican asfaltos con modificaciones a la mezcla asfáltica tradicional, las proporciones pueden variar desde el 3% al 6% de asfalto en peso de agregados pétreos.

2.8.9. SELECCIÓN DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA

En variadas ocasiones el proyecto de una mezcla asfáltica se reduce a determinar su contenido de ligante, sin embargo esta es la última fase de un proceso más amplio, ya que los factores involucrados requieren estudios más cuidadosos con el fin de garantizar un comportamiento adecuado de la mezcla y un considerable ahorro económico en la solución.

Entre las fases del desarrollo de un proyecto de una mezcla son las siguientes:

- a) Análisis de las condiciones de trabajo de la mezcla: tráfico, tipo de infraestructura (carretera, vía urbana, aeropuerto, etc), es fundamental determinar la ubicación de la capa (rodadura, intermedia o base) y espesor, la naturaleza de las capas subyacentes, intensidad del tráfico

pesado, clima, etc. Así también identificar si se trata de un pavimento nuevo o de una rehabilitación.

- b) Determinación de las propiedades fundamentales de la mezcla a elaborar, dadas las condiciones de trabajo de la misma, previamente debe establecerse la resistencia a las deformaciones plásticas o la flexibilidad, entre otras.
- c) Seleccionar el tipo de mezcla que mejor se adapte a los requerimientos planteados en el análisis de consideraciones económicas o de puesta en obra a considerar.
- d) Materiales disponibles, elección de los agregados pétreos, los cuales deben cumplir con especificaciones, las mismas que serán limitadas en un radio limitado, fijadas a un costo razonable, de la misma manera se debe seleccionar el polvo mineral de aportación.
- e) Elección del tipo de ligante: asfalto, asfalto modificado, emulsión asfáltica, el costo será un factor determinante. Sin embargo, hay que tomar en cuenta la función de la capa y de las condiciones del entorno.
- f) Dosificación o determinación del contenido óptimo de ligante según un proceso que debe adaptarse al tipo de mezcla, la cual debe hacerse para distintas combinaciones de las fracciones disponibles del agregado pétreo, de manera que las granulometrías conjuntas analizadas estén dentro de un uso previamente seleccionado.
- g) Otros factores a tener en cuenta en el diseño y selección de una mezcla asfáltica son los siguientes: Exigencias de seguridad vial, estructura del pavimento, técnicas de diseño y ejecución, sitio de construcción del pavimento (topografía, temperatura, terreno, periodo de lluvias trazado de la vía, entre otros), condiciones de drenaje, consideraciones económicas.

Para la realización de un proyecto de mezcla asfáltica existe una gama amplia de posibles soluciones, para ello se hace un estudio muy riguroso y detenido, para elegir el diseño más adecuado técnica y económicamente.

Otros principios también se aplican de acuerdo con las siguientes reglas:

- a) Tipo de mezclas asfálticas según su composición granulométrica.

El tipo de mezcla asfáltica a emplear se determinará en función de:

- La capa de pavimento a que se destine.
 - La categoría del tráfico.
- b) Tipo de ligante asfáltico.
- Dependerá principalmente de:
- La capa de pavimento a que se destine la mezcla.
 - El tipo de mezcla.
 - La categoría del tráfico.
 - El clima de la zona en la cual se construirá la carretera.
- c) Relación Filler/Asfalto.
- Esta relación dependerá de:
- La capa de pavimento a que se destine la mezcla.
 - El tipo de mezcla.
 - La categoría del tráfico.
 - La zona en que se encuentre la carretera [28].

2.8.10. Métodos de Mezclado

Según el método constructivo, las mezclas asfálticas se dividen en dos grupos:
Mezclas en planta y mezclas en sitio.

2.8.10.1. Mezcla en Planta

Consiste en la mezcla de árido y asfalto en una planta central, los aspectos más comunes para clasificar una planta de asfalto son:

- **El tipo de proceso:** Se dividen en plantas continuas y discontinuas conocidas como “bachada”
- **El sentido de secado:** Las plantas pueden ser en sentido o flujo paralelo y en contra-flujo.
- **La forma de mezclado:** Existen plantas de mezcla en frío y las de mezcla en caliente.

Según el tipo de proceso: Las plantas continuas operan en una línea de producción del mismo nombre, el agregado y el producto pasan de una etapa a otra sin detenerse, de manera que la mezcla se entrega de forma continua en la descarga.



Gráfico 19. Planta de asfalto continua de flujo paralelo
Fuente: Amman (2018)

El proceso discontinuo o de bachada (proveniente del inglés *batch*, cuyo significado es hornada o lote), en uno o más procesos de producción se “arman paquetes”, para que los mismos sean sometidos a un proceso puntual, clasificación, acumulación, pesaje o mezcla. Posteriormente el paquete se someterá a un proceso diferente, se continuará así hasta que se entregue la mezcla en un “batch” de producto.

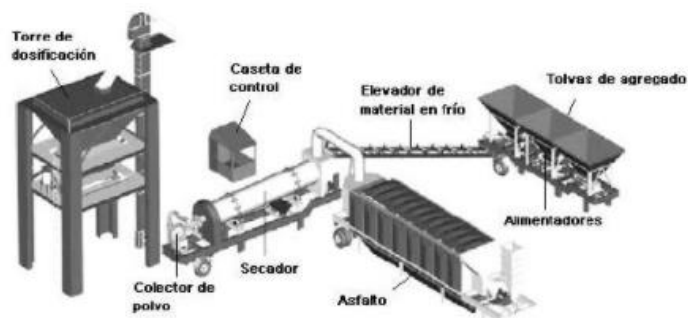


Gráfico 20. Planta asfáltica discontinua
Fuente: Linares (2010)

Según el sentido de secado: En las plantas por secado o flujo paralelo, los materiales ingresan al tambor de secado en el sentido de ingreso de la llama y fluyen en sentido paralelo al tránsito de los gases.

Las plantas de secado a contra-flujo, los agregados ingresan al tambor secador por el extremo opuesto a la llama y fluyen en contra-sentido de los gases del sistema, el

secado se realiza a menores temperaturas y se consume menor cantidad de combustible.



Gráfico 21. Planta Asfáltica de secado a contra flujo

Fuente: Wirtgen Group (2019)

Según el tipo de mezclado: Su uso es común en mezclas en frío, debido a que se usan asfaltos líquidos, por lo que no se calientan los agregados para su producción. Sin embargo, el asfalto se calienta a una temperatura relativamente baja con el fin de obtener la viscosidad necesaria de mezclado.

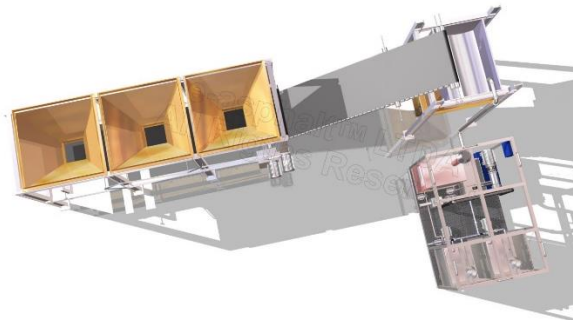


Gráfico 22. Planta asfáltica de mezclado en frío

Fuente: e-asfalto (2018)

Las mezclas en caliente son las de mayor estabilidad, consiste en mezclar el agregado pétreo y el asfalto a altas temperaturas comprendidas entre 135 a 165 °C. Se dividen en mezcla en el tambor secador y mezcla externa, se mezclan los agregados con el asfalto, bien sea en un módulo continuo llamado tambor secador-mezclador o en un módulo concéntrico pero aislado de la zona de secado, llamado también doble barril.

Las plantas de mezcla extrema se caracterizan porque el proceso de mezclado se realiza en una unidad mezcladora independiente del tambor de secado, los mezcladores más comunes son el de tipo tambor y el de ejes gemelos, en el proceso el mezclador de tipo tambor divide el tradicional tambor secador-mezclador en dos tambores independientes que realizan sus funciones separadamente. El principio consiste en separar las operaciones de secado y mezclado con el fin de eliminar totalmente el riesgo de oxidación del asfalto por contacto con la llama.

Comúnmente el sistema es conocido como drum-mix, el riesgo es resuelto desde modelos antiguos hasta en modelos modernos y automatizados, en la mayoría de los casos permite obtener mezclas en menor tiempo posible, sin embargo la eficacia de la mezcladora en gran medida influye en factores como: El operario, la calidad de los materiales antes y después del acopio, las proporciones adecuadas de los materiales constituyentes en la mezcla asfáltica, para que todo lo anterior conlleve a mezclas asfálticas con mejores rendimientos deben tener precisión y coordinación [16].



Gráfico 23. Planta asfáltica tipo drum-mix
Fuente: Asphalt Mixing Plant

2.8.10.2. Mezcla en Sitio

Es una capa asfáltica que se produce mezclando árido con asfalto líquido en la misma faja del camino, mediante motoniveladora o alguna maquinaria especial que efectúe el trabajo.



Gráfico 24. Compactado de asfalto en sitio

2.8.11. Impacto ambiental de una planta de asfalto

Según la Agencia de Protección Ambiental (EPA) de Estados Unidos, las plantas de procesamiento de asfalto y las fábricas de producción de techos con ese material, están dentro de las principales fuentes de contaminación del aire, contándose entre ellos con formaldehído, exano, fenol, materia orgánica policíclica y tolueno. Así también en las labores de transporte y almacenamiento hacen que se liberen “compuestos orgánicos volátiles, hidrocarburos aromáticos policíclicos y partículas condensadas muy finas”.

Existe también producción de humos, gases y vapores conteniendo sustancias letalmente tóxicas, como el sulfuro de hidrógeno, arsénico, benceno, cadmio y se cita como muy peligrosos la presencia en el procesamiento de solventes como tolueno, xileno y nafta, además de estireno, asbestos, sílice y hule reciclado.

Estudios realizados por la organización ambientalista Blue Ridge Environment Defense League (BREDL), sus estudios realizados en personas que vivían dos kilómetros a la redonda de plantas de producción de asfalto.

Las enfermedades más frecuentes fueron alta presión ambiental (18 por ciento), sinusitis (18 por ciento), dolor de cabeza (14 por ciento) y problemas respiratorios (9 por ciento). De acuerdo con la organización ambiental, las enfermedades anteriormente mencionadas podrían desencadenar en cáncer, problemas en el sistema nervioso central, lesiones hepáticas, problemas respiratorios e irritación de la piel. Los animales experimentaron defectos en los procesos reproductivos en recién nacidos y problemas en el sistema inmunológico.



Gráfico 25. Gases generados en la compactación del asfalto
Fuente: J3 CORP (2017)

2.8.12. Ensayos del Cemento Asfáltico

2.8.12.1. Gravedad Específica (Norma ASTM D 70-09 E-1) (NTE INEN 923)

Por definición la gravedad específica es la relación entre el peso por unidad de volumen de un material respecto al mismo volumen de agua a una misma temperatura ($25^{\circ}\text{C} - 77^{\circ}\text{F}$), dicha temperatura nos permite pasar de pesos a volúmenes y viceversa.

Se determina mediante el ensayo de picnómetro. La muestra de cemento asfáltico se coloca dentro de un picnómetro previamente calibrado. El picnómetro y la muestra son pesados; se procede a llenar el picnómetro con agua destilada y es colocado en un baño de agua destilada por unos 30 minutos a 25°C , se determina su peso.

La gravedad específica del cemento asfáltico se determina considerando la masa de la muestra y la masa del agua desalojada con respecto al picnómetro calibrado.

Se calcula por medio de la siguiente fórmula:

$$\delta_{asf} = \frac{(C - A)}{(B - A) - (D - C)}$$

Donde:

δ_{asf} = Gravedad específica del asfalto.

A= Peso del picnómetro.

B= Peso del picnómetro con agua destilada.

C= Peso del picnómetro parcialmente lleno con cemento asfáltico.

D= Peso del picnómetro con cemento asfáltico.

Equipo

- Picnómetro de vidrio en forma cilíndrica o cónica, con boca esmerilada en la que cabe un tapón de vidrio de 22 mm de diámetro, en centro de la tapa lleva un orificio de 1 a 2 mm de diámetro, tendrá de 24 a 30 ml de capacidad. La superficie superior del tapón será plana y pulida y la inferior será cóncava para facilitar la salida del aire.
- Balanza de precisión de 0.01 gr.
- Baño María.
- Agua destilada.
- Vaso de precipitación.
- Termómetro.
- Paño limpio y seco.
- Asfalto y modificado con aceite de motor usado.

Preparación del equipo:

Llenar parcialmente el vaso Griffin con 600 mL o más de agua destilada, hasta un nivel que permita sumergir la parte superior del picnómetro, a una profundidad no menor a 40 mm.

Sumergir parcialmente el vaso en el baño de agua, de modo que el fondo del recipiente se ubique a una profundidad no menor a 100 mm; mientras que la parte superior del recipiente se ubique por sobre el nivel de agua del baño. Utilizar cualquier método que asegure que el vaso no se voltee, mientras se garantice que la circulación del agua en el baño alrededor del vaso no se restrinja.

Procedimiento:

- Calibrar el picnómetro, se determina la masa del picnómetro limpio y seco con su tapa con una precisión de 0.001 gramos y se registra como "A".
- Llenar el picnómetro con agua destilada y sumergirlo en un vaso con agua destilada y colocar el tapón ligeramente en el picnómetro, ubicar el picnómetro

dentro del vaso y presionar el tapón firmemente en su lugar, regresar el vaso al baño de agua si éste se retiró anteriormente.

- Colocar el vaso en el baño maría a $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ y mantenerlo por 30 minutos, se procede a secar y registrar el peso “B” del picnómetro más agua destilada.
- Preparar una muestra de asfalto 200 gramos de muestra la mezcla debe estar fluida, la temperatura debe elevarse a más de $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($131\text{ }^{\circ}\text{F}$) sobre el punto de reblandecimiento esperado para el alquitrán, o a más de $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($230\text{ }^{\circ}\text{F}$) sobre el punto de reblandecimiento esperado para el asfalto, se debe evitar calentar por más de 60 minutos con el fin de evitar incorporar burbujas de aire dentro de la mezcla. Se introduce en el picnómetro hasta la mitad y se deja enfriar la muestra con la tapa, se registra el peso como “C”, el vertido del asfalto se debe hacer en el picnómetro limpio y seco, previamente calibrado a las tres cuartas partes de capacidad, el material no debe tocar las paredes para evitar burbujas, si existiesen se las debe eliminar con una llama larga de gas flameado por unos segundos.
- Dejar enfriar el picnómetro con su tapón y la muestra a temperatura ambiente por 40 minutos como mínimo y pesarlo nuevamente con el tapón, con una precisión de 0.001 gramos. Registrar el picnómetro más la muestra como C.
- Retirar el vaso del baño de agua si es necesario, llenar con agua destilada el picnómetro con asfalto, colocando suavemente el tapón del mismo con el fin de evitar la inclusión de burbujas de agua en el picnómetro y sumergir el baño maría a $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ por 30 minutos y registrar el peso como “D”.
- Calcular la densidad con una precisión de 0.001 como se indica a continuación:

$$\text{Densidad} = \text{Densidad Relativa} \times W_T$$

Temperatura $^{\circ}\text{C}$	Densidad del Agua, Kg/m^3 (Kg/L)
15	999,1 (0.9991)
25	997,0 (0.997)

Tabla 21. Densidad del agua a temperatura del ensayo

Fuente: Handbook of Chemistry and Physics (Manual de Química y Física)

2.8.12.2. Punto de Reblandecimiento Método de Anillo y Bola (Norma ASTM D 36) (NTE INEN 920)

Se determina comúnmente por el ensayo del anillo y bola, sin embargo este ensayo no interviene en las especificaciones para cementos asfálticos empleados en carpetas asfálticas. Su uso más frecuente es en cementos asfálticos más sólidos que requieren otras aplicaciones, su principal objetivo es conocer la temperatura en la cual los cementos asfálticos se hacen fluidos.

En ensayo consiste en colocar el cemento asfáltico en dos anillos de latón de dimensiones reguladas por la norma ASTM, se introducen los anillos suspendidos en un baño de agua destilada, se coloca en cada muestra una bola de acero de dimensiones y peso regulados. Posteriormente se calienta el baño a una velocidad de 5°C por minuto y se toma la lectura del termómetro en el momento en el que la bola de acero caiga desde una altura de 25 milímetros, a esta lectura de temperatura se llama punto de ablandamiento del cemento asfáltico. Los resultados de este ensayo se toman como indicadores de precaución que se debe tomar durante la manipulación de estos productos evitando así riesgos de incendio.

Equipo

- Anillos, de bronce, bordes cuadrados.
- Guías de las esferas, de bronce para centrar la esfera sobre las probetas.
- Platos de base.
- Esferas de acero, diámetro 9.53 mm y peso entre 3.45 y 3.55 gramos.
- Soportes de anillos y montaje completo.
- Termómetro.
- Guías de contacto de las bolas.
- Vaso de precipitación resistente al calor de 800 ml.
- Agua destilada.
- Glicerina.
- Estufa.
- Espátula.

- Termómetro.
- Asfalto y modificado con aceite de motor usado.

El termómetro de mercurio debe cumplir con las características que se indican en la siguiente tabla:

Resistencia ASTM	Escala °C	Graduación °C	Longitud Total (mm)	Error máx. °C
15 C	-2 A 80	0.2	397	0.2
16 C	300 a 200	0.5	397	0.3

Tabla 22. Característica Termómetros de Mercurio

Fuente: Norma NLT 125/84

Procedimiento:

- Calentar la muestra de asfalto en la estufa hasta que esté fluida para el llenado de los anillos, evitando el sobrecalentamiento ya que el mismo genera burbujas en la muestra que alteran los resultados del ensayo.
- Las temperaturas recomendadas para el calentamiento de las muestras son entre 50 y 60 °C para breas de alquitrán y entre 80 y 100 °C para betunes; el tiempo máximo de calentamiento será de 30 minutos en todos los casos.
- Para materiales con punto de reblandecimiento hasta 80 °C, untar una capa delgada de glicerina en el vidrio para anillos y colocar sobre éste los anillos de bronce.
- Colocar la muestra caliente en los dos anillos previamente calentados a una temperatura aproximadamente igual a la del punto de vertido del material. Posteriormente colocar dichos anillos sobre el plato de calentamiento previamente tarado con los agentes de prevención de adhesión.
- Dejar enfriar los anillos con la muestra durante 30 minutos como mínimo.
- Enfriada la muestra, enrasar cuidadosamente cortando el exceso con un cuchillo o espátula.
- Montar los anillos, las guías, las esferas en el soporte metálico y el termómetro.
- Calentar la muestra evitando sobrecalentamientos localizados, hasta lograr fluidez para que se pueda verter sin exceder de 56 °C de temperatura.

- Introducir todo el sistema en el vaso con agua destilada a temperatura de 5 ± 1 °C por minuto por 15 minutos, el agua se llena hasta un nivel entre 102 y 108 mm por encima del fondo del vaso.
- Colocar el sistema en la estufa y encender el mechero de ensayo y se ajusta la llama a un diámetro de 4 ± 0.8 mm intensificando el calor de tal forma que la temperatura se eleve 5 °C por minuto, ésta temperatura se deberá mantener uniforme a todo el largo del ensayo, sin permitir a partir del tercer minuto variación de ± 0.5 °C en la temperatura.
- Calentar el vaso ajustado para que la temperatura aumente 15 ± 1 °C por minuto, cuando la temperatura de la muestra es aproximadamente de 56 °C, disminuir la velocidad de incremento de temperatura a 5.5 ± 0.5 °C por minuto, ya que durante los siguientes 28 °C se encuentra el probable punto de inflamación.
- La temperatura leída en el instante en que la masa bituminosa toca la placa de referencia se toma como punto de reblandecimiento.
- Montar los aparatos, se colocan los anillos con las muestras, las guías de las bolas y llenar el baño con agua destilada hasta una altura de 105 ± 3 mm.
- Colocar las dos bolas en el fondo del baño para que adquieran la misma temperatura del montaje, colocando al final las guías.
- Calentar a una temperatura de 5°C/minuto. Registrar la temperatura indicada por el termómetro al momento en que el asfalto rodeando la bola, toca el fondo del baño.
- Repetir el ensayo en caso que la diferencia de caída de las bolas difiera más de 1°C al momento de topar la placa base.
- El punto de reblandecimiento será la temperatura en grados centígrados (°C) obtenida como el valor medio de las probetas ensayadas, con aproximación al 0.5 °C más cercano.

2.8.12.3. Penetración (Norma ASTM D 5) (NTE INEN 0917)

El ensayo tiene como objetivo establecer la dureza o consistencia del cemento asfáltico para su clasificación en grados de penetración, se mide la distancia que una aguja normalizada es introducida verticalmente en una muestra de cemento asfáltico en condiciones de temperatura, carga y tiempo, especificadas en la norma ASTM, el ensayo de temperatura se realiza a una temperatura de 25°C, la

aguja debe tener una carga de 100 gramos y el tiempo es de 5 segundos para penetrar en la muestra.

Es probado que mientras más blando es el cemento asfáltico mayor será la lectura que establezca su penetración. Los grados de penetración comprendidos dentro de los rangos de 60-70, 85-100, 120-150 y 200-300; y para aplicaciones especiales e industrias el rango de 40-50.

El ensayo describe la consistencia o dureza de materiales bituminosos sólidos o semisólidos utilizados en la construcción de carreteras.

Equipo:

- Penetrómetro.
 - Aguja de penetración.
 - Recipiente o molde para muestra.
 - Baño María.
 - Dispositivo medidor de tiempo.
 - Termómetro.
 - Espátula.
 - Asfalto y asfalto modificado con Aceite usado.
-
- El penetrómetro está constituido por un mecanismo que permita el movimiento vertical sin rozamiento apreciable, de un vástago móvil al que se fija firmemente en su parte inferior la aguja de penetración: la masa del vástago será de 47.5 ± 0.05 gramos. Se debe disponer de masas suplementarias de 50 y 100 ± 0.05 gramos para realizar los diversos ensayos.
 - La Aguja de penetración tiene que ser de acero inoxidable templado, grado 440 C o similar, de dureza Rockwell C 54 a C 60, de 50 mm de longitud y entre 1.00 y 1.02 mm de diámetro, con un extremo simétricamente aguzado hasta formar un cono con un ángulo de 9.2 ± 0.05 grados. Cuando la aguja se coloca en el herrete éste debe estar constituida

monolíticamente de una varilla de acero inoxidable o bronce de 3.2 ± 0.05 mm de diámetro y 38.1 ± 1.0 m de longitud.

- El recipiente metálico de vidrio cilíndrico debe poseer las dimensiones que se indican en la tabla:

Penetración	Diámetro (mm)	Profundidad (mm)
Hasta 200	55	35
Entre 200 y 350	70	45

Tabla 23. Dimensiones del Recipiente

Fuente: Norma (Norma NLT-124)

- Baño de agua: capaz de mantener una temperatura de 25 ± 0.1 °C (77 ± 0.2 °F). El baño debe tener una plataforma perforada que se ubique a no menos de 50 mm del fondo, y a no menos de 100 mm por debajo del nivel líquido de dicho baño.
- Plato de transferencia: Debe tener una capacidad de al menos 350 mL y una profundidad suficiente para que el agua cubra el recipiente de la muestra, la forma eficiente de mantener la posición firme del plato es un soporte de tres puntos.
- Temporizador: Cualquier dispositivo electrónico que tenga una precisión de ± 0.1 segundos para un intervalo de 60 segundos.
- Termómetros: Se debe utilizar termómetros de líquido en vidrio calibrados, de rango adecuado, con error máximo de escala 0.1 °C (0.2 °F), los mismos deben cumplir con la norma ASTM E1 o con la especificación ASTM E 2251.

Termómetro ASTM	Rango
17C o 17F	19°C a 27 °C (66°F a 80 °F)
63C o 63 F	-8°C a +32°C (18°F a 89°F)
64C o 64F	25°C a 55°C (77°F a 131 °F)

Tabla 24. Termómetros utilizados en el ensayo

Fuente: Norma NTE INEN 917

- El termómetro utilizado en el baño de agua se debe calibrar periódicamente de acuerdo con el método de ensayo ASTM E77.

Procedimiento:

- Calentar las muestras por un tiempo mínimo para garantizar que sea lo suficientemente fluida, se debe agitar las muestras hasta alcanzar la homogeneidad, evitando la formación de burbujas.
- Verter la muestra en el recipiente, de modo que cuando alcance la temperatura de ensayo, la profundidad de la muestra sea al menos 120% de la profundidad a la cual se espera que la aguja penetre.
- Dejar enfriar al aire libre, a una temperatura entre 15 y 30 °C, por 45 minutos a 1.5 horas en el recipiente pequeño, de 1.5 a 2 horas en el recipiente mediano y de 1.5 a 2 horas para los recipientes más grandes, se procede a sumergir los recipientes en el baño de agua maría a temperatura de 25 °C.
- Permitir que el recipiente pequeño permanezca en el baño por 45 minutos a 1.5 horas, el recipiente mediano por 1 a 1.5 horas y los recipientes más grandes por 1.5 a 2 horas.
- Cuando no se especifique las condiciones para el ensayo, se entenderán los siguientes parámetros normalizados: Temperatura 25 °C, carga 100 gramos y tiempo 5 segundos, las condiciones especiales del ensayo se detallan en la siguiente tabla:

Temperatura °C (°F)	Carga, g	Tiempo, s
0 (32)	200	60
4 (39.2)	200	60
45 (113)	50	5
46.1 (115)	50	5

Tabla 25. Condiciones especiales de ensayo de penetración

Fuente: Norma NTE INEN 917

- Armado el penetrómetro revisar que la aguja de penetración esté limpia y seca, aproximar la aguja de penetración a la superficie de la muestra, para impedir el rozamiento y falsas lecturas. Se encera el penetrómetro colocando un peso de 50 gramos para tener una masa total de 100 ± 0.1 gramos entre el vástago, la aguja y accesorios.
- Colocar la muestra en la base del Penetrómetro y aproximar la aguja hasta que la punta toque ligeramente la superficie del material sin penetrar.
- Encerar el Penetrómetro y el cronómetro.
- Liberar el mecanismo que libera la aguja durante el tiempo especificado, finalmente se lee y anota la distancia, expresada en décimas de milímetro, que haya penetrado la aguja de la muestra.
- Realizar por lo menos tres penetraciones en 1 muestra en puntos distantes de 10 mm entre sí y con los bordes del recipiente.
- Para penetraciones mayores a 200 mm utilizar tres agujas, dejándolas en la muestra hasta terminar el ensayo.

2.8.12.4. Índice de Penetración (Norma INV E-724-07)

Este parámetro fue establecido por Pfeiffer y Van Doormal, desde los valores obtenidos en los ensayos de Penetración a 25 °C y del Punto de Ablandamiento, permite medir la susceptibilidad del cemento asfáltico a la temperatura. Su valor calculado da una referencia de la estructura coloidal y del comportamiento reológico (relación entre el esfuerzo y la deformación), se obtiene por medio de la expresión:

$$I_p = \frac{20 * t_{RaB} + 500 * \log p - 1952}{t_{RaB} - 50 * \log P + 120}$$

Donde:

I_p = Índice de penetración.

t_{RaB} = Punto de Ablandamiento en grados Celsius.

P = Penetración en 0.1 mm a 25 °C.

Los resultados obtenidos se deberán redondear a la décima de la unidad más próxima y los índices de penetración presentan los siguientes límites para clasificar los cementos asfálticos:

- $I_p > +1$: Son cementos asfálticos que presentan reducida susceptibilidad a la temperatura, mostrando cierta elasticidad y tixotropía (Cambio de viscosidad), llamadas también tipo gel.
- $I_p < -1$: Son cementos asfálticos que presentan elevada susceptibilidad a la temperatura, gran abundancia en resina y comportamiento de tipo viscoso.
- $+1 \geq I_p \geq -1$: Presentan características intermedias, a la cual pertenecen la mayoría de cementos asfálticos que se emplean para hormigón asfáltico.

2.8.12.5. Punto de Inflamación Mediante la Copa Abierta de Cleveland (Norma ASTM D 92)

El punto de inflamación de un cemento asfáltico, se conoce como la temperatura más baja en la cual se desprenden los componentes volátiles de la muestra y tienen como resultado la presencia de una flama abierta. Este parámetro no debe confundirse con el punto de combustión, sino es la temperatura que marca el termómetro cuando al pasar la flama se produce la combustión del cemento asfáltico.

Para realizar el ensayo mediante la Copa abierta de Cleveland (copia abierta de latón), se llena parcialmente con cemento asfáltico hasta la marca de llenado que posee la copa, posteriormente se calienta a una velocidad que no exceda 16.5°C por minuto y antes de alcanzar el destello deberá aumentar la temperatura entre 5°C y 6°C por minuto, se procede a pasar periódicamente la flama sobre la superficie del cemento asfáltico hasta que se produzca un destello, se registra la temperatura en la cual ocurrió una llamarada repentina.

Equipo:

- Copa abierta Cleveland.
- Soporte.
- Termómetro.
- Asfalto y modificado con aceite de motor usado

Procedimiento:

- Llenar la copa a cualquier temperatura que no exceda de 100 °C por encima del punto de ablandamiento de la muestra, de manera que la parte superior de menisco quede en la línea de llenado.
- Aplicar calor a temperatura incremental de 14 a 17 °C por minuto. Cuando la temperatura sea aproximadamente 56 °C por debajo del punto de llama esperado, se disminuye el calor de manera que la temperatura aumente para los últimos 28 °C antes de llegar al punto de inflamación, en 5 a 6 °C por minuto.
- Por debajo de 28° C del punto de inflamación, se aplica la llama de ensayo, una vez por cada aumento de 2 °C, pasando la llama por el centro de la copa.
- Se registra como punto de inflamación la lectura de temperatura sobre el termómetro cuando aparezca una llama en cualquier punto sobre la superficie.
- El punto de combustión se continúa calentando la muestra de tal manera que aumente de 5 a 6° C por minuto, continuando la aplicación de la llama del ensayo, hasta que el asfalto se encienda y permanezca quemándose al menos durante 5 segundos, registrando la temperatura como punto de combustión.

2.8.12.6. Ductilidad (Norma ASTM D 113)

Es una característica determinante para la utilización como aglomerante en una carpeta asfáltica, a mayor ductilidad tiene mejores propiedades aglomerantes, pero son más susceptibles a los cambios de temperatura.

Para medir este parámetro, se realiza el ensayo tipo extensión, consiste en moldear varias probetas de cemento asfáltico en dimensiones y condiciones estandarizadas por la norma ASTM. Las probetas elaboradas se sumergen en agua salada a una temperatura de 25 °C. En la ejecución del ensayo se retira una parte de la probeta de la otra con una velocidad de 5 centímetros por minuto hasta romper el hilo de cemento asfáltico que se forma al estirar las probetas de los extremos. Para registrar la ductilidad del cemento asfáltico se mide la distancia máxima en centímetros hasta donde se produce la rotura del hilo de cemento asfáltico.

Equipo

- Molde de bronce.
 - Placa.
 - Baño de agua.
 - Ductilómetro
 - Termómetro.
 - Espátula.
 - Asfalto y asfalto modificado con Aceite usado
-
- Baño de agua: Recipiente con capacidad mínima de 10 litros, con dimensiones de longitud 160 cm, de ancho 30 cm y profundidad 25 cm. Debe mantener el agua a temperatura de ensayo con variación de 0.1 °C.
 - Placa base: Placa de bronce plana, provista de un tornillo lateral de sujeción.
 - Ductilómetro: Es el aparato para el ensayo de tracción, consta de un tanque de agua en el que se sumergen las probetas, provisto de un mecanismo de arrastre que no produzca vibraciones, capaz de separar a la velocidad especificada un extremo de la probeta mientras el otro está fijo, hasta 150 cm.
 - Termómetro: Con un rango como se indica en la Tabla 1 y conforme los requerimientos de la Especificación ASTM E1, también un dispositivo termométrico equivalente que se haya calibrado de acuerdo al ensayo ASTM E 220 o al ASTM E 644.

Rango de Temperatura	N° de Termómetro ASTM
-8 a 32 °C	63C
18 a 89 °F	63F

Tabla 26. Termómetros que pueden utilizarse en el ensayo.

Fuente: NTE INEN 916

- Agente antiadherente (desmoldante): Una mezcla tal como glicerina y dextrina, talco o caolín (arcilla china) o Resina Versamid y aceite mineral, para recubrir el fondo y los lados del molde evitando que la muestra se pegue al mismo.
- Horno o estufa: Capaz de mantener la temperatura dentro de un rango de $\pm 5^{\circ}\text{C}$ ($\pm 10^{\circ}\text{F}$) respecto a la temperatura requerida, la muestra se calienta hasta que sea lo suficientemente fluida para verter.
- Molde de bronce: Para fabricar las probetas, las dimensiones del molde deben ser tales que forme una briqueta con las dimensiones indicadas:

Dimensiones de la briqueta	
Longitud total	7.45 a 7.55 cm
Distancia entre sujetadores	2.97 a 3.03 cm
Ancho de la boca del sujetador	1.98 a 2.02 cm
Ancho de la parte más estrecha (punto medio entre sujetadores)	0.99 a 1.01 cm
Espesor	0.99 a 1.01 cm

Tabla 27. Dimensiones de la briqueta de ensayo

Fuente: NTE INEN 916

Procedimiento:

- Ensamblar el molde sobre la placa base de tal manera que estén unidos, sujetar el molde con el tornillo lateral; para evitar la adherencia del material a la placa y el molde, cubrir con una ligera capa de glicerina.
- Calentar el material asfáltico cuidadosamente (no mayor a 145°C) hasta que esté lo suficientemente fluido para verterlo en los moldes, y que además pase a través del tamiz $300\ \mu\text{m}$ (ASTM N°50).

- Colocar el material en un recorrido alternativo de extremo a extremo hasta llenar las probetas procurando no distorsionar el montaje de las piezas, evitar la inclusión de burbujas.
- Dejar enfriar a temperatura ambiente durante 30 a 40 minutos, sumergiendo en el baño de agua a una temperatura de 25 °C durante otros 30 minutos, enrasar la probeta de ensayo.
- El conjunto placa, molde y probeta se introduce de nuevo en el baño de agua a 25 °C durante 85 a 95 minutos, se retira la placa del molde, se quitan las piezas laterales y se comienza el ensayo.
- La probeta se monta en el ductilómetro, el mecanismo se pone en marcha, a la velocidad especificada hasta que se produzca la rotura midiéndose la distancia en cm. que se hayan separado ambas pinzas.
- Durante el ensayo la probeta mientras se estira deberá permanecer sumergida, sin aproximarse a la superficie o al fondo a una distancia menor de 25 cm.
- Generalmente el material se va estirando paulatinamente hasta formar un hilo y su posterior rotura, si el material tiende a subir o bajar, ajustar la densidad del agua añadiendo alcohol metílico (CH₃OH) o cloruro sódico (NaCl).
- Se ensayarán tres probetas por muestra y el valor medio obtenido se expresará como resultado de la ductilidad. Informar todas las condiciones en las que se realizó el ensayo [29].

**2.8.12.7. Viscosidad Saybolt de Materiales Bituminosos (ASTM D 88-07)
(NTE INEN 1981:94)**

El ensayo tiene por objeto determinar la viscosidad Saybolt Furol de los materiales bituminosos, empleando el viscosímetro Saybolt, la utilidad de este ensayo radica en la caracterización de determinados productos bituminosos e igualmente como elemento de uniformidad. En las definiciones dadas por la NTE INEN 1981:94, indica:

Viscosidad Saybolt Universal SSU: Es el tiempo en segundos de 60 cm³ de muestra a través de un orificio universal, calibrado a condiciones normalizadas. Se utiliza para tiempos de flujo igual o mayor que 32 segundos.

Viscosidad Saybolt Furol SSF: Es el tiempo en segundos de 60 cm³ de muestra a través de un orificio Furol (concentración de Fuel and Road oil), calibrado a condiciones normalizadas. Se utiliza para tiempos de flujo igual o mayor que 25 segundos.

Viscosidad Redwood N° 1: Es el tiempo de flujo en segundos de 50 cm³ de muestra a través de un orificio Redwood, calibrado a condiciones normalizadas.

Equipo

Viscosímetro Saybolt

- **Tubo de carga:** De material resistente a la corrosión, el extremo inferior del tubo será roscado con un tope para fijarlo dentro del baño, tendrá un tapón de corcho u otro material para prevenir que el material escurra antes del ensayo.
- **Baño termostático:** Provisto de un dispositivo de agitación y de medios de calentamiento o enfriamiento, este dispositivo se encontrará a una distancia mayor a 3 cm del tubo de carga. Además, sirve de soporte, para mantener la carga en posición vertical. La temperatura del baño termostático, para las temperaturas normales no deben diferir de las indicadas en la siguiente tabla:

Temperatura estándar de ensayo en °C	Líquido recomendado para el baño	Diferencia máxima de temperatura entre el baño y la muestra °C	Termómetro ASTM
21.1	Agua	± 0.05	17C
25.0	Agua	± 0.05	17C
37.8	Agua o aceite de 50 a 70 SSU a 37.8 °C	± 0.15	18C

50.0	Agua o aceite de 120 a 150 SSU a 37.8 °C	± 0.20	19C
54.4	Agua o aceite de 120 a 150 SSU a 37.8 °C	± 0.30	19C
60.0	Agua o aceite de 120 a 150 SSU a 37.8 °C	± 0.60	20C
82.2	Agua o aceite de 300 a 370 SSU a 37.8 °C	+ 0.80	21C
98.9	Aceite de 300 a 370 SSU a 37.8 °C	+ 1.10	22

Tabla 28. Temperatura del baño termostático

Fuente: NTE INEN 1981:94

- Copa Receptora: De vidrio con capacidad de $60 \pm 0.05 \text{ cm}^3$ a 20 °C.
- Embutido filtrador: Para filtrar la muestra del ensayo con malla intercambiable de 150 a 75 μm .
- Cronómetro: Con apreciación de ± 0.1 , empleado para medir los tiempos, la exactitud del 0.1% en 60 segundos.
- Pipeta: Para extraer el exceso de la muestra en el anillo de rebalse, deberá tener una punta lisa aproximadamente 3 mm de diámetro exterior y 2 mm de diámetro interior.

Calibración del viscosímetro Saybolt Universal

- Calibrar a intervalos periódicos, midiendo el tiempo de flujo a 37.8 °C, de un aceite estándar de viscosidad conocida de acuerdo a lo especificado en la siguiente tabla:

Viscosidad de aceites estándar	SSU a 37.8 °C	SSU a 98.9 °C	SSF a 50 °C
S3	36	-	-
S6	46	-	-
S20	100	-	-
S60	290	-	-
S200	930	-	-
S600	-	150	120

Tabla 29. Estándares de viscosidad de aceites para viscosímetro Saybolt Universal
Fuente: NTE INEN 1981:94

- El tiempo de flujo de la viscosidad de aceite estándar será igual al valor de la viscosidad Saybolt certificado.
- Si el tiempo de flujo excede del 0.2% del valor certificado, el factor de corrección se calcula de acuerdo con la ecuación:

$$F = \frac{V}{T}$$

Dónde:

F= Factor de corrección.

V= Viscosidad Saybolt certificado, en segundos.

T= Tiempo de flujo a 37.8 °C en segundos.

El factor de corrección que se aplica a todos los valores de viscosidad y para todas las temperaturas, se basa en el empleo de un aceite de viscosidad normalizado, cuyo tiempo de flujo está comprendido entre 200 y 00 segundos.

- Para calibrar el viscosímetro Saybolt Furol, se calibra el aparato a 50 °C en la misma forma que se indicó anteriormente, empleando un aceite de viscosidad normalizada, cuyo tiempo definido de flujo mínimo sea 90 segundos.

Procedimiento:

- Efectuar las determinaciones en un ambiente libre de corrientes de aire ni cambios bruscos de temperatura.
- Ubicar la muestra en el viscosímetro, de manera que no se contamine con polvo o vapores durante el ensayo.
- Las temperaturas de ensayo normalizadas para determinar la viscosidad Saybolt Universal son 21.1, 37.8, 54.4 y 98.9 °C (70, 100, 130 y 210 °F).
- Las temperaturas de ensayo normalizadas para determinar la viscosidad Saybolt Furol son 25,0 37.8, 50.0 y 98.9 °C (77, 100, 122 y 210 °F).
- Colocar verticalmente el tubo de carga y ensayar su alineación, con un nivel de burbuja sobre el plano del anillo.
- Emplear un corcho u otro medio adecuado para evitar el flujo de la muestra, hasta la iniciación del ensayo.
- Llenar el baño por lo menos 5 mm por encima del nivel de desborde interno del viscosímetro.
- Agitar el baño de manera que la temperatura de la muestra alcance la temperatura de ensayo y se mantenga constante.
- Si la temperatura de ensayo es mayor que la del ambiente, calentar el producto a no más de 20 °C sobre la temperatura del ensayo.
- Filtrar el producto a través de un tamiz de 150 a 75 μm , directamente en el viscosímetro hasta que su nivel se encuentre por encima del anillo de desborde.
- Calentar la muestra en su envase original a aproximadamente 50 °C (122 °F), agitándola y mezclándola para asegurarse de que todas las parafinas hayan desaparecido y mezclar bien.
- Verter aproximadamente 100 mL de muestra en un matraz Erlenmeyer de 125 mL y taponarlo sin apretar, con un corcho o tapón de goma.
- Sumergir el matraz en un baño de agua hirviendo durante 30 minutos.
- Agitar la muestra en el viscosímetro con la ayuda de un termómetro que esté equipado con su soporte. Utilizando movimientos circulares de 30 a 50 rpm, en un plano horizontal, cuando la temperatura del ensayo se mantenga constante en comparación con la temperatura de ensayo seleccionada retirar el termómetro.

- Colocar el tubo de extracción dentro de la cámara del viscosímetro en un determinado punto y aplicar succión para remover parte de la muestra hasta que la misma se encuentre por debajo del anillo de desborde.
- Verificar que la copa receptora está en la posición correcta, posteriormente retirar el corcho y simultáneamente poner en marcha el cronómetro, detener éste cuando el menisco del producto alcance la marca de 60 cm³ del cuello de la copa receptora.

CÁLCULOS

- Multiplicar el tiempo de flujo de la muestra, en segundos, por el factor de corrección para el viscosímetro, que se determinó empleando la fórmula para calibración.
- Reportar el tiempo de flujo corregido como la Viscosidad Saybolt Universal o Furol de la muestra, a la temperatura a la cual se ha desarrollado el ensayo.

2.8.13. Diseño de Mezcla Asfáltica

En el presente estudio se empleará el método Marshall, fue desarrollado durante la Segunda Guerra Mundial por Bruce Marshall, ex -ingeniero del Departamento de Carreteras del Estado de Mississippi, posteriormente el método fue aplicado para el uso en las vías.

El método Marshall mundialmente utilizado surge en el año de 1943 promovida por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de Estados Unidos, el método consistía en desarrollar un método para el diseño y control de mezclas asfálticas.

El método Marshall es aplicable para elaboración de mezclas cuyo agregado tenga como tamaño máximo nominal de 1 pulgada (25.0 mm.), caso contrario si el agregado es de mayor tamaño se usará el molde de 6 pulgadas de diámetro.

Las briquetas a elaborar con aceite de motor usado, se someterán a ensayos de estabilidad y flujo serán comparados en función del comportamiento de la mezcla con el asfalto base y con la modificación en porcentajes 1 y 2 por ciento, los

ensayos de laboratorio permitirán el análisis de resultados y permitirá establecer las respectivas conclusiones.

2.8.14. Mezcla de Agregados

En la fabricación de carpetas asfálticas, es fundamental utilizar la granulometría correcta, de esta manera se conseguirá una carpeta de rodadura de buena calidad. La calidad del agregado a utilizar está condicionada a especificaciones en las cuales se destacan el porcentaje de vacíos, el porcentaje de vacíos llenos de asfalto, estabilidad, fluencia, etc. Todas éstas dependen de la granulometría.

El procedimiento nos habla de encontrar la “Estabilidad Granulométrica”, con el fin de obtener la granulometría deseada, obteniendo la granulometría de cada uno de los materiales. La combinación de los agregados debe ser en proporciones de manera que la mezcla se encuentre dentro de los límites establecidos por las fajas granulométricas recomendadas, como ejemplo: De a=38% del agregado grueso y b=62% del agregado fino a partir de la ecuación:

$$P = A * a + B * b$$

Donde:

- P= Mezcla de agregados.
 - A, B= Pasante de cada tamiz, agregado grueso y fino respectivamente.
 - a,b= Porcentaje de agregado en la mezcla.
- La granulometría obtenida se compara con los límites de las especificaciones en la norma NEVI-12 en función de la mezcla asfáltica.

Tamiz (mm)	Tamaño Nominal Máximo del Agregado (mm)			
	19,0 mm (3/4")	12,5 mm (1/2")	9,5 mm (3/8")	4,75 mm
(1") 25,00	100			
(3/4") 19,00	90-100	100		
(1/2") 12,50		90-100	100	
(3/8") 9,50	56-80		90-100	100
(N°4) 4,75	35-65	44-74	55-85	80-100
(N°10) 2,36	23-49	28-58	32-67	65-100
(N°16) 1,18				40-80
(N°30) 0,6				25-65
(N°50) 0,3	5-19	5-21	7-23	7-40
(N° 100) 0,15				3-20
(N° 200)0,075	2-8	2-10	2-10	2-10

Tabla 30. Requisitos de Graduación para Agregados en Mezclas Asfálticas Densas

Fuente: Nevi-12

La granulometría de la mezcla obtenida se compara con los límites de las especificaciones de la norma NEVI-12 en función del tipo de mezcla asfáltica a realizar, para el presente estudio se ha seleccionado un tamaño máximo nominal de agregado de 1/2", cuya especificación se encuentra en la segunda columna de la tabla precedente a este párrafo.

2.8.15. Tamaño Máximo Nominal, a utilizar en la estabilización granulométrica

En las recomendaciones del instituto del asfalto:

- Para tráfico alto el espesor mínimo es de 2" (50 mm), para capa de roadura, se debe respetar la relación:

$$e > 3 * D$$

Donde:

- e= Espesor de la capa.
- D= Tamaño máximo nominal del agregado.

Para la selección del tamaño nominal a trabajar en la estabilización granulométrica se despeja "D", de la expresión anterior, entonces se tiene:

$$D < e/3$$

En el cálculo, si e=50 mm, D=16.67 mm, entonces el tamaño máximo nominal máximo nominal menor a este valor es para TMN= 1/2" (12.5 mm).

2.8.16. Cálculo de los porcentajes retenidos en cada tamiz para realizar briquetas.

La masa requerida para cada tamaño, especificados para una briqueta (masa individual) y masa total para la elaboración de briquetas se muestra en la siguiente tabla en total se elaboraron 45 briquetas. El número de briquetas se genera a partir de la elaboración de la mezcla asfáltica en caliente en total fueron 15 para una mezcla asfáltica con 1% de aceite de motor usado y 15 para la mezcla asfáltica con un 2% de aceite de motor usado.

El porcentaje retenido y la masa individual y total se calculan a partir de la siguiente ecuación:

$$\% \textit{Retenido} = \% \textit{Pasante Superior} - \% \textit{Pasante}$$

Donde:

- % Pasante Superior: Porcentaje pasante en peso del tamiz inmediatamente superior al tamaño del tamiz analizado.
- % Pasante: Porcentaje pasante en peso del tamiz analizado.

$$\textit{Masa individual} = \textit{Masa briqueta} * \% \textit{Retenido}$$

Donde:

- Masa de la briqueta: 1200 gr.
- % retenido: Porcentaje en peso retenido en cada tamiz.

Para el cálculo de la masa total, el resultado de la masa individual se multiplica por el número de briquetas que para el caso de estudio experimental son 45.

La mezcla de los agregados y asfalto en planta se realiza en tolvas, en la Mina Alvarado se seleccionan y posteriormente se mezclan tres clases de agregados con el asfalto (3/4", 3/8" y Agregado fino), el peso mezclado de los agregados pesa aproximadamente una tonelada larga.

El método de dosificación empleado por el laboratorista de la planta consiste en bachadas de 5000 gramos, dicha masa es utilizada para elaborar tres briquetas de 1200 gramos y una cuarta mezcla la cual es empleada para la ejecución del ensayo Rice, en total suman 4800 gramos.

El método de dosificación empleado cumple con los requerimientos granulométricos de la norma Nevi-12.

Tamiz	Abertura (mm)	% Retenido		
		3/4"	3/8"	Fino
1"	25	0,00	0,00	0,00
3/4"	19	7,80	0,00	0,00
1/2"	12,7	55,86	0,00	0,00
3/8"	9,5	83,91	1,35	0,00
N°4	4,75	99,72	89,69	0,29
N°8	2,36	99,88	99,81	12,51
N°50	0,3	99,89	99,95	68,30
N° 100	0,149	100,00	100,00	78,72
N°200	0,075	100,00	100,00	88,52

Tabla 31. Resultados granulométricos agregados

Fuente: Carlos Martínez

En la siguiente tabla se muestra la combinación de agregados cuyos porcentajes cumplen con los parámetros granulométricos de la norma Nevi-12.

Agregado		% Pasa			TOTAL	% ESPEC. ASTM	
		3/4"	3/8"	Fino			
% Material		16,67	32,18	51,15	100,00		
Tamiz	Abertura (mm)	290	560	890	1740	Lim. Inf.	Lím. Sup
1"	25	16,67	32,18	51,15	100,00	-	-
3/4"	19	15,37	32,18	51,15	98,70	100	100
1/2"	12,7	7,36	32,18	51,15	90,69	90	100
3/8"	9,5	2,68	31,75	51,15	85,58	-	-
N°4	4,75	0,05	3,32	51,00	54,37	44	74
N°8	2,36	0,02	0,06	44,75	44,83	28	58
N°50	0,3	0,02	0,02	16,22	16,25	5	21
N° 100	0,149	0,00	0,00	10,88	10,88	-	-
N°200	0,075	0,00	0,00	5,87	5,87	2	10

Tabla 32. Combinación de Agregados en planta

Fuente: Carlos Martínez

En el siguiente gráfico se muestra la combinación de los agregados, así como los límites superior e inferior de las especificaciones granulométricas de la norma Nevi-12 para agregados de tamaño nominal máximo de 1/2"

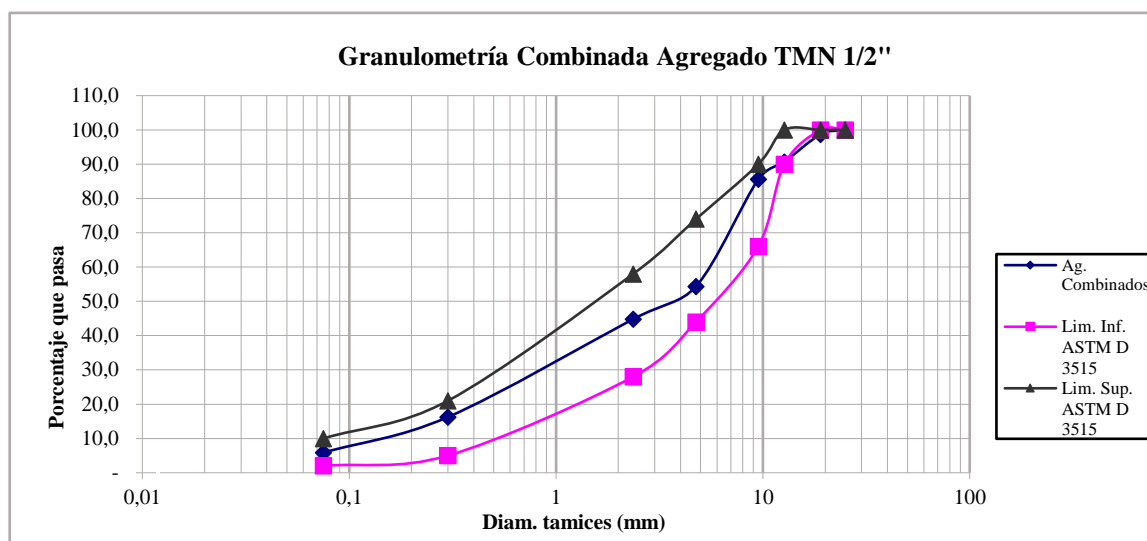


Ilustración 26. Granulometría combinada de agregados

2.8.17. Uso de la mezcla en la estructura del pavimento

Para el diseño de la mezcla asfáltica y elección de las características de la misma se consideran los siguientes datos.

- **Intensidad del tráfico:** Tráfico Alto
- **Tipo de capa:** Capa de rodadura.

Los parámetros mencionados anteriormente nos permiten determinar el tipo de mezcla a utilizar, así también el tamaño del agregado, también influye en el espesor de la capa a utilizar, determina además si se utilizará solo una capa de mezcla asfáltica o varias capas [30].

Capas de Superficie	Alta	○			○			○ ○ ○		
	Moderada	○			○ ○ ○			○ ○ ○		
	Baja	○			○ ○ ○			○ ○ ○		
	Tipo MA Caliente	Densa	Abierta	Discontinua	Densa	Abierta	Discontinua	Densa	Abierta	Discontinua
		Tráfico Bajo			Tráfico Medio			Tráfico Alto		
Capas Intermedias	Alta	○			○			○		
	Moderada	○			○ ○ ○			○ ○ ○		
	Baja	○			○			○ ○ ○		
	Tipo MA Caliente	Densa	Abierta	Discontinua	Densa	Abierta	Discontinua	Densa	Abierta	Discontinua
		Tráfico Bajo			Tráfico Medio			Tráfico Alto		
Capas de Base	Alta	○			○			○ ○		
	Moderada	○			○ ○ ○			○ ○ ○		
	Baja	○			○ ○			○ ○ ○		
	Tipo MA Caliente	Densa	Abierta	Discontinua	Densa	Abierta	Discontinua	Densa	Abierta	Discontinua
		Tráfico Bajo			Tráfico Medio			Tráfico Alto		

Gráfico 27. Recomendaciones generales para Selección del tipo mezcla asfáltica

Fuente: NEVI-12 Sección 812 3.3

2.9. Tipo de mezcla asfáltica

En función de la intensidad del tránsito se obtendrá una mezcla de gradación densa, en función de los siguientes parámetros: NEVI-12 SECCIÓN 812-3-3

El uso que tendrá la capa es rodadura, con intensidad de tráfico alta, para lo cual la norma NEVI-12, establece tres tipos de graduaciones: Densa, abierta y discontinua. El análisis de la mezcla se basa en las características que pueden influir sobre ella. Estas características son:

- ✓ Gravedad o Densidad específica de la mezcla (G_{mb}).
- ✓ Vacíos de aire (V_a).
- ✓ Vacíos del agregado mineral (VMA).
- ✓ Vacíos llenos de asfalto (VFA).
- ✓ Contenido de asfalto (P_b).

2.9.1. Gravedad o Densidad específica de la mezcla (G_{mb}).

Se la define como el peso unitario de la mezcla, se expresa en kilogramos por metro cúbico o libra por pie cúbico (kg/m^3 o lb/ft^3), si la densidad de una mezcla es alta, le dará mayor durabilidad a la misma.

Generalmente las mezclas elaboradas en laboratorio poseen una densidad mayor que aquellas elaboradas en sitio, debido a procesos de compactación diferentes, las especificaciones exigen que sea un porcentaje de densidad calculada en laboratorio (95%).

2.9.2. Vacíos de Aire (V_a)

Son pequeños espacios o bolsas de aire presentes en partículas de los agregados recubiertos con asfalto, están presentes en todo tipo de mezclas asfálticas, así como la densidad de la mezcla, teniendo una relación inversamente proporcional, es decir a mayor número de vacíos la mezcla presentará menor densidad, es contraproducente en la durabilidad de la capa de rodadura.

Por otro lado si se tiene una densidad alta, el porcentaje de vacíos será menor con mayor durabilidad en la capa de rodadura compactada, sin embargo los vacíos presentan especial importancia permitiendo que pueda existir alguna compactación adicional debido a las cargas de tráfico, además proporciona espacio por donde el asfalto puede fluir durante la compactación adicional.

Según lo propuesto en la Norma Ecuatoriana Vial NEVI-12 en la tabla 811-4.1, en los criterios Marshall, se especifica que para un tráfico de intensidad alta, el porcentaje de vacíos de aire en muestras en laboratorio es del 3% al 5%, de tal manera se ratifica el uso de la mezcla de tipo densa. En la siguiente tabla se presentan los límites en cuanto a granulometría a usar en función del tamaño máximo nominal del agregado: 1/2".

2.9.3. Vacíos en el Agregado mineral (VMA).

Son un porcentaje en volumen de la mezcla asfáltica, los espacios existentes entre las partículas de agregados que conforman la mezcla asfáltica compactada, constituyen los espacios disponibles para distribuir el volumen de asfalto efectivo, por lo tanto, mientras mayor sea el volumen del agregado mineral tendrá mayor espacio para distribuir la película de asfalto.

En la norma Ecuatoriana Vial NEVI-12, establece valores límite según el tamaño máximo nominal de la combinación de agregados, presentados en la siguiente tabla:

TMN		VMA mínimo %		
		Vacíos de Aire de Diseño %		
mm	in	3.0	4.0	5.0
4.75	Nº4	16	17	18
9.50	3/8	14	15	16
12.50	1/2	13	14	15
19.00	3/4	12	13	14

Tabla 33. Vacíos en el Agregado mineral en la mezcla asfáltica

Fuente: Nevi-12

Mientras mayor sea la película de asfalto que cubre a los agregados, mayor será la durabilidad de la mezcla asfáltica.

2.9.4. Vacíos llenos de asfalto (VFA)

Comprenden los espacios intergranulares llenos de cemento asfáltico, los vacíos llenos de asfalto resultan de restar los vacíos de aire y los vacíos del agregado mineral, esta cantidad dividida para los vacíos del agregado mineral.

2.9.5. Contenido de asfalto (P_b)

Se determinará con la mayor exactitud posible en el laboratorio, mientras que en campo debe ser controlado, ya que la cantidad de asfalto determinará la durabilidad del pavimento. El contenido óptimo de asfalto dependerá de la granulometría de los agregados empleados en la mezcla asfáltica, la absorción, , gradación; por consiguiente a mayor cantidad de finos se requerirá mayor contenido de asfalto, igualmente la capacidad de absorción del material (agregado) juega un papel importante al determinar el contenido óptimo de asfalto. El porcentaje absorbido en una mezcla es la cantidad de cemento

asfáltico añadido para obtener las características y propiedades anheladas en el diseño de la mezcla asfáltica en caliente.

El contenido de asfalto efectivo, es definido como aquel que no es retenido por el agregado, también se conoce como la cantidad de asfalto que forma una película sobre la superficie del agregado, se calcula como la diferencia entre el asfalto absorbido y el contenido total del asfalto empleado [31].

Una mezcla asfáltica está conformada por agregado, asfalto absorbido, asfalto y aire, como se detalla en la siguiente sección:

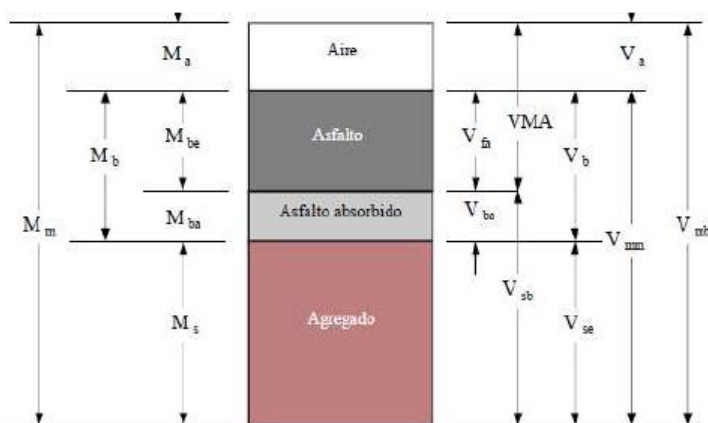


Gráfico 28. Composición mezcla asfáltica

Fuente: Asphalt Institute 7th edition

M_m = Masa total de la mezcla.

M_a = Masa de aire.

M_b = Masa de asfalto.

M_{ba} = Masa de asfalto absorbido.

M_{be} = Masa de asfalto efectivo.

M_s = Masa de agregado.

VMA = Volumen de vacíos en agregado mineral.

V_{mb} = Masa de asfalto.

V_{mm} = Volumen de la mezcla asfáltica sin vacíos.

V_{fa} = Volumen de vacíos llenados con asfalto.

V_a = Volumen de vacíos de aire.

V_b = Volumen de asfalto.

V_{ba} = Volumen de asfalto absorbido.

V_{sb} = Volumen del agregado mineral (Gravedad específica bruta de la masa).

V_{sa} = Volumen específico de agregado mineral (Gravedad específica efectiva).

2.9.6. Porcentaje teórico óptimo de asfalto para briquetas

Al determinar el contenido de asfalto de diseño para una mezcla o gradación particular de agregados por el Método Marshall, se preparan una gama de

muestras con diferentes contenidos de asfalto, el objetivo es lograr datos de prueba con relaciones bien definidas. Los diferentes porcentajes de asfalto para la mezcla asfáltica deben planificarse sobre la base de incrementos de 0.5 por ciento de contenido de asfalto, con al menos dos contenidos de asfalto por encima del valor esperado de diseño y al menos dos por debajo de este valor. El contenido de asfalto de “diseño esperado” puede ser basado en: la experiencia, fórmula computacional, o realizar el centrifugado de equivalencia de querosén o pruebas de remojo Hveem. El contenido de asfalto de diseño esperado, en porcentaje por el peso total de la mezcla, podría entonces estimarse en aproximadamente equivalente al porcentaje del agregado en la gradación final pasando el tamiz N° 200.

Un ejemplo de una fórmula computacional es esta ecuación:

$$P = 0.035a + 0.045b + Kc + F$$

Donde:

- P= Porcentaje de asfalto con respecto al peso del material
- a= Porcentaje del material retenido en el tamiz N°8.
- b= Porcentaje de material que pasa el tamiz N°8 y se retiene en el N°200.
- c= Porcentaje que pasa el tamiz N° 200.
- K= 0.15 para un 11-15% que pasa el tamiz N°200, 0.18 para 6-10% que pasa el tamiz N°200, 0.20 para un 5% o menos que pasa el tamiz N°200.
- F= 0-2.0 por ciento. Basado en la absorción de agregados ligeros o pesados, en ausencia de otros datos, se sugiere un valor de 0.7. Para proporcionar datos adecuados, al menos se preparan tres muestras para cada contenido de asfalto seleccionado. Por lo tanto, un diseño de mezcla Marshall usa cinco contenidos de asfalto diferentes requerirá normalmente al menos 15 muestras de prueba. Cada muestra de prueba normalmente requerirá aproximadamente 1.2 kg (2.7 lb.) de agregado.

Los requisitos mínimos agregados para una serie de muestras de prueba de una mezcla y graduación será de aproximadamente 23 kg (50 lb). Unos 4 litros (1 galón) de cemento asfáltico será adecuado [28].

2.10. Preparación y Fabricación de Briquetas Cilíndricas ensayo Marshall

La dosificación de los agregados con los diferentes porcentajes de asfalto se realizó en 5000 gramos, los pesos de material para cada mezcla asfáltica convencional y sin modificar se muestran en las siguientes tablas:



		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL					
“EFECTOS EN LA ADICIÓN DE ACEITE DE MOTOR USADO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE”							
“DOSIFICACIÓN AGREGADOS 0% ACEITE DE MOTOR USADO”							
ORIGEN:		CANTERA ALVARADO-AMBATO					
PESO MUESTRA:		5000 gr					
ENSAYADO POR:		Carlos Martínez Herrera			FECHA: 25/01/2021		
MATERIAL	PORCENTAJE	PUNTO 1 (gr)	PUNTO 2 (gr)	PUNTO 3 (gr)	PUNTO 4 (gr)	PUNTO 5 (gr)	
3/4"	16.7	791.7	787.5	783.3	779.2	775	
3/8"	32.2	1528.7	1520.7	1512.6	1504.6	1496.6	
Arena	51.1	2429.6	2416.8	2404.0	2391.6	2378.4	
TOTAL	100	4750	4725	4700	4675	4650	
% AC 20		5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	
Peso AC 20		250	275	300	325	350	

Tabla 34. Dosificación Agregados y Asfalto mezcla asfáltica convencional

Fuente: Carlos Martínez



 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL						
“EFECTOS EN LA ADICIÓN DE ACEITE DE MOTOR USADO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE”						
“DOSIFICACIÓN AGREGADOS 1% ACEITE DE MOTOR USADO”						
ORIGEN:		CANTERA ALVARADO-AMBATO				
PESO MUESTRA:		5000 gr				
ENSAYADO POR:		Carlos Martínez Herrera			FECHA: 25/01/2021	
MATERIAL	PORCENTAJE	PUNTO 1 (gr)	PUNTO 2 (gr)	PUNTO 3 (gr)	PUNTO 4 (gr)	PUNTO 5 (gr)
3/4"	16.7	791.7	787.5	783.3	779.2	775
3/8"	32.2	1528.7	1520.7	1512.6	1504.6	1496.6
Arena	51.1	2429.6	2416.8	2404.0	2391.6	2378.4
TOTAL	100	4750	4725	4700	4675	4650
% AC 20		5.0	5.5	6.0	6.5	7.0
Peso AC 20		247.5	272.25	297	321.75	346.5
Peso ACM		2.5	2.75	3	3.25	3.5

Tabla 35. Dosificación Agregados y Asfalto mezcla modificada con 1% ACM

Fuente: Carlos Martínez

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL						
“EFECTOS EN LA ADICIÓN DE ACEITE DE MOTOR USADO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE”						
“DOSIFICACIÓN AGREGADOS 2% ACEITE DE MOTOR USADO”						
ORIGEN:		CANTERA ALVARADO-AMBATO				
PESO MUESTRA:		5000 gr				
ENSAYADO POR:		Carlos Martínez Herrera			FECHA: 25/01/2021	
MATERIAL	PORCENTAJE	PUNTO 1 (gr)	PUNTO 2 (gr)	PUNTO 3 (gr)	PUNTO 4 (gr)	PUNTO 5 (gr)
3/4"	16.7	791.7	787.5	783.3	779.2	775
3/8"	32.2	1528.7	1520.7	1512.6	1504.6	1496.6
Arena	51.1	2429.6	2416.8	2404.0	2391.6	2378.4
TOTAL	100	4750	4725	4700	4675	4650
% AC 20		5.0	5.5	6.0	6.5	7.0
Peso AC 20		245	269.5	294	318.5	343
Peso ACM		5.0	5.5	6.0	6.5	7.0

Tabla 36. Dosificación Agregados y Asfalto mezcla modificada con 2% ACM

Fuente: Carlos Martínez

2.11. Proceso de Cálculo, Método Marshall

Para el método Marshall se realizan varios cálculos necesarios para saber el comportamiento de la mezcla en función de su contenido de asfalto y después obtener mediante gráficas el contenido óptimo de asfalto para la mezcla realizada. A continuación, se enuncian los cálculos que se realizan para el método con sus respectivas fórmulas.

2.11.1. Gravedad Específica Bulk agregados

Las gravedades específicas son obtenidas en el laboratorio individualmente por cada fracción de agregado pétreo. Para el cálculo respectivo de Gravedades específicas Bulk y Aparente, se determina mediante las siguientes fórmulas:

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

El cálculo se realiza para cada agregado.

$$G_{sb} = \frac{100}{\frac{Agr_1}{(P_1 \times G_{sb1}) + (R_1 \times G_{sb1})} + \frac{Agr_2}{(P_2 \times G_{sb2}) + (R_2 \times G_{sb2})} + \dots + \frac{Agr_n}{(P_n \times G_{sbn}) + (R_n \times G_{sbn})}}$$

Donde:

Agr_1, Agr_2, Agr_n = Porcentaje de cada agregado en la mezcla.

P_1, P_2, P_n = Porcentajes que pasa la malla N°4 de cada agregado.

R_1, R_2, R_n = Porcentajes que retiene la malla N°4 de cada agregado.

Gsb_1, Gsb_2, Gsb_n = Gravedades Específicas Bulk de cada agregado.

2.11.2. Gravedad Específica Teórica Máxima (Gmm), Ensayo RICE (Norma ASTMD 2041)

El ensayo emplea una bomba de vacíos a una muestra asfáltica seca, se introduce una muestra suelta, previamente pesada como lo establece la tabla () en la olla de vacíos a una temperatura de 25 °C. Durante 15 minutos se deja encendida la bomba de vacíos, después se pesa la muestra más la olla de vacíos llena de agua a la misma temperatura.

Se emplea la siguiente fórmula para calcularla:

$$G_{mm} = \frac{A}{A + B - C}$$

Donde:

A= Peso en el aire de la mezcla asfáltica secada al horno.

B= Peso del Picnómetro de Vacío Lleno de Agua a 25 °C ± 1°C (77°F).

C= Peso del Picnómetro de Vacío Lleno de Agua y Mezcla Asfáltica a 25 °C.

Tamaño máximo nominal de la partícula en la muestra; mm (pulgada)	Muestra mínima (gr)
50.0 (2)	6000
37.5 (1 1/2)	4000
25.0 (1)	2500
19,0 (3/4)	2000
12.5 (1/2)	1500
9.5 (3/8)	1000
4.75 (N°4)	500

Tabla 37. Gravedad específica teórica máxima de acuerdo al tamaño máximo nominal de partícula

Fuente: ASTM D 2041

Los resultados del ensayo RICE para determinar la Gravedad Específica Teórica Máxima del diseño se encuentran tabulados en el capítulo 3.

2.11.3. Gravedad Específica Bulk de la Mezcla Asfáltica Compactada (Norma ASTM D 2726)

El ensayo consiste en introducir las probetas en un baño de agua a 25 °C por 5 minutos, previamente se debe tomar el peso seco de las probetas, se procede a secarlas superficialmente y pesarlas. En el momento de introducirlas en una

canasta para ser pesadas en agua a la misma temperatura individualmente, se calcula con la siguiente expresión:

$$\text{Gravedad Específica Bulk} = \frac{A}{B - C}$$

Donde:

A= Masa de la probeta seca en el aire.

B= Masa en el aire de probeta saturada superficialmente.

C= Masa de la probeta en agua.

2.11.4. Gravedad Específica Efectiva de la Mezcla (Gse)

Este tipo de gravedad incluye todos los espacios en las partículas de agregados pétreos a excepción de los que absorbe el cemento asfáltico, se determina mediante la siguiente ecuación:

$$G_{se} = \frac{\frac{P_{mm} - P_b}{G_{mm}} - \frac{P_b}{G_b}}{\frac{P_{mm} - P_b}{G_{mm}} - \frac{P_b}{G_b}}$$

Donde:

G_{mm}= Gravedad específica teórica Máxima (Ensayo Rice).

P_{mm}= Porcentaje de masa del total de la mezcla suelta=100

P_b= Contenido de cemento asfáltico.

G_b= Gravedad específica del cemento asfáltico.

2.11.5. Porcentaje de Vacíos (Va)

En la mezcla asfáltica compactada consiste en pequeños espacios de aire entre las partículas de agregado, el porcentaje de vacíos de aire puede determinarse usando:

$$Va = 100 * \left[1 - \frac{G_{mb} - P_s}{G_{sb}} \right]$$

Donde:

G_{mb} = Gravedad Específica Bulk de la mezcla compactada.

P_s = Porcentaje del agregado en la briqueta.

G_{sb} = Gravedad Específica Bulk de los agregados.

2.11.6. Porcentaje de vacíos de Agregado mineral (VAM)

Incluye los vacíos de aire y del volumen de asfalto efectivo. Se calcula a partir de la gravedad específica de la briqueta, la gravedad bulk de los agregados y del porcentaje de asfalto.

$$VAM = 100 - \left[\frac{G_{mb} * (100 - P_b)}{G_{sb}} \right]$$

Donde:

G_{mb} = Densidad bulk de la mezcla asfáltica compactada.

P_b = Porcentaje del agregado en la briqueta.

G_{sb} = Gravedad Especifica Bulk de los agregados.

2.11.7. Contenido de asfalto efectivo

En una mezcla de pavimento es el volumen total de asfalto, menos la cantidad de asfalto perdido por absorción dentro de las partículas del agregado, es decir es la porción de la cantidad total de asfalto que se queda como una capa en el exterior de la partícula del agregado, siendo la proporción que gobierna el desempeño de una mezcla asfáltica, cuya fórmula es:

$$P_{ba} = 100 * \left[\frac{G_{se} - G_{sb}}{G_{sb} * G_{se}} \right] * G_b$$

Donde:

P_{be} = Contenido de asfalto efectivo, porcentaje de la masa total de la mezcla.

P_b = Contenido de asfalto, porcentaje de la masa total de la mezcla.

P_{ba} = Asfalto absorbido, porcentaje de la masa del agregado.

P_s = Contenido de agregado, porcentaje total de la masa de la mezcla

2.11.8. Porcentaje de vacíos llenos de Asfalto (VFA)

Es el porcentaje de vacíos en el agregado mineral que son llenados por el asfalto, no incluyendo el asfalto absorbido, se determina usando:

$$VFA = 100 * \frac{VMA - V_a}{VMA}$$

Donde:

VFA= Vacíos llenados con asfalto, porcentaje de VMA.

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

V_a= Vacíos de aire en mezclas compactadas, porcentaje del volumen total [32].

2.11.9. Determinación de Estabilidad y flujo (ASTM D-1559)

El valor de la estabilidad es una medida de la carga bajo la cual una probeta cede o falla totalmente, la estabilidad Marshall indica la resistencia de una mezcla asfáltica a la deformación, estabilidades muy elevadas no siempre indican confiabilidad. Estabilidades extremadamente altas indican sacrificio de durabilidad, un valor de estabilidad demasiado alto no siempre es bueno, pero todo dependerá de las sollicitaciones del tráfico para un determinado proyecto.

El flujo es un parámetro que se produce en la probeta ensayada en la carga máxima y su valor es el promedio de las tres briquetas realizadas para cada porcentaje de asfalto analizado.

Equipo:

- Prensa de carga Marshall.
- Cabezales de prueba.
- Deformímetro.

Procedimiento:

- Colocar la briqueta elaborada en baño maría, se debe sumergir la probeta totalmente durante 30 minutos a 60°C.

- Precalentar y lubricar los cabezales, una vez lista la briqueta colocar en los cabezales y aplicar la carga, colocando el dial de deformación encerado.
- Suspender la carga una vez que se obtenga la carga máxima, es decir cuando los cabezales superior e inferior se acercan al igual que la lectura en el indicador del dial queda registrada.
- Registrar la carga máxima indicada por el medidor como valor de estabilidad Marshall.

CAPÍTULO III

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Contenido de Humedad Agregado Grueso 3/4”

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL 		
“EFECTOS EN LA ADICIÓN DE ACEITE DE MOTOR USADO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE” “ HUMEDAD AGREGADO 3/4” ”		
ORIGEN:	CANTERA ALVARADO-AMBATO	
ENSAYADO POR:	Carlos Martínez Herrera	FECHA: 12/01/2021
NORMA:	NTE INEN 862	
Muestra	M5	M6
Peso Recipiente (A)	43.50	43.50
Peso Recipiente + Suelo Natural (B)	342.35	338.40
Peso del Suelo Natural (C=B-A)	298.85	294.90
Peso Recipiente + Muestra Seca (D)	338.45	336.24
Peso Muestra Seca (E=D-A)	294.95	292.74
Peso del Agua (F=B-D)	3.90	2.16
Humedad (G=(F/C)*100	1.31%	0.73%

Tabla 38. Resultados Ensayo de Humedad Agregado 3/4”

Fuente: Carlos Martínez

3.2. Contenido de Humedad Agregado 3/8”

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL 		
“EFECTOS EN LA ADICIÓN DE ACEITE DE MOTOR USADO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE” “ HUMEDAD AGREGADO 3/8” ”		
ORIGEN:	CANTERA ALVARADO-AMBATO	
ENSAYADO POR:	Carlos Martínez Herrera	FECHA: 12/01/2021
NORMA:	NTE INEN 862	
Muestra	M3	M4
Peso Recipiente (A)	43.50	43.50
Peso Recipiente + Suelo Natural (B)	315.10	310.31
Peso del Suelo Natural (C=B-A)	271.60	266.80
Peso Recipiente + Muestra Seca (D)	311.25	308.62
Peso Muestra Seca (E=D-A)	267.75	265.12
Peso del Agua (F=B-D)	3.85	1.69
Humedad (G=(F/C)*100	1.42%	0.63%

Tabla 39. Resultado Ensayo de Humedad Agregado 3/8”

Fuente: Carlos Martínez

3.3. Contenido de Humedad Agregado Fino

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL 		
“EFECTOS EN LA ADICIÓN DE ACEITE DE MOTOR USADO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE”		
“HUMEDAD AGREGADO FINO”		
ORIGEN:	CANTERA ALVARADO-AMBATO	
ENSAYADO POR:	Carlos Martínez Herrera	FECHA: 12/01/2021
NORMA:	NTE INEN 862	
Muestra	M1	M2
Peso Recipiente (A)	43.50	43.50
Peso Recipiente + Suelo Natural (B)	219.19	218.2
Peso del Suelo Natural (C=B-A)	175.69	174.7
Peso Recipiente + Muestra Seca (D)	217.11	216.31
Peso Muestra Seca (E=D-A)	173.61	172.81
Peso del Agua (F=B-D)	2.08	1.89
Humedad (G=(F/C)*100)	1.18%	1.08%

Tabla 40. Resultado Ensayo de Humedad Agregado Fino

Fuente: Carlos Martínez

3.4. Resultado ensayo de Abrasión Agregado 3/4"



 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL 							
“EFECTOS EN LA ADICIÓN DE ACEITE DE MOTOR USADO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE”							
“ABRASIÓN AGREGADO GRUESO 3/4”							
ORIGEN:	CANTERA ALVARADO-AMBATO						
PESO MUESTRA (gr):	5000,00						
ENSAYADO POR:	Carlos Martínez Herrera	FECHA: 12/01/2021					
NORMA:	NTE INEN 860-ASTM C-31						
DIÁMETRO				MÉTODO			
Pasa el Tamiz		Retenido en Tamiz		A	B	C	D
N°	“mm”	N°	“mm”	Cantidad de Material a Emplear			
1 1/2	37.50	1	25.00	1250 ± 25			
1	25.00	3/4	19.00	1250 ± 25			
3/4	19.00	1/2	12.50	1250 ± 10	2500 ± 10		
1/2	12.50	3/8	9.50	1250 ± 10	2500 ± 10		
3/8	9.50	1/4	6.25			2500 ± 10	
1/4	6.25	N°4	4.76			2500 ± 10	
N°4	4.76	N°8	2.38				5000 ± 10
Peso Total				5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10
Número de Esferas				12	11	8	6
Número de Revoluciones				500	500	500	500
Tiempo de Rotación “min”				15	15	15	15
$\%Desg = \frac{W_{inicial} - W_{final}}{W_{inicial}} \times 100$							
Descripción				Unidad	3/4"		
Peso de la Muestra				A	gr	5000,00	
Retenido Tamiz N° 12 (Después 500 rev)				B	gr	3160,20	
Cantidad que pasa el Tamiz N° 12				C	gr	1839,80	
Porcentaje de Desgaste (D= C/A*100)					%	36,80	

Tabla 41. Resultado Ensayo de Abrasión Agregado 3/4"

Fuente: Carlos Martínez

3.5. Resultado Ensayo de Abrasión Agregado 3/8"



		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL					
“EFECTOS EN LA ADICIÓN DE ACEITE DE MOTOR USADO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE”							
“ABRASIÓN AGREGADO GRUESO 3/8”							
ORIGEN:		CANTERA ALVARADO-AMBATO					
PESO MUESTRA (gr):		5000,00					
ENSAYADO POR:		Carlos Martínez Herrera			FECHA: 12/01/2021		
NORMA:		NTE INEN 860-ASTM C-31					
DIÁMETRO				MÉTODO			
Pasa el Tamiz		Retenido en Tamiz		A	B	C	D
N°	“mm”	N°	“mm”	Cantidad de Material a Emplear			
1 1/2	37.50	1	25.00	1250 ± 25			
1	25.00	3/4	19.00	1250 ± 25			
3/4	19.00	1/2	12.50	1250 ± 10	2500 ± 10		
1/2	12.50	3/8	9.50	1250 ± 10	2500 ± 10		
3/8	9.50	1/4	6.25			2500 ± 10	
1/4	6.25	N°4	4.76			2500 ± 10	
N°4	4.76	N°8	2.38				5000 ± 10
Peso Total				5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10
Número de Esferas				12	11	8	6
Número de Revoluciones				500	500	500	500
Tiempo de Rotación “min”				15	15	15	15
$\%Desg = \frac{W_{inicial} - W_{final}}{W_{inicial}} \times 100$							
Descripción				Unidad	3/8”		
Peso de la Muestra				A	gr	5000,00	
Retenido Tamiz N° 12 (Después 500 rev)				B	gr	3156,10	
Cantidad que pasa el Tamiz N° 12				C	gr	1843,90	
Porcentaje de Desgaste (D= C/A*100)					%	36,88	

Tabla 42. Resultado ensayo de Abrasión Agregado 3/8"

Fuente: Carlos Martínez

3.6. Granulometría Agregado 3/4"



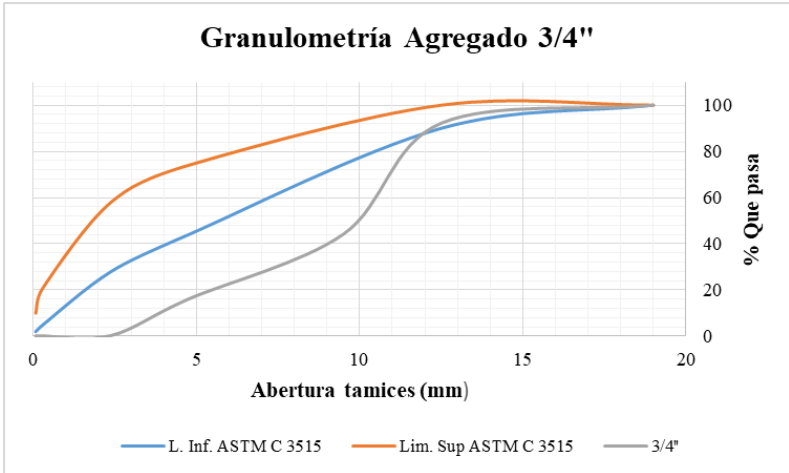


		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL					
“EFECTOS EN LA ADICIÓN DE ACEITE DE MOTOR USADO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE”							
“ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO AGREGADO 3/4”							
ORIGEN:		CANTERA ALVARADO-AMBATO					
PESO MUESTRA (gr):		6000 gr		PÉRDIDA DE MUESTRA (%): 0,6%			
ENSAYADO POR:		Carlos Martínez Herrera		FECHA: 05/01/2021			
NORMA:		NTE INEN 872					
Tamiz	Abertura (mm)	Retenido parcial (gr)	Retenido acumulado (gr)	% Retenido Acumulado	% que pasa	Límites ASTM % que pasa	
3/4"	19.0	0	0	0,00	100,00	100	100
1/2"	12.5	467,20	467,20	7,79	92,21	90	100
3/8"	9.5	2880,20	3347,40	55,83	44,17	-	-
N°4	4.76	1681,40	5028,80	83,87	16,13	44	74
N°8	2.38	949,20	5978,00	99,70	0,30	28	58
N°50	0.297	9,80	5987,80	99,86	0,14	5	21
N°200	0.075	1,80	5989,60	99,89	0,11	2	10
FUENTE		6,40	5996,00	0,11			
ERROR ADMISIBLE:		0,6% < 1%					
TAM. NOM. MÁXIMO.:		1/2"					
							
Gráfico 29. Granulometría Agregado 3/4"							

Tabla 43. Resultado Granulometría Agregado 3/4"

Fuente: Carlos Martínez

3.7. Granulometría Agregado 3/8"

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL 							
“EFECTOS EN LA ADICIÓN DE ACEITE DE MOTOR USADO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE”							
“ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO AGREGADO 3/8”							
ORIGEN:	CANTERA ALVARADO-AMBATO						
PESO MUESTRA (gr):	6000 gr PÉRDIDA DE MUESTRA (%): 0,13%						
ENSAYADO POR:	Carlos Martínez Herrera FECHA: 05/01/2021						
NORMA:	NTE INEN 872						
Tamiz	Abertura (mm)	Retenido parcial (gr)	Retenido acumulado (gr)	% Retenido Acumulado	% que pasa	Límites ASTM % que pasa	
3/4"	19.0	0	0	0,00	100,00	100	100
1/2"	12.5	0	0	0,00	100,00	90	100
3/8"	9.5	0	0	0,00	100,00	-	-
N°4	4.76	80,8	80,8	1,35	98,65	44	74
N°8	2.38	5287	5367,8	89,46	10,54	28	58
N°50	0.297	610,8	5978,6	99,64	0,36	5	21
N°200	0.075	10,6	5989,2	99,82	0,18	2	10
FUENTE		3	5992,2	0,05			
ERROR ADMISIBLE:	0,13% < 1%						
TAM. NOM. MÁXIMO:	N°4						

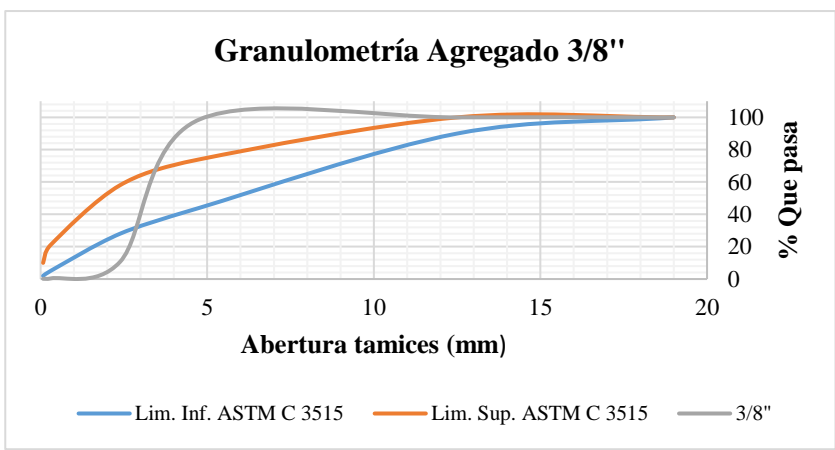




Gráfico 30. Granulometría Agregado 3/8"

Tabla 44. Resultado Granulometría Agregado 3/8"

Fuente: Carlos Martínez

3.8. Granulometría Agregado Fino

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL					
“EFECTOS EN LA ADICIÓN DE ACEITE DE MOTOR USADO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE”							
“ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO AGREGADO FINO”							
ORIGEN:		CANTERA ALVARADO-AMBATO					
PESO MUESTRA (gr):		500 gr				PÉRDIDA DE MUESTRA (%): 0,13%	
ENSAYADO POR:		Carlos Martínez Herrera				FECHA: 05/01/2021	
NORMA:		NTE INEN 872					
Tamiz	Abertura (mm)	Retenido parcial (gr)	Retenido acumulado (gr)	% Retenido Acumulado	% que pasa	Límites ASTM % que pasa	
¾”	19.0	0	0	0,00	100,00	100	100
½”	12.5	0	0	0,00	100,00	90	100
3/8”	9.5	0	0	0,00	100,00	-	-
N°4	4.76	0	0	0,00	100,00	44	74
N°8	2.38	2,4	2,4	0,55	99,45	28	58
N°50	0.297	62,6	65	15,03	85,97	5	21
N°200	0.075	270,6	335,6	77,58	22,42	2	10
FUENTE		97	432,6	86,52			
MÓDULO DE FINURA:		1.80					

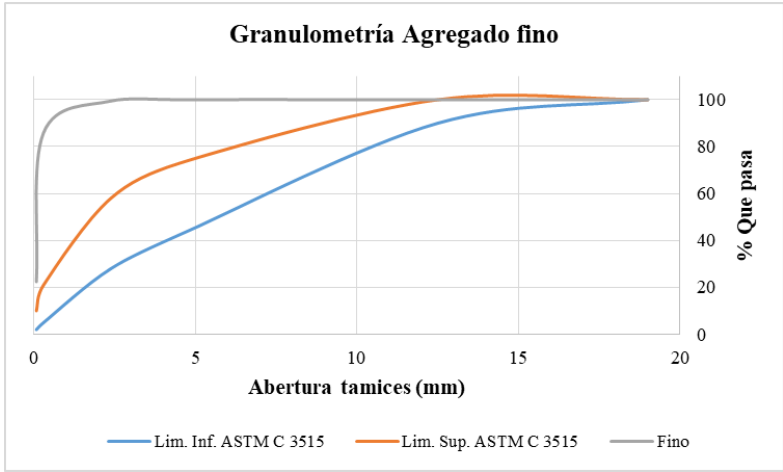


Gráfico 31. Granulometría Agregado fino

Tabla 45. Resultado Granulometría Agregado Fino

Fuente: Carlos Martínez

3.9. Gravedades Específicas y Absorción Agregado 3/4"


 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL 			
"EFECTOS EN LA ADICIÓN DE ACEITE DE MOTOR USADO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE"			
<i>"Gravedad Específica del Agregado Grueso 3/4"</i>			
ORIGEN:	CANTERA ALVARADO-AMBATO		
ENSAYADO POR:	Carlos Martínez Herrera	FECHA: 21/01/2021	
NORMA:	NTE INEN 857		
<i>DATOS</i>	<i>DESCRIPCIÓN</i>	<i>Unidad</i>	<i>Valor</i>
M1	Masa de la canastilla en el aire	gr	1236.00
M2	Masa de la canastilla en el agua	gr	1071.00
M3	Masa de la canastilla + muestra SSS en el aire	gr	6780.80
M4	Masa de la canastilla + muestra SSS en el agua	gr	4509.00
DA	Densidad real del agua	gr/cm ³	0.997
M5=M3-M1	Masa de la muestra SSS en el aire	gr	5544.80
M6=M4-M2	Masa de la muestra SSS en el agua	gr	3438.00
VR=(M5-M6)/DA	Volumen real de la muestra	cm ³	2113.14
G _{sssb} =M5/(M5-M6)	GRAVEDAD SSS BULK	gr/cm ³	2.632
<i>"Capacidad de Absorción del Agregado Grueso"</i>			
M7	Masa del recipiente	gr	1236.00
M8	Masa del recipiente + muestra SSS	gr	6780.80
M9=M8-M7	Masa de la muestra SSS	gr	5544.80
M10	Masa del recipiente + muestra seca	gr	6652.00
M11=M10-M7	Masa de la muestra seca	gr	5416.00
G _{sb} = M11/(M5-M6)	GRAVEDAD ESPECÍFICA SECA BULK	gr/cm ³	2.571
G _{sa} = M11/(M11-M6)	GRAVEDAD ESPECÍFICA SECA APARENTE	gr/cm ³	2.738
CA=((M9-M11)/M11)*100	Capacidad de absorción	gr	2.363%

Tabla 46. Resultados Gravedades Específicas y Absorción Agregado 3/4"

Fuente: Carlos Martínez

3.10. Gravedades Específicas y Absorción Agregado 3/8”



 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL 			
“EFECTOS EN LA ADICIÓN DE ACEITE DE MOTOR USADO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE”			
“ <i>Densidad Real del Agregado Grueso 3/8”</i> ”			
ORIGEN:	CANTERA ALVARADO-AMBATO		
ENSAYADO POR:	Carlos Martínez Herrera	FECHA: 21/01/2021	
NORMA:	NTE INEN 857		
<i>DATOS</i>	<i>DESCRIPCIÓN</i>	<i>Unidad</i>	<i>Valor</i>
M1	Masa de la canastilla en el aire	gr	1236.00
M2	Masa de la canastilla en el agua	gr	1071.00
M3	Masa de la canastilla + muestra SSS en el aire	gr	6280.40
M4	Masa de la canastilla + muestra SSS en el agua	gr	6115.40
DA	Densidad real del agua	gr/cm ³	0.997
M5=M3-M1	Masa de la muestra SSS en el aire	gr	5044.40
M6=M4-M2	Masa de la muestra SSS en el agua	gr	3075.20
VR=(M5-M6)/DA	Volumen real de la muestra	cm ³	1975.12
G _{SSS} =M5/(M5-M6)	GRAVEDAD SSS BULK	gr/cm ³	2.562
“ <i>Capacidad de Absorción del Agregado Grueso”</i> ”			
M7	Masa del recipiente	gr	1236.00
M8	Masa del recipiente + muestra SSS	gr	6280.40
M9=M8-M7	Masa de la muestra SSS	gr	5044,40
M10	Masa del recipiente + muestra seca	gr	6131.00
M11=M10-M7	Masa de la muestra seca	gr	4895.00
G _{sb} = M11/(M5-M6)	GRAVEDAD ESPECÍFICA SECA BULK	gr/cm ³	2.486
G _{sa} = M11/(M11-M6)	GRAVEDAD ESPECÍFICA SECA APARENTE	gr/cm ³	2.690
CA=((M9-M11)/M11)*100	Capacidad de absorción	gr	3.05%

Tabla 47. Resultado Gravedades Específicas y Absorción Agregado 3/8”

Fuente: Carlos Martínez

3.11. Gravedades Específicas y Absorción Agregado Fino



 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL 			
“EFECTOS EN LA ADICIÓN DE ACEITE DE MOTOR USADO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE”			
“Gravedad Específica Agregado Fino”			
ORIGEN:	CANTERA ALVARADO-AMBATO		
ENSAYADO POR:	Carlos Martínez Herrera	FECHA:21/01/2021	
NORMA:	NTE INEN 856		
DATOS	DESCRIPCIÓN	Unidad	Valor
M1	Masa del picnómetro	gr	96.94
M2	Masa del picnómetro + agregado sss	gr	348.34
M3	Masa del picnómetro + agregado sss + agua	gr	500.15
M4=M3-M2	Masa del agua añadida	gr	151.81
M5	Masa del picnómetro + 250 cc de agua	gr	345.62
M6=M5-M1	Masa de 250 cc de agua	gr	248.68
DA=M6/250 cm ³	Densidad del agua	gr/cc	0.994
M7=M6-M4	Masa del agua desalojada por el agregado	gr	96.87
Msss=M2-M1	Masa del agregado sss	gr	251.4
Vsss=M7/DA	Volumen de agua desalojada (Volumen de agregado añadido)	cc	97.56
$G_{sssb} = M_{sss} / (M_5 + M_{sss} - M_3)$	GRAVEDAD ESPECÍFICA SSS BULK	gr/cm3	2.619
“Capacidad de Absorción del Agregado Fino”			
M7	Masa del recipiente	gr	55
M8	Masa del recipiente + muestra SSS	gr	305,0
M9=M8-M7	Masa de la muestra SSS	gr	250,0
M10	Masa del recipiente + muestra seca	gr	301.8
M11=M10-M7	Masa de la muestra seca	gr	246.8
$G_{sb} = M_{11} / (M_5 + M_{sss} - M_3)$	GRAVEDAD ESPECÍFICA SECA BULK	gr/cm3	2.585
$G_{sa} = M_{11} / (M_5 + M_{11} - M_3)$	GRAVEDAD ESPECÍFICA SECA APARENTE	gr/cm3	2.675
$CA = ((M_9 - M_{11}) / M_{11}) * 100$	Capacidad de absorción	gr	1.297%

Tabla 48. Resultado Gravedades Específicas y Absorción Agregado fino

Fuente: Carlos Martínez

3.12. Resumen Gravedades Específicas Agregados



 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL 			
“EFECTOS EN LA ADICIÓN DE ACEITE DE MOTOR USADO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE”			
<i>“Gravedades Específicas Agregados”</i>			
ORIGEN: CANTERA ALVARADO “AMBATO”			
ENSAYADO POR: Carlos Martínez Herrera			
FECHA: 15/02/2021			
Agregado	Gssb	Gsa	Gsb
3/4”	2.632	2.738	2.571
3/8”	2.561	2.690	2.486
Fino	2.595	2.675	2.547

Tabla 49. Resumen de Resultados Gravedades Específicas

Fuente: Carlos Martínez

3.13. Peso Unitario Agregado 3/4”

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL 			
“EFECTOS EN LA ADICIÓN DE ACEITE DE MOTOR USADO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE”			
<i>“Peso Unitario Agregado Grueso 3/4”</i>			
ORIGEN: CANTERA ALVARADO-AMBATO			
ENSAYADO POR: Carlos Martínez Herrera		FECHA: 15/01/2021	
NORMA: NTE INEN 858			
Material que pasa tamiz 2” y es retenido en el N° 4	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
A Peso del Material (gr)	6103,80	6117,50	6110,20
B Volumen del recipiente (cm ³)	4539,60	4539,60	4539,60
Peso unitario (A/B) (gr/cm ³)	1,345	1,348	1,346
Promedio (M1+M2+M3)/3	1,346		

Tabla 50. Resultado peso unitario Agregado 3/4”

Fuente: Carlos Martínez

3.14. Peso Unitario Agregado 3/8”

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL 			
“EFECTOS EN LA ADICIÓN DE ACEITE DE MOTOR USADO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE”			
<i>“Peso Unitario Agregado Grueso 3/8”</i>			
ORIGEN: CANTERA ALVARADO-AMBATO			
ENSAYADO POR: Carlos Martínez Herrera		FECHA: 15/01/2021	
NORMA: NTE INEN 858			
Material que pasa tamiz 2” y es retenido en el N° 4	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
A Peso del Material (gr)	5961,40	5962,00	5996,20
B Volumen del recipiente (cm ³)	4539,60	4539,60	4539,60
Peso unitario (A/B) (gr/cm ³)	1,313	1,313	1,314
Promedio (M1+M2+M3)/3	1,314		

Tabla 51. Resultado Peso unitario Agregado 3/8”

Fuente: Carlos Martínez

3.15. Peso Unitario Agregado Fino

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL 			
“EFECTOS EN LA ADICIÓN DE ACEITE DE MOTOR USADO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE” <i>“Peso Unitario Agregado Fino”</i>			
ORIGEN:	CANTERA ALVARADO-AMBATO		
ENSAYADO POR:	Carlos Martínez Herrera	FECHA:	15/01/2021
NORMA:	NTE INEN 858		
Material que pasa tamiz 2” y es retenido en el Integral	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
A Peso del Material (gr)	6615,80	6658,30	6652,10
B Volumen del recipiente (cm ³)	4539,60	4539,60	4539,60
Peso unitario (A/B) (gr/cm ³)	1,457	1,467	1,465
Promedio (M1+M2+M3)/3	1,463		

Tabla 52. Resultado peso unitario Agregado Fino

Fuente: Carlos Martínez

3.16. Peso Específico Asfalto

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL 		
“EFECTOS EN LA ADICIÓN DE ACEITE DE MOTOR USADO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE” <i>“Peso Específico del Asfalto”</i>		
ORIGEN:	CANTERA ALVARADO-AMBATO	
ENSAYADO POR:	Carlos Martínez Herrera	FECHA: 21/01/2021
NORMA:	NTE INEN 923 ASTM D 70	
DESCRIPCIÓN	NOMENC.	VALOR
Masa del frasco (picnómetro) + agua	M1	68.40
Masa del frasco (picnómetro)	M2	38.45
M1-M2	M3	29.95
Peso del picnómetro + Cemento Asfáltico	M4	49.35
Masa del frasco (picnómetro)	M5	27.02
M4-M5	M6	22.33
Peso del picnómetro + Asfalto + Agua para llenar el picnómetro	M7	76.16
Peso del picnómetro + Cemento Asfáltico	M8	68.35
M7-M8	M9	7.81
M3-M9	M10	22.14
Gravedad Específica (gr/cm ³)	M6/M10	1,009

Tabla 53. Resultado Peso Específico del Asfalto

Fuente: Carlos Martíne

3.17. Gravedades Específicas Combinadas Agregados



 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL 																																									
“EFECTOS EN LA ADICIÓN DE ACEITE DE MOTOR USADO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE”																																									
MEZCLA DE AGREGADOS (Mezcla Calculada)																																									
ORIGEN:	CANTERA ALVARADO-AMBATO																																								
ENSAYADO POR:	Carlos Martínez Herrera																																								
FECHA:	08/02/2021																																								
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Tipo de Agregado</th> <th>% de Mezcla de Agregados</th> <th>Porcentaje que Pasa Malla N°4</th> <th>Porcentaje que retiene Malla N°4</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>3/4"</td> <td>Agr1= 16,70</td> <td>P1= 16,13%</td> <td>R1= 83,87%</td> </tr> <tr> <td>3/8"</td> <td>Agr2= 32,20</td> <td>P2= 10,54%</td> <td>R2= 89,54%</td> </tr> <tr> <td>Fino</td> <td>Agr3= 51,15</td> <td>P3= 100,00%</td> <td>R3= 0,00%</td> </tr> </tbody> </table>	Tipo de Agregado	% de Mezcla de Agregados	Porcentaje que Pasa Malla N°4	Porcentaje que retiene Malla N°4	3/4"	Agr1= 16,70	P1= 16,13%	R1= 83,87%	3/8"	Agr2= 32,20	P2= 10,54%	R2= 89,54%	Fino	Agr3= 51,15	P3= 100,00%	R3= 0,00%	<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Tipo de Agregado</th> <th colspan="2">Gravedad Específica</th> <th colspan="2">Porcentaje de Absorción</th> </tr> <tr> <th>Bulk</th> <th>Aparente</th> <th>Abs1=</th> <th>Abs2=</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>3/4"</td> <td>Gsb1= 2,571</td> <td>Gsa1= 2,738</td> <td>Abs1= 2,363%</td> <td>Abs2= 3,050%</td> </tr> <tr> <td>3/8"</td> <td>Gsb2= 2,486</td> <td>Gsa2= 2,690</td> <td>Abs3= 1,297%</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Fino</td> <td>Gsb3= 2,585</td> <td>Gsa3= 2,675</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	Tipo de Agregado	Gravedad Específica		Porcentaje de Absorción		Bulk	Aparente	Abs1=	Abs2=	3/4"	Gsb1= 2,571	Gsa1= 2,738	Abs1= 2,363%	Abs2= 3,050%	3/8"	Gsb2= 2,486	Gsa2= 2,690	Abs3= 1,297%		Fino	Gsb3= 2,585	Gsa3= 2,675		
Tipo de Agregado	% de Mezcla de Agregados	Porcentaje que Pasa Malla N°4	Porcentaje que retiene Malla N°4																																						
3/4"	Agr1= 16,70	P1= 16,13%	R1= 83,87%																																						
3/8"	Agr2= 32,20	P2= 10,54%	R2= 89,54%																																						
Fino	Agr3= 51,15	P3= 100,00%	R3= 0,00%																																						
Tipo de Agregado	Gravedad Específica		Porcentaje de Absorción																																						
	Bulk	Aparente	Abs1=	Abs2=																																					
3/4"	Gsb1= 2,571	Gsa1= 2,738	Abs1= 2,363%	Abs2= 3,050%																																					
3/8"	Gsb2= 2,486	Gsa2= 2,690	Abs3= 1,297%																																						
Fino	Gsb3= 2,585	Gsa3= 2,675																																							
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Tipo de Agregado</th> <th>Fórmulas</th> <th>Resultados</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Gravedad Específica Bulk o Neta</td> <td> $G_{sb} = \frac{100}{\frac{Agr_1}{G_{sb1}} + \dots + \frac{Agr_n}{G_{sbn}}}$ </td> <td>2,550 gr/cm³</td> </tr> <tr> <td>Gravedad Específica Aparente</td> <td> $G_{sa} = \frac{100}{\frac{Agr_1}{G_{sa1}} + \dots + \frac{Agr_n}{G_{san}}}$ </td> <td>2,690 gr/cm³</td> </tr> <tr> <td>Porcentaje de Absorción</td> <td> $\%Abs = \frac{(P_1 \times A_1) + (P_2 \times A_2) + \dots + (P_n \times A_n)}{100}$ </td> <td>2,039%</td> </tr> </tbody> </table>	Tipo de Agregado	Fórmulas	Resultados	Gravedad Específica Bulk o Neta	$G_{sb} = \frac{100}{\frac{Agr_1}{G_{sb1}} + \dots + \frac{Agr_n}{G_{sbn}}}$	2,550 gr/cm ³	Gravedad Específica Aparente	$G_{sa} = \frac{100}{\frac{Agr_1}{G_{sa1}} + \dots + \frac{Agr_n}{G_{san}}}$	2,690 gr/cm ³	Porcentaje de Absorción	$\%Abs = \frac{(P_1 \times A_1) + (P_2 \times A_2) + \dots + (P_n \times A_n)}{100}$	2,039%																													
Tipo de Agregado	Fórmulas	Resultados																																							
Gravedad Específica Bulk o Neta	$G_{sb} = \frac{100}{\frac{Agr_1}{G_{sb1}} + \dots + \frac{Agr_n}{G_{sbn}}}$	2,550 gr/cm ³																																							
Gravedad Específica Aparente	$G_{sa} = \frac{100}{\frac{Agr_1}{G_{sa1}} + \dots + \frac{Agr_n}{G_{san}}}$	2,690 gr/cm ³																																							
Porcentaje de Absorción	$\%Abs = \frac{(P_1 \times A_1) + (P_2 \times A_2) + \dots + (P_n \times A_n)}{100}$	2,039%																																							

Tabla 54. Resultado Gravedades Específicas combinadas de Agregados

Fuente: Carlos Martínez

3.18. Ensayo Rice 5,0 Asfalto (0% Aceite)

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL 			
“EFECTOS EN LA ADICIÓN DE ACEITE DE MOTOR USADO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE”			
ENSAYO RICE <i>“Gravedad específica máxima teórica”</i>			
ORIGEN:	CANTERA ALVARADO-AMBATO		
ENSAYADO POR:	Carlos Martínez Herrera	FECHA:	20/01/2021
NORMA:	ASTM D-2041		
5,0 % DE ASFALTO			
DATOS	DESCRIPCIÓN	Unidad	Valor
M1	Peso frasco + agua a 25 °C	gr	10375,8
M2	Peso Frasco	gr	3979,80
M3	Peso muestra + frasco	gr	5114,80
M4	Peso muestra (M3-M2)	gr	1135,00
M5	Peso muestra + frasco + agua a 25 °C	gr	11032,5
Gmm	Gravedad específica teórica máxima (M4/M4-(M5-M1))	gr/cm ³	2,373

Tabla 55. Resultados ensayo Rice 5,0% de Asfalto

Fuente: Carlos Martínez

3.19. Ensayo Rice 5,5% Asfalto (0% Aceite)



 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL 			
“EFECTOS EN LA ADICIÓN DE ACEITE DE MOTOR USADO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE”			
ENSAYO RICE <i>“Gravedad específica máxima teórica”</i>			
ORIGEN:	CANTERA ALVARADO-AMBATO		
ENSAYADO POR:	Carlos Martínez Herrera	FECHA:	20/01/2021
NORMA:	ASTM D-2041		
5,5 % DE ASFALTO			
DATOS	DESCRIPCIÓN	Unidad	Valor
M1	Peso frasco + agua a 25 °C	gr	10375,8
M2	Peso Frasco	gr	3979,80
M3	Peso muestra + frasco	gr	5160,50
M4	Peso muestra (M3-M2)	gr	1180,70
M5	Peso muestra + frasco + agua a 25 °C	gr	11055,2
Gmm	Gravedad específica teórica máxima (M4/M4-(M5-M1))	gr/cm ³	2,355

Tabla 56. Resultado ensayo Rice 5,5% de Asfalto

Fuente: Carlos Martínez

3.20. Ensayo Rice 6,0% Asfalto (0% Aceite).

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL 			
“EFECTOS EN LA ADICIÓN DE ACEITE DE MOTOR USADO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE”			
ENSAYO RICE “Gravedad específica máxima teórica”			
ORIGEN:	CANTERA ALVARADO-AMBATO		
ENSAYADO POR:	Carlos Martínez Herrera	FECHA:	20/01/2021
NORMA:	ASTM D-2041		
6,0 % DE ASFALTO			
DATOS	DESCRIPCIÓN	Unidad	Valor
M1	Peso frasco + agua a 25 °C	gr	10375,8
M2	Peso Frasco	gr	3979,80
M3	Peso muestra + frasco	gr	5044,00
M4	Peso muestra (M3-M2)	gr	1064,20
M5	Peso muestra + frasco + agua a 25 °C	gr	10985,3
Gmm	Gravedad específica teórica máxima (M4/M4-(M5-.1))	gr/cm ³	2,340

Tabla 57. Resultado ensayo Rice 6,0% de Asfalto

Fuente: Carlos Martínez

3.21. Ensayo Rice 6,5% Asfalto (0% Aceite).

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL 			
“EFECTOS EN LA ADICIÓN DE ACEITE DE MOTOR USADO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE”			
ENSAYO RICE “Gravedad específica máxima teórica”			
ORIGEN:	CANTERA ALVARADO-AMBATO		
ENSAYADO POR:	Carlos Martínez Herrera	FECHA:	20/01/2021
NORMA:	ASTM D-2041		
6,5 % DE ASFALTO			
DATOS	DESCRIPCIÓN	Unidad	Valor
M1	Peso frasco + agua a 25 °C	gr	10375,80
M2	Peso Frasco	gr	3979,80
M3	Peso muestra + frasco	gr	5064,20
M4	Peso muestra (M3-M2)	gr	1084,40
M5	Peso muestra + frasco + agua a 25 °C	gr	10994,30
Gmm	Gravedad específica teórica máxima (M4/M4-(M5-.1))	gr/cm ³	2,328

Tabla 58. Resultados ensayo Rice 6,5% de Asfalto

Fuente: Carlos Martínez

3.22. Ensayo Rice 7,0% Asfalto (0% Aceite).


 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL 			
“EFECTOS EN LA ADICIÓN DE ACEITE DE MOTOR USADO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE”			
ENSAYO RICE “Gravedad específica máxima teórica”			
ORIGEN:	CANTERA ALVARADO-AMBATO		
ENSAYADO POR:	Carlos Martínez Herrera	FECHA:	20/01/2021
NORMA:	ASTM D-2041		
7,0 % DE ASFALTO			
DATOS	DESCRIPCIÓN	Unidad	Valor
M1	Peso frasco + agua a 25 °C	gr	10375,80
M2	Peso Frasco	gr	3979,80
M3	Peso muestra + frasco	gr	5055,40
M4	Peso muestra (M3-M2)	gr	1075,60
M5	Peso muestra + frasco + agua a 25 °C	gr	10985,70
Gmm	Gravedad específica teórica máxima (M4/M4-(M5-.1))	gr/cm3	2,310

Tabla 59. Resultado ensayo Rice 7,0% de Asfalto

Fuente: Carlos Martínez

3.23. Ensayo Rice 5,0% Asfalto (1% Aceite).


 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL 			
“EFECTOS EN LA ADICIÓN DE ACEITE DE MOTOR USADO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE”			
ENSAYO RICE “Gravedad específica máxima teórica”			
ORIGEN:	CANTERA ALVARADO-AMBATO		
ENSAYADO POR:	Carlos Martínez Herrera	FECHA:	20/01/2021
NORMA:	ASTM D-2041		
5,0 % DE ASFALTO (1% ACEITE DE MOTOR USADO)			
DATOS	DESCRIPCIÓN	Unidad	Valor
M1	Peso frasco + agua a 25 °C	gr	10375,80
M2	Peso Frasco	gr	3979,80
M3	Peso muestra + frasco	gr	5115,80
M4	Peso muestra (M3-M2)	gr	1136,00
M5	Peso muestra + frasco + agua a 25 °C	gr	11032,70
Gmm	Gravedad específica teórica máxima (M4/M4-(M5-.1))	gr/cm3	2,371

Tabla 60. Resultado ensayo Rice 5,0% de Asfalto-1,0% de Aceite de Motor Usado

Fuente: Carlos Martínez

3.24. Ensayo Rice 5,5% Asfalto (1% Aceite).



 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL 			
“EFECTOS EN LA ADICIÓN DE ACEITE DE MOTOR USADO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE”			
ENSAYO RICE “Gravedad específica máxima teórica”			
ORIGEN:		CANTERA ALVARADO-AMBATO	
ENSAYADO POR:		Carlos Martínez Herrera	
NORMA:		ASTM D-2041	
		FECHA: 20/01/2021	
5,5 % DE ASFALTO (1% ACEITE DE MOTOR USADO)			
DATOS	DESCRIPCIÓN	Unidad	Valor
M1	Peso frasco + agua a 25 °C	gr	10375,80
M2	Peso Frasco	gr	3979,80
M3	Peso muestra + frasco	gr	5165,40
M4	Peso muestra (M3-M2)	gr	1185,60
M5	Peso muestra + frasco + agua a 25 °C	gr	11058,10
Gmm	Gravedad específica teórica máxima (M4/M4-(M5-.1))	gr/cm3	2,356

Tabla 61. Resultado ensayo Rice 5,5% de Asfalto-1,0% de Aceite de Motor Usado
Fuente: Carlos Martínez

3.25. Ensayo Rice 6,0% Asfalto (1% Aceite).

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL 			
“EFECTOS EN LA ADICIÓN DE ACEITE DE MOTOR USADO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE”			
ENSAYO RICE “Gravedad específica máxima teórica”			
ORIGEN:		CANTERA ALVARADO-AMBATO	
ENSAYADO POR:		Carlos Martínez Herrera	
NORMA:		ASTM D-2041	
		FECHA: 20/01/2021	
6,0 % DE ASFALTO (1% ACEITE DE MOTOR USADO)			
DATOS	DESCRIPCIÓN	Unidad	Valor
M1	Peso frasco + agua a 25 °C	gr	10375,80
M2	Peso Frasco	gr	3979,80
M3	Peso muestra + frasco	gr	5050,60
M4	Peso muestra (M3-M2)	gr	1070,80
M5	Peso muestra + frasco + agua a 25 °C	gr	10989,00
Gmm	Gravedad específica teórica máxima (M4/M4-(M5-.1))	gr/cm3	2,340

Tabla 62. Resultado ensayo Rice 6,0% de Asfalto-1,0% de Aceite de motor usado
Fuente: Carlos Martínez

3.26. Ensayo Rice 6,5% Asfalto (1% Aceite).

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL 			
“EFECTOS EN LA ADICIÓN DE ACEITE DE MOTOR USADO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE”			
ENSAYO RICE “Gravedad específica máxima teórica”			
ORIGEN:		CANTERA ALVARADO-AMBATO	
ENSAYADO POR:		Carlos Martínez Herrera	FECHA: 20/01/2021
NORMA:		ASTM D-2041	
6,5 % DE ASFALTO (1% ACEITE DE MOTOR USADO)			
DATOS	DESCRIPCIÓN	Unidad	Valor
M1	Peso frasco + agua a 25 °C	gr	10375,80
M2	Peso Frasco	gr	3979,80
M3	Peso muestra + frasco	gr	5064,60
M4	Peso muestra (M3-M2)	gr	1084,80
M5	Peso muestra + frasco + agua a 25 °C	gr	10994,40
Gmm	Gravedad específica teórica máxima (M4/M4-(M5-.1))	gr/cm3	2,327

Tabla 63. Resultado ensayo Rice 6,5% de Asfalto-1,0% de Aceite de motor usado

Fuente: Carlos Martínez

3.27. Ensayo Rice 7,0% Asfalto (1% Aceite).

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL 			
“EFECTOS EN LA ADICIÓN DE ACEITE DE MOTOR USADO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE”			
ENSAYO RICE “Gravedad específica máxima teórica”			
ORIGEN:		CANTERA ALVARADO-AMBATO	
ENSAYADO POR:		Carlos Martínez Herrera	FECHA: 20/01/2021
NORMA:		ASTM D-2041	
7,0 % DE ASFALTO (1% ACEITE DE MOTOR USADO)			
DATOS	DESCRIPCIÓN	Unidad	Valor
M1	Peso frasco + agua a 25 °C	gr	10375,80
M2	Peso Frasco	gr	3979,80
M3	Peso muestra + frasco	gr	5085,60
M4	Peso muestra (M3-M2)	gr	1105,80
M5	Peso muestra + frasco + agua a 25 °C	gr	11002,60
Gmm	Gravedad específica teórica máxima (M4/M4-(M5-.1))	gr/cm3	2,309

Tabla 64. Resultado ensayo Rice 7,0% de Asfalto-1,0% de Aceite de motor usado

Fuente: Carlos Martínez

3.28. Ensayo Rice 5,0% Asfalto (2% Aceite)

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL 			
“EFECTOS EN LA ADICIÓN DE ACEITE DE MOTOR USADO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE”			
ENSAYO RICE “Gravedad específica máxima teórica”			
ORIGEN:	CANTERA ALVARADO-AMBATO		
ENSAYADO POR:	Carlos Martínez Herrera	FECHA:	20/01/2021
NORMA:	ASTM D-2041		
5,0% DE ASFALTO (2% ACEITE DE MOTOR USADO)			
DATOS	DESCRIPCIÓN	Unidad	Valor
M1	Peso frasco + agua a 25 °C	gr	10375,80
M2	Peso Frasco	gr	3979,80
M3	Peso muestra + frasco	gr	5116,30
M4	Peso muestra (M3-M2)	gr	1136,50
M5	Peso muestra + frasco + agua a 25 °C	gr	11032,90
Gmm	Gravedad específica teórica máxima (M4/M4-(M5-.1))	gr/cm3	2,371

Tabla 65. Resultado ensayo Rice 5,0% de Asfalto-2,0% de Aceite de motor usado

Fuente: Carlos Martínez

3.29. Ensayo Rice 5,5% Asfalto (2% Aceite)

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL 			
“EFECTOS EN LA ADICIÓN DE ACEITE DE MOTOR USADO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE”			
ENSAYO RICE “Gravedad específica máxima teórica”			
ORIGEN:	CANTERA ALVARADO-AMBATO		
ENSAYADO POR:	Carlos Martínez Herrera	FECHA:	20/01/2021
NORMA:	ASTM D-2041		
5,5% DE ASFALTO (2% ACEITE DE MOTOR USADO)			
DATOS	DESCRIPCIÓN	Unidad	Valor
M1	Peso frasco + agua a 25 °C	gr	10375,80
M2	Peso Frasco	gr	3979,80
M3	Peso muestra + frasco	gr	5163,50
M4	Peso muestra (M3-M2)	gr	1183,70
M5	Peso muestra + frasco + agua a 25 °C	gr	11058,40
Gmm	Gravedad específica teórica máxima (M4/M4-(M5-.1))	gr/cm3	2,362

Tabla 66. Resultado ensayo Rice 5,5% de Asfalto-2,0% de Aceite de motor usado

Fuente: Carlos Martínez

3.30. Ensayo Rice 6,0% Asfalto (2% Aceite)


 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL 			
“EFECTOS EN LA ADICIÓN DE ACEITE DE MOTOR USADO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE”			
ENSAYO RICE “Gravedad específica máxima teórica”			
ORIGEN:	CANTERA ALVARADO-AMBATO		
ENSAYADO POR:	Carlos Martínez Herrera	FECHA:	20/01/2021
NORMA:	ASTM D-2041		
6,0% DE ASFALTO (2% ACEITE DE MOTOR USADO)			
DATOS	DESCRIPCIÓN	Unidad	Valor
M1	Peso frasco + agua a 25 °C	gr	10375,80
M2	Peso Frasco	gr	3979,80
M3	Peso muestra + frasco	gr	5057,40
M4	Peso muestra (M3-M2)	gr	1077,60
M5	Peso muestra + frasco + agua a 25 °C	gr	10993,2
Gmm	Gravedad específica teórica máxima (M4/M4-(M5-.1))	gr/cm3	2,342

Tabla 67. Resultados ensayo Rice 6,0% de Asfalto-2,0% de Aceite de motor usado
Fuente: Carlos Martínez

3.31. Ensayo Rice 6,5% Asfalto (2% Aceite)

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL 			
“EFECTOS EN LA ADICIÓN DE ACEITE DE MOTOR USADO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE”			
ENSAYO RICE “Gravedad específica máxima teórica”			
ORIGEN:	CANTERA ALVARADO-AMBATO		
ENSAYADO POR:	Carlos Martínez Herrera	FECHA:	20/01/2021
NORMA:	ASTM D-2041		
6,5% DE ASFALTO (2% ACEITE DE MOTOR USADO)			
DATOS	DESCRIPCIÓN	Unidad	Valor
M1	Peso frasco + agua a 25 °C	gr	10375,80
M2	Peso Frasco	gr	3979,80
M3	Peso muestra + frasco	gr	5043,60
M4	Peso muestra (M3-M2)	gr	1063,8
M5	Peso muestra + frasco + agua a 25 °C	gr	1092,60
Gmm	Gravedad específica teórica máxima (M4/M4-(M5-.1))	gr/cm3	2,328

Tabla 68. Resultados ensayo Rice 6,5% de Asfalto-2,0% de Aceite de motor usado
Fuente: Carlos Martínez

3.32. Ensayo Rice 7,0% Asfalto (2% Aceite)


 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL 			
“EFECTOS EN LA ADICIÓN DE ACEITE DE MOTOR USADO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE”			
ENSAYO RICE <i>“Gravedad específica máxima teórica”</i>			
ORIGEN:	CANTERA ALVARADO-AMBATO		
ENSAYADO POR:	Carlos Martínez Herrera		
NORMA:	ASTM D-2041		
FECHA: 20/01/2021			
7,0% DE ASFALTO (2% ACEITE DE MOTOR USADO)			
DATOS	DESCRIPCIÓN	Unidad	Valor
M1	Peso frasco + agua a 25 °C	gr	10375,80
M2	Peso Frasco	gr	3979,80
M3	Peso muestra + frasco	gr	5065,30
M4	Peso muestra (M3-M2)	gr	1085,50
M5	Peso muestra + frasco + agua a 25 °C	gr	10991,4
Gmm	Gravedad específica teórica máxima (M4/M4-(M5-.1))	gr/cm ³	2,310

Tabla 69. Resultados ensayo Rice 7,0% de Asfalto-2,0% de Aceite de motor usado

Fuente: Carlos Martínez

3.33. Diseño de Mezcla Asfáltica Convencional Método Marshall

PROYECTO: "EFECTOS DE LA ADICIÓN DE ACEITE DE MOTOR USADO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE"

PESO ESPECÍFICO DE LOS AGREGADOS (Gagr): 2.55 gr/cm³

PESO ESPECÍFICO DEL ASFALTO (Gasf): 1,009 gr/cm³

PROCEDENCIA DE LOS AGREGADOS: CANTERA ALVARADO-AMBATO

PORCENTAJE DE ACEITE DE MOTOR USADO: 0%

NÚMERO DE GOLPES: 75

DISEÑO MEZCLA ASFÁLTICA MÉTODO MARSHALL																			
MUESTRA Nº	CEMENTO ASFÁLTICO %	ESPESOR DE PROBETA (cm)	PESO EN GRAMOS			PESO ESPECÍFICO (gr/cm ³)			ASFALTO ABSORBIDO %	VOLUMEN-% TOTAL			VACÍOS EN AGREGADOS MINERALES	% DE ASFALTO EFECTIVO	% VACÍOS LLENOS ASFALTO	ESTABILIDAD EN LIBRAS			FLUJO pulg/100
			SECA EN AIRE	SSS AIRE	AGUA	BULK (Gb)	MÁXIMO TEÓRICO	MÁXIMO MEDIDO		AGREGADO	VACÍOS CON AIRE	ASFALTO EFECTIVO				LECTURA DIAL	FACTOR CORRECCIÓN	ESTABILIDAD CORREGIDA	
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
1.1	5,00	6,34	1124,60	1131,20	618,30	2,193										2970,00	1,003	2978,91	10,80
1.2		6,42	1143,40	1145,50	612,80	2,146										2904,00	0,983	2854,632	11,07
1.3		6,53	1153,20	1155,40	607,50	2,105										2893,00	0,956	2765,708	11,45
PROMEDIO						2,148	2,369	2,373	0,073	80,021	9,484	10,495	19,979	4,930	52,528			2866,42	11,11
2.1	5,50	6,58	1150,20	1151,00	626,30	2,192										2712,15	0,947	2568,41	11,50
2.2		6,27	1082,40	1084,20	590,00	2,190										3494,93	1,021	3568,32	10,10
2.3		6,30	1051,60	1052,40	575,20	2,204										3190,64	1,013	3232,11	11,90
PROMEDIO						2,195	2,352	2,355	0,050	81,357	6,780	11,864	18,643	5,453	63,634			3122,95	11,17
3.1	6,00	6,55	1100,40	1097,40	587,20	2,157										3049,52	0,953	2906,19	12,45
3.2		6,03	1064,40	1051,80	567,60	2,198										3373,65	1,093	3687,40	13,50
3.3		6,00	1052,00	1034,80	584,80	2,338										3686,76	1,103	4066,50	12,55
PROMEDIO						2,231	2,336	2,340	0,079	82,239	4,660	13,101	17,761	5,926	70,270			3553,36	12,83
4.1	6,5	6,85	1230,80	1231,80	673,10	2,203										3783,78	0,886	3352,43	15,30
4.2		6,55	1154,60	1155,20	635,40	2,221										3356,01	0,953	3198,28	14,00
4.3		6,69	1106,60	1108,40	611,20	2,226										2679,08	0,925	2478,14	15,35
PROMEDIO						2,217	2,320	2,328	0,164	81,276	4,784	13,940	18,724	6,347	74,449			3009,62	14,88
5.1	7,00	6,55	1133,80	1135,40	623,90	2,217										3373,65	0,953	3215,09	15,30
5.2		6,47	1117,60	1118,50	596,80	2,142										3073,77	0,970	2981,56	15,75
5.3		6,59	1129,20	1131,80	605,60	2,146										2833,425	0,945	2677,59	14,50
PROMEDIO						2,168	2,304	2,310	0,127	79,078	6,136	14,786	20,922	6,882	79,311			2958,08	15,18

Tabla 70. Diseño mezcla Asfáltica Método Marshall

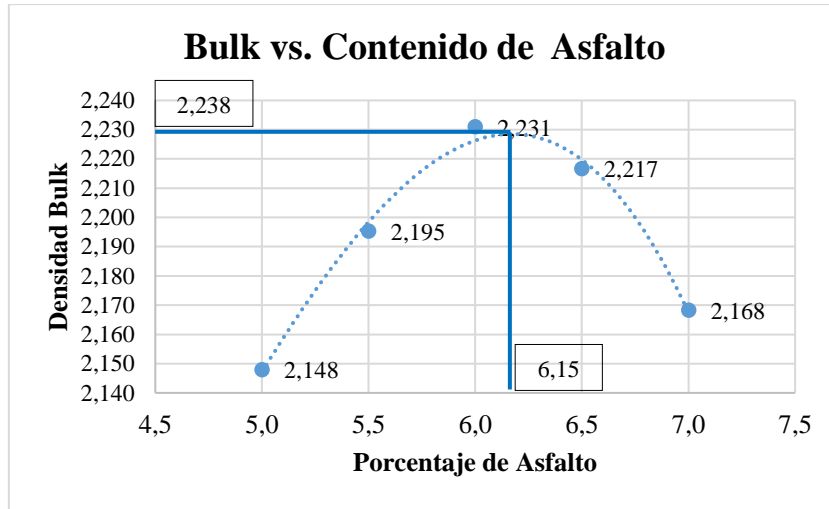


Gráfico 32. Densidad Bulk vs. Contenido de Asfalto
Fuente: Carlos Martínez

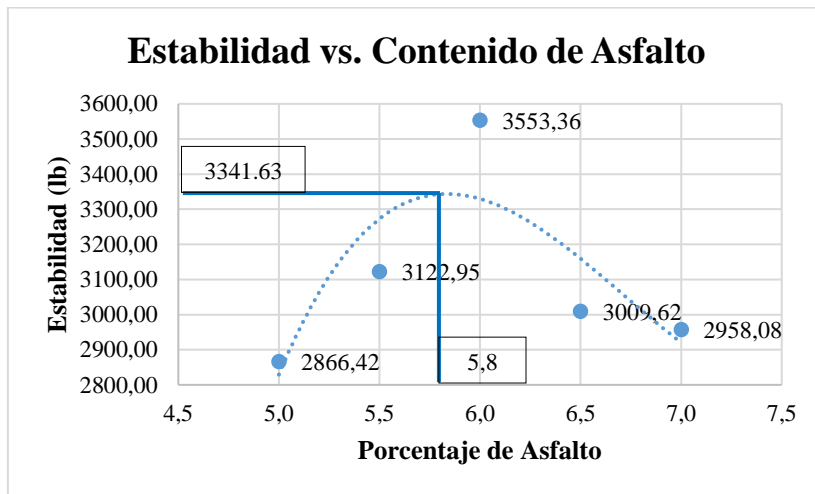


Gráfico 33. Estabilidad vs. Contenido de Asfalto
Fuente: Carlos Martínez

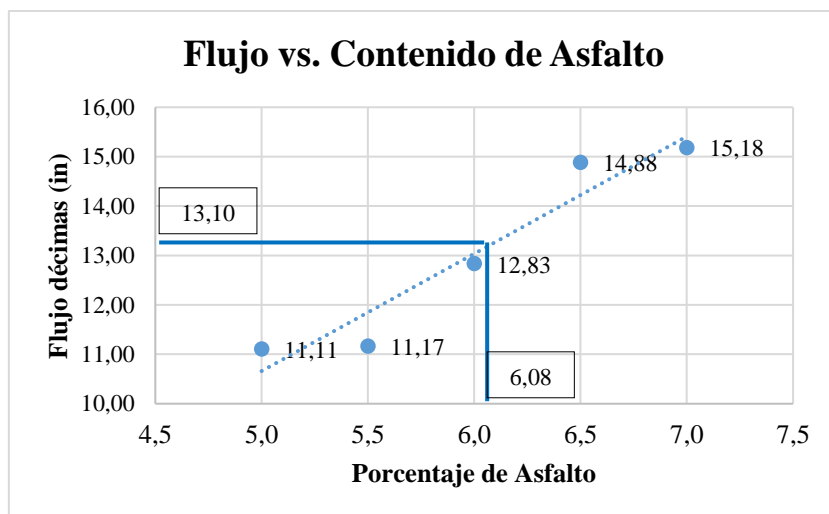


Gráfico 34. Flujo vs. Contenido de Asfalto
Fuente: Carlos Martínez

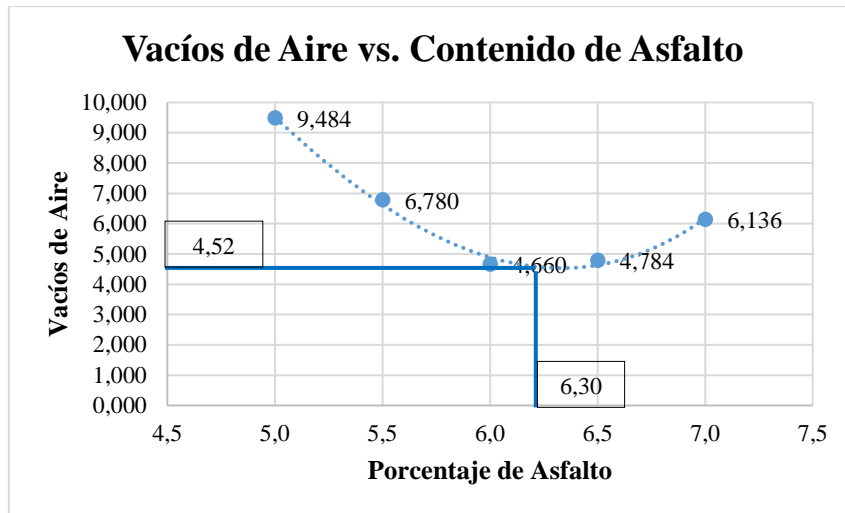


Gráfico 35. Vacíos de Aire vs. Contenido de Asfalto
Fuente: Carlos Martínez

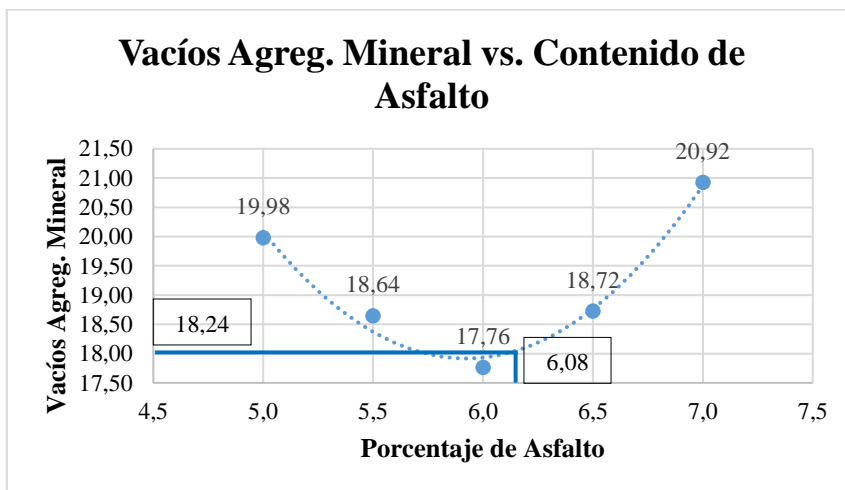


Gráfico 36. Vacíos Agregado Mineral vs. Contenido de Asfalto
Fuente: Carlos Martínez

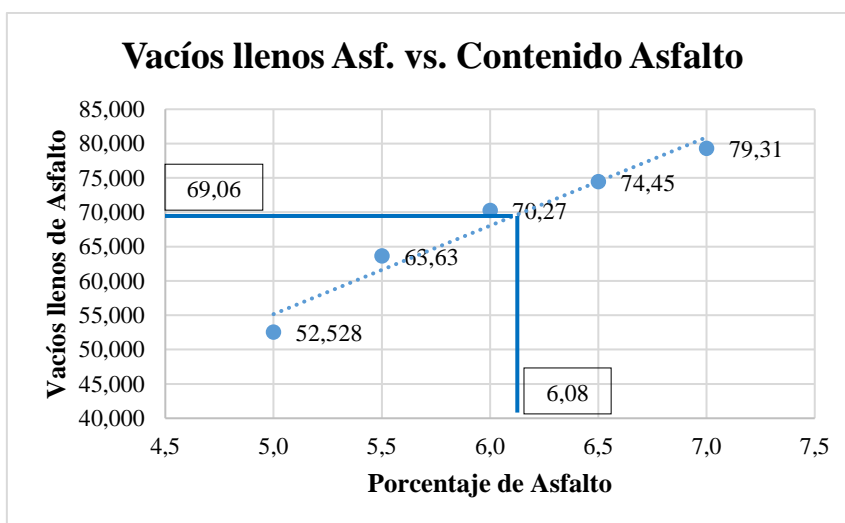


Gráfico 37. Vacíos llenos de Asfalto vs. Contenido de Asfalto
Fuente: Carlos Martínez

3.34. Determinación del Contenido óptimo de Asfalto mezcla convencional

Para determinar el contenido óptimo de asfalto se calcula el promedio de los valores máximos de los gráficos obtenidos: 1) Densidad Bulk vs. Contenido de Asfalto, 2) Estabilidad vs. Contenido de Asfalto, 3) Vacíos vs. Contenido de Asfalto.

Contenido óptimo de Asfalto Convencional	
Densidad Bulk vs. Contenido de Asfalto	6,15 %
Estabilidad vs. Contenido de Asfalto	5,80 %
Vacíos vs. Contenido de Asfalto	6,30 %
Contenido óptimo de Asfalto	6,08 %

Tabla 71. Determinación del Contenido óptimo de Asfalto mezcla Convencional

Fuente: Carlos Martínez

El valor del flujo se obtiene trazando desde el eje de las abscisas con el porcentaje óptimo calculado anteriormente, hasta hacer chocar con la línea de tendencia, se obtuvo un valor de flujo de **13,10** décimas de pulgada. Los valores obtenidos se compraran con los estándares de la norma Nevi-12 propuesta inicialmente en el tema de investigación.

Criterio	Tráfico Alto	Valor Obtenido
Golpes por cara	75	75
Estabilidad	1800 lb	3312,02 lb
Flujo 0.25 mm	8-14	13,10
Vacíos de Aire, %	3-5	4,557 %
Vacíos de Agregado Mineral, %	14	18,24 %
Vacíos Llenos de Asfalto, %	65-75	69,06 %

Tabla 72. Comparación de Resultados obtenidos y la Norma NEVI-12, mezcla de asfalto convencional

Fuente: Carlos Martínez

Los parámetros calculados están dentro de los estándares de la norma Nevi-12. La fórmula maestra de laboratorio:

3.35. Diseño Mezcla Asfáltica con 1.0 % de Aceite

PROYECTO: "EFECTOS DE LA ADICIÓN DE ACEITE DE MOTOR USADO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE"

PESO ESPECÍFICO DE LOS AGREGADOS (Gagr): 2.55 gr/cm³

PESO ESPECÍFICO DEL ASFALTO (Gasf): 1,009 gr/cm³

PROCEDENCIA DE LOS AGREGADOS: CANTERA ALVARADO-AMBATO

PORCENTAJE DE ACEITE DE MOTOR USADO: 1%

NÚMERO DE GOLPES: 75

DISEÑO MEZCLA ASFÁLTICA MÉTODO MARSHALL																			
MUESTRA N°	CEMENTO ASFÁLTICO %	ESPESOR DE PROBETA (cm)	PESO EN GRAMOS			PESO ESPECÍFICO (gr/cm ³)			ASFALTO ABSORBIDO %	VOLUMEN-% TOTAL			VACÍOS EN AGREGADOS MINERALES	% DE ASFALTO EFECTIVO	% VACÍOS LLENOS ASFALTO	ESTABILIDAD EN LIBRAS			FLUJO pulg/100
			SECA EN AIRE	SSS AIRE	AGUA	BULK (Gb)	MÁXIMO TEÓRICO	MÁXIMO MEDIDO		AGREGADO	VACÍOS CON AIRE	ASFALTO EFECTIVO				LECTURA DIAL	FACTOR CORRECCIÓN	ESTABILIDAD CORREGIDA	
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
1.1	5,00	6,45	1167,20	1171,60	614,60	2,096										2150,30	0,975	2096,54	11,75
1.2		6,37	1157,40	1160,50	615,50	2,124										2226,80	0,995	2215,67	12,50
1.3		6,46	1167,70	1170,30	635,80	2,185										2116,90	0,973	2059,74	12,32
PROMEDIO						2,135	2,369	2,371	0,037	79,525	9,970	10,505	20,475	4,964	51,307			2123,98	12,19
2.1	5,50	7,00	1162,30	1165,40	635,30	2,193										2458,58	0,858	2109,46	14,00
2.2		6,95	1168,20	1171,40	640,60	2,201										2216,03	0,868	1923,51	13,50
2.3		7,08	1167,20	1170,30	624,80	2,140										2469,60	0,843	2081,87	14,50
PROMEDIO						2,178	2,352	2,356	0,069	80,703	7,568	11,729	19,297	5,435	60,783			2038,28	14,00
3.1	6,00	6,56	1130,80	1133,60	648,90	2,333										2612,93	0,951	2484,89	18,60
3.2		6,95	1217,80	1219,20	653,10	2,151										3093,62	0,868	2685,26	14,50
3.3		6,86	1180,40	1182,80	646,90	2,203										3150,95	0,884	2785,44	17,10
PROMEDIO						2,229	2,336	2,340	0,079	82,165	4,746	13,089	17,835	5,926	73,391			2651,86	16,73
4.1	6,5	7,18	1244,60	1246,20	686,30	2,223										3329,55	0,826	2750,21	12,60
4.2		7,14	1245,40	1247,10	687,10	2,224										3860,96	0,832	3212,31	21,10
4.3		7,52	1258,40	1261,20	686,80	2,191										3342,78	0,773	2583,97	18,80
PROMEDIO						2,213	2,320	2,327	0,144	81,127	4,919	13,955	18,873	6,365	73,939			2848,83	17,50
5.1	7,00	6,93	1117,40	1119,30	623,50	2,254										2681,28	0,871	2335,39	23,30
5.2		6,42	1122,60	1138,40	621,40	2,171										2672,46	0,983	2627,03	17,80
5.3		6,92	1180,60	1183,70	622,80	2,105										2324,07	0,873	2028,91	18,80
PROMEDIO						2,177	2,304	2,309	0,107	79,384	5,732	14,884	20,616	6,901	72,196			2330,45	19,97

Tabla 73. Diseño Mezcla Asfáltica Método Marshall 1% Aceite de motor usado

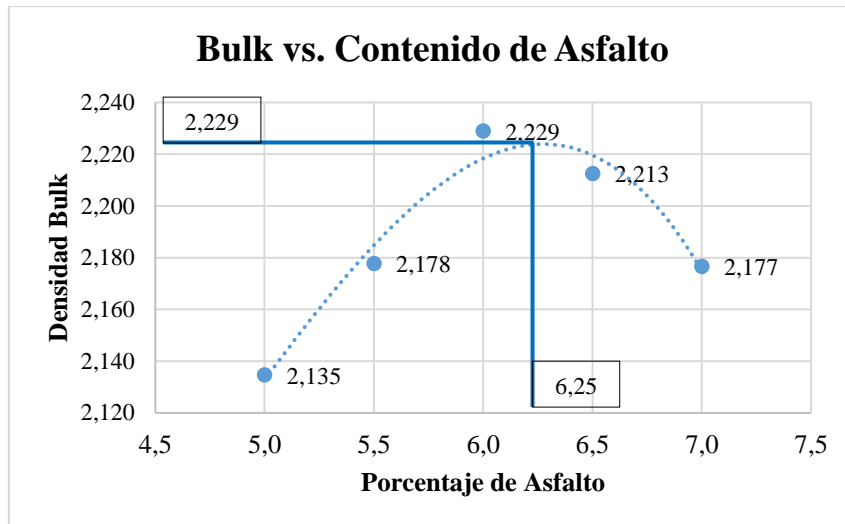


Gráfico 38. Densidad Bulk vs. Contenido de Asfalto 1%
Fuente: Carlos Martínez

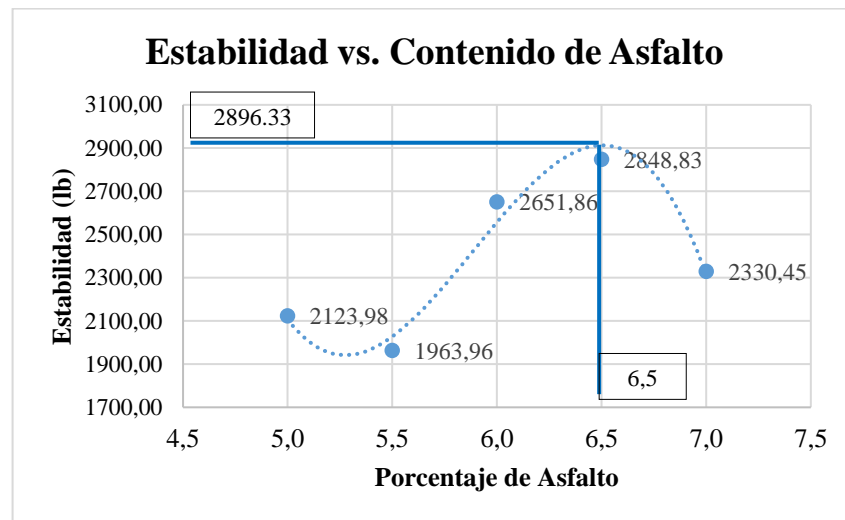


Gráfico 39. Estabilidad vs. Contenido de Asfalto 1%
Fuente: Carlos Martínez

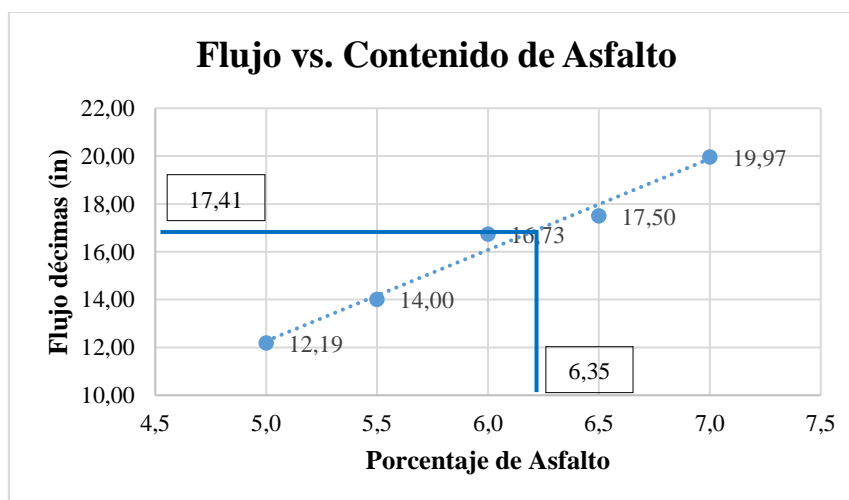


Gráfico 40. Flujo vs. Contenido de Asfalto 1%
Fuente: Carlos Martínez

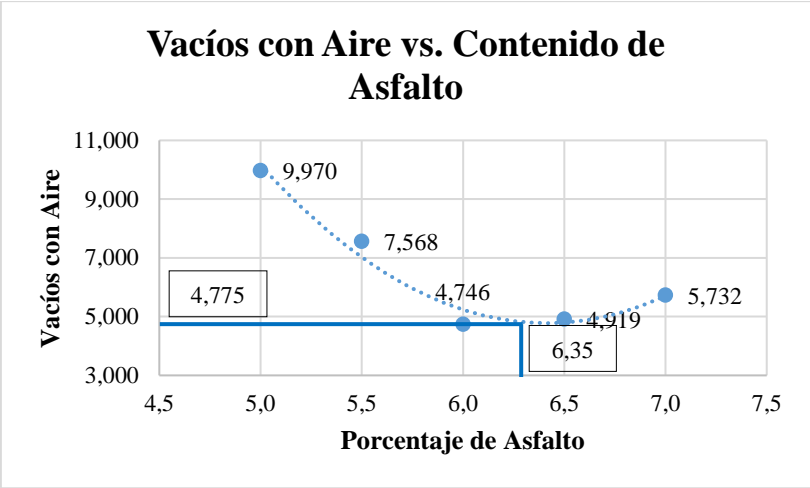


Gráfico 41. Vacíos con Aire vs. Contenido de Asfalto 1%
Fuente: Carlos Martínez

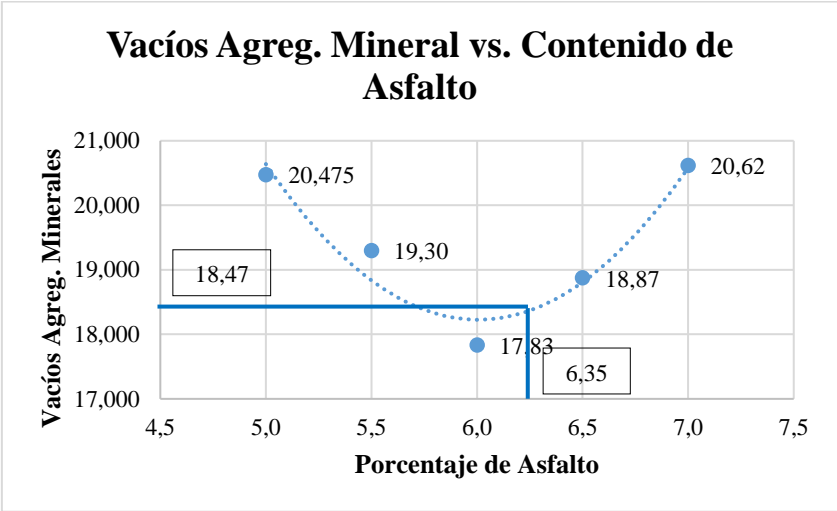


Gráfico 42. Vacíos Agregado Mineral vs. Contenido de Asfalto 1%
Fuente: Carlos Martínez

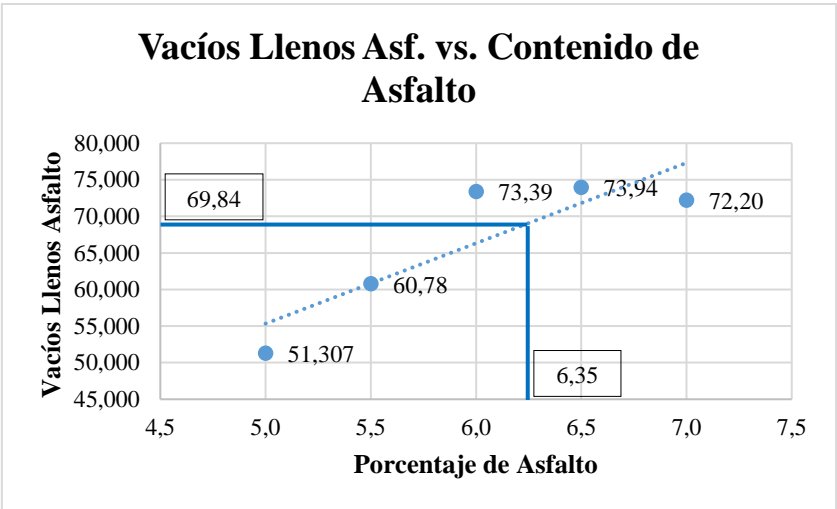


Gráfico 43. Vacíos Llenos de Asfalto vs. Contenido de Asfalto 1%
Fuente: Carlos Martínez

3.36. Determinación del Contenido óptimo de Asfalto Mezcla con 1% de Aceite de Motor Usado.

Para determinar el contenido óptimo de asfalto se calcula el promedio de los valores máximos de los gráficos obtenidos: 1) Densidad Bulk vs. Contenido de Asfalto, 2) Estabilidad vs. Contenido de Asfalto, 3) Vacíos vs. Contenido de Asfalto, destacando que en la mezcla se añadió aceite de motor usado en 1% con respecto al peso del asfalto.

Contenido óptimo de Asfalto con 1% de Aceite de Motor Usado	
Densidad Bulk vs. Contenido de Asfalto	6,25%
Estabilidad vs. Contenido de Asfalto	6,50%
Vacíos vs. Contenido de Asfalto	6,30%
Contenido óptimo de Asfalto	6,35%

Tabla 74. Determinación del Contenido óptimo de Asfalto mezcla con 1% de AMU

Fuente: Carlos Martínez

Se determina que el valor del contenido óptimo de asfalto respecto a la mezcla asfáltica convencional incrementó en 0,24%, por otro lado el valor del flujo a establecer, se seguirá el procedimiento semejante para la mezcla convencional, se traza desde el eje de las abscisas con el porcentaje óptimo calculado anteriormente, hasta hacer chocar con la línea de tendencia, se obtiene un valor de flujo de **17,41** décimas de pulgada. Los valores obtenidos se comparan con los estándares de la norma Nevi-12 propuesta inicialmente en el tema de investigación.

Criterio	Tráfico Alto	Valor Obtenido
Golpes por cara	75	75
Estabilidad	1800 lb	28544,91 lb
Flujo 0.25 mm	8-14	17,29
Vacíos de Aire, %	3-5	4,746 %
Vacíos de Agregado Mineral, %	14	18,47 %
Vacíos Llenos de Asfalto, %	65-75	69,84 %

Tabla 75. Comparación de los Resultados obtenidos y la Norma Nevi-12 1% AMU

Fuente: Carlos Martínez

En los valores calculados hay que destacar que el valor de flujo no satisface los parámetros que establece la normativa Nevi-12, los valores de flujo establecido (8-14), sin embargo, el valor calculado es **17,41** décimas de pulgada.

3.37. Diseño Mezcla Asfáltica con 2,0% de Aceite

PROYECTO: "EFECTOS DE LA ADICIÓN DE ACEITE DE MOTOR USADO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE"

PESO ESPECÍFICO DE LOS AGREGADOS (Gagr): 2.55 gr/cm³

PESO ESPECÍFICO DEL ASFALTO (Gasf): 1,009 gr/cm³

PROCEDENCIA DE LOS AGREGADOS: CANTERA ALVARADO-AMBATO

PORCENTAJE DE ACEITE DE MOTOR USADO: 2%

NÚMERO DE GOLPES: 75

DISEÑO MEZCLA ASFÁLTICA MÉTODO MARSHALL																			
MUESTRA N°	CEMENTO ASFÁLTICO %	ESPESOR DE PROBETA (cm)	PESO EN GRAMOS			PESO ESPECÍFICO (gr/cm ³)			ASFALTO ABSORBIDO %	VOLUMEN-% TOTAL			VACÍOS EN AGREGADOS MINERALES	% DE ASFALTO EFECTIVO	% VACÍOS LLENOS ASFALTO	ESTABILIDAD EN LIBRAS			FLUJO pulg/100
			SECA EN AIRE	SSS AIRE	AGUA	BULK (Gb)	MÁXIMO TEÓRICO	MÁXIMO MEDIDO		AGREGADO	VACÍOS CON AIRE	ASFALTO EFECTIVO				LECTURA DIAL	FACTOR CORRECCIÓN	ESTABILIDAD CORREGIDA	
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
1.1	5,00	6,51	1135,60	1138,60	586,60	2,057										2578,40	0,960	2475,26	10,80
1.2		6,48	1135,80	1139,20	592,30	2,077										2682,50	0,968	2596,66	11,75
1.3		6,43	1123,20	1125,80	585,80	2,080											1878,60	0,980	1841,03
PROMEDIO						2,071	2,369	2,371	0,036	77,168	12,638	10,194	22,832	5,327	48,849			2304,32	11,26
2.1	5,50	6,69	1136,00	1138,80	608,60	2,143										3060,54	0,925	2831,00	12,70
2.2		6,55	1138,20	1140,30	617,20	2,176										2859,89	0,953	2725,47	10,60
2.3		6,47	1117,00	1120,40	585,30	2,087										1825,74	0,97	1770,97	11,50
PROMEDIO						2,135	2,352	2,362	0,183	79,132	9,597	11,271	20,868	5,327	54,009			2442,48	11,60
3.1	6,00	7,13	1254,40	1257,30	685,40	2,193										4002,08	0,834	3337,73	12,60
3.2		6,32	1105,40	1106,70	620,60	2,274										3201,66	1,008	3227,27	14,50
3.3		6,62	1138,60	1140,80	610,80	2,148										2174,13	0,939	2041,51	12,40
PROMEDIO						2,205	2,336	2,342	0,118	81,291	5,840	12,869	18,709	5,889	68,787			2868,84	13,17
4.1	6,5	6,68	1177,80	1180,40	657,20	2,251										4037,36	0,928	3746,67	18,10
4.2		7,13	1220,40	1223,70	651,10	2,131										3234,74	0,834	2697,77	18,30
4.3		6,75	1137,00	1143,60	645,60	2,283										3464,06	0,91	3152,29	13,20
PROMEDIO						2,222	2,320	2,328	0,164	81,469	4,559	13,973	18,531	6,347	75,399			3198,91	16,53
5.1	7,00	6,61	1195,20	1197,30	655,40	2,206										2447,55	0,941	2303,14	18,80
5.2		7,00	1200,70	1208,40	638,60	2,107										2670,255	0,858	2291,08	20,30
5.3		6,82	1184,60	1187,30	642,80	2,176										2357,145	0,893	2104,93	10,30
PROMEDIO						2,163	2,304	2,310	0,127	78,878	6,373	14,749	21,122	6,882	69,829			2233,05	16,47

Tabla 76. Diseño mezcla Asfáltica Método Marshall 2% Aceite de motor usado

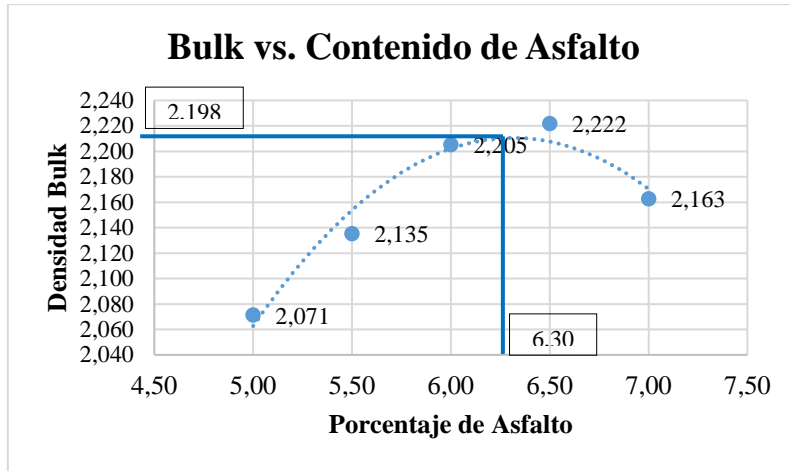


Gráfico 44. Densidad Bulk vs. Contenido de Asfalto 2%
Fuente: Carlos Martínez

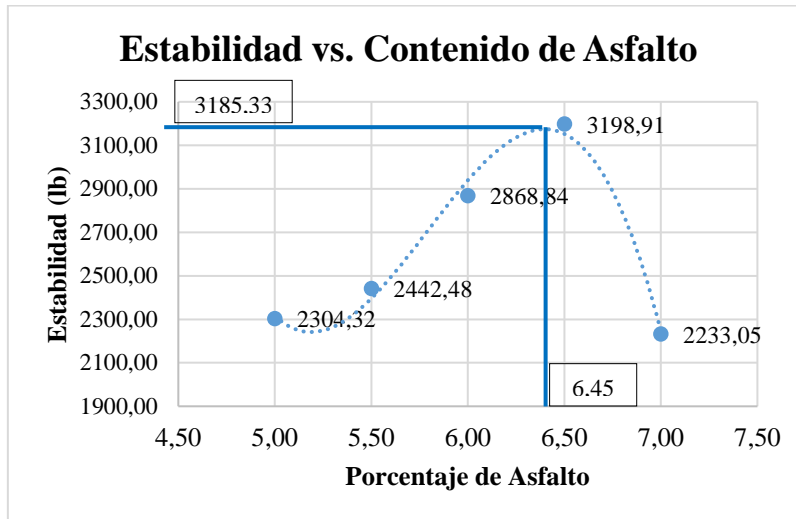


Gráfico 45. Estabilidad vs. Contenido de Asfalto 2%
Fuente: Carlos Martínez

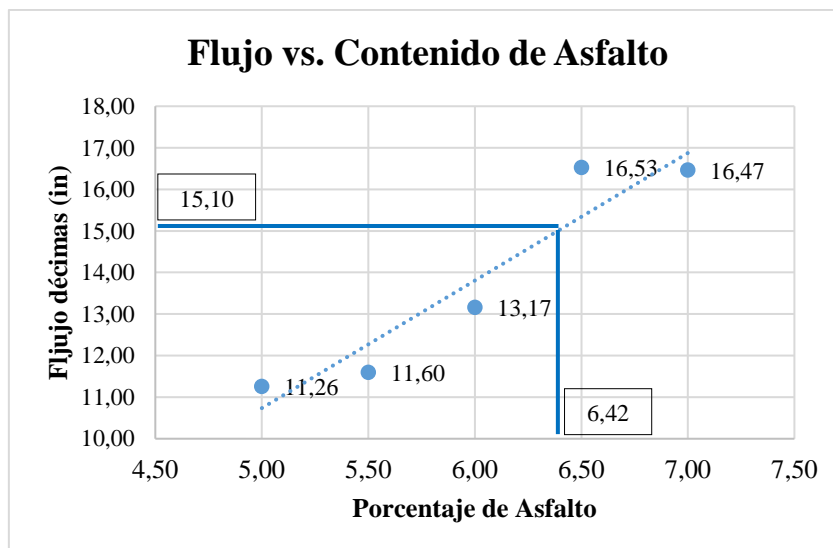


Gráfico 46. Flujo vs. Contenido de Asfalto 2%
Fuente: Carlos Martínez

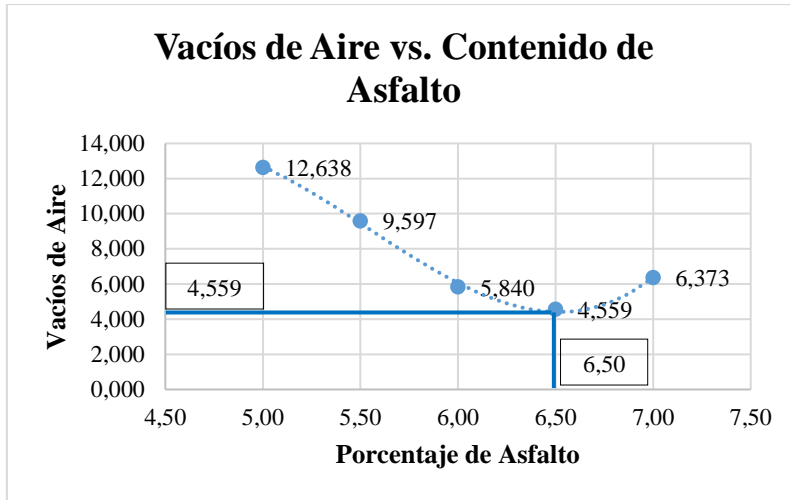


Gráfico 47. Vacíos de aire vs. Contenido de Asfalto 2%
Fuente: Carlos Martínez

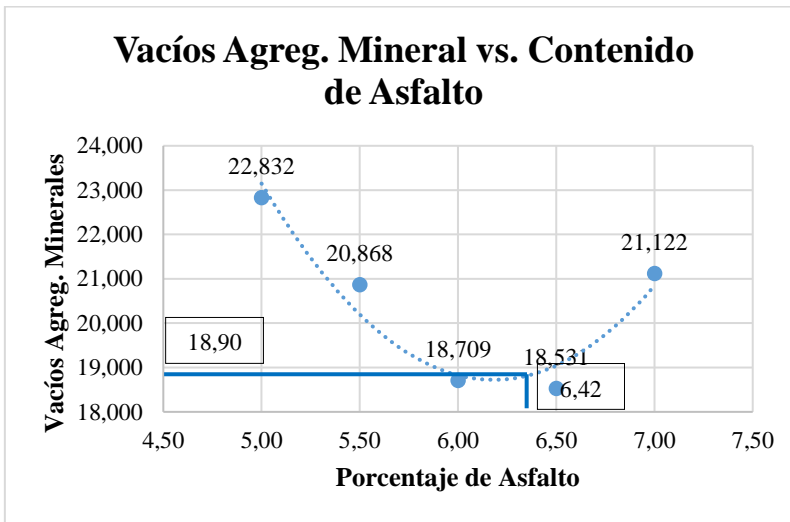


Gráfico 48. Vacíos Agregado Mineral vs. Contenido de Asfalto 2%
Fuente: Carlos Martínez

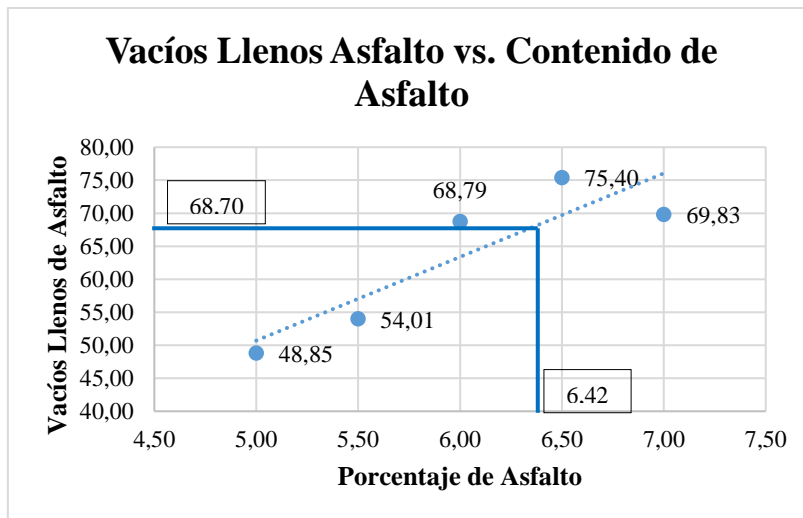


Gráfico 49. Vacíos Llenos de Asfalto vs. Contenido de Asfalto 2%
Fuente: Carlos Martínez

3.38. Determinación del Contenido óptimo de Asfalto mezcla 2% Aceite de motor usado.

Para determinar el contenido óptimo de asfalto se calcula el promedio de los valores máximos de los gráficos obtenidos: 1) Densidad Bulk vs. Contenido de Asfalto, 2) Estabilidad vs. Contenido de Asfalto, 3) Vacíos vs. Contenido de Asfalto.

Contenido óptimo de Asfalto con 2% de Aceite de Motor Usado	
Densidad Bulk vs. Contenido de Asfalto	6,30%
Estabilidad vs. Contenido de Asfalto	6,45%
Vacíos vs. Contenido de Asfalto	6,50%
Contenido óptimo de Asfalto	6,42%

Tabla 77. Determinación del Contenido óptimo de Asfalto mezcla con 2% de AMU
Fuente: Carlos Martínez

Se determina que el valor del contenido óptimo de asfalto respecto a la mezcla asfáltica convencional incrementó en 0,34%, así también con respecto a la mezcla modificada con 1% de aceite de motor usado incrementó en 0,07%. Para determinar el valor de flujo, se traza una línea desde las abscisas con el porcentaje óptimo calculado anteriormente, haciendo chocar con la línea de tendencia, se obtiene un valor de flujo de **15,10** décimas de pulgada. Los valores obtenidos se comparan con los estándares de la norma Nevi-12 propuesta inicialmente en el tema de investigación.

Criterio	Tráfico Alto	Valor obtenido
Golpes por cara	75	75
Estabilidad	1800 lb	3163,17 lb
Flujo 0.25 mm	8-14	15,10
Vacíos de Aire, %	3-5	4,46%
Vacíos de Agregado Mineral, %	14	18,90
Vacíos Llenos de Asfalto, %	65-75	68,70

Tabla 78. Comparación de los Resultados obtenidos y la Norma Nevi-12 2% AMU
Fuente: Carlos Martínez

En los valores calculados hay que destacar que el valor de flujo no satisface los parámetros que establece la normativa Nevi-12, los valores de flujo establecido (8-14), sin embargo, el valor calculado es **15,10** décimas de pulgada.

3.39. Análisis de Resultados

En este literal se procede analizar y comparar los resultados obtenidos en la mezcla convencional, así también en las mezclas modificadas con 1% y 2% de aceite de motor usado. Se procederá a contrastar los principales parámetros: Densidad Bulk, Estabilidad, Flujo, Vacíos. Así también se evaluará el incremento en el contenido óptimo de asfalto en el diseño de cada una de las tres mezclas.

3.40. Resumen resultados Ensayos Densidad Bulk.

DATOS DENSIDAD BULK		
Sin Asfalto	5,00	2,148
	5,50	2,195
	6,00	2,231
	6,50	2,217
	7,00	2,168
1%	5,00	2,135
	5,50	2,178
	6,00	2,229
	6,50	2,213
	7,00	2,177
2%	5,00	2,071
	5,50	2,135
	6,00	2,205
	6,50	2,222
	7,00	2,163

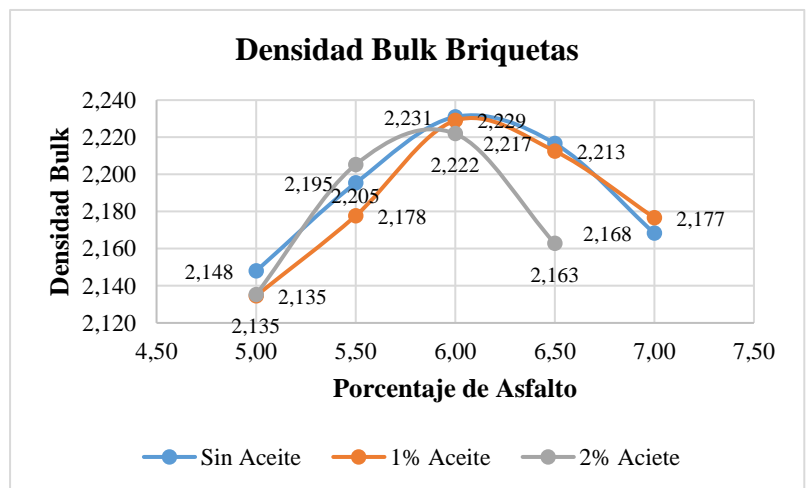
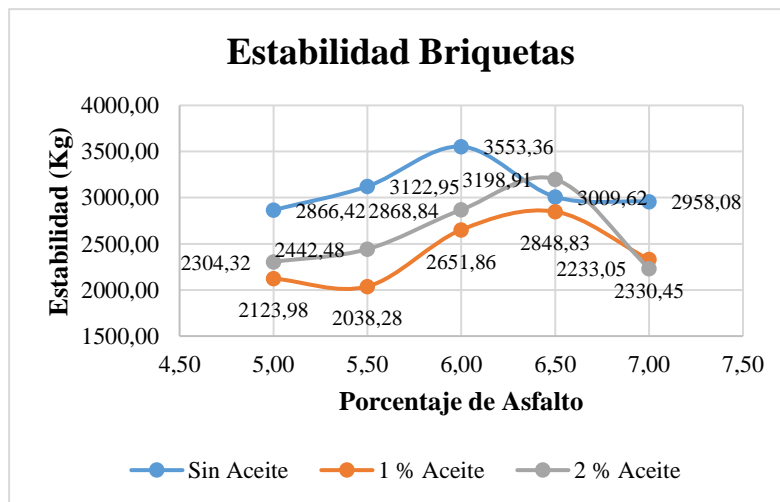


Tabla 79. Resumen resultados Densidad Bulk

3.41. Resumen resultados Ensayos Estabilidad.

DATOS ESTABILIDAD		
Sin Asfalto	5,00	2866,42
	5,50	3122,95
	6,00	3553,36
	6,50	3009,62
	7,00	2958,08
1%	5,00	2123,98
	5,50	2038,28
	6,00	2651,86
	6,50	2848,83
	7,00	2330,45
2%	5,00	2304,32
	5,50	2442,48
	6,00	2868,84
	6,50	3198,91
	7,00	2233,05

Tabla 80. Resumen resultados ensayos Estabilidad



3.42. Resumen resultados ensayos de Flujo.

DATOS FLUJO		
Sin Asfalto	5,00	11,11
	5,50	11,17
	6,00	12,83
	6,50	12,83
	7,00	12,83
1%	5,00	12,19
	5,50	14,00
	6,00	16,73
	6,50	17,50
	7,00	19,97
2%	5,00	11,26
	5,50	11,60
	6,00	13,17
	6,50	16,53
	7,00	16,47

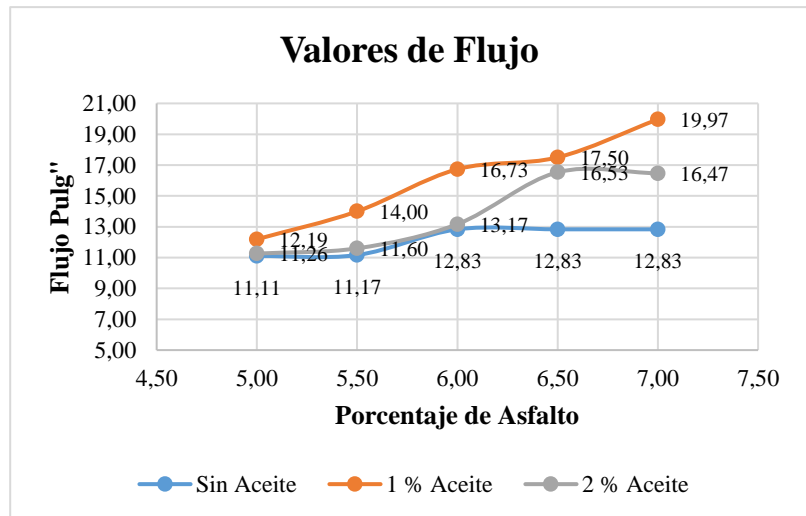


Tabla 81. Resumen resultados flujo

3.43. Resultados cálculo de vacíos

DATOS VACÍOS		
Sin Asfalto	5,00	9,484
	5,50	6,780
	6,00	4,660
	6,50	4,784
	7,00	6,136
1%	5,00	9,970
	5,50	7,568
	6,00	4,746
	6,50	4,919
	7,00	5,732
2%	5,00	12,638
	5,50	9,597
	6,00	5,840
	6,50	4,559
	7,00	6,373

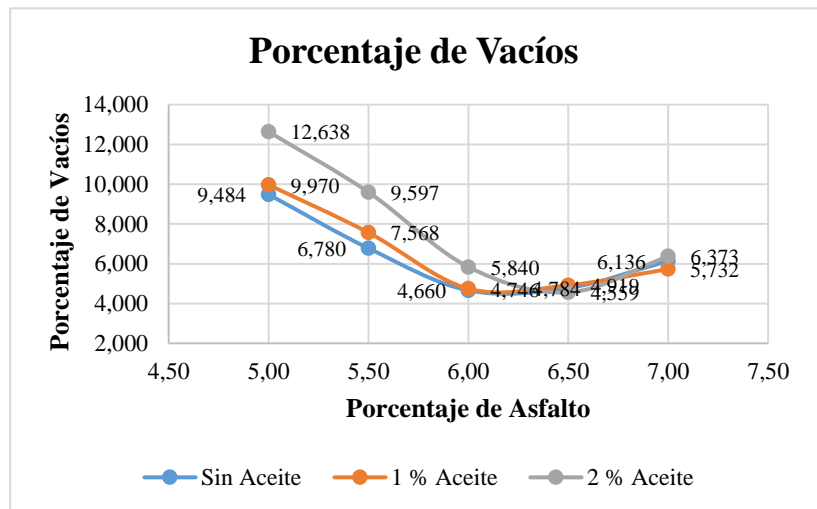


Tabla 82. Resumen resultados Vacíos

3.44. Resumen Cálculo de porcentajes óptimos de Asfalto

Porcentajes Óptimos	
Sin Aceite	6,07
1%	6,35
2%	6,42

Tabla 83. Resumen resultados porcentajes óptimos de Asfalto

Fuente: Carlos Martínez

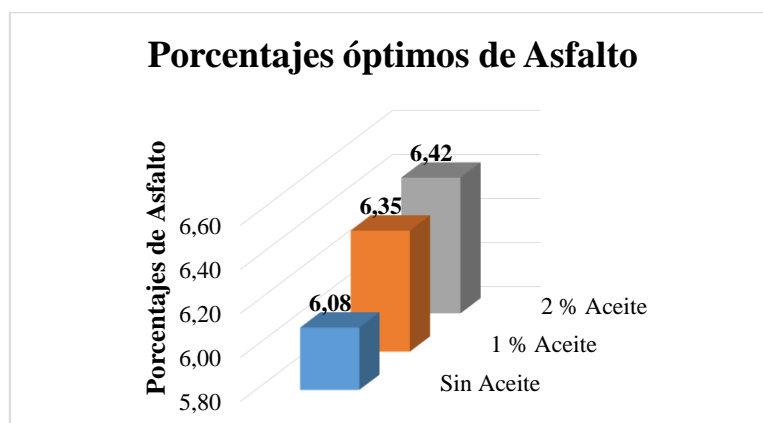


Gráfico 50. Porcentajes óptimos de Asfalto

Fuente: Carlos Martínez

3.45. Verificación de la Hipótesis

A través de la ejecución y posterior análisis de los ensayos de la mezcla asfáltica, convencional y modificada con aceite de motor usado, se observó variación en las propiedades de la mezcla asfáltica. En primera instancia el contenido óptimo de asfalto de la mezcla asfáltica tradicional se obtuvo un porcentaje de 6,08%, mientras que para la mezcla asfáltica modificada con aceite de motor usado con 1% se obtuvo un contenido óptimo de asfalto de 6,35%, así también para la mezcla asfáltica modificada con 2% de aceite de motor usado el contenido óptimo de asfalto se calculó en 6,42%, evidenciando así el incremento en el contenido de asfalto compensatorio al porcentaje de aceite de motor usado añadido a la mezcla en caliente tradicional.

En términos de estabilidad tanto la mezcla asfáltica como la convencional cumplen con el estándar de la Norma Nevi-12 de 1800 lb, así para un 6,08% se obtuvo una estabilidad de 3312,02 lb, mientras que para el 1% de aceite de motor usado se obtuvo 28544,27 lb, por otro lado para un 2% de aceite de motor usado se obtuvo un valor de 3163, 17 lb.

Sin embargo el parámetro discriminante entre la mezcla convencional y las modificadas fue el valor de flujo, la norma Nevi-12 establece para una mezcla asfáltica de tráfico pesado valores de flujo entre 8 y 14 décimas de pulgada, en la mezcla asfáltica convencional se cumple el parámetro con un valor de flujo de 13,10, mientras que para el 1% y 2% de aceite añadido a la mezcla tradicional se obtuvieron flujos de 17,41 y 15,10 décimas de pulgada respectivamente, los valores obtenidos no satisfacen los parámetros establecidos en la Norma Nevi-12, por lo tanto el uso de aceite de motor usado en mezclas asfálticas no es recomendable ya que los valores de flujo son elevados para condiciones de tránsito pesado.

CAPÍTULO IV

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. CONCLUSIONES

- Se determinó que el Peso específico Bulk disminuye al adicionar aceite de motor usado de acuerdo al porcentaje añadido a la mezcla asfáltica en caliente.
- Se estableció que el contenido óptimo de asfalto incrementa al incorporar aceite de motor usado en 0,27% para 1% y 0,34% para 2%.
- Se estableció que la mezcla asfáltica convencional cumple con todos los parámetros de la Norma Nevi-12.
- Se concluyó que los valores de estabilidad de las mezclas modificadas con aceite de motor usado, son menores a los valores de la mezcla asfáltica convencional, sin embargo los mismos satisfacen las exigencias de la norma Nevi-12 para tráfico pesado (1800 lb).
- Se concluyó que la adición de aceite de motor usado a la mezcla asfáltica en caliente genera valores de flujo cuyos valores no cumplen los requerimientos de la norma Nevi-12; 17,41 décimas de pulgada para 1% y 15,10 décimas de pulgada para 2%.
- Se determinó que para la adición de 2% de aceite de motor usado, existe desprendimiento de los agregados, es decir los mismos perdieron adherencia al momento de ejecutar los ensayos de estabilidad a diferencia de la mezcla convencional y modificada con 1% de aceite de motor usado.
- Se concluyó que existió un incremento en los valores de vacíos para las mezclas modificadas con aceite de motor usado, es decir en la mezcla no existió un adecuado recubrimiento por parte del asfalto.

4.2. RECOMENDACIONES

- Se recomienda tomar una muestra representativa de cada agregado, es decir no se deben tomar muestras de la parte superior o inferior por efectos de segregación con el fin de obtener resultados representativos.
- Se recomienda muestrear el asfalto en recipientes metálicos con el fin de calentarlo para que el mismo presente fluidez para su posterior uso en los ensayos y elaboración de briquetas.
- Se recomienda ejecutar los ensayos que permitan conocer las propiedades físicas y mecánicas de los agregados para determinar si los mismos cumplen con los requerimientos de normativa de construcción vigente.
- Se recomienda controlar la temperatura de mezclado y compactación del asfalto y los agregados (140°C-150°C), si la mezcla se enfría se debe desechar pues el asfalto no se adhiere correctamente a los agregados, mientras que si el asfalto es calentado en exceso el mismo pierde sus propiedades y presenta envejecimiento prematuro.
- Se recomienda ejecutar el número de golpes de acuerdo al tipo de tráfico seleccionado, es un factor determinante en la densidad de la mezcla.
- Se recomienda mezclar homogéneamente el asfalto con el aceite de motor usado dejando reposar la mezcla por al menos 30 minutos antes de realizar el mezclado y posterior compactación de la mezcla.
- Se recomienda verificar la temperatura del Baño María a 60 °C, así también el tiempo en el que las briquetas tienen que estar sumergidas (30 minutos).
- Se recomienda sacar las briquetas del Baño María y colocarlas en la máquina para el ensayo de estabilidad en un tiempo no mayor a 30 segundos.
- Se recomienda colocar líneas de tendencia representativas es decir cuyo valor de “R” en Excel se aproximen a 1.
- Se recomienda identificar correctamente los valores máximos de la línea de tendencia con el fin de evitar distorsiones en los resultados de contenido óptimo de asfalto en cada mezcla ejecutada.
- Se recomienda verificar la precisión de los equipos en cada uno de los ensayos, así también los parámetros para el diseño de mezclas vigente.

C. MATERIALES DE REFERENCIA

1. Bibliografía

- [1] [En línea]. Available: <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/546>. [Último acceso: 10 10 2020].
- [2] [En línea]. Available: <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/8431>. [Último acceso: 10 10 2020].
- [3] [En línea]. Available: <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/221482/221482.pdf>. [Último acceso: 10 10 2020].
- [4] [En línea]. Available: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/60083>. [Último acceso: 10 10 2020].
- [5] [En línea]. Available: https://labandeira.eu/publicacions/ICE_847_127-148__EC8C62D45CF63AA664C7217770335B20.pdf. [Último acceso: 12 10 2020].
- [6] [En línea]. Available: <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/742/1/T-UCE-0011-31.pdf>. [Último acceso: 12 10 2020].
- [7] [En línea]. Available: <https://core.ac.uk/download/pdf/11055297.pdf>. [Último acceso: 12 11 2020].
- [8] [En línea]. Available: http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lic/de_1_a/capitulo1.pdf. [Último acceso: 14 Diciembre 2020].
- [9] [En línea]. Available: <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/11811/capitulo2.pdf>. [Último acceso: 14 Diciembre 2020].
- [10] [En línea]. Available: <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/5675/Capitulo4.pdf>. [Último acceso: 14 Diciembre 2020].
- [11] [En línea]. Available: <https://www.compraspublicas.gob.ec/ProcesoContratacion/compras/PC/bajarArchiv>

- o.cpe?Archivo=Q-0lV8qXwvx1JVS6I5lmjxj0G2nimBUw60raa7fPcw8. [Último acceso: 14 Diciembre 2020].
- [12] [En línea]. Available: <http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/701/1/10136229.pdf>. [Último acceso: 14 Diciembre 2020].
- [13] [En línea]. Available: <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/11811/capitulo2.pdf>. [Último acceso: 14 Diciembre 2020].
- [14] [En línea]. Available: <http://repositorio.ucsg.edu.ec/bitstream/3317/1159/1/T-UCSG-PRE-ING-IC-19.pdf>. [Último acceso: 15 Diciembre 2020].
- [15] [En línea]. Available: <http://repositorio.espe.edu.ec/xmlui/handle/21000/8431>. [Último acceso: 15 Diciembre 2020].
- [16] [En línea]. Available: www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/10811/1/T-UCE-0011-288.pdf. [Último acceso: Diciembre 15 2020].
- [17] [En línea]. Available: <https://repositorio.upse.edu.ec/handle/46000/2267?locale=es>. [Último acceso: 15 Diciembre 2020].
- [18] [En línea]. Available: <https://www.slideshare.net/ludwigtrinidad/agregados-para-la-construccion>. [Último acceso: 2020 Diciembre 15].
- [19] [En línea]. Available: <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/7321/Capitulo4.pdf>. [Último acceso: 15 Diciembre 2020].
- [20] [En línea]. Available: <https://www.monografias.com/docs/Astm-D-75-P35T3JGHVP2A5>. [Último acceso: 15 Diciembre 2020].
- [21] [En línea]. Available: https://www.academia.edu/37324069/Designaci%C3%B3n_ASTM_C_131_01. [Último acceso: 16 Diciembre 2020].
- [22] [En línea]. Available: <http://www2.uca.edu.sv/mecanica-estructural/materias/materialesCostruccion/guiasLab/ensayoAgregados/Densidad%20ogravedad%20especifica%20y%20absorcion%20de%20agregados%20finos.pdf>. [Último acceso: 16 Diciembre 2020].

- [23] [En línea]. Available: <http://www2.uca.edu.sv/mecanica-estructural/materias/materialesCostruccion/guiasLab/ensayoAgregados/Densidad%20gravedad%20especifica%20y%20absorcion%20de%20agregados%20finos.pdf>. [Último acceso: 16 Diciembre 2020].
- [24] [En línea]. Available: <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/546/1/TESIS.pdf>. [Último acceso: 16 Diciembre 2020].
- [25] [En línea]. Available: <https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/8116/1/TESIS%20%20RECICLAJE%20DE%20ACEITE....pdf>. [Último acceso: 16 Diciembre 2020].
- [26] [En línea]. Available: <http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/30240/1/TESIS%20%20ANA%20GABRIELA%20PRECIADO.pdf>. [Último acceso: 18 Diciembre 2020].
- [27] [En línea]. Available: <https://repositorio.uide.edu.ec/bitstream/37000/2217/1/T-UIDE-1264.pdf>. [Último acceso: 18 Diciembre 2020].
- [28] [En línea]. Available: https://www.academia.edu/39782610/Design_Methods_Asphalt_Mix_7th_Edition_MS_2_Asphalt_Mix_Design_Methods_7th_Edition. [Último acceso: 18 Diciembre 2020].
- [29] [En línea]. Available: <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/2225>. [Último acceso: 20 Diciembre 2020].
- [30] [En línea]. Available: https://www.obraspublicas.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2013/12/01-12-2013_Manual_NEVI-12_VOLUMEN_3.pdf. [Último acceso: 20 Diciembre 2020].
- [31] [En línea]. Available: <https://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt246.pdf>. [Último acceso: 20 Diciembre 2020].

[32] [En línea]. Available:
[http://repositorio.puce.edu.ec/bitstream/handle/22000/15089/TESIS-
%20MEZCLA%20ASFALTICA.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.puce.edu.ec/bitstream/handle/22000/15089/TESIS-%20MEZCLA%20ASFALTICA.pdf?sequence=1&isAllowed=y). [Último acceso: 20
Diciembre 2020].

2. Anexos

2.1. Factor de corrección para la Estabilidad Marshall.







ESPESOR (mm)	FACTOR	ESPESOR (mm)	FACTOR	ESPESOR (mm)	FACTOR
31,5	3,902	36,5	3,030	41,5	2,246
31,6	3,884	36,6	3,014	41,6	2,234
31,7	3,867	36,7	2,999	41,7	2,223
31,8	3,850	36,8	2,983	41,8	2,211
31,9	3,833	36,9	2,968	41,9	2,199
32,0	3,815	37,0	2,952	42,0	2,187
32,1	3,798	37,1	2,936	42,1	2,175
32,2	3,780	37,2	2,921	42,2	2,163
32,3	3,763	37,3	2,905	42,3	2,151
32,4	3,745	37,4	2,889	42,4	2,139
32,5	3,728	37,5	2,874	42,5	2,128
32,6	3,710	37,6	2,858	42,6	2,116
32,7	3,693	37,7	2,843	42,7	2,104
32,8	3,675	37,8	2,827	42,8	2,092
32,9	3,658	37,9	2,811	42,9	2,080
33,0	3,640	38,0	2,796	43,0	2,070
33,1	3,623	38,1	2,780	43,1	2,060
33,2	3,605	38,2	2,763	43,2	2,050
33,3	3,588	38,3	2,745	43,3	2,040
33,4	3,570	38,4	2,728	43,4	2,030
33,5	3,554	38,5	2,710	43,5	2,020
33,6	3,538	38,6	2,693	43,6	2,010
33,7	3,522	38,7	2,675	43,7	2,000
33,8	3,506	38,8	2,658	43,8	1,990
33,9	3,490	38,9	2,640	43,9	1,980
34,0	3,474	39,0	2,623	44,0	1,970
34,1	3,458	39,1	2,605	44,1	1,960
34,2	3,442	39,2	2,588	44,2	1,950
34,3	3,426	39,3	2,570	44,3	1,940
34,4	3,410	39,4	2,553	44,4	1,930
34,5	3,394	39,5	2,535	44,5	1,920
34,6	3,378	39,6	2,517	44,6	1,912
34,7	3,362	39,7	2,500	44,7	1,904
34,8	3,346	39,8	2,486	44,8	1,896
34,9	3,330	39,9	2,471	44,9	1,888
35,0	3,311	40,0	2,457	45,0	1,879
35,1	3,293	40,1	2,443	45,1	1,871
35,2	3,274	40,2	2,428	45,2	1,863
35,3	3,255	40,3	2,414	45,3	1,855
35,4	3,236	40,4	2,399	45,4	1,847
35,5	3,218	40,5	2,385	45,5	1,839
35,6	3,199	40,6	2,371	45,6	1,831
35,7	3,180	40,7	2,356	45,7	1,823
35,8	3,161	40,8	2,342	45,8	1,814
35,9	3,143	40,9	2,328	45,9	1,806
36,0	3,124	41,0	2,313	46,0	1,798
36,1	3,105	41,1	2,299	46,1	1,790
36,2	3,086	41,2	2,284	46,2	1,782
36,3	3,068	41,3	2,270	46,3	1,774
36,4	3,049	41,4	2,258	46,4	1,766


ESPESOR (mm)	FACTOR	ESPESOR (mm)	FACTOR	ESPESOR (mm)	FACTOR
46,5	1,758	51,5	1,435	56,5	1,216
46,6	1,750	51,6	1,430	56,6	1,213
46,7	1,742	51,7	1,425	56,7	1,209
46,8	1,734	51,8	1,420	56,8	1,205
46,9	1,726	51,9	1,415	56,9	1,201
47,0	1,718	52,0	1,410	57,0	1,198
47,1	1,710	52,1	1,405	57,1	1,194
47,2	1,702	52,2	1,400	57,2	1,190
47,3	1,694	52,3	1,395	57,3	1,187
47,4	1,686	52,4	1,390	57,4	1,184
47,5	1,678	52,5	1,386	57,5	1,181
47,6	1,670	52,6	1,381	57,6	1,178
47,7	1,663	52,7	1,377	57,7	1,174
47,8	1,656	52,8	1,373	57,8	1,171
47,9	1,649	52,9	1,368	57,9	1,168
48,0	1,643	53,0	1,364	58,0	1,165
48,1	1,636	53,1	1,359	58,1	1,162
48,2	1,629	53,2	1,355	58,2	1,159
48,3	1,622	53,3	1,351	58,3	1,156
48,4	1,615	53,4	1,346	58,4	1,153
48,5	1,608	53,5	1,342	58,5	1,149
48,6	1,601	53,6	1,338	58,6	1,146
48,7	1,594	53,7	1,333	58,7	1,143
48,8	1,588	53,8	1,329	58,8	1,140
48,9	1,581	53,9	1,324	58,9	1,137
49,0	1,574	54,0	1,320	59,0	1,134
49,1	1,567	54,1	1,316	59,1	1,131
49,2	1,560	54,2	1,311	59,2	1,128
49,3	1,554	54,3	1,307	59,3	1,124
49,4	1,549	54,4	1,303	59,4	1,121
49,5	1,543	54,5	1,298	59,5	1,118
49,6	1,538	54,6	1,294	59,6	1,115
49,7	1,532	54,7	1,289	59,7	1,112
49,8	1,526	54,8	1,285	59,8	1,109
49,9	1,521	54,9	1,281	59,9	1,106
50,0	1,515	55,0	1,276	60,0	1,103
50,1	1,509	55,1	1,272	60,1	1,099
50,2	1,504	55,2	1,268	60,2	1,096
50,3	1,498	55,3	1,263	60,3	1,093
50,4	1,493	55,4	1,259	60,4	1,090
50,5	1,487	55,5	1,254	60,5	1,087
50,6	1,481	55,6	1,250	60,6	1,084
50,7	1,476	55,7	1,246	60,7	1,081
50,8	1,470	55,8	1,243	60,8	1,078
50,9	1,465	55,9	1,239	60,9	1,074
51,0	1,460	56,0	1,235	61,0	1,071
51,1	1,455	56,1	1,231	61,1	1,068
51,2	1,450	56,2	1,228	61,2	1,065

51,3	1,445	56,3	1,224	61,3	1,062
51,4	1,440	56,4	1,220	61,4	1,059
ESPEJOR (mm)	FACTOR	ESPEJOR (mm)	FACTOR	ESPEJOR (mm)	FACTOR
61,5	1,056	66,4	0,936	71,3	0,834
61,6	1,053	66,5	0,934	71,4	0,832
61,7	1,049	66,6	0,932	71,5	0,830
61,8	1,046	66,7	0,930	71,6	0,829
61,9	1,043	66,8	0,928	71,7	0,828
62,0	1,040	66,9	0,925	71,8	0,826
62,1	1,037	67,0	0,923	71,9	0,825
62,2	1,035	67,1	0,920	72,0	0,824
62,3	1,032	67,2	0,918	72,1	0,823
62,4	1,029	67,3	0,915	72,2	0,821
62,5	1,027	67,4	0,913	72,3	0,820
62,6	1,024	67,5	0,910	72,4	0,819
62,7	1,021	67,6	0,908	72,5	0,818
62,8	1,019	67,7	0,905	72,6	0,816
62,9	1,016	67,8	0,903	72,7	0,815
63,0	1,013	67,9	0,900	72,8	0,814
63,1	1,011	68,0	0,898	72,9	0,813
63,2	1,008	68,1	0,895	73,0	0,811
63,3	1,005	68,2	0,893	73,1	0,810
63,4	1,003	68,3	0,890	73,2	0,808
63,5	1,000	68,4	0,888	73,3	0,806
63,6	0,998	68,5	0,886	73,4	0,804
63,7	0,995	68,6	0,884	73,5	0,802
63,8	0,993	68,7	0,883	73,6	0,800
63,9	0,990	68,8	0,881	73,7	0,798
64,0	0,988	68,9	0,879	73,8	0,796
64,1	0,985	69,0	0,877	73,9	0,794
64,2	0,983	69,1	0,875	74,0	0,792
64,3	0,980	69,2	0,873	74,1	0,790
64,4	0,978	69,3	0,871	74,2	0,788
64,5	0,975	69,4	0,869	74,3	0,786
64,6	0,973	69,5	0,868	74,4	0,784
64,7	0,970	69,6	0,866	74,5	0,782
64,8	0,968	69,7	0,864	74,6	0,780
64,9	0,965	69,8	0,862	74,7	0,779
65,0	0,963	69,9	0,860	74,8	0,778
65,1	0,960	70,0	0,858	74,9	0,776
65,2	0,958	70,1	0,856	75,0	0,775
65,3	0,956	70,2	0,854	75,1	0,774
65,4	0,954	70,3	0,853	75,2	0,773
65,5	0,953	70,4	0,851	75,3	0,771
65,6	0,951	70,5	0,849	75,4	0,770
65,7	0,949	70,6	0,847	75,5	0,769
65,8	0,947	70,7	0,845	75,6	0,768
65,9	0,945	70,8	0,843	75,7	0,766
66,0	0,943	70,9	0,841	75,8	0,765
66,1	0,941	71,0	0,839	75,9	0,764
66,2	0,939	71,1	0,838	76,0	0,763
66,3	0,938	71,2	0,836	76,1	0,761

Tabla 84. Factor de corrección de la Estabilidad Marshall de acuerdo al espesor de la briqueta

2.2. Anexos Fotográficos

Muestreo de Agregados Planta Alvarado	Muestreo Asfalto
	
Clasificación Agregado 3/8" y Fino	Granulometría Agregado 3/4"
	
Material Retenido en tamices	Granulometría Agregado Fino
	
Gravedad Específica Agregado 3/4"	Gravedad Específica Agregado 3/8"

	
<p>Peso seco Agregado Fino</p>	<p>Peso Agua+Muestra+Picnómetro</p>
	
<p>Peso Agregado Fino (briquetas)</p>	<p>Agregados 3/4", 3/8", fino</p>
	
<p>Calentando Asfalto a 150 °C</p>	<p>Calentando Agregado fino</p>



Temperatura de los agregados (140°C-150°C)



Pesando agregados calientes



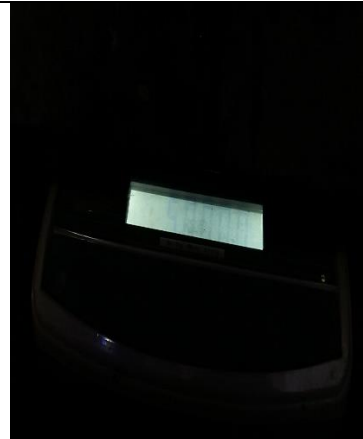
Incorporando Asfalto para elab. briquetas









Peso total agregados+asfalto



Calentando la mezcla de Agregados y Asfalto



Colcando el molde en la base del pedestal

	
<p>Colcando la mezcla en el mode</p>	<p>Briquetas convencionales elaboradas</p>
	
<p>Briquetas elaboradas</p>	<p>Pesando el Aceite de Motor Usado</p>
	
<p>Briquetas con 1% de Aceite de Motor Usado</p>	<p>Briquetas con 2% de Aceite de motor Usado</p>



Pesando las briquetas secas



Baño María con Briquetas



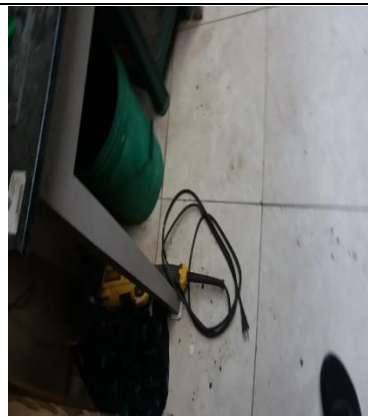
Mezcla para ensayo Rice



Peso en agua de briquetas



Máquina Ensayo Rice



Ensayo de Estabilidad y Flujo



Lectura del Dial y Carga ensayo de Estabilidad	Lectura del Dial y Carga Ensayo de Estabilidad
	

Tabla 85. Anexos fotográficos
Fuente: Carlos Martínez