



Universidad
Continental

FACULTAD DE INGENIERÍA

Escuela Académico Profesional de Ingeniería Civil

Tesis

**Influencia de la fibra sintética de alta tenacidad
DRYMIX RC 4020 en la estabilidad, fluencia y
reducción de fisuramiento por fatiga en mezclas
asfálticas en caliente**

Danilo Gutarra Lara

Huancayo, 2018

para optar el Título Profesional de
Ingeniero Civil



Repositorio Institucional Continental
Tesis digital



Obra protegida bajo la licencia de [Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivadas 2.5 Perú](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.5/peru/)

Agradecimientos

A Dios y Don Bosco

Le agradezco a Dios por la salud y la vida; por guiar mis pasos por el sendero bienaventurado. Y a San Juan Bosco por ser para mí un modelo de vida y lucha por los ideales de cada uno de nosotros.

A mi familia

Quiero agradecer en esta ocasión por el apoyo y motivación incondicional que día a día me van brindando mis padres y hermanos, por lo cual debo mi agradecimiento eterno y por las enseñanzas aprendidas por todos los consejos que conllevan a desarrollar una persona que lucha día a día en busca del éxito y la felicidad.

Al Mg.Sc. Augusto Elías García Corzo

Por el apoyo y esfuerzo brindado a lo largo del desarrollo de la presente tesis; quien con sus conocimientos y experiencia orientaron el desarrollo integro de la investigación.

A mis mejores amigos

Por la confianza depositada en mí; y por su amistad incondicional que me brindaron en cada momento. Y por el apoyo directo como asistentes en el desarrollo de la presente investigación.

“Las decisiones han de seguir un proceso de reflexión, y aunque tengan en cuenta la intuición, nunca han de depender de la emoción del momento”

Shakespeare

Dedicatoria

Esta investigación se la dedico a mis padres Albino y Ernestina, la mejor pareja que haya conocido hasta el día de hoy, a quienes debo todo lo que soy y seré, por guiarme y desear en ser un buen profesional. Por ser, además, los padres que siempre desee tener.

Índice de contenido

Agradecimientos	II
Dedicatoria	III
Índice de contenido	IV
Índice de tablas	VIII
Índice de figuras.....	X
Lista de fotografías	XII
Resumen.....	XIII
Abstract.....	XV
Introducción	XVII

Capítulo I Planteamiento de la investigación

1.1. Planteamiento del problema.....	1
1.2. Formulación del problema	2
1.2.1. Problema general.....	2
1.2.2. Problemas específicos.	2
1.3. Objetivos	2
1.3.1. Objetivo general.	2
1.3.2. Objetivos específicos.	3
1.4. Justificación de la investigación	3
1.4.1. Justificación Teórica.	3
1.4.2. Justificación Metodológica.	3
1.4.3. Justificación Práctica.....	4
1.5. Formulación de las hipótesis.....	4
1.5.1. Hipótesis general	4
1.5.2. Hipótesis específicas.	4
1.6. Variables	4
1.6.1. Variable Independiente.	4
1.6.2. Variable Dependiente.....	5

Capítulo II Marco teórico

2.1. Antecedentes de la investigación	7
2.1.1. Antecedentes Internacionales.....	7
2.1.2. Antecedentes Nacionales.	11
2.2. Bases teóricas	12
2.2.1. Teorías generales sobre pavimentos y mezclas asfálticas.....	12
2.2.2. Componentes de la mezcla asfáltica en caliente.	16
2.2.3. Propiedades de la mezcla asfáltica.....	52
2.2.4. Comportamiento y Caracterización de mezclas asfálticas.....	62
2.2.5. Patología en Pavimentos Flexibles.....	79

2.2.6. Métodos de diseño de mezclas.....	85
2.2.7. Requerimientos para las mezclas asfálticas de Diseño Marshall.	89
2.2.8. Análisis multicriterio con métodos discretos (MAUT y A.H.P.).....	91

Capítulo III Metodología

3.1. Métodos, y alcance de la investigación.....	99
3.1.1. Enfoque de la investigación.	99
3.1.2. Tipo de Investigación.	99
3.1.3. Alcance.....	100
3.2. Diseño de la investigación.	100
3.3. Población y muestra.	101
3.3.1. Población objetivo.....	101
3.3.2. Muestra.....	101
3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	102
3.4.1. Observación.....	102
3.4.2. Realización de pruebas estandarizadas.	102
3.4.3. Uso de instrumentos mecánicos y electrónicos.....	103
3.4.4. Uso de Instrumentos específicos propios de la disciplina (Diseño de pavimentos flexibles)	103
3.4.5. Información secundaria recolectada por otros investigadores.	103
3.5. Procesamiento de Datos	104

Capítulo IV Desarrollo de la Investigación

4.1. Etapa I: Selección y propiedades de los materiales empleados.	107
4.1.1. Fibra acrílica DRYMIX RC 4020.	107
4.1.2. Agregados finos y gruesos.	109
4.1.3. Cemento asfáltico.....	120
4.2. Etapa II: Diseño de mezclas asfálticas.....	120
4.2.1. Diseño de mezcla asfáltica patrón-Método Marshall.....	120
4.2.2. Diseños de mezclas asfálticas modificadas con fibras acrílicas.....	139
4.3. Etapa III: Ensayos a las mezclas asfálticas.	139
4.3.1. Preparación de los especímenes bituminosos (ASTM D 6926, 2010)...	140
4.3.2. Comportamiento a la fatiga de mezclas asfálticas modificadas.....	141
4.3.3. Ensayo realizado en vigas para determinar la resistencia a la flexión (con cargas a los tercios del tramo).	143
4.4. Etapa IV: Toma de decisión por métodos multicriterio discretos (MAUT y AHP).	145

Capítulo V Resultados y análisis de la investigación

5.1. Mezcla asfáltica patrón.	148
------------------------------------	-----

5.2.	Mezcla asfáltica modificada con fibras acrílicas de 20 mm – TIPO A.....	149
5.2.1.	Estabilidad Marshall.....	149
5.2.2.	Flujo.	152
5.3.	Mezcla asfáltica modificada con fibras acrílicas de 12 mm – TIPO B.....	152
5.3.1.	Estabilidad Marshall.....	152
5.3.2.	Flujo.	155
5.4.	Mezcla asfáltica modificada con fibras acrílicas de 8 mm – TIPO C.....	155
5.4.1.	Estabilidad Marshall.....	155
5.4.2.	Flujo.	158
5.5.	Comportamiento a la fatiga.....	158
5.5.1.	Fatiga en mezcla modificada con dosificación óptima de fibras acrílicas de 20 mm (óptimo Tipo A).	160
5.5.2.	Fatiga en mezcla modificada con dosificación óptima de fibras acrílicas de 12 mm (óptimo Tipo B).	161
5.5.3.	Fatiga en mezcla modificada con dosificación óptima de fibras acrílicas de 8 mm (óptimo Tipo C).	162
5.5.4.	Ensayo realizado en vigas para determinar la resistencia a la flexión (con cargas a los tercios del tramo).....	163
5.6.	Comparación de mezclas modificadas y su influencia por longitud de corte de las fibras.....	164
5.6.1.	Estabilidad Marshall, flujo y fatiga.	164
5.7.	Análisis multicriterio (Método MAUT y AHP).....	165

Capítulo VI

Análisis estadístico

6.1.	Validación de hipótesis.	169
6.1.1.	Hipótesis de la investigación N° 01.	169
6.1.2.	Hipótesis de la investigación N° 02.	172
6.1.3.	Hipótesis de la investigación N° 03.	174

Capítulo VII

Conclusiones y recomendaciones

7.1.	Conclusiones.	177
7.2.	Recomendaciones.....	181

Referencias bibliográficas	183
---	-----

Anexos	186
Anexo A: Comparación de costos.....	187
Anexo B: Ensayos para agregados.....	191
Anexo C: Diseño de mezcla asfáltica patrón	200
C.1. Determinación del óptimo contenido de asfalto	201
C.2. Mezcla asfáltica patrón	209
Anexo D: Diseño de mezcla asfáltica modificada TIPO A	211

Anexo E: Diseño de mezcla asfáltica modificada TIPO B	221
Anexo F: Diseño de mezcla asfáltica modificada TIPO C	231
Anexo G: Cemento asfáltico	241
Anexo H: Fibras acrílicas.....	243
Anexo I: Reporte de viscosidades.....	247
Anexo J: Panel fotográfico.....	256

Índice de tablas

Tabla 1. Matriz de operacionalización de variables.....	6
Tabla 2. Clasificación de mezclas asfálticas en caliente y principales características.....	15
Tabla 3. Requerimientos para los agregados gruesos.	29
Tabla 4. Requerimientos para los agregados finos.	30
Tabla 5. Husos granulométricos para mezclas asfálticas según el manual de carreteras.....	31
Tabla 6. Selección del tipo de cemento asfáltico	42
Tabla 7. Especificaciones del cemento asfáltico clasificado por penetración.	42
Tabla 8. Especificaciones del cemento asfáltico clasificado por viscosidad.	43
Tabla 9. Rangos de temperatura de aplicación (°C).....	44
Tabla 10. Aditivos empleados en la producción de mezclas asfálticas.	45
Tabla 11. Aditivos y propiedades que manipulan.....	45
Tabla 12. Propiedades de la fibra celulosa.....	48
Tabla 13. Propiedades mecánicas de las fibras	49
Tabla 14. Terminología volumétrica de la mezcla asfáltica	56
Tabla 15. Recomendaciones de velocidades y frecuencias.....	67
Tabla 16. Serie de pruebas convencionales para relación A y VTS	68
Tabla 17. Valores de código recomendados	68
Tabla 18. Parámetros A y VTS (RTFOT) recomendados.....	69
Tabla 19 . Requisitos para mezcla de concreto bituminoso	90
Tabla 20. Vacíos mínimos en el agregado mineral (VMA).....	91
Tabla 21. Vacíos llenos con asfalto (VFA).....	91
Tabla 22. Cuantificación de la muestra y número de especímenes Marshall por muestra	102
Tabla 23. Propiedades físicas y mecánicas de la fibra acrílica.	107
Tabla 24. Series de tamices.....	112
Tabla 25. Pesos por tamices.....	113
Tabla 26. Granulometría de la arena zarandeada.....	114
Tabla 27. Granulometría de la arena chancada.	114
Tabla 28. Granulometría de la Piedra Chancada.....	115
Tabla 29. Resultado de peso específico y absorción de la arena natural zarandeada	116
Tabla 30. Resultado de peso específico y absorción de la arena chancada.....	117
Tabla 31. Resumen de propiedades físico - mecánicas de la arena natural zarand.....	117
Tabla 32. Resumen de propiedades físico - mecánicas de la arena gruesa triturada	117
Tabla 33. Peso mínimo de la muestra de ensayo	118
Tabla 34. Resultado de peso específico y absorción del agregado grueso.....	119
Tabla 35. Resumen de características físico - mecánicas de la piedra triturada	119
Tabla 36. Reporte de propiedades del cemento asfáltico.....	120
Tabla 37. Mezcla Teórica de Agregados para Gradación MAC-2.....	122
Tabla 38. Regresión lineal para relación A y VTS	125
Tabla 39. Rango de temperatura para mezcla y compactación.....	125
Tabla 40. Proporciones y porcentajes de retenidos de los agregados	126
Tabla 41. Reporte de espesores, pesos específicos aparentes y pesos unitarios.	132
Tabla 42. Factores de Correlación para estabildades (A)	134
Tabla 43. Criterios para juzgar la aceptabilidad de las estabildades.....	134

Tabla 44. Criterios para juzgar la aceptabilidad de los flujos	135
Tabla 45. Tabulación de resultados para cada porcentaje de asfalto	135
Tabla 46. Resultados del óptimo contenido de asfalto.....	138
Tabla 47. Pesos de materiales para la mezcla asfáltica patrón.....	138
Tabla 48. Pesos de componentes para las mezclas modificadas con fibras acrílicas	139
Tabla 49. Configuración estructural típica del pavimento flexible para estudio	142
Tabla 50. Rangos típicos de relaciones Poisson para HMA de gradación densa.....	143
Tabla 51. Número de puntos en las coordenadas x e y en las ruedas	143
Tabla 52. Árbol de requerimientos	145
Tabla 53. Funciones de valor	146
Tabla 54. Ponderación para el árbol de requerimientos.....	147
Tabla 55. Resultados de la Mezcla Asfáltica Patrón (0.0 % de adición de fibra).....	148
Tabla 56. Resultados de mezclas asfálticas modificada con fibras acrílicas de 20 mm.	149
Tabla 57. Resultados de mezclas Asfálticas modificada con fibras acrílicas de 12 mm.	153
Tabla 58. Resultados de las mezclas Asfálticas modificada con fibras acrílicas de 8 mm.	156
Tabla 59. Variables de entrada para calcular el Módulo Complejo Dinámico (E^*) y resultados	159
Tabla 60. Resultados predictivos de fatiga para mezclas asfálticas modificadas TIPO A	160
Tabla 61. Resultados predictivos de fatiga para mezclas asfálticas modificadas TIPO B	161
Tabla 62. Características de fatiga para mezclas asfálticas modificadas TIPO C	162
Tabla 63. Resultados de la resistencia a la flexión en vigas	163
Tabla 64. Comparación de valores predictivos y resultados del ensayo realizado en vigas	163
Tabla 65. Resumen de resultados de mezclas modificadas con la dosificación óptima	165
Tabla 66. Resultado del índice de valor para la alternativa 1- “Mezcla asfáltica convencional”	166
Tabla 67. Resultado del índice de valor para la alternativa 2- Mezcla asfáltica TIPO “A”.....	166
Tabla 68. Resultado del índice de valor para la alternativa 3- Mezcla asfáltica TIPO “B”	167
Tabla 69. Resultado del índice de valor para la alternativa 4- Mezcla asfáltica TIPO “C”	167
Tabla 70. Cálculos de la prueba de hipótesis 1	171
Tabla 71. Cálculos de la prueba de hipótesis 2	173
Tabla 72. Cálculos de la prueba de hipótesis 3	175

Índice de figuras

FIGURA 1. Capas genéricas de un pavimento flexible y disipación de esfuerzos.	14
FIGURA 2. Tamices de la granulometría de agregados	18
FIGURA 3. Estados de consistencia de un suelo y sus límites respectivos.	20
FIGURA 4. Descripción volumétrica para los agregados.....	22
FIGURA 5. Esquema para la separación de constituyentes químicos en el asfalto.	32
FIGURA 6. Ejemplo de refinación de asfalto.	33
FIGURA 7. Refinamiento típico del petróleo.	34
FIGURA 8. Comportamiento real del Asfalto.	36
FIGURA 9. Características del flujo de líquidos.	37
FIGURA 10. Fibras utilizadas en la construcción de pavimentos.	46
FIGURA 11. Clasificación de fibras usados en la industria de la construcción.	46
FIGURA 12. Sección transversal de las fibras acrílicas hiladas en seco, forma de hueso.	50
FIGURA 13. Adherencia de la fibra acrílica en una matriz.....	51
FIGURA 14. Proceso de producción de la fibra DRYMIX RC 4020.....	52
FIGURA 15. Esquema peso-volumen para una partícula de agregado.	55
FIGURA 16. Esquema de la distribución de esfuerzos en pavimentos típicos.....	62
FIGURA 17. Comportamiento y deformaciones ante repeticiones de carga.....	64
FIGURA 18. Carta de correlación para estimar el Módulo Resiliente de Mezclas asfálticas.	64
FIGURA 19. Nomograma de Van der Poel para Determinar el Módulo de Rigidez del cemento asfáltico S_b	74
FIGURA 20. Nomograma para el cálculo de Modulo de rigidez de las mezclas asfálticas (Shell, 1978).	75
FIGURA 21. Tipos de cargas controladas para la prueba de fatiga.....	77
FIGURA 22. Nomograma para predecir la vida a la fatiga de HMA (Bonnaure, 1980).	78
FIGURA 23. Proceso de iniciación del agrietamiento por fatiga.	80
FIGURA 24. Fisuramiento por fatiga, en áreas sujetas a tráfico	81
FIGURA 25. Agrietamiento en bloques.	81
FIGURA 26. Diagrama de proceso de agrietamiento por reflexión.	82
FIGURA 27. Agrietamiento por reflexión en juntas de losas de concreto.	82
FIGURA 28. Desnivel entre carril/berma.	83
FIGURA 29. Agrietamiento transversal.	84
FIGURA 30. Bombeo de base estabilizada bajo un pavimento asfáltico.	84
FIGURA 31. Diagrama de Estabilidad y Flujo Marshall.....	88
FIGURA 32. Requerimientos generales para análisis multicriterio.	93
FIGURA 33. Despliegue de los requerimientos en criterios e indicadores.	93
FIGURA 34. Tendencias crecientes y decrecientes de una función de valor.	96
FIGURA 35. Evaluación de alternativa a nivel de indicadores, criterios y requerimientos.	97
FIGURA 36. Flujograma de mezclas asfálticas a realizar en la investigación.	105
FIGURA 37. Diagrama del desarrollo experimental a nivel de laboratorio.	106
FIGURA 38. Análisis termogravimétrico aplicado a la fibra.	108
FIGURA 39. Diagrama de incorporación de la fibra acrílica.	109

FIGURA 40. Ubicación de cantera agregado fino - Matahuasi	110
FIGURA 41. Pasos para el cuarteo manual.	111
FIGURA 42. Representación de curva granulométrica para el agregado combinado.	122
FIGURA 43. Fracciones recomendadas para separar los agregados (ASTM D 6926).	126
FIGURA 44. Relación del porcentaje de Vacíos y el contenido de Asfalto.	136
FIGURA 45. Relación de la Estabilidad y Porcentaje de Asfalto.	136
FIGURA 46. Relación del Flujo Y porcentaje de asfalto.	136
FIGURA 47. Relación del peso unitario y Porcentaje de Asfalto.	137
FIGURA 48. Relación del porcentaje de Vacíos en el agregado mineral y el contenido de Asfalto.	137
FIGURA 49. Relación del porcentaje de Vacíos Llenos con Asfalto y porcentaje de Asfalto....	137
FIGURA 50. Gráfico para el ingreso de cargas y puntos de análisis.	143
FIGURA 51. Vigas de mezclas asfálticas de 6"x6"x21"	144
FIGURA 52. Ensayo de resistencia a la flexión en vigas con cargas a los tercios del tramo.	144
FIGURA 53. Estabilidad vs dosis de fibras acrílicas de 20 mm.	150
FIGURA 54. Relación del peso unitario y dosificación de Fibras de 20 mm.	151
FIGURA 55. Relación del Porcentaje de Vacíos y dosificación de Fibras de 20 mm.	151
FIGURA 56. Relación del porcentaje de Vacíos en el agregado mineral y dosificación de Fibras de 20 mm.	151
FIGURA 57. Relación del porcentaje de vacíos llenos con asfalto y dosis de fibras de 20 mm.	151
FIGURA 58. Flujo vs dosis de fibras acrílicas de 20 mm.	152
FIGURA 59. Estabilidad vs dosis de fibras acrílicas de 12 mm.	153
FIGURA 60. Relación del peso unitario y Porcentaje de Adición de Fibras de 12 mm.	154
FIGURA 61. Relación del Porcentaje de Vacíos y Adición de Fibras de 12 mm.	154
FIGURA 62. Relación del porcentaje de Vacíos en el agregado mineral y Porcentaje de adición de Fibras de 12 mm.	154
FIGURA 63. Relación del porcentaje de vacíos llenos con asfalto y dosis de fibras de 12 mm.	155
FIGURA 64. Flujo vs dosis de fibras acrílicas de 12 mm.	155
FIGURA 65. Estabilidad vs dosis de fibras acrílicas de 8 mm.	156
FIGURA 66. Relación del peso unitario y Porcentaje de Adición de Fibras de 8 mm.	157
FIGURA 67. Relación del Porcentaje de Vacíos y dosificación de Fibras de 8 mm.	157
FIGURA 68. Relación del porcentaje de Vacíos en el agregado mineral y dosificación de fibras de 8 mm.	157
FIGURA 69. Relación del porcentaje de vacíos llenos con asfalto y dosis de fibras de 8 mm. ..	158
FIGURA 70. Flujo vs dosis de fibras acrílicas de 8 mm.	158
FIGURA 71. Deformación a tracción en la Mezcla Asfáltica Patrón.	160
FIGURA 72. Deformación a tracción en la Mezcla Asfáltica "A": 0.15% fibra de 20 mm.	160
FIGURA 73. Deformación a tracción en la Mezcla Asfáltica "B": 0.20% fibra de 12 mm.	161
FIGURA 74. Deformación a tracción en la Mezcla Asfáltica "C": 0.15% fibra de 8 mm.	162
FIGURA 75. Estabilidades en mezclas modificadas con fibras acrílicas de 20, 12 y 8 mm.	164
FIGURA 76. Flujos en mezclas modificadas con fibras acrílicas de 20, 12 y 8 mm.	165
FIGURA 77. Índices de valor por cada requerimiento.	168

Lista de fotografías

FOTO N° 1. REALIZACIÓN DEL ENSAYO DE ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO PARA LA ARENA CHANCADA (PREVIO CUARTEO SEGÚN NORMA MTC E 105).	257
FOTO N° 2. DETERMINACIÓN DE PESOS PARA CADA FRACCIÓN LUEGO DEL CRIBADO-PIEDRA CHANCADA.	257
FOTO N° 3. MEZCLADO Y CONTROL DE TEMPERATURA PARA C.A. AL 5.0% - PREDISEÑO MAC 2.	257
FOTO N° 4. CONTROL DE TEMPERATURA PARA COMPACTADO C.A. AL 4.5% - PREDISEÑO MAC 2.	257
FOTO N° 5. CHUSEADO DE BRIQUETAS ANTES DEL COMPACTADO-PREDISEÑO MAC 2.	258
FOTO N° 6. COMPACTADO DE ESPECÍMENES-PREDISEÑO MAC 2.	258
FOTO N° 7. ESPECÍMENES COMPACTADOS -PREDISEÑO MAC 2. (DETERMINACIÓN DE OPTIMO PORCENTAJE DE ASFALTO)	258
FOTO N° 8. MEDICIÓN DE ESPESORES CON CINTA MÉTRICA.	258
FOTO N° 9. GRAVEDAD ESPECIFICA BULK (PESO SECO) PARA ESPECÍMENES MAC 02 - PREDISEÑO.	258
FOTO N° 10. GRAVEDAD ESPECIFICA BULK (PESO SUMERGIDO) PARA ESPECÍMENES MAC 02 - PREDISEÑO.	259
FOTO N° 11. GRAVEDAD ESPECIFICA BULK (PESO SSS) PARA ESPECÍMENES MAC 02 - PREDISEÑO.	259
FOTO N° 12. CONTROL DE TEMPERATURA PARA INMERSIÓN DE ESPECÍMENES EN BAÑO CON AGUA A 60°C.	259
FOTO N° 13. ESPECÍMENES CON ADICIÓN DE FIBRA ACRÍLICA DE 20mm.	259
FOTO N° 14. DISEÑO DE MEZCLA CONVENCIONAL MAC-02 AL 4.5%	260
FOTO N° 15. DISEÑO DE MEZCLA CONVENCIONAL MAC-02 AL 5.5%	260
FOTO N° 16. PREPARACIÓN DE AGREGADOS PARA VIGAS.	260
FOTO N° 17. PESAJE DE FIBRAS DE 12mm.	260
FOTO N° 18. PESAJE DE FIBRAS DE 8mm.	260
FOTO N° 19. PESAJE DE FIBRAS DE 20mm.	260
FOTO N° 20. MEZCLADO DE ASFALTO, AGREGADO Y FIBRAS.	261
FOTO N° 21. MEDICIÓN DE TEMPERATURA DE LA MEZCLA.	261
FOTO N° 22. AMASADO FINAL DE MEZCLA.	261
FOTO N° 23. CHUSEADO DE MEZCLA EN VIGA.	261
FOTO N° 24. COMPACTADO DE VIGA CON CARGA UNIFORMEMENTE DISTRIBUIDA, MEDIANTE UNA PLACA DE 10mm DE ESPESOR.	261
FOTO N° 25. VIGAS DE ASFALTO DESENCOFRADAS.	261
FOTO N° 26. ENSAYO DE RESISTENCIA A FLEXIÓN CON CARGAS EN LOS TERCIOS DE TRAMO CENTRAL.	262
FOTO N° 27. FLEXIÓN DE VIGA PATRÓN Y VALOR DE CARGA MÁXIMA APLICADA.	262
FOTO N° 28. FLEXIÓN DE VIGA CON ADICIÓN DE FIBRA DE 20 mm. Y CARGA MÁXIMA APLICADA.	262
FOTO N° 29. FLEXIÓN DE VIGA CON ADICIÓN DE FIBRA DE 8 mm. Y CARGA MÁXIMA APLICADA.	262
FOTO N° 30. FLEXIÓN DE VIGA CON ADICIÓN DE FIBRA DE 12mm. Y CARGA APLICADA.	262

Resumen

Debido a la necesidad constante de mejorar y optimizar las diferentes propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas en caliente, que se vean reflejadas en un mejor comportamiento; con reducciones en la aparición prematura de fallas estructurales más importantes como los ahuellamientos (deformaciones permanentes), fisuraciones por fatiga y agrietamientos térmicos. Se propone la incorporación de aditivos que puedan mejorar en cierto grado la capacidad de resistencia ante la aparición de una falla estructural en un pavimento flexible. Las fibras acrílicas y otras fibras sintéticas o naturales se incorporan en materiales de construcción con diferentes objetivos, para el presente estudio (mezclas asfálticas en caliente) se propone la adición de fibras acrílicas en mezclas asfálticas con gradación densa como un aditivo que promueve la eficiencia de retención y adhesión del asfalto; además de aumentar la flexibilidad por la elongación (27 % aproximadamente) de la fibra en la red tridimensional de la mezcla asfáltica que le permite disminuir posibles deformaciones permanentes (recuperándose al cesar los esfuerzos).

Las fibras acrílicas por su composición, longitud-forma y propiedades mecánicas al ser incorporadas dentro de la mezcla asfáltica buscan optimizar el comportamiento mecánico sin deteriorar o afectar la afinidad entre los componentes.

La presente investigación incorpora fibras acrílicas con diferentes longitudes de corte, estas fibras fueron fabricadas y diseñadas para la modificación de mezclas asfálticas; el objetivo es determinar su influencia en las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas en caliente con gradación densa.

El esquema experimental incluyó el análisis de 25 tipos de mezclas asfálticas: (a) uno de control, llamada mezcla asfáltica patrón; (b) ocho mezclas con dosificaciones distintas de fibras con longitud de corte de 20 mm, llamada mezcla asfáltica modificada Tipo A; (c) ocho mezclas con dosificaciones distintas de fibras con longitud de corte de 12 mm, llamada mezcla asfáltica modificada Tipo B, y (d) ocho mezclas con dosificaciones distintas de fibras con longitud de corte de 8 mm, llamada mezcla asfáltica modificada Tipo C. Para valorar el aporte de la fibra se realizaron los ensayos de PESO ESPECIFICO APARENTE Y PESO UNITARIO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS COMPACTADAS EMPLEANDO ESPECÍMENES SATURADOS CON SUPERFICIE SECAS (MTC E 514) y ensayos de RESISTENCIA DE MEZCLAS BITUMINOSAS EMPLEANDO EL APARATO MARSHALL (MTC E 504, ASTM D 6926, ASTM D 6927 Y AASHTO 245).

Los resultados observados permitieron determinar un incremento en los valores de estabilidad, además de un decremento proporcional en el flujo respecto al porcentaje de fibra adicionada. También se determinó un mejoramiento en la resistencia a la fatiga. Cabe mencionar que altas dosificaciones de fibra producen un efecto opuesto al deseado, este resultado se debe a la afectación en la trabajabilidad y por tanto un incremento en la heterogeneidad en la mezcla asfáltica.

Palabras clave: mezcla asfáltica en caliente, mezcla asfáltica en caliente patrón, adición, fibra acrílica de alta tenacidad (20 mm, 12 mm y 8 mm), estabilidad, flujo, fisuramiento por fatiga (deformación por tracción admisible).

Abstract

Due to the constant need to improve and optimize the different mechanical properties of hot asphalt mixtures, which are will reflected in a better performance; with reductions in the premature appearance of more important structural faults such as permanent rutting, fatigue cracking and thermal cracking. It is proposed the incorporation of devices that can improve the capacity of resistance before the appearance of a structural failure in a flexible pavement. Acrylic fibers and other synthetic or natural fibers are incorporated in construction materials with different objectives, for the present study is prepared with the addition of acrylic fibers in mixtures with dense gradation properties as an additive that promotes the efficiency of retention and adhesion of the asphalt; In addition to increasing the flexibility by elongation (approximately 27%) of the fiber in the three-dimensional red of the asphalt mix that allows to minimize the permanent deformations (recovering when the efforts cease).

The acrylic fibers for their composition, length-shape and mechanical properties be incorporated into the asphalt mix seek to optimize the mechanical behavior without deteriorating or affecting the affinity between the components.

The present investigation incorporates acrylic fibers with different cut lengths, these fibers were manufactured and designed for the modification of asphalt mixtures; the objective is to determine its influence on the mechanical properties of hot asphalt mixtures with dense gradation.

The experimental scheme included the analysis of 25 types of asphalt mixtures: (a) one of control, called asphalt mix pattern; (b) eight mixtures with different fiber dosages with a cut length of 20 mm, called modified asphalt mix Type A; (c) eight mixtures with different dosages of fibers with a cut length of 12 mm, called a modified asphalt mix Type B, and (d) eight mixtures with different fiber dosages with a cut length of 8 mm, called modified asphalt mix Type C To evaluate the contribution of the fiber, APPARENT SPECIFICITY AND UNIT WEIGHT tests of COMPACT ASPHALTIC MIXTURES were carried out using SATURATED SPECIMENS WITH DRY SURFACES (MTC E 514) and RESULTS OF BITUMINOUS MIXTURES USING THE MARSHALL APPLIANCE (MTC E 504, ASTM D 6926, ASTM D 6927 and AASHTO 245).

The observed results allowed to determine an increase in the stability values, in addition to a proportional decrease in the flow with respect to the percentage of fiber added. An

improvement in fatigue resistance was also determined. It should be mentioned that high dosages of fiber produce an opposite effect to that desired, this result is due to the effect on the workability and therefore an increase in the heterogeneity in the asphalt mixture.

Keywords: hot asphalt mix, hot asphalt mix pattern, addition, high tenacity acrylic fiber (20 mm, 12 mm and 8 mm), stability, flow, fatigue cracking (admissible tensile strain).

Introducción

En la red vial de nuestro país, en referencia a los que tienen como estructuras a los pavimentos flexibles, éstas presentan evidencias de aparición de fallas estructurales prematuras; principalmente ahuellamientos (deformaciones permanentes), fisuramiento por fatiga o térmico. Todo esto debido al aumento del flujo vehicular cómo al tipo de vehículos pesados que deterioran prematuramente la carpeta asfáltica. Cabe mencionar que se suman a estos causantes; las condiciones climáticas, calidad de materiales empleados e inadecuados procedimientos constructivos o deficiencias de diseño.

De lo expuesto, en la búsqueda de mezclas asfálticas con mejor comportamiento y/o desempeño que las previstas con materiales convencionales muchas veces se propusieron incorporaciones de nuevos materiales (sintéticos o naturales) que sean inocuos respecto a los demás componentes de la mezcla y a la mezcla en sí misma. Procurando que estos materiales sean económicos.

La presente investigación se enfoca en valorar los efectos de las fibras acrílicas de alta tenacidad de distintas longitudes de corte (20 mm, 12 mm y 8 mm respectivamente); en la estabilidad, flujo, fisuración por fatiga y el aporte que se puede generar mediante la modificación de la mezcla asfáltica con fibras acrílicas en diferentes dosificaciones.

El desarrollo de esta tesis está estructurado en ocho capítulos:

En el Capítulo I se hace mención al planteamiento y formulación del problema, y se detallan los objetivos, hipótesis y variables.

En el Capítulo II se desarrolla el marco teórico, con la finalidad de orientar el estudio, evitar y prevenir errores en el proceso siguiente a la investigación y delimitar temas cercanos al planteamiento del problema.

En el Capítulo III se formula la metodología de la investigación, definiendo el diseño de la investigación, población, muestra y procedimientos de recolección de datos.

En el Capítulo IV se describe el desarrollo de la investigación, donde a su vez este capítulo se subdivide en tres etapas como sigue: (a) Selección y propiedades de los materiales utilizados; (b) Diseño de mezclas asfálticas, y (c) Ensayos a las mezclas asfálticas.

En el Capítulo V se presentan los resultados y los análisis alcanzados de la investigación, donde se detallarán y expondrán las propiedades de las mezclas asfálticas en

caliente, debido a la adición de las fibras acrílicas de diferentes longitudes de corte comparándolos con los de diseño de mezcla asfáltica patrón.

En el Capítulo VI se realiza el análisis estadístico de los resultados, para la validación de las Hipótesis de la investigación.

En el Capítulo VII se exponen y detallan las conclusiones y recomendaciones de la presente investigación.

En la parte final de la investigación, con el Capítulo VIII se exponen las referencias bibliográficas y anexos respectivamente.

El autor.

Capítulo I

Planteamiento de la investigación

1.1. Planteamiento del problema

El desarrollo de la tecnología en mezclas asfálticas se ha venido intensificando año tras año, en la búsqueda de materiales que aporten y mejoren las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas incorporándolo en su elaboración; como son los aditivos y refuerzos que eviten el deterioro prematuro de la carpeta asfáltica. Debido a que actualmente, el volumen de vehículos pesados que transitan dentro de la infraestructura vial en la ciudad de Huancayo viene creciendo a un ritmo acelerado en los últimos años. Este evento viene produciendo el deterioro prematuro y acelerado de la carpeta asfáltica, esta incapacidad prematura se pone en evidencia mediante la aparición de diversas patologías que advierten el mal funcionamiento como: (a) agrietamientos por fatiga, (b) ahuellamientos, etc. Obteniéndose así una red de carreteras que presta un servicio poco confortable e inseguro para los usuarios y además con una capacidad reducida para resistir fenómenos de deterioro.

Así también, el problema de la búsqueda de alternativas apunta al objetivo de lograr la afinidad del material incorporado evitando el detrimento con los demás componentes y proponer un material con disponibilidad. Ante esta problemática resulta necesario actuar y proponer soluciones con el objetivo de mejorar la infraestructura vial terrestre que actualmente tiene nuestra ciudad, ya que los métodos de diseño para pavimentos asfálticos en caliente y

materiales empleados han permanecido considerablemente estáticos; con pocas innovaciones frente al crecimiento del volumen vehicular de cargas.

Actualmente existen materiales innovadores, técnicas y procedimientos modernos en el campo de la construcción aplicados a las capas que conforman el pavimento en países desarrollados. Estudiar y evaluar estas innovaciones para proponer su aplicación en nuestros pavimentos asfálticos es de suma importancia ya que el refinamiento y transferencia tecnológica nos permitirá contar con pavimentos de alta calidad de servicio y durabilidad, con menor costo de mantenimiento y por ende una buena relación costo/beneficio. Que impactará positivamente en el presupuesto destinado a carreteras.

Por lo que la presente investigación pretende analizar y evaluar la influencia del uso de la fibra sintética acrílica DRYMIX RC 4020 (longitudes de corte de 20 mm, 12 mm y 8 mm respectivamente); en la estabilidad; flujo y en la reducción de fisuramiento por fatiga en las mezclas asfálticas en caliente.

1.2. Formulación del problema

1.2.1. Problema general.

¿Cómo influye la adición de fibras acrílicas de alta tenacidad DRYMIX RC 4020, en el comportamiento de las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica en caliente?

1.2.2. Problemas específicos.

- ¿Cuál es el efecto de la adición de fibras acrílicas de alta tenacidad DRYMIX RC 4020 en la estabilidad de la mezcla asfáltica?
- ¿Cuál es el efecto de la adición de fibras acrílicas de alta tenacidad DRYMIX RC 4020 en el flujo de la mezcla asfáltica?
- ¿Cómo influye la adición de fibras acrílicas de alta tenacidad DRYMIX RC 4020 en el proceso de fisuración por fatiga de los pavimentos asfálticos?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general.

Evaluar la influencia de la adición de fibras acrílicas de alta tenacidad DRYMIX RC 4020, en el comportamiento de las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica en caliente.

1.3.2. Objetivos específicos.

- Determinar el efecto de la adición de fibras acrílicas de alta tenacidad DRYMIX RC 4020 en la estabilidad de la mezcla asfáltica.
- Determinar el efecto de la adición de fibras acrílicas de alta tenacidad DRYMIX RC 4020 en el flujo de la mezcla asfáltica.
- Determinar la influencia de la adición de fibras acrílicas de alta tenacidad DRYMIX RC 4020 en el proceso de fisuración por fatiga.

1.4. Justificación de la investigación

1.4.1. Justificación Teórica.

Hasta la fecha, la red vial de nuestra ciudad está presentando grandes deficiencias por la falta de pavimentos y en muchas zonas del país, solo se cuenta con superficies de rodadura en calidad de afirmado; resulta necesario también agregar a esta problemática el deterioro acelerado de los pavimentos asfálticos existentes. Consecuencia de la mayor demanda de este tipo de infraestructura, de los factores climáticos y calidad de materiales utilizados. Con la investigación propuesta se busca dar a conocer las bondades del uso de las fibras acrílicas en la elaboración de mezclas asfálticas, estas adiciones pueden ser usadas para garantizar un incremento en la estabilidad, asimismo controlar y reducir el fisuramiento por fatiga.

Por ende, se ve la necesidad de plantear métodos innovadores en la elaboración y producción de mezclas asfálticas en caliente; para la construcción de carreteras durables y económicas que mejoraran nuestra red vial.

1.4.2. Justificación Metodológica.

La presente investigación contará con protocolos y parámetros de control en toda la etapa de experimentación y la toma de datos; por lo que se garantiza un correcto análisis y adecuada evaluación de los comportamientos que se presentan para cada uno de los diseños de mezclas asfálticas que se investigarán las cuales son: (a) mezcla asfáltica patrón (mezcla asfáltica convencional de gradación densa), (b) mezclas asfálticas modificadas con fibras acrílicas de 20 mm, (c) mezclas asfálticas modificadas con fibras acrílicas de 12 mm, y (d) mezclas asfálticas modificadas con fibras acrílicas de 8 mm. Los métodos empleados durante el desarrollo de la investigación, servirán como fuente de apoyo y referencia para propuestas de aplicación de nuevos materiales en la producción de mezclas asfálticas en caliente.

1.4.3. Justificación Práctica.

La finalidad de esta investigación es proponer la adición de un nuevo material (fibra acrílica) en la mezcla asfáltica en caliente, en una dosis optima que mejore las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica. Generando así una respuesta en la producción de mezclas asfálticas más resistentes y duraderas, a factores agresivos que causan deterioro prematuro y acelerado en las carpetas asfálticas.

1.5. Formulación de las hipótesis

1.5.1. Hipótesis general

La fibra sintética de alta tenacidad DRYMIX RC 4020 tiene una influencia favorable en el comportamiento de las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica en caliente.

1.5.2. Hipótesis específicas.

- El efecto de la adición de fibras acrílicas de alta tenacidad DRYMIX RC 4020 en la estabilidad de la mezcla asfáltica es favorable, respecto a la mezcla asfáltica patrón.
- El efecto de la adición de fibras acrílicas de alta tenacidad DRYMIX RC 4020 en el flujo de la mezcla asfáltica es favorable, respecto a la mezcla asfáltica patrón.
- Las fibras acrílicas de alta tenacidad DRYMIX RC 4020 influyen favorablemente en la reducción del proceso de fisuración por fatiga, respecto a la mezcla asfáltica patrón.

1.6. Variables

1.6.1. Variable Independiente.

- Dosis de las fibras acrílicas de alta tenacidad DRYMIX RC 4020 en la elaboración de la mezcla asfáltica (Con las dimensiones: (a) Porcentaje de fibra acrílica, y (b) Tamaño de las fibras acrílicas).

1.6.2. Variable Dependiente.

- Propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica (Con las dimensiones: Resistencia de mezclas bituminosas y Fisuramiento por fatiga en mezclas asfálticas).

Tabla 1. Matriz de operacionalización de variables

VARIABLE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DIMENSIÓN	INDICADOR
<p>X1: Dosis de fibras acrílicas, como adición en la elaboración de la mezcla asfáltica.</p>	<p>Método utilizado para modificar las propiedades mecánicas y/o térmicas de las mezclas asfálticas. Debido a cambios en la estructura que compone dicha mezcla, resultando una mezcla comúnmente llamada "Mezcla asfáltica modificada".</p>	<p>Porcentaje de fibras acrílicas.</p>	<p>Peso de la fibra acrílica como adición del contenido total de la mezcla (agregados pétreos y asfalto) en dosis de: (a)0.05%, (b)0.10%, (c)0.15%, (d)0.20%, (e)0.30%, (f)0.50%, (g)0.70% y (h)1.00%.</p>
		<p>Tamaño de las fibras acrílicas.</p>	<p>Longitud de corte como sigue: (a) 20 mm. (b) 12 mm. (c) 8 mm.</p>
<p>Y1: Propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica.</p>	<p>Son propiedades que se manifiestan al aplicar una fuerza en la mezcla asfáltica compactada, por lo que se refiere a la capacidad de resistir acciones de carga.</p>	<p>Resistencia de mezclas bituminosas</p>	<p>Propiedades de la mezcla asfáltica sujeto a medición de acuerdo a ensayo: (a) Flujo (mm.) (b) Estabilidad (Lb.)</p>
		<p>Fisuramiento por fatiga.</p>	<p>Propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica y viscosidades del ligante asfáltico, sujetos a medición de acuerdo a ensayos: (a) Volumen del cemento asfáltico efectivo (%). (b) Vacíos en el agregado mineral (%). (c) Volumen de vacíos de aire (%). (d) Viscosidad aparente-Brookfield (cP). (e) Modulo de rotura en viga (kg/cm²). (f) Número de repeticiones de ejes admisibles a la falla (sujeto a fórmulas predictivas).</p>
<p>VARIABLE INDEPENDIENTE Tratamiento, estímulo. Influencia, etc. (Causa)</p> <p>VARIABLE DEPENDIENTE (Efecto)</p> <p>Influye en...</p> <p>Reduce, Mejora, Incrementa, Etc.</p>			

Capítulo II

Marco teórico

2.1. Antecedentes de la investigación

2.1.1. Antecedentes Internacionales.

- **MARÍN, H. A.** (2004). En su tesis PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL de 2004 del INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL-ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA UNIDAD ZACATENCO DE MÉXICO titulada: **“ASFALTOS MODIFICADOS Y PRUEBAS DE LABORATORIO PARA CARACTERIZARLOS”**.

El trabajo de la tesis tuvo como finalidad proponer nuevas mezclas asfálticas que mediante el empleo de un tipo de material en específico (fibras acrílicas, polímero SBS, fibra de celulosa e hidróxido de calcio hidratada) en la elaboración de la mezcla; presenten un buen comportamiento frente a deterioros tales como las deformaciones plásticas permanentes, agrietamientos por fatiga, agrietamientos térmicos, envejecimiento y oxidación de la película delgada de cemento asfáltico que envuelve el material pétreo; todos estos causados por la acción de los agentes atmosféricos, la mala calidad de los materiales que se emplean y el hecho de no tener en consideración las condiciones climáticas del lugar en el que va a ser colocada la mezcla asfáltica.

Para lo cual se realizó un estudio experimental en laboratorio empleando dos tipos de mezclas: una con una granulometría densa y otra, una mezcla abierta; se usan además dos tipos de cementos asfálticos, uno convencional y uno modificado con 2% de polímero tipo “SBS” y tres tipos de fibras (dos tipos de fibras acrílicas y una fibra de celulosa), realizando luego pruebas en el ensayo de Tensión Indirecta en dos condiciones diferentes, en seco y húmedo con la finalidad de observar y cuantificar el efecto que causa el agua en el comportamiento de la mezcla.

El principal hallazgo en esta investigación, es aquella que refiere haberse evidenciado que mediante la adición de fibras se consigue mezclas con una mejor redistribución de esfuerzos, que además las fibras componen una mejor mezcla confiriéndole una mayor cohesión gracias a su elasticidad, resultando mezclas más flexibles con una mayor resistencia al impacto y a los efectos abrasivos del tráfico.

También se concluye que la adición de las fibras con cementos asfálticos convencionales genera resultados similares obtenidos empleando solamente cementos asfálticos modificados con polímeros.

Recomienda una dosis en un porcentaje del 0.60 % en peso para fibras acrílicas con longitud de corte de 18 mm.

Los resultados de esta investigación exponen la viabilidad del empleo de las fibras acrílicas para la elaboración de mezclas asfálticas en caliente con mejor comportamiento que las mezclas asfálticas convencionales.

- **FONSECA Y MARTÍNEZ (1999)**, En la publicación del artículo: **“EL EMPLEO DE FIBRAS EN LA ELABORACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS PARA PAVIMENTOS DE GRADACIÓN ABIERTA”**, presentados en los cuadernos FICA de la FUNDACIÓN ICA, MÉXICO.

La investigación de este artículo se enfocó en el uso de fibras acrílicas de 18 mm de longitud de corte para la elaboración de mezclas asfálticas modificadas, además de un estudio comparativo con asfaltos modificados por polímeros. Para todos los casos se utilizaron dos tipos de granulometrías; una densa, comúnmente empleada en el país donde se realizó el estudio y las misma que usamos en la mayoría de pavimentaciones que hay en nuestro país. Y una segunda granulometría de gradación abierta. Para el diseño de las mezclas asfálticas se realizó un estudio Marshall (para determinar el contenido óptimo de asfalto); luego se utilizó el porcentaje óptimo de cemento asfáltico

para todos los diseños de mezclas, manipulando la dosificación de las fibras por vía seca y finalmente una modificación al cemento asfáltico con polímeros SBS.

La evaluación de los efectos de las fibras sobre las propiedades mecánicas se realizó mediante la evaluación de la estabilidad y el flujo. Y el comportamiento dinámico por los valores de deformación permanente y modulo dinámico.

Los resultados exponen que:

- ❖ La resistencia a la tensión con la adición de fibras incrementa en porcentajes menores al esperado, pero muestran un incremento considerablemente alto en la tenacidad y la energía de fractura de estas mezclas asfálticas modificadas. Por lo que se deduce que se mejora la ductilidad, esta característica representa para la mezcla una mayor resistencia a los fenómenos de fisuración por presencia de bajas temperaturas a la que estará expuesto en su vida útil. Además, se reporta que estos resultados mencionados son similares a las mezclas asfálticas elaboradas con cementos asfálticos modificados con polímeros SBS.
 - ❖ El uso de cementos asfálticos modificados con polímeros SBS, así como las que poseen una adición de fibras en la mezcla, estas contribuyen en producir una mejor redistribución de esfuerzos armando de manera más homogénea la mezcla, por ello se mejora la capacidad de retención del cemento asfáltico, lográndose un compuesto rico en mastico asfáltico.
 - ❖ Respecto a los flujos observados con la adición de fibras se observó que; en mezclas densas se registra un máximo de 6 mm, en cambio las mezclas abiertas lograron alcanzar los 10 mm, lo cual le confiere soportar mayores cargas después de llegada la fractura.
 - ❖ Los resultados de mezclas asfálticas elaboradas con fibras de celulosas de 1.1 mm de longitud de corte fueron opuestos al esperado, porque mostraron un comportamiento igual y en la mayoría de las propiedades medidas inferior a las mezclas asfálticas convencionales.
- **REYES O. Y REYES L.** (2005), En la publicación del artículo: **“COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y DINÁMICO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA CON ADICIÓN DE FIBRAS”**. presentados en la Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal, MÉXICO.

Para el artículo se emplearon la adición de fibras de polipropileno (sin especificar la longitud de corte de las mismas) en mezclas asfálticas en caliente por vía seca para evaluar el efecto en el comportamiento mecánico y dinámico de la mezcla. La evaluación de los efectos de las fibras sobre las propiedades mecánicas se realizó mediante la evaluación de la estabilidad y el flujo. Y el comportamiento dinámico por los valores de deformación permanente y modulo dinámico.

Los resultados muestran que:

- ❖ Existe un efecto positivo de las fibras en la modificación de la mezcla asfáltica.
 - ❖ Se presentan mejoras sustanciales en las propiedades mecánicas y dinámicas con la adición de fibras, exponiéndose un porcentaje óptimo de adición a la mezcla asfáltica de 0.60 % de fibras de 18 mm de longitud de corte.
 - ❖ El módulo dinámico se ve aumentad en un 45% promedio para el porcentaje óptimo de adición de fibras; la deformación permanente disminuye en 27.6% para el porcentaje óptimo de adición de fibras. Estos comportamientos reflejan otra alternativa para mejorar la mezcla asfáltica, aumentando la adherencia por ende un aumento en la resistencia a la disgregación por efecto abrasivo del tráfico y retardando el inicio y propagación del agrietamiento por fatiga y/o térmico.
- **ELIZONDO, MIRANDA, AGUILAR, LORIA Y ZAMBRANO (2009)**, En la publicación del artículo: “ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA MODIFICACIÓN DE MEZCLA ASFÁLTICA CON FIBRAS ACRÍLICAS”, presentados en las Memorias XVIII CILA.

La investigación de este artículo se enfocó en el uso de fibras acrílicas de 12 mm de longitud de corte para la elaboración de mezclas asfálticas modificadas, para analizar el desempeño al fisuramiento por fatiga y los aportes que pudieran generar mediante la modificación de la mezcla con fibras acrílicas en diferentes dosificaciones. La evaluación a la fatiga se realiza a partir del ensayo de desempeño en laboratorio, adicionalmente se hace un estudio de los daños relacionados con la deformación permanente (ahuellamiento) y al impacto por humedad.

Los ensayos se realizan con tres diseños de mezclas asfálticas, todas con un diseño para un 4 % de vacíos: (a) con contenidos de 0.00% de fibras (mezcla patrón), (b) con

contenidos de 0.15% de fibra, y (c) con contenidos de 0.20% de fibra. Los diseños de mezclas se realizaron basándose en la norma AAASHTO M 323 correspondiente a la metodología Superpave. Con una estructura granulométrica densa gruesa de tamaño máximo nominal de 12.5 mm.

La investigación expone las siguientes conclusiones:

- ❖ El comportamiento a la fatiga medido a través del ensayo de viga a flexo-compresión, mostro un mejor comportamiento por el aporte de la fibra en la resistencia al fisuramiento en un 15.0 % respecto a la mezcla convencional.
- ❖ Se evidencia que para aumentos sensibles en la dosificación de fibra a partir del 0.30 %, se producen variaciones importantes a nivel de volumen de las mezclas. Produciendo mezclas inestables por el mayor requerimiento de asfalto por el aumento en la superficie específica de la fibra, ocasionando menores resistencias al corte. Además de problemas en la trabajabilidad que pueden ocasionar una variabilidad en los resultados.

2.1.2. Antecedentes Nacionales.

- ❖ **BALLENA, C. (2016).** En su tesis PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE LICENCIADO EN INGENIERÍA CIVIL de 2016 de la UNIVERSIDAD SEÑOR DE SIPÁN DE PERÚ titulada: **“UTILIZACIÓN DE FIBRAS DE POLIETILENO DE BOTELLAS DE PLÁSTICO PARA SU APLICACIÓN EN EL DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS ECOLÓGICAS EN FRÍO”.**

En esta investigación se plantea el uso de un tipo de fibra sintética, que no solo ayude a mejorar las propiedades de la mezcla asfáltica en frío, sino también busca mejorar positivamente el impacto al medio ambiente. Ya que la fibra empleada se elaborará de desperdicios plásticos que contengan en su composición el POLIETILENO.

El objetivo que persigue la tesis, es evaluar y cuantificar los efectos que produce la adición de fibras de polietileno al incorporarlas en las mezclas asfálticas en frío. Para ello evalúa la estabilidad, flujo y porcentaje de vacíos.

Los principales hallazgos que se exponen son las siguientes:

- ❖ La incorporación de fibras de polietileno en la mezcla asfáltica en frío presenta una mejora pobre al flujo y estabilidad de la mezcla respecto a la convencional, cabe mencionar que de las tres distintas fibras de polietileno usados y

clasificados por su granulometría; solo una de ellas presenta la mejora y mientras que los dos restantes generan deterioro o muestran ser perjudiciales a la mezcla asfáltica, generando desmoronamiento e inestabilidad.

- ❖ El porcentaje óptimo para la dosificación con fibras de polietileno (PET) es del 5.00 % respecto al peso total.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Teorías generales sobre pavimentos y mezclas asfálticas.

2.2.1.1. Pavimento.

Podemos definir como pavimento a la formación de capas, cada uno con un tipo de material previamente seleccionado, que luego de ser dispuestas en el trazo de la carretera reciben en forma directa las cargas vehiculares. Para luego transmitir estas cargas en los estratos de las capas inferiores en forma disipada, produciendo una superficie de tránsito vehicular.

Los parámetros indispensables para un funcionamiento correcto de los pavimentos son: (a) adecuado trazo horizontal y vertical, (b) ancho, (c) buena resistencia a las cargas para evitar las fallas y agrietamientos, y (d) también una buena adherencia entre el vehículo y el pavimento. Donde el aspecto más importante de la estructura de pavimento, es la resistencia de las capas, la cual debe ser la adecuada para disipar los esfuerzos destructivos de las cargas producto del tránsito vehicular, del agua e intemperismo.

La disposición de capas se debe a un factor netamente económico, ya que al determinar el espesor de cada capa la finalidad es darle el espesor mínimo que atenúe los esfuerzos sobre la capa inmediata inferior. El comportamiento y desempeño de las capas no solo dependerá del material que las conforma, ya que gran parte e influencia es el proceso constructivo que se elige para la ejecución de las obras que implican su construcción, siendo el proceso más importante la compactación y humedad de los materiales de cada capa. Cuando un material no se acomoda correctamente, este se acomoda por efecto de las cargas y es cuando ahí se generan deformaciones permanentes (ahuellamientos).

Los tipos de pavimento que más se usan en el país son:

- ❖ Pavimentos flexibles.
- ❖ Pavimentos Rígidos.

- ❖ Pavimentos Semirrígidos.
- ❖ Pavimentos articulados.

2.2.1.2. Pavimento Flexible.

Es una estructura conformada por una carpeta asfáltica apoyada generalmente sobre dos capas no rígidas, la base y sub base. Pero puede prescindirse de cualquiera de las capas, que deben estar sustentadas según las necesidades.

2.2.1.2.1. Carpeta asfáltica.

Según Minaya y Ordóñez (2006), una carpeta asfáltica o llamada capa de rodamiento es aquella que proporciona una superficie uniforme y estable al tráfico vehicular, que debe tener una textura y color adecuado, además esta debe garantizar una resistencia a los efectos que puedan causar el tráfico de cargas y el medio ambiente al que estarán expuestos.

Una carpeta asfáltica está constituida con materiales bituminosos, que cumplen la función de ser los aglomerantes en la mezcla; agregados y de ser el caso los aditivos.

Los tipos de carpeta asfáltica que más se usan en el país son:

- ❖ Mezclas asfálticas en caliente.
- ❖ Mezclas asfálticas en frío.
- ❖ Tratamientos superficiales bicapa.
- ❖ Morteros asfálticos (agregado fino + filler + asfalto).

2.2.1.2.2. Base.

La capa base es aquella situada entre la subbase – o la subrasante para el caso de ser excluida en el diseño- y la carpeta asfáltica. Esta tiene como finalidad ser el elemento **resistente** de la estructura total. Por ello debe contar con un alto grado de compactación y debe ser lo más durable posible. Además, debe presentar unas características especiales; como la estabilidad frente a la presencia del agua y los cambios volumétricos que conllevan esta exposición y una alta estabilidad a las cargas que recibirá en el transcurso de su vida útil.

2.2.1.2.3. Sub-Base.

Esta capa puede ser excluida en el diseño, esta se apoya siempre en la sub-rasante y los materiales que lo conforman cuentan con requisitos de calidad menos estrictos a las solicitudes en las bases; debido a que la disipación de cargas que se da desde la parte superior a la inferior,

hace que la sollicitación de resistencia en esta capa sea menor tal como se muestra en la **FIGURA 1**. De ahí que esta tiene requisitos de calidad menos rigurosos.

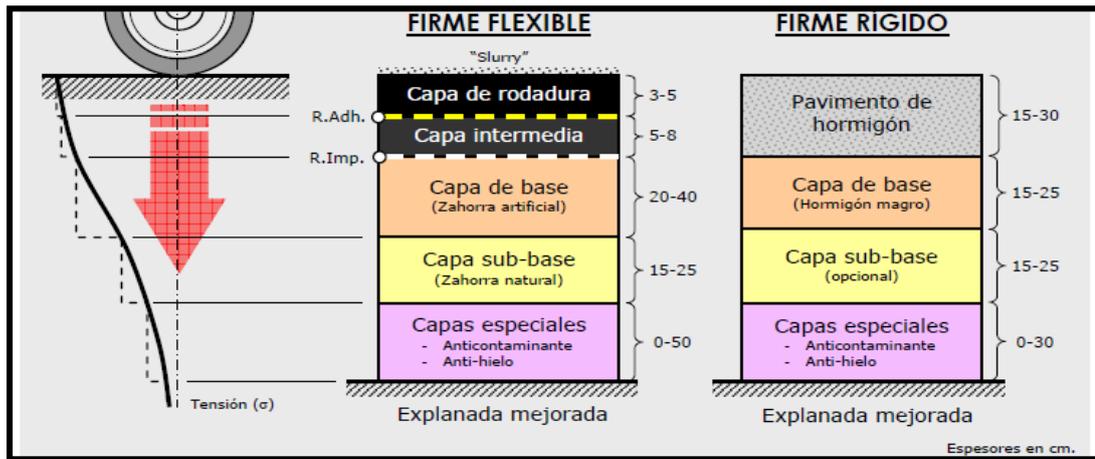


FIGURA 1. Capas genéricas de un pavimento flexible y disipación de esfuerzos.

Nota: Tomado de "Manual de Carreteras. Volumen II: Construcción y Mantenimiento," por L. Bañón y J. Bevia. 2000b. 2ª ed., Alicante.

2.2.1.3. Mezcla asfáltica.

Las mezclas asfálticas también llamadas mezclas de concreto asfáltico pueden ser definidas como la combinación de agregados de naturaleza pétreo con un tipo de ligante asfáltico y un relleno material comúnmente denominado filler. Donde la granulometría del agregado pétreo dependerá de la clase de mezcla asfáltica que se desea elaborar; todos estos elementos se combinan a diferentes temperaturas; si la mezcla se da en temperaturas altas; a estas se les denomina **mezclas asfálticas en caliente**.

Y cuando la mezcla se realiza a temperatura ambiente es denominada **mezcla asfáltica en frío**. Un componente adicional en la mezcla son los vacíos de aire, estos pueden estar presentes en distintos porcentajes, que dependerán de la naturaleza del agregado, de su granulometría empleada, de la temperatura de mezclado y compactado entre otras condiciones más. Siendo los porcentajes comunes aquellos que están entre el 4% y 6% en las mezclas densas en caliente y siendo comunes los que están entre un 20 a 25 % de vacíos con aire para las mezclas abiertas.

2.2.1.4. Mezcla asfáltica en caliente (MAC).

Según Bañón y Bevia (2000b), este tipo de mezcla se puede definir como la combinación de un ligante hidrocarbonado, agregados pétreos –filler inclusive- y

opcionalmente aditivos para mejorar una característica de la mezcla, de forma que todas las partículas de los agregados queden recubiertas por el ligante de forma homogénea.

La clasificación se realiza de acuerdo a diferentes parámetros como se detalla en la **Tabla 2.**

Tabla 2. Clasificación de mezclas asfálticas en caliente y principales características

PARÁMETRO	TIPO DE MEZCLA	SUB-CLASES	CARACTERÍSTICAS
GRANULOMETRÍA DE LOS AGREGADOS	GRADACIÓN DENSA	MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE CONVENCIONAL O MEZCLA DE GRADACIÓN CONTINUA	*Tamaño máximo nominal comúnmente de 12.5mm a 19 mm (1/2" a 3/4"). * Gradación continua
		LARGE-STONE MIX	*Tamaño máximo nominal comúnmente de 25mm a 37.5 mm (1" a 1 1/2").
		MEZCLA ARENA ASFALTO	*Tamaño máximo nominal comúnmente menos de 9.5 mm (0.375")
	GRADACIÓN ABIERTA O POROSAS	OPEN-GRADED POROUS FRICTION COURSE (OGFC)	*Gradación relativamente uniforme, proporciona drenaje en la superficie para prevenir encharcamientos.
		BASE PERMEABLE TRATADA CON ASFALTO	*Gradación uniforme con mayor tamaño máximo nominal al OGFC, para drenar el agua que entra a la estructura de la superficie o subrasante.
	GAP-GRADED (GRADACIÓN INCOMPLETA)	GAP-GRADED CONVENCIONAL	*Contiene agregados finos a gruesos, con poca presencia de agregados intermedios. Proporcionan capas densas impermeables.
STONE MÁSTIC ASPHALT (SMA)		*Incorpora en gran cantidad el filler mineral al agregado normal para alcanzar un 8% al 10% de material pasante a la malla No. 200 (0.075 mm).	
PORCENTAJE DE VACÍOS EN LA MEZCLA	MEZCLAS DENSAS	MEZCLAS CONVENCIONALES	* Los vacíos de aire (Va) están comprendidos entre un 3% a 6%.
		MEZCLAS SUPERPAVE	
		MEZCLAS SMA	
	MEZCLAS SEMI-DENSAS O SEMI-CERRADAS	* Los vacíos de aire (Va) están comprendidos entre un 6% a 10%.	
	MEZCLAS GRUESAS	10% <Va<15%	
MEZCLAS ABIERTAS	15% <Va<22%		
MEZCLAS POROSAS	22% <Va<28%		

Nota: Tomado y adaptado de "Manual de Carreteras. Volumen II: Construcción y Mantenimiento" por L. Bañón y J. Bevia. 2000b. 2ª ed., Alicante.

2.2.2. Componentes de la mezcla asfáltica en caliente.

Los materiales que componen la mezcla asfáltica son esencialmente los:(a) agregados pétreos (finos, gruesos y filler o polvo mineral); (b) el cemento asfáltico, y (c) opcionalmente aditivos.

2.2.2.1. Agregados minerales o pétreos.

Son los elementos inertes de la mezcla asfáltica, que son aglomerados por el cemento asfáltico.

Los agregados minerales son un conjunto de partículas inorgánicas, que pueden ser de origen natural o artificial. Los agregados que se usan para la elaboración de mezclas asfálticas en la mayoría de los casos son obtenidos de los depósitos fluviales, glaciares o explotados en canteras para su posterior aprovechamiento. Estos son separados, por procesos mecánicos en distintas fracciones según su tamaño de partículas; lavados; triturados o en casos especiales tratados para mejorar las características de comportamiento de las mezclas asfálticas en las cuales son empleadas. Aunque también existen los llamados agregados sintéticos, estos materiales son el producto de la sinterización de un material en particular, por lo que muchas veces son subproductos industriales (arcillas expandidas, escorias de altos hornos, vidrios, etc.).

Debido a la fricción entre partículas que estarán sometidas, es recomendable que procedan de rocas de buena calidad, exigiéndose altos equivalentes de arena (superiores a 45 ó 50 en capas de rodadura y a 40 en capas inferiores) y una gran adhesividad, determinada mediante el ensayo de Riedel-Weber (Norma de ensayo MTC E 220: Adhesividad de los ligantes bituminosos a los áridos finos - Manual de Ensayo de Materiales, 2016).

2.2.2.1.1. Agregado mineral fino.

Según el Manual de Carreteras: Especificaciones técnicas generales para construcción EG-2013 (MTC¹,2013), se puede definir al agregado fino como aquel agregado cuyas partículas provenientes del fraccionamiento natural o artificial, están comprendidas entre los tamices de 4,75 mm y 75 μ m (N.º 4 y N.º 200).

¹ MTC: Ministerio de Transporte y Comunicaciones.

Estos materiales, junto con el filler, cobran una mayor importancia en la composición de las mezclas asfálticas, especialmente en las mezclas densas. Se ha demostrado además que los agregados finos resultan decisivos para lograr una buena resistencia al deslizamiento en las carpetas asfálticas.

2.2.2.1.2. *Agregado mineral grueso.*

Es aquella proveniente de la desintegración natural o artificial de las rocas, se clasifica en gravas y piedras trituradas o chancadas, se define como las partículas de agregado retenidos en el tamiz de 4.75 mm. (malla N.º 04).

2.2.2.1.3. *Filler o polvo mineral.*

Según el manual de Carreteras: Especificaciones técnicas generales para construcción EG-2013 (MTC,2013), son aquellos que logran pasar el tamiz de 75 µm (N.º 200). Éstos son usados en las mezclas asfálticas para poder completar la granulometría de los agregados finos, cuyas características no cumplen con las especificaciones técnicas correspondientes.

Y según la descripción general de la norma ASTM² D 242³, consistirá en el mineral finamente dividida, como polvo de roca, polvo de escoria, cal hidratada, cemento hidráulico, cenizas volantes, loess u otro material adecuado. Además, el relleno mineral estará dentro de los siguientes límites:

Tamiz	Porcentaje Pasante (Por peso)
600-µm (No. 30)	100
300-µm (No. 50)	95 - 100
75-µm (No. 200)	70 - 100

El polvo mineral rellena los vacíos entre los agregados gruesos, contribuyendo a la consistencia de la mezcla, modificando la trabajabilidad, resistencia al agua y envejecimiento. Su incorporación aumenta la viscosidad del medio cohesivo (proporcionando una resistencia a la deformación).

² <https://www.astm.org/>: American Society for Testing and Materials [Sociedad Americana para Pruebas y Materiales].

³ ASTM D 242 Standard Specification for Mineral Filler for Bituminous Paving Mixtures.

Según Motta y Leite (2000), la mayor parte de los filler que pasan la malla n°200 (75 μm) son relativamente gruesos (mayor que 40 μm), la mayor parte de este material cumple la función de cubrir los vacíos del esqueleto mineral, disminuyendo el índice de vacíos y modificando el óptimo contenido de asfalto. Además, el porcentaje de material que pasa el tamiz n°200 (75 μm), ahora se denomina “DUST” para acentuar la diferencia de su comportamiento con respecto al tradicional filler. Cuando el porcentaje de material que pasa la malla n°200 aumenta, se disminuyen los vacíos del esqueleto mineral, mejorando la distribución de partículas y la trabajabilidad de las mezclas bituminosas aumenta hasta cierto punto. Por encima de este nivel, cuanto se tienen mayores porcentajes pasantes de la malla n°200, los finos comenzarán a perjudicar la estabilidad del esqueleto mineral, entorpeciendo los contactos que se darán entre las partículas gruesas, produciendo problemas en la compactación.

2.2.2.1.4. *Propiedades físicas, químicas y mecánicas de los agregados.*

A. Granulometría (ASTM D 422⁴).

Es la distribución por tamaño de las partículas que conforman los agregados, esta es una de las principales características de los agregados, ya que afectan de manera directa en la estabilidad y trabajabilidad de las mezclas.

La distribución de partículas es expresada como porcentaje del peso total y es determinada pasando el agregado con una serie de tamices apilados con aberturas progresivamente más pequeñas, como se ilustra en la **FIGURA 2**.



FIGURA 2. Tamices de la granulometría de agregados

⁴ ASTM D 422: Standard Test Method for Particle-size Analysis of Soils.

Donde se determina el peso del agregado en cada tamiz (masa A), junto con el peso acumulado total (masa B), porcentaje retenido, porcentaje que pasa, y el paso del porcentaje total. Se pueden calcular según lo determinado por las ecuaciones siguientes.

$$\text{Porcentaje retenido} = \frac{A}{B} \times 100 \quad (2.1)$$

$$\text{Porcentaje total que pasa} = 100 - \text{porcentaje retenido acumulado} \quad (2.2)$$

❖ *Tamaño máximo (TM)*: Para deslindar posibles confusiones citaremos las siguientes terminologías:

- ✓ La Norma ASTM D 8⁵; lo define como la abertura de tamiz más pequeño a través de la cual se requiere que *pase toda la cantidad de agregado*. (Basado en la terminología de la ASTM C 125⁶). Donde luego de la definición aclara que existe otra definición que pertenece a la AASHTO⁷.
DISCUSIÓN: Existe otra definición, *que se aplica solo a los agregados utilizados en el procedimiento de diseño de la mezcla Superpave*, se incluye en la especificación AASHTO MP2⁸.

❖ *Tamaño máximo nominal (TMN)*: Para deslindar posibles confusiones citaremos las siguientes terminologías:

- ✓ La Norma ASTM D 8; lo define como la abertura de tamiz más pequeña a través de la cual se permite el paso de la cantidad total del agregado. las especificaciones en los agregados generalmente estipulan una abertura de tamiz a través de la cual *todo el agregado puede pasar, pero no es necesario* (primer retenido), de modo que una proporción máxima indicada del agregado pueda retenerse en ese tamiz (Basado en la terminología ASTM C 125). Donde luego de la definición aclara que existe otra definición que pertenece a la AASHTO.
DISCUSIÓN: Existe otra definición, *que se aplica solo a los agregados utilizados en el procedimiento de diseño de la mezcla Superpave*, se incluye en la especificación AASHTO MP2.

⁵ ASTM D 8: Standard Terminology Relating to Materials for Roads and Pavements.

⁶ ASTM C 125: Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates.

⁷ AASHTO: American Association of State Highway and Transportation Officials.

⁸ AASHTO MP2: Standard Specification for Superpave Volumetric Mix Design.

B. Estados de consistencia.

Los agregados pétreos están muy influenciados por la presencia de agua en su estructura. Este fenómeno se acentúa cuanto menor es el tamaño de las partículas que componen dicho agregado, siendo especialmente relevante en los agregados donde haya gran cantidad de componente arcilloso, ya que en estos; los fenómenos de interacción superficial se imponen a los de tipo gravitatorio. A continuación, podemos citar los estados de consistencia para los agregados:

- ❖ *Líquido*: En este estado la presencia de una cantidad excesiva de agua anula las fuerzas de atracción Inter-particular que mantenían unido al suelo, por lo que presenta propiedades y una apariencia de suspensión.
- ❖ *Semilíquido*, con las propiedades de un fluido viscoso sin capacidad resistente.
- ❖ *Plástico*: Aquí el suelo es fácilmente moldeable, presentando grandes deformaciones con la aplicación de esfuerzos pequeños. Su comportamiento es plástico, por lo tanto, no recupera su estado inicial una vez retirado el esfuerzo. Mecánicamente no es apto para soportar cargas adicionales.
- ❖ *Semisólido*: En este estado el agregado deja de ser moldeable, se torna quebradizo y resquebrajadizo antes de cambiar de forma. Sin embargo, no es un sólido puro, ya que disminuye de volumen si continúa perdiendo agua. Su comportamiento mecánico es aceptable.
- ❖ *Sólido*: En este estado el agregado alcanza la estabilidad, ya que su volumen no varía con los cambios de humedad. Aquí el comportamiento mecánico es óptimo.

Los contenidos de humedad correspondientes a los puntos de transición entre cada uno de estos estados definen los límites líquidos (LL), plástico (LP) y de retracción (LR) respectivamente; como se muestra en la **FIGURA 3**.



FIGURA 3. Estados de consistencia de un suelo y sus límites respectivos.

Atterberg fue el primero que relacionó el grado de plasticidad con su contenido en agua o humedad, expresado en función del peso seco de la muestra. También definió los cuatro estados de consistencia vistos anteriormente y determinó los límites entre ellos, caracterizando la variación de diferentes propiedades físicas y mecánicas.

De los límites mencionados, es importante definir los estados líquidos (límite líquido) y plástico (límite plástico), ya que éstos presentan una alta deformabilidad del suelo y una drástica reducción de su capacidad portante.

❖ *Límite Líquido:*

El manual de ensayos de Materiales-MTC E 110⁹ (2016) señala que:

Es el contenido de humedad, expresado en porcentaje, para el cual el suelo se halla en el límite entre los estados líquido y plástico. Arbitrariamente se designa como el contenido de humedad al cual el surco separador de dos mitades de una pasta de suelo se cierra a lo largo de su fondo en una distancia de 13 mm (1/2 pulg) cuando se deja caer la copa 25 veces desde una altura de 1 cm a razón de dos caídas por segundo. Determinado mediante el método de la cuchara de Casagrande.

❖ *Límite Plástico:*

El manual de ensayos de Materiales-MTC E 111¹⁰ (2016) señala que:

Se denomina límite plástico (L.P.) a la humedad más baja con la que pueden formarse barritas de suelo de unos 3,2 mm (1/8") de diámetro, rodando dicho suelo entre la palma de la mano y una superficie lisa (vidrio esmerilado), sin que dichas barritas se desmoronen.

❖ *Índice de plasticidad:*

El manual de ensayos de Materiales-MTC E 111 (2016) señala que:

Se puede definir el índice de plasticidad de un suelo como la diferencia entre su límite líquido y su límite plástico.

$$I.P. = L.L. - L.P. \quad (2.3)$$

Donde:

I.P. = índice de Plasticidad

⁹ MTC E 110: Determinación del Límite Líquido de los Suelos.

¹⁰ MTC E 111: Determinación Del Límite Plástico (L.P.) de los Suelos e Índice de Plasticidad (I.P.)

L.L. = Límite Líquido

P.L. = Límite Plástico

C. Gravedad Específica y Absorción del Agregado (MTC E 205¹¹ y E 206¹², 2016).

Según la norma MTC E 205 (2016), el peso específico (gravedad específica) es la característica generalmente usada para calcular el volumen ocupado por el agregado en varias mezclas que contienen agregados incluyendo concreto de cemento Portland, concreto bituminoso, y otras mezclas que son proporcionadas y analizadas en base al volumen.

La gravedad específica (peso específico) se expresa como la relación de la masa de las partículas de agregado de una unidad de volumen con respecto a una masa de agua con el mismo volumen. Para convertir un peso dado de agregado en términos de volumen de sólido.

En la **FIGURA 4**, se puede apreciar una descripción volumétrica para los agregados y para comprender mejor las definiciones siguientes.

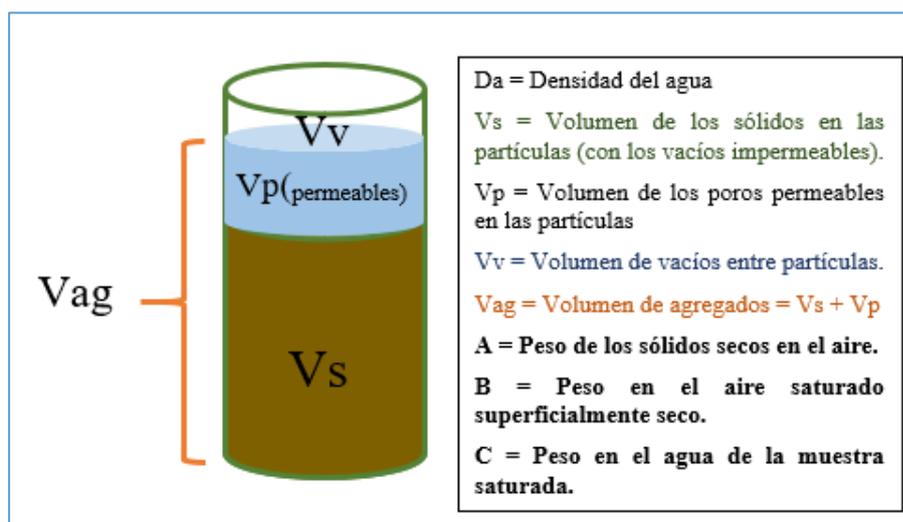


FIGURA 4. Descripción volumétrica para los agregados.

El peso específico se expresa de tres formas en función de las consideraciones de saturación:

❖ *Peso específico de masa (Pem):*

¹¹ MTC E 205: Gravedad Específica y Absorción de Agregados Finos.

¹² MTC E 206: Peso Específico y Absorción de Agregados Gruesos.

Para los agregados finos tenemos que;

$$Pe_m = \frac{A}{(500 - V_{aa})} \quad (2.4)$$

Donde:

V_{aa} = Peso en gramos o volumen en cm^3 de agua añadida al frasco de 500 cm^3 ; luego de introducir agua en el frasco una muestra de 500 g de material preparado (agregado fino con superficie saturada superficialmente seca), hasta alcanzar la marca de 500 cm^3 .

Para los agregados gruesos tenemos que;

$$Pe_m = \frac{A}{(B - C)} \quad (2.5)$$

❖ *Peso específico de masa saturado con superficie seca (Pe_{sss}):*

Para los agregados finos tenemos que;

$$Pe_{sss} = \frac{500}{(500 - V_{aa})} \quad (2.6)$$

Para los agregados gruesos tenemos que;

$$Pe_{sss} = \frac{B}{(B - C)} \quad (2.7)$$

❖ *Peso específico aparente (Pe_a)*

Para los agregados finos tenemos que;

$$Pe_a = \frac{A}{(500 - V_{aa}) - (500 - A)} \quad (2.8)$$

Para los agregados gruesos tenemos que;

$$Pe_a = \frac{A}{(A - C)} \quad (2.9)$$

❖ *Absorción (A_b):*

Es la cantidad de agua que un agregado absorbe cuando es empapado con agua. Un agregado, especialmente poroso, también absorberá el cemento asfáltico. Debido a la viscosidad del cemento asfáltico y al hecho de que la mayoría de los agregados sean hidrofílicos (afinidad al agua), el agregado absorberá menos asfalto que el

agua. Si un agregado es altamente absorbente, continuará absorbiendo el aglutinante de asfalto después de la mezcla inicial en la planta mezcladora, dejando así menos película de aglutinante de asfalto en su superficie.

Si un agregado absorbe demasiado asfalto, la mezcla se volverá menos cohesiva y difícil de colocar y compactar. La mezcla también tendrá un bajo espesor de película de asfalto en el agregado, lo que puede ocasionar problemas de durabilidad de la mezcla. Estos agregados requerirán un mayor contenido de aglutinante asfáltico para proporcionar una mezcla con un rendimiento aceptable. Los agregados altamente porosos deben contener otras cualidades deseables para superar su excesiva demanda de asfalto.

Los valores de absorción se usan para calcular el cambio en la masa de un agregado debido al agua absorbida entre los espacios de los poros permeables, comparado a la condición seca y estimado cuando el agregado ha estado en contacto con el agua lo suficiente para satisfacer la mayor absorción potencial.

Para los agregados finos tenemos que;

$$A_b(\%) = \frac{(500 - A)}{A} \times 100 \quad (2.10)$$

Para los agregados gruesos tenemos que;

$$A_b(\%) = \frac{(B - A)}{A} \times 100 \quad (2.11)$$

D. Cantidad de Material fino que pasa el tamiz de 75 µm (N° 200); (MTC E 202, 2016).

Es la estimación de materiales finos (partículas menores al tamiz de 75 µm) que se puedan presentar en el agregado fino de partículas sueltas. Ya que los valores altos de las cantidades mencionadas son perjudiciales para la mezcla asfáltica; porque afectan la adherencia y aumenta la cantidad de agua necesaria.

En el ensayo para determinar la cantidad de material fino, el agregado es sometido a un proceso de sedimentación y tamizado por vía húmeda, la diferencia en peso seco, entre la muestra original y la muestra lavada, se expresa como porcentaje; determinándose el material fino que pasa la malla N°200 (75 µm).

E. Durabilidad al sulfato de sodio y sulfato de magnesio (MTC E 209, 2016).

Es el porcentaje de pérdida que sufre un agregado que está sometido al ataque de soluciones saturadas de sulfato de sodio o sulfato de magnesio. Por lo tanto, este ensayo sirve para determinar la resistencia de los agregados a la desintegración por medio de soluciones saturadas ya mencionadas; durante no menos de 16 h ni más de 18 h, de una manera tal que la solución cubra toda la muestra.

Este ensayo estima la resistencia del agregado al deterioro por acción de los agentes climáticos durante la vida útil de la obra. Puede aplicarse tanto en agregado grueso como fino.

Este porcentaje suministra información útil para juzgar la alterabilidad de los agregados que están sometidos al intemperismo, particularmente cuando no se dispone de información adecuada sobre el comportamiento del material expuesto a condiciones atmosféricas reales.

F. Arcilla en terrones y partículas desmenuzables (friables) en agregados (MTC E 212, 2016).

La norma MTC E 212 define el procedimiento para determinar de manera aproximada el contenido de terrones de arcilla y partículas desmenuzables en los agregados que se emplearán en la elaboración de mezclas asfálticas.

G. Materia Orgánica en Arena (MTC E 213, 2016).

Es la cantidad de impurezas orgánicas que pueden estar presentes en los agregados, el método para determinar estas cantidades está descrito en la norma MTC E 212, 2016. El principal valor de este método de ensayo es proporcionar una advertencia sobre el posible contenido de impurezas orgánicas perjudiciales para la mezcla asfáltica.

H. Partículas Chatas y Alargadas en agregados (MTC E 223, 2016 y ASTM 4791).

Cuando los agregados son chatos y alargados con frecuencia tienden a quebrarse durante la compactación, resultando una mezcla en sitio que puede ser significativamente diferente de la mezcla diseñada. En algunos casos las mezclas con exceso de partículas chatas y alargadas pueden interferir con la consolidación y dificultar la colocación de los materiales. Además, pueden modificar la granulometría del medio luego de romperse las partículas durante la aplicación de las cargas. Se llama partícula chata cuando la relación ancho/espesor es mayor que 1/3; y alargada cuando la relación largo/ancho es mayor que 1/3.

I. Porcentaje de Caras de Fractura (MTC E 210, 2016).

Algunas especificaciones contienen requerimientos relacionados al porcentaje de partículas fracturadas en los agregados gruesos. La finalidad de tales requerimientos es maximizar la resistencia al esfuerzo cortante mediante el incremento de fricción inter-partícula. Otro objetivo es suministrar estabilidad a los tratamientos de superficies de agregados y proporcionar una fricción incrementada por la textura a los agregados usados en los pavimentos de superficies granulares.

Las formas de las partículas pueden afectar la trabajabilidad durante su colocación; así como la intensidad de fuerza para compactarla y afectar la resistencia de la estructura del pavimento durante su vida útil.

Las partículas irregulares y angulares mayormente resisten el desplazamiento (movimiento) en el pavimento, debido a que se entrelazan al ser compactadas. Ya que el mejor entrelazamiento se da con partículas de bordes puntiagudos y de forma cúbica, estas características se logran con la trituración.

❖ *Cara fracturada (MTC E 210,2016):*

Es una superficie angular, áspera y rugosa lisa o una superficie fracturada de una partícula de agregado que ha sido triturado naturalmente o por otros medios artificiales. Discusión: Para esta norma, una cara se considerará “una cara fracturada” sólo si tiene un área proyectada de al menos tan larga como un cuarto del área máxima proyectada (área transversal- sección máxima) de la partícula y la cara tiene un borde bien definido, esta excluye picaduras o quiebres pequeños.

❖ *Partícula fracturada (MTC E 210,2016):*

Es una partícula de agregado que tiene al menos un número mínimo de caras fracturadas especificadas (usualmente una o dos).

J. Abrasión los ángeles (MTC E 207, 2016).

Los agregados deben tener la capacidad de resistir el desgaste y degradación durante la producción, colocación y compactación de las obras de pavimentación, y sobre todo durante la vida de servicio del pavimento. Las condiciones de esfuerzo-deformación, donde la carga de la llanta es transmitida a la superficie del pavimento como una presión vertical aproximadamente uniforme y alta. Hacen que la estructura del pavimento distribuye los esfuerzos de la carga, de una máxima intensidad en la superficie hasta una mínima en la subrasante.

Por esta razón los agregados pétreos que están en, o cerca de la superficie, deben ser más resistentes que los agregados usados en las capas inferiores. Pues las capas superiores reciben los mayores esfuerzos y están propensos a una mayor degradación por efectos de las cargas de tránsito.

K. Equivalente de arena (MTC E 114, 2016).

El equivalente de arena indica las proporciones relativas de suelos arcillosos o finos plásticos y polvo en suelos granulares y agregados finos que pasan el tamiz N°4 (4,75mm). El término “equivalente de arena”, expresa el concepto de que la mayor parte de los suelos granulares y agregados finos son mezclas de partículas gruesas deseables, arena y generalmente arcillas o finos plásticos y polvo, indeseables.

L. Adherencia-Revestimiento y Desprendimiento de Mezcla de Agregado- Bitumen (MTC E 517, 2016).

Para un diseño de mezcla asfáltica resulta importante determinar la capacidad de retención de una película bituminosa en una superficie de agregado en presencia de agua.

Todos los agregados resultan ser porosos, la porosidad se determina sumergiendo los agregados en un baño y determinando la cantidad de líquido que absorbe.

La capacidad de un agregado para absorber agua (o asfalto) es un factor importante para el diseño de mezclas asfálticas. Si se tiene un agregado altamente absorbente, entonces absorberá asfalto después del mezclado inicial, disminuyendo la cantidad de asfalto para unir las demás partículas de agregado. Por lo tanto, un agregado más poroso requiere cantidades mayores de asfalto que otros agregados con menos porosidad.

El concepto de adherencia en el diseño de mezclas está relacionado a la afinidad del agregado por el asfalto, y se puede definir como la tendencia del agregado para retener una capa de asfalto. Las calizas y las dolomitas tienen alta afinidad con el asfalto sin embargo también son hidrofóbicas (repelen el agua) porque resisten los esfuerzos del agua por separar el asfalto de sus superficies. Los agregados hidrofílicos (que retienen el agua) tienen, por otro lado, poca afinidad por el asfalto. En consecuencia, tienden a separarse de las películas de asfalto cuando son expuestas al agua. Por lo expuesto el concepto de adherencia no está necesariamente relacionado al concepto de porosidad.

M. Índice de durabilidad- (MTC E 214, 2016).

El índice de durabilidad de un agregado es un valor que muestra la resistencia relativa de un agregado para producir finos dañinos como la arcilla, cuando este agregado es sometido a métodos de degradación mecánicos.

Un bajo índice de durabilidad en un agregado especifica su inutilización en varias aplicaciones de construcción, propensas a degradación y consecuente generación de finos de comportamiento arcilloso.

Este valor proporciona un diagnóstico rápido para la evaluación de la calidad de una fuente de agregado. Las investigaciones indican que también pueden usarse estos valores, en vez de los resultados del ensayo de durabilidad frente a la acción de una solución de sulfato de sodio, para evaluar la durabilidad del agregado.

Aunque la aplicación de este método ha sido limitada a los agregados de construcción para usos específicos, Existe la posibilidad de expansión de la aplicación de este método para controlar la calidad de los agregados utilizados en otras áreas de construcción, tales como agregados para uso de mezclas bituminosas de pavimentación, agregado grueso para estructuras de concreto hidráulico, y el agregado para el uso de ferrocarriles.

N. Sales Solubles Totales (MTC E 219, 2016).

La determinación del contenido de cloruros y sulfatos, solubles en agua, de los agregados pétreos empleados en bases estabilizadas y mezclas asfálticas, resulta importante para evitar la aparición de fallas debido a las reacciones negativas de las sales solubles con los demás componentes de la mezcla al cual pertenecen.

O. Angularidad del agregado fino (MTC E 222, 2016).

La determinación de la angularidad de los agregados finos mediante el cálculo de vacíos, es importante porque estos valores se correlacionan con la resistencia al ahuellamiento.

La angularidad del agregado fino es el porcentaje de vacíos con aire presente en las partículas menores de 2,36 mm (pasante malla N° 8), levemente compactados.

2.2.2.1.5. Requerimientos para los agregados.

Según el manual de Carreteras: Especificaciones técnicas generales para construcción EG-2013 (MTC,2013), los agregados empleados deberán poseer una naturaleza tal, que, al aplicársele una capa del material asfáltico, ésta no se desprenda por efecto del agua y del tráfico. Además, sólo se admitirá el empleo de agregados con características hidrófilas, si se usa algún

aditivo de comprobada eficacia para proporcionar una buena adherencia. La mezcla de los agregados (grueso, fino y el filler) deberá encajar a las exigencias de la respectiva especificación, en cuanto a su granulometría.

A. Agregados minerales gruesos.

El agregado grueso procederá de la trituración de roca o grava o por una combinación de ambas; donde se debe garantizar la limpieza de sus fragmentos; sin exceso de partículas planas, alargadas, blandas o desmenuzables. El agregado estará exento de polvo, tierra, terrones de arcilla u otras sustancias que puedan imposibilitar la adhesividad con el asfalto.

Los agregados minerales gruesos, deben cumplir además con los requerimientos, establecidos en la **Tabla 3**.

Tabla 3. *Requerimientos para los agregados gruesos.*

Ensayos	Norma	Requerimiento	
		Altitud (msnm)	
		≤3.000	>3.000
Durabilidad (al Sulfato de Magnesio)	MTC E 209	18% máx.	15% máx.
Abrasión Los Ángeles	MTC E 207	40% máx.	35% máx.
Adherencia	MTC E 517	+95	+95
Índice de Durabilidad	MTC E 214	35% min.	35% min.
Partículas chatas y alargadas	ASTM 4791	10% máx.	10% máx.
Caras fracturadas	MTC E 210	85/50	90/70
Sales Solubles Totales	MTC E 219	0,5% máx.	0,5% máx.
Absorción *	MTC E 206	1,0% máx.	1,0% máx.

* Excepcionalmente se aceptarán porcentajes mayores sólo si se aseguran las propiedades de durabilidad de la mezcla asfáltica.

Nota: Tomado de “Manual de Carreteras: Especificaciones técnicas generales para construcción EG-2013.” por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones. 2013.

B. Agregados minerales fino.

Éstos pueden ser constituidos por arena chancada o una mezcla de ella con arena natural. Las partículas deberán ser duros, limpios y de superficie rugosa y angular. Además, deberá estar libre de cualquier sustancia, que dificulte la adhesión con el asfalto.

Los agregados minerales finos, deben cumplir además con los requerimientos, establecidos en la **Tabla 4**.

Tabla 4. Requerimientos para los agregados finos.

Ensayos	Norma	Requerimiento	
		Altitud (msnm)	
		≤3.000	>3.000
Equivalente de Arena	MTC E 114	60	70
Angularidad del agregado fino	MTC E 222	30	40
Azul de metileno	AASHTO TP 57	8 máx.	8 máx.
Índice de Plasticidad (malla N.º 40)	MTC E 111	NP	NP
Durabilidad (al Sulfato de Magnesio)	MTC E 209	-	18% máx.
Índice de Durabilidad	MTC E 214	35 mín.	35 mín.
Índice de Plasticidad (malla N.º 200)	MTC E 111	4 máx.	NP
Sales Solubles Totales	MTC E 219	0,5% máx.	0,5% máx.
Absorción* *	MTC E 205	0,5% máx.	0,5% máx.

** Excepcionalmente se aceptarán porcentajes mayores sólo si se aseguran las propiedades de durabilidad de la mezcla asfáltica.

Nota: Tomado de “Manual de Carreteras: Especificaciones técnicas generales para construcción EG-2013.” por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones. 2013.

C. Filler o polvo mineral.

Este componente será el producto de los procesos de trituración de los agregados pétreos o podrá ser una contribución de productos comerciales (cal hidratada o cemento portland). El peso unitario aparente de este material, determinado por la norma de ensayo MTC E 205, deberá encontrarse entre 0,5 y 0,8 g/cm³ y su coeficiente de emulsibilidad (NLT 180¹³) deberá ser inferior a 0,6.

Los materiales que pueden utilizarse como polvo mineral puede ser: (a) cal hidratada; (b) cemento Portland; (c) polvo de roca; (d) polvo de escoria, (e) ceniza fina; o (f) loes.

La cal hidratada deberá cumplir los requisitos que se especifican en la norma AASHTO M303¹⁴ y los restantes materiales antes descritos, deben cumplir la norma ASTM D 242.

D. Gradación para mezcla asfáltica en caliente (MAC)

La gradación de los agregados para la producción de mezclas asfálticas en caliente deberá ajustarse a alguna de las siguientes gradaciones especificadas en la Tabla 5.

¹³ NLT-180: Coeficiente de emulsibilidad del polvo mineral (Norma de ensayo).

¹⁴ AASHTO M303: Standard Specification for Lime for Asphalt Mixtures.

Alternativamente pueden usarse las gradaciones especificadas en la ASTM D 3515¹⁵ e Instituto del asfalto.

Tabla 5. Husos granulométricos para mezclas asfálticas según el manual de carreteras

Tamiz	Porcentaje que pasa		
	MAC -1	MAC-2	MAC-3
25,0 mm (1")	100		
19,0 mm (3/4")	80-100	100	
12,5 mm (1/2")	67-85	80-100	
9,5 mm (3/8")	60-77	70-88	100
4,75 mm (N.º 4)	43-54	51-68	65-87
2,00 mm (N.º 10)	29-45	38-52	43-61
425 µm (N.º 40)	14-25	17-28	16-29
180 µm (N.º 80)	8-17	8-17	9-19
75 µm (N.º 200)	4-8	4-8	5-10

Nota: Tomado de “Manual de Carreteras: Especificaciones técnicas generales para construcción EG-2013.” por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones. 2013.

El material de la mezcla de los agregados debe estar libre de terrones de arcilla y se aceptará como máximo el 1% de partículas deleznales según ensayo MTC E 212. Tampoco deberá contener materia orgánica y otros materiales deletéreos.

2.2.2.2. *Bitúmenes (Betunes).*

Según la American Society for Testing and Materials (ASTM D 8, 2002), se define como bitumen (betún) a una clase de sustancias cementicias negras o de color oscuro (sólidas, semisólidas o viscosas), naturales o fabricadas, compuestas principalmente de hidrocarburos de alto peso molecular, de los cuales son típicos los: (a) asfaltos, (b) alquitranes, (c) brea y (d) asfaltitas.

2.2.2.2.1. *Asfalto.*

Según la American Society for Testing and Materials (ASTM D 8, 2002), se define al asfalto como un material cementoso de color marrón oscuro a negro en el que los constituyentes predominantes son betunes que se producen en la naturaleza o se obtienen en el procesamiento del petróleo. Los asfaltos propiamente dichos son materiales compuestos por una mezcla de

¹⁵ ASTM D 3515: Standard Specification for Hot-Mixed, Hot-Laid Bituminous Paving Mixtures.

betunes e impurezas insolubles en sulfuro de carbono (C2S), éstas últimas en una proporción superior al 5%.

El termino de *cemento asfáltico* se define como un asfalto con o sin flujo, especialmente preparado en términos de calidad y consistencia para uso directo en la fabricación de pavimentos bituminosos, y que tiene una penetración a 25 ° C (77 ° F) entre 5 y 300 dmm, bajo una carga de 100 gramos aplicada por 5 segundos. El asfalto se compone de asfaltenos y maltenos o petróleos. Los asfaltenos son sólidos amorfos de alto peso molecular que constituyen entre el 5 y el 25 % del cemento asfáltico. Los maltenos o petróleos de bajo peso molecular se componen de aromáticos, resinas y saturados. Los aromáticos y saturados son líquidos viscosos, mientras que las resinas son materiales polares semisólidos que le dan propiedades adhesivas al asfalto. La composición se muestra en la **FIGURA 5**.

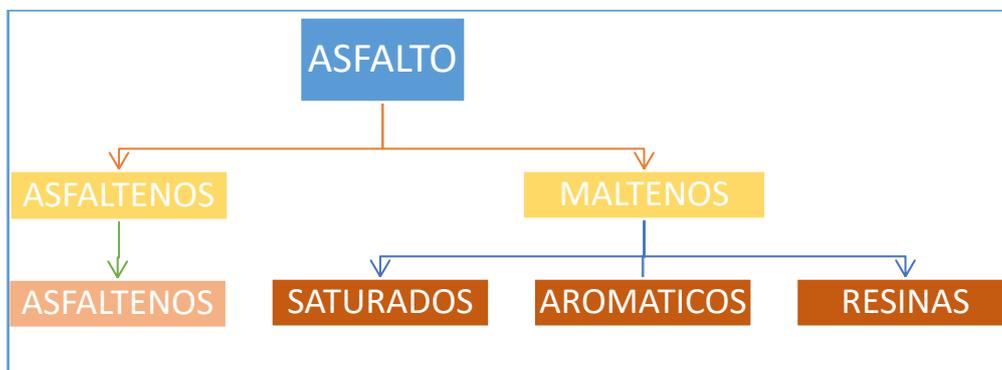


FIGURA 5. Esquema para la separación de constituyentes químicos en el asfalto.

A. Procedencia de los asfaltos.

Existen dos formas conocidas de procedencia de los asfaltos aptos para su empleo en carreteras:

❖ *Asfaltos naturales.*

Antes de 1907, la principal fuente de cementos asfálticos se produjo de forma natural. El asfalto natural más conocido se encuentra en la isla de Trinidad y tiene la forma de un lago de brea de unos 87 metros de profundidad. El asfalto del Lago Trinidad es aproximadamente 63 % de asfalto o betún y el resto mineral y material orgánico. Para todos los fines prácticos, el asfalto de Trinidad es demasiado duro o rígido para ser utilizado exclusivamente en pavimentos de asfalto, pero se puede mezclar con cementos de asfalto más blandos. Los depósitos de roca asfáltica pueden contener de 5 a 30 % de asfalto y el resto está conformado por piedra arenisca o caliza.

La Gilsonita es un hidrocarburo resinoso de origen natural nombrado por su descubridor, Samuel Gilson, que se describe mejor como un asfalto rocoso que se extrae en la cuenca Uintah en la parte noreste del estado de Utah. Este asfalto natural es similar al asfalto de petróleo duro y a menudo se lo denomina "asfaltita", "uintaita" o "asphaltum". El asfalto nativo no se usa comúnmente como aglutinante para pavimentos de asfalto.

❖ *Asfalto artificial o Asfalto derivado del petróleo.*

Los cementos asfálticos de petróleo son hidrocarburos coloidales dispersos, derivados del refinado y procesamiento de petróleo crudo. La refinación a gran escala de petróleo crudo para la fabricación de combustible y lubricantes ha hecho que el asfalto natural sea menos económico de usar. Casi todos los aglutinantes de asfalto de pavimentación utilizados en la actualidad son derivados del petróleo. El cemento asfáltico se fabrica refinando un petróleo crudo mediante destilación atmosférica seguida de destilación al vacío como se ilustra en la **FIGURA 6**.

La destilación atmosférica se completa a temperaturas en el rango de 300-350 ° C. El residuo atmosférico se envía luego a la unidad de destilación al vacío que opera aproximadamente a 350 ° C con 40 mm Hg de vacío. El residuo de destilación a vacío o "residuo" es el cemento asfáltico básico producido.

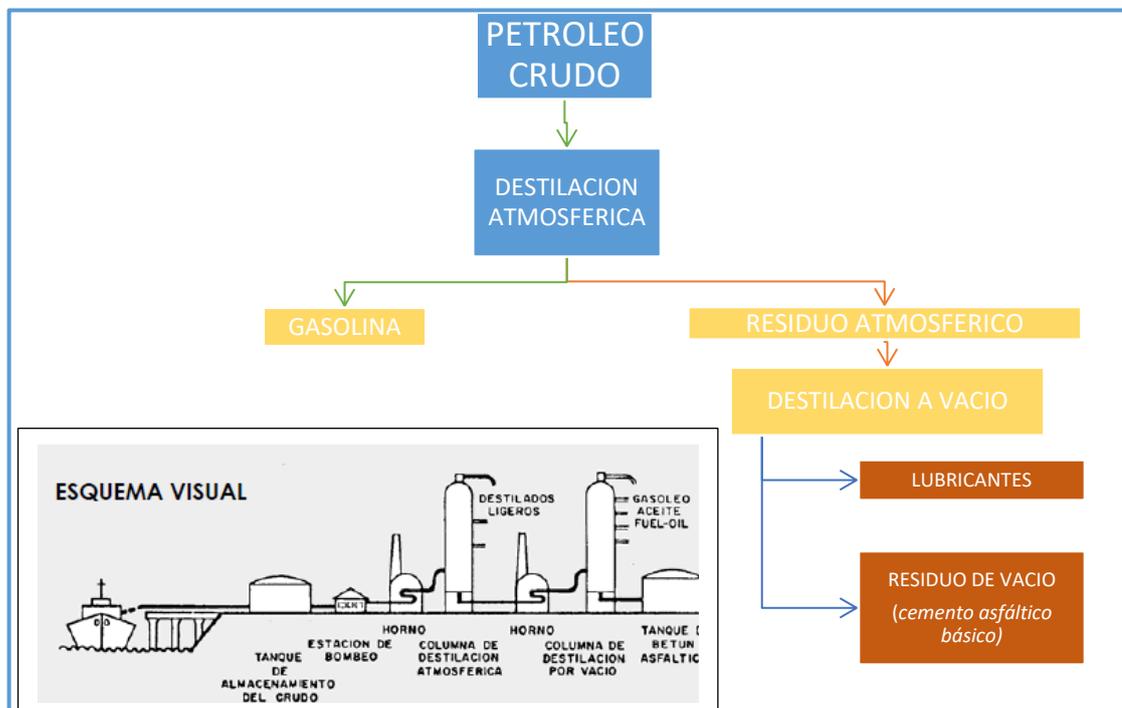


FIGURA 6. Ejemplo de refinación de asfalto.

En la **FIGURA 7**, se muestra una ilustración esquemática de una refinería típica.

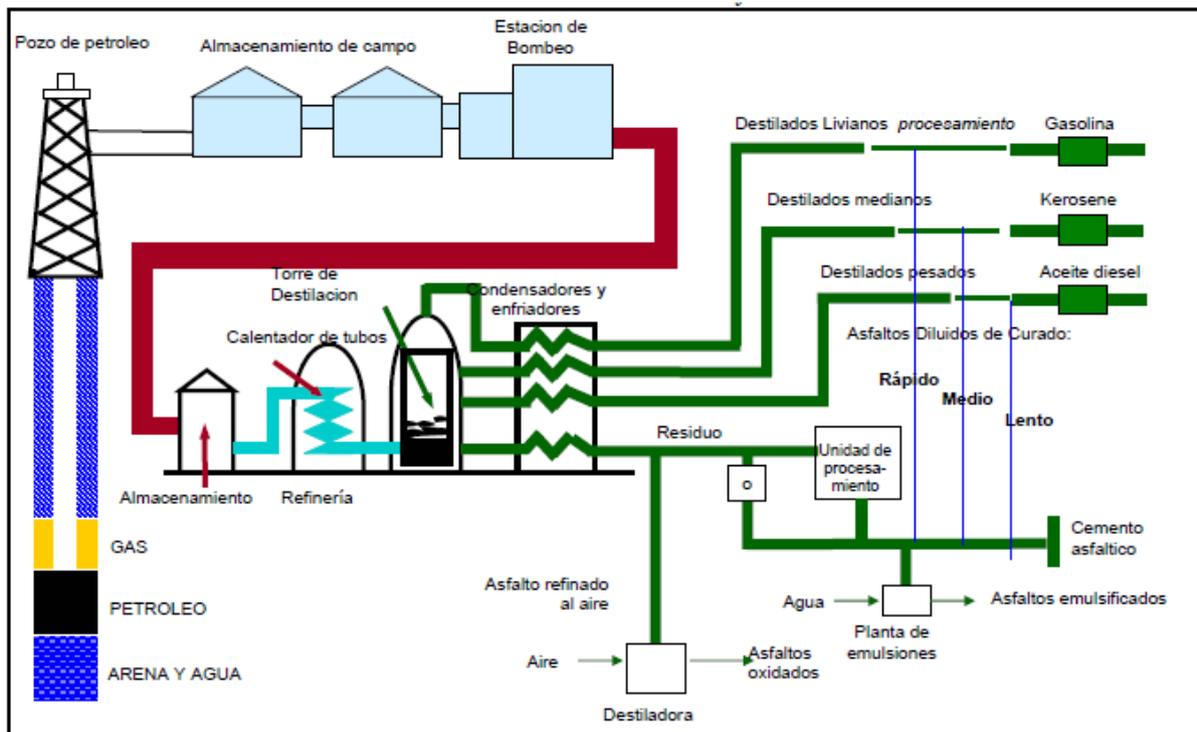


FIGURA 7. Refinamiento típico del petróleo.

Nota: Tomado de "Diseño Modernos de Pavimentos Asfálticos," por S. Minaya y A. Ordóñez. 2006. 2ª ed., Lima.

Aparte de su empleo directo en obra como conglomerante, el cemento asfáltico puede ser tratado para obtener otros productos con propiedades más específicas para acometer diversas funciones, empleados también en la construcción de carreteras. Así obtener productos derivados de los cementos asfálticos, como los:

Asfaltos diluidos (Asfaltos líquidos) o Cutbacks, son derivados de los cementos asfálticos que se obtienen por disolución de los mismos en un aceite diésel o fluidificante (gasolina o kerosene), presentando por tanto una viscosidad más reducida. Fueron ideados y desarrollados para facilitar el empleo de los cementos asfálticos de penetración en situaciones donde las temperaturas o el tipo de tratamiento exigen viscosidades de aplicación menores a las que pueden obtenerse normalmente, incluso calentando fuertemente el cemento asfáltico.

Dada la volatilidad del fluidificante tenemos los:

$$\text{ASFALTOS DE CURADO RÁPIDO(RC)} = \text{CEMENTO ASFÁLTICO} + \text{GASOLINA}$$

$$\text{ASFALTOS DE CURADO MEDIO(MC)} = \text{CEMENTO ASFÁLTICO} + \text{KEROSENE}$$

$$\text{ASFALTOS DE CURADO LENTO(SC)} = \text{CEMENTO ASFÁLTICO} + \text{ACEITE DIESEL}$$

La puesta en obra requiere un menor calentamiento, pudiéndose incluso emplear a temperatura ambiente (de 6° a 20° C) en el caso de los menos viscosos. Se emplean sobre todo en riegos de imprimación y adherencia, tratamientos superficiales y estabilizaciones de capas granulares.

Emulsiones asfálticas, una emulsión es una dispersión de un líquido en forma de pequeñas gotitas microscópicas (fase discontinua-asfalto ligeramente diluido) dentro de otro que constituye la fase continua (agua), no siendo miscibles ambos entre sí. Al igual que los cutbacks, la emulsión tiene por objeto facilitar la puesta en obra del cemento asfáltico, e incluso poder trabajar con él en condiciones climáticas adversas, como la lluvia o el frío. Esto es posible gracias a que las emulsiones son productos líquidos a temperatura ambiente, con una viscosidad tan reducida que no suelen necesitar ningún tipo de calentamiento.

Su fabricación se realiza en molinos coloidales, con una potencia capaz de producir la dispersión de ambos productos (agua y cemento asfáltico caliente) al pasar entre ellos. Esta mezcla se realiza en presencia de un agente emulsionante o emulgente, que cumple una triple función: (a) aumentar la resistencia al desplazamiento por el agua tras la puesta en obra, facilitando la adhesión del ligante con los agregados pétreos; (b) facilitar la dispersión de las partículas de cemento asfáltico, y (c) evitar la posterior aglomeración de las partículas, al cargarlas todas eléctricamente con una misma polaridad (+ ó -), haciendo así almacenable la emulsión.

$$\text{ASFALTO EMULSIFICADO} = \text{CEMENTO ASFÁLTICO} + \text{AGUA} + \text{EMULSIÓN}$$

Dada la polaridad proporcionada por el emulgente a las partículas del cemento asfáltico tenemos las:

(a) emulsiones aniónicas, estas presentan un carácter básico, estando las partículas del cemento asfáltico cargadas negativamente, por lo que presentan buena adhesividad con áridos alcalinos o alcalinotérreos tales como las calizas, que se ionizan positivamente al contacto con el agua.

(b) Emulsiones catiónicas, aquí las partículas del cemento asfáltico se cargan positivamente, lo que facilita la adherencia de áridos ácidos, con alto contenido en sílice; también son compatibles con la mayoría de áridos calizos.

2.2.2.2.2. Comportamiento mecánico del Cemento Asfáltico.

Según Minaya y Ordóñez (2006), la naturaleza del asfalto es viscoelástica, lo que significa que su comportamiento depende de la temperatura y el tiempo de aplicación de la carga. El asfalto a altas temperaturas tiene menor rigidez, típico durante la temperatura de mezcla (135°C). A medida que baje la temperatura el asfalto se vuelve más rígido. A temperaturas muy bajas el asfalto puede agrietarse porque se vuelve frágil y quebradizo, como se ilustra en la **FIGURA 8**. Análogamente cuando las cargas aplicadas son rápidas el asfalto tiene mayor rigidez y cuando las cargas son lentas hay menor rigidez y mayor deformación.

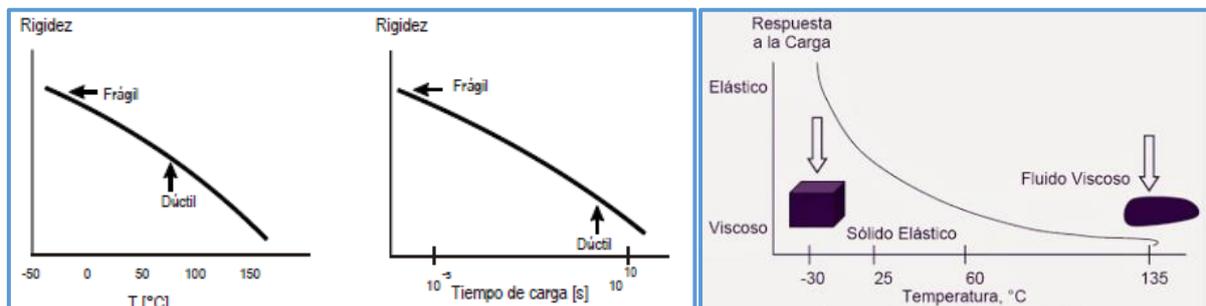


FIGURA 8. Comportamiento real del Asfalto.

Nota: Tomado de “Diseño Modernos de Pavimentos Asfálticos,” por S. Minaya y A. Ordóñez. 2006. 2ª ed., Lima.

El cemento asfáltico al ser un “material visco - elástico” muestra simultáneamente características elásticas y viscosas. Donde a temperaturas altas (>100 °C) se comporta como un fluido viscoso y fluye siguiendo la ley de Newton. Mientras que a bajas temperaturas (< 0 °C) actúa como un sólido elástico, comportándose elásticamente bajo la ley de Hooke, cuando es cargado se estira o comprime, y cuando es descargado retoma su forma inicial. A temperaturas intermedias, que representa la condición esperada del pavimento se comporta como un fluido viscoso y como un sólido elástico.

A. Comportamiento en temperaturas altas.

En climas cálidos o sometidos a cargas de tráfico lentas, el cemento asfáltico se comporta como un líquido viscoso, dejando que el agregado soporte las cargas cíclicas. En esta condición las características del agregado pétreo cumplen un papel muy importante ya que el asfalto solo trabaja como un simple aglutinante.

Si el flujo del cemento asfáltico en caliente es lento puede ser observado microscópicamente como capas adyacentes de moléculas deslizándose unas sobre otras. La resistencia o fricción entre capas se relaciona a la velocidad relativa de deslizamiento. La

viscosidad es una característica que ayuda a diferenciar a los líquidos y se define como el esfuerzo de corte entre la velocidad de deformación por corte.

La **FIGURA 9** muestra un juego de cartas que tienen una línea vertical marcada a un lado. Cuando se aplica el corte en el punto superior, las cartas tratan de deslizarse una sobre la otra y los puntos marcados en las cartas empiezan a separarse. La velocidad al corte es la velocidad a la cual estos puntos se separan.

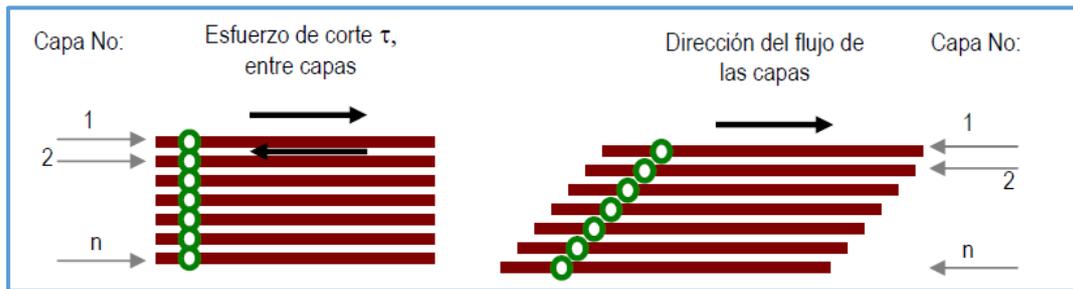


FIGURA 9. Características del flujo de líquidos.

Nota: Tomado de “Diseño Modernos de Pavimentos Asfálticos,” por S. Minaya y A. Ordóñez. 2006. 2ª ed., Lima.

Los fluidos Newtonianos tienen una relación lineal entre el esfuerzo de corte y la velocidad relativa. El asfalto caliente (a temperaturas mayores que 60°C) es comúnmente un fluido Newtoniano. Los líquidos viscosos como el asfalto caliente algunas veces se les llama plásticos porque una vez que empiezan a fluir no retornan a su posición original. Esto se da a temperaturas altas, cuando algunos pavimentos de mezclas asfálticas en caliente menos estables fluyen bajo cargas repetidas de llantas formando una deformación permanente (ahuellamiento) a lo largo de su trayectoria. Sin embargo, este fenómeno también se debe al comportamiento de los agregados en las condiciones expuestas.

B. Comportamiento en temperaturas bajas.

En climas fríos o condiciones de aplicación de carga rápida, el cemento asfáltico se comporta como un sólido elástico. En los sólidos elásticos al cesar la carga que los deforman, estos recuperan su posición original. Si el material se esfuerza más allá de su capacidad, el sólido elástico puede romperse.

El agrietamiento por bajas temperaturas algunas veces ocurre en los pavimentos cuando están sometidos a climas fríos. En esta condición, las cargas aplicadas producen esfuerzos internos que se acumulan en el pavimento asfáltico que tenderá a contraerse mientras su movimiento es restringido por las capas inferiores.

C. Comportamiento a temperaturas Intermedias.

En climas con temperaturas intermedias, el cemento asfáltico expone características de líquido viscoso y sólido elástico. A estas temperaturas, el cemento asfáltico es un excelente material adhesivo usado en pavimentación. Cuando se calienta el asfalto actúa como un lubricante, permitiendo mezclarse con el agregado, cubrirlo y compactarse formando una superficie lisa y densa. Tan pronto es enfriado, el asfalto actúa manteniendo juntos los agregados en una matriz sólida aquí actúa como ligante. En esta etapa el comportamiento del asfalto es visco-elástico es decir, tiene características elásticas y viscosas, dependiendo de la temperatura y velocidad de carga.

D. Comportamiento del ligante envejecido.

Otra característica importante del cemento asfáltico, es la susceptibilidad a la oxidación por el aire, debido a la composición de moléculas orgánicas que reaccionan con el oxígeno del ambiente. En esta reacción la estructura y composición de las moléculas de asfalto cambian, haciendo su estructura más dura y frágil dando origen al término “endurecimiento por oxidación” o “endurecimiento por envejecimiento”.

La oxidación ocurre más rápidamente a altas temperaturas; debido a esto, gran parte del endurecimiento ocurre durante la producción. Cuando el cemento asfáltico es sometido a las elevadas temperaturas propias de este proceso, de todo lo mencionado se puede afirmar que la oxidación es más crítica en cementos asfálticos usados en pavimentos expuestos a climas cálidos y desérticos.

La inapropiada compactación también puede generar oxidación o endurecimiento prematuro. En estos casos, los inadecuados niveles de compactación tienen altos porcentajes de vacíos de aire interconectados, que permiten que más aire o el agua penetren en la mezcla acelerando la oxidación.

2.2.2.2.3. Propiedades físicas y comportamientos mecánicos del cemento asfáltico.

En general, todos los cementos asfálticos presentan una serie de características físicas comunes, tales como su color oscuro, la facultad de presentar buena adhesividad con la superficie de las partículas de los agregados o su inmiscibilidad con el agua.

En cuanto a su comportamiento mecánico, este es muy complejo ya que depende de varios factores, como la carga aplicada, el tiempo que ésta actúa o la temperatura ambiente.

Todo este complejo comportamiento trata de explicarse desde el punto de vista global de la reología.

A. Penetración a 25° C, carga de 100 g, 5 s, 0.1 mm (MTC E 304, 2016).

La penetración a 25° C, determina una media de consistencia del cemento asfáltico expresado como la distancia en décimas de milímetro que una aguja estándar penetra verticalmente una muestra del material bajo condiciones conocidas de carga, tiempo y temperatura. Este valor se halla mediante el ensayo de penetración realizado a 25°C (valor promedio de la temperatura de servicio del pavimento), indica la rigidez del asfalto. Este ensayo permite clasificar de forma primaria a los cementos asfálticos, estableciendo además una nomenclatura.

Dicho ensayo consiste en la introducción de una aguja tarada y calibrada en una muestra de cemento asfáltico que se halla a una temperatura constante de 25°C, midiéndose la profundidad a la que llega a penetrar el punzante elemento luego de 5 segundos.

Este ensayo permite clasificar de forma primaria a los cementos asfálticos, estableciendo además una nomenclatura. La normativa peruana (ESPECIFICACIONES TÉCNICAS GENERALES PARA CONSTRUCCIÓN EG-2013, TOMO I) establece la siguiente nomenclatura para cementos asfálticos en función de dicho ensayo:

PEN MIN-MAX

Donde PEN es la sigla que significa grado de penetración.

MIN es el valor mínimo tolerable de penetración en décimas de milímetro.

MAX es el valor máximo tolerable de penetración en décimas de milímetro.

En función de su penetración, los cementos asfálticos se clasifican en dos grandes grupos:

(i) Blandos, presentan altos valores de penetración, lo que los hace poco apropiados para zonas cálidas, ya que pierden consistencia a temperaturas relativamente altas. Por otro lado, son idóneos en zonas frías, al no volverse rígidos y quebradizos. De este tipo son los betunes PEN 85-100, PEN 120-150 y PEN 200-300.

(ii) Duros, al contrario que los anteriores, son más consistentes (rígidos y viscosos) a altas temperaturas, por lo que son aptos para su uso en zonas cálidas. En cambio, en

climas más fríos tienen un peor comportamiento que los anteriores. A este grupo pertenecen los PEN 40-50 y PEN 60-70.

B. Viscosidad.

La viscosidad se puede definir como la resistencia que oponen las partículas a separarse, debido a los rozamientos internos que ocurren en el seno del fluido.

En el caso de los cementos asfálticos varía con la temperatura, lo que da una idea de su susceptibilidad térmica. La clasificación por viscosidad se basó en los ensayos de viscosidad del ligante. La viscosidad es una medida fundamental del flujo, que proporciona información acerca del comportamiento viscoso a mayores temperaturas.

Las especificaciones generalmente se refieren a la viscosidad del asfalto a dos temperaturas diferentes:

- ❖ **Viscosidad Absoluta a 60°C, Poises (MTC E 308, 2016);** Sirve para clasificar el cemento asfáltico y representa la viscosidad del cemento asfáltico a la temperatura más alta de servicio. En el ensayo se mide el tiempo que requiere el asfalto para fluir a través de un tubo capilar calibrado a 60°C, debido a que el asfalto a esa temperatura es muy rígido, se requiere someter al vacío a la muestra para que el asfalto se mueva a través del tubo en un tiempo razonable.

Este ensayo permite clasificar a los cementos asfálticos, estableciendo además una nomenclatura. La normativa peruana (ESPECIFICACIONES TÉCNICAS GENERALES PARA CONSTRUCCIÓN EG-2013, TOMO I) establece la siguiente nomenclatura para cementos asfálticos en función de dicho ensayo:

AC – GRADO DE VISCOSIDAD ABSOLUTA

donde AC es la sigla que significa CEMENTO ASFALTICO.

- ❖ **Viscosidad Cinemática, 135°C St mínimo (MTC E 310, 2016);** corresponde aproximadamente a la viscosidad del asfalto durante el mezclado y colocación. En el ensayo a 135° C se mide el tiempo requerido para que un volumen fijo de líquido fluya, por capilaridad, a través de un viscosímetro, a esa temperatura solo se requiere de la gravedad para que el asfalto fluya.

C. Punto de Inflamación (MTC E 312, 2016).

El punto de inflamación de un cemento asfáltico se define como la temperatura a la que comienza a producirse la inflamación de los vapores desprendidos por dicho producto bituminoso. Si la temperatura del ligante sobrepasa dicho valor crítico deberán tomarse las precauciones oportunas durante la manipulación del mismo para evitar el riesgo de incendio.

El punto de inflamación de un cemento asfáltico oscila entre los 175 y los 235°C, dependiendo de la penetración del mismo, siendo los más duros los que alcanzan valores más elevados.

D. Ductilidad, 25°C, 5cm/min (MTC E 306, 2016).

La ductilidad de un cemento asfáltico se define como el alargamiento en centímetros que produce la rotura de una probeta en determinadas condiciones de temperatura (25°C) y velocidad de deformación (5 cm/min). Guarda una estrecha relación con la impermeabilidad de un firme, ya que la formación de grietas permite el paso del agua a capas inferiores.

El significado de la medida de la ductilidad es discutible, sobre todo teniendo en cuenta que cementos asfálticos de igual penetración, pero de distinto origen presentan valores muy distintos. Lo que es indiscutible es que todo ligante debe tener la suficiente ductilidad para soportar las deformaciones producidas por los cambios térmicos o por las solicitaciones generadas por el tráfico.

Este ensayo es relativo al comportamiento del cemento asfáltico en la carpeta asfáltica.

E. Solubilidad en Tricloro-etileno, % (MTC E 302, 2016).

La determinación del grado de solubilidad en tricloroetileno de materiales asfálticos que tengan poco material mineral o que en su defecto carezcan de él, es importante porque es una medida que representa la porción de componentes activos cementantes que están presentes en la totalidad del cemento asfáltico.

2.2.2.2.4. Especificaciones para el cemento asfáltico.

Según el manual de Carreteras: Especificaciones técnicas generales para construcción EG-2013 (MTC,2013), el cemento asfáltico empleado en las mezclas asfálticas elaboradas en caliente será clasificado por viscosidad absoluta y por penetración. Respecto al empleo; estas serán usadas según las características climáticas de la región, la correspondiente carta viscosidad del cemento asfáltico y tal como lo indica la **Tabla 6**, según lo establecido en Proyecto y aprobado por el Supervisor.

Tabla 6. Selección del tipo de cemento asfáltico

Temperatura Media Anual			
24°C o más	24°C - 15°C	15°C - 5°C	Menos de 5°C
40-50 ó 60-70 o modificado	60-70	85-100 120-150	Asfalto Modificado

Nota: Tomado de “Manual de Carreteras: Especificaciones técnicas generales para construcción EG-2013.” por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones. 2013.

Los requisitos de calidad del cemento asfáltico clasificado por penetración se muestran en la **Tabla 7** y para los clasificados por viscosidad absoluta se muestran en la **Tabla 8**.

El cemento asfáltico debe presentar un aspecto homogéneo, libre de agua y no formar espuma cuando es calentado a la temperatura de 175°C. Además, podrá modificarse mediante la inclusión de aditivos de diferente naturaleza tales como: rejuvenecedores, polímeros, o cualquier otro producto garantizado, con los ensayos correspondientes.

En tales casos, las especificaciones particulares establecerán el tipo de aditivo y las especificaciones que deberán cumplir tanto el cemento asfáltico modificado como las mezclas asfálticas resultantes, al igual que la dosificación y dispersión homogénea del aditivo incorporado.

Tabla 7. Especificaciones del cemento asfáltico clasificado por penetración

TIPO	GRADO PENETRACIÓN										
	GRADO	ENSAYO	PEN		PEN		PEN		PEN		
			40-50		60-70		85-100		120-150		200-300
		min	máx	min	máx	min	máx	min	máx	min	máx
PRUEBAS SOBRE EL MATERIAL BITUMINOSO											
Penetración a 25°C, 100 g, 5 s, 0,1 mm	MTC E 304	40	50	60	70	85	100	120	150	200	300
Punto de Inflamación, °C	MTC E 312	232		232		232		218		177	
Ductilidad, 25°C, 5cm/min, cm	MTC E 306	100		100		100		100		100	
Solubilidad en Tricloro-etileno, %	MTC E 302	99		99		99		99		99	
Índice de Penetración (Susceptibilidad Térmica) ⁽¹⁾	MTC E 304	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1
Ensayo de la Mancha (Oliensies) ⁽²⁾											
Solvente Nafta - Estándar	AASHTO M 20	Neg.		Neg.		Neg.		Neg.		Neg.	
Solvente Nafta - Xileno, %Xileno		Neg.		Neg.		Neg.		Neg.		Neg.	
Solvente Heptano - Xileno, %Xileno		Neg.		Neg.		Neg.		Neg.		Neg.	

TIPO	GRADO PENETRACIÓN										
GRADO	ENSAYO	PEN		PEN		PEN		PEN		PEN	
		40-50		60-70		85-100		120-150		200-300	
		min	máx	min	máx	min	máx	min	máx	min	máx
Pruebas sobre la Película Delgada a 163 °C, 3,2 mm, 5 h											
Pérdida de masa, %	ASTM D 1754		0,8		0,8		1,0		1,3		1,5
Penetración retenida después del ensayo de película fina, %	MTC E 304	55+		52+		47+		42+		37+	
Ductilidad del residuo a 25 °C, 5 cm/min, cm ⁽³⁾	MTC E 306			50		75		100		100	

(1), (2) Ensayos opcionales para su evaluación complementaria del comportamiento reológico en el material bituminoso indicado.

Nota: Tomado de “Manual de Carreteras: Especificaciones técnicas generales para construcción EG-2013.” por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones. 2013.

Tabla 8. Especificaciones del cemento asfáltico clasificado por viscosidad

Características	Grado de Viscosidad				
	AC-2,5	AC-5	AC-10	AC-20	AC-40
Viscosidad Absoluta a 60°C, Poises	250±50	500±100	1.000±200	2.000±400	4.000±800
Viscosidad Cinemática, 135°C St. mínimo	80	110	150	210	300
Penetración 25°C, 100gr, 5 s mínimo	200	120	70	40	20
Punto de Inflamación, °C mínimo	163	177	219	232	232
Solubilidad en tricloroetileno, % masa, mínimo	99	99	99	99	99
Pruebas sobre el residuo del ensayo de película fina					
* Viscosidad Absoluta, 60°C, Poises máximo	1.250	2.500	5.000	10.000	20.000
* Ductilidad, 25°C, 5cm/min, cm, mínimo	100	100	50	20	10
Ensayo de la Mancha (Oliensies) ⁽¹⁾					
Solvente Nafta - Estándar	Negativo	Negativo	Negativo	Negativo	Negativo
Solvente Nafta - Xileno, % Xileno	Negativo	Negativo	Negativo	Negativo	Negativo
Solvente Heptano - Xileno, % Xileno	Negativo	Negativo	Negativo	Negativo	Negativo

(1) Porcentajes de solvente a usar, se determinará si el resultado del ensayo indica positivo, (ASTM D 3381).

Nota: Tomado de “Manual de Carreteras: Especificaciones técnicas generales para construcción EG-2013.” por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones. 2013.

A. Temperatura de aplicación del material bituminoso

Según el manual de Carreteras: Especificaciones técnicas generales para construcción EG-2013 (MTC,2013), el material bituminoso a utilizar en los diferentes trabajos según la especificación respectiva será obligatoriamente aplicado dentro de los rangos de la carta

viscosidad-temperatura (ASTM D341¹⁶) establecidos en el proyecto y aprobado por el Supervisor. Se observará los rangos de temperatura de aplicación establecidos, en la **Tabla 9**.

Tabla 9. Rangos de temperatura de aplicación (°C).

Tipo y grado del asfalto	Temperaturas de Esparcido ⁽²⁾		Temperaturas de mezclado en planta ⁽¹⁾	
	Mezclas in situ	Tratamientos superficiales	Mezclas Densas	Mezclas Abiertas
Asfaltos Diluidos				
MC-30	--	30	--	--
Emulsiones asfálticas				
CRS-1	--	50-85	--	
Cemento asfáltico Todos los grados	140 máx (4)		140 máx (4)	

(1) Temperatura de mezcla inmediatamente después de preparada.

(2) La Máxima temperatura deberá estar debajo de aquella en la que ocurre vapores o espuma.

(3) En casos que la T° de aplicación esté por encima del punto de inflamación, se debe tener precaución para prevenir fuego o explosiones.

(4) Se podrá variar esta temperatura a de acuerdo a la carta de viscosidad-temperatura Fuente: MS-16-Asphalt Instituto

Nota: Tomado y adaptado del “Manual de Carreteras: Especificaciones técnicas generales para construcción EG-2013.” por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones. 2013.

2.2.2.3. Aditivos.

Aunque con los componentes ya vistos se cubren casi la totalidad de necesidades que pueden surgir en la construcción de carreteras, existen situaciones en las que la mezcla asfáltica debe ofrecer una mejor respuesta: grandes cargas de tráfico, condiciones externas agresivas, gran variabilidad térmica, etc.

Los aditivos surgen para tratar de cubrir este hueco; con ellos se pretende mejorar ciertas características con respecto a los cementos asfálticos convencionales o las mezclas asfálticas, como la susceptibilidad térmica, reología, comportamiento mecánico y fluencia, adhesividad, resistencia al envejecimiento o una mayor durabilidad.

En la **Tabla 10** podemos observar los aditivos empleados en la producción de mezclas asfálticas.

¹⁶ ASTM D341: Standard Test Method for Viscosity-Temperature Charts for Liquid Petroleum Products.

Tabla 10. Aditivos empleados en la producción de mezclas asfálticas

TIPO DE ADITIVO		EJEMPLOS
Polímero	Plastómeros	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Etileno-acetato de vinilo (EVA) ✓ Etileno-acetato de metilo (EMA) ✓ Polietileno (PE) ✓ Polipropileno (PP) ✓ Poliestireno (PS)
	Elastómeros termoplásticos	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Estireno-butadieno-estireno (SBS) ✓ Estireno-butadieno (SBR)
Fibras		<ul style="list-style-type: none"> ✓ Amianto (asbesto) ✓ Celulosa ✓ Fibras acrílicas
Otros Productos		<ul style="list-style-type: none"> ✓ Caucho natural o reciclado ✓ Cemento ✓ Cal Hidratada

Al agregar estos aditivos al cemento asfáltico previo a realizar la mezcla con los áridos o durante la mezcla, serán comúnmente llamados **Asfaltos modificados**.

A continuación, se muestra en forma resumida, en la **Tabla 11**, un enlistado de los aditivos que se emplean como modificadores de asfalto, así como las propiedades que manipulan cada uno de ellos.

Tabla 11. Aditivos y propiedades que manipulan

AGENTE MODIFICADOR	PROPIEDAD QUE MANIPULA
Copolímeros en block y otros termoplásticos: <ul style="list-style-type: none"> ❖ SB (Estireno - Butadieno) ❖ SBS (Estireno-Butadieno-Estireno) ❖ SIS (Estireno-Isopreno-Estireno) ❖ SEBS (Estireno-Etileno-Butadieno- Estireno) ❖ ABS (Acrilonitrilo-Butadieno- Estireno) ❖ EVA (Etil-Vinil-Acetato) 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Modificador de reología. ✓ Aditivos endurecedores del asfalto. ✓ Aditivos ablandadores del asfalto. ✓ Aditivos rejuvenecedores del asfalto. ✓ Aditivo para mejorar la adherencia.
Hules naturales y sintéticos: <ul style="list-style-type: none"> ❖ NR (Hule natural) ❖ PBD (Polibutadieno) ❖ PCB (látex) 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Modificador de reología. ✓ Aditivos ablandadores del asfalto.
Otros: <ul style="list-style-type: none"> ❖ Hule de llanta. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Rejuvenecedor en reciclado. ✓ Rejuvenecedor en asfaltos modificados.
<ul style="list-style-type: none"> ❖ Fibras (celulosa, acrílico, polipropileno, etc). 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Aditivo para mejorar la adherencia.
<ul style="list-style-type: none"> ❖ Agentes antistriping (poliaminas). 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Aditivo para mejorar la adherencia.
<ul style="list-style-type: none"> ❖ Cal hidratada 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Aditivo para mejorar la adherencia.

2.2.2.3.1. Fibras.

Son polímeros de estructuras unidimensionales, largas y delgadas. Se doblan con facilidad y su propósito principal es la creación de tejidos. Las fibras de acero, plástico, vidrio y materiales naturales (celulosa de madera) están disponibles en una amplia variedad de formas, tamaños y espesor; pueden ser cilíndricas, llanas, onduladas y deformadas con longitud típica de 6 mm a 150 mm (0.25 pulg. a 6 pulg.) y espesor variando de 0.005 mm a 0.75 mm (0.0002 pulg. a 0.03 pulg.). Como se puede ver en la **FIGURA 10**.



FIGURA 10. Fibras utilizadas en la construcción de pavimentos.

Nota: Tomado de La Oficina Internacional para la Estandarización de Fibras Artificiales (The International Bureau for the standardisation of Man-Made fibres - BISFA, 2018).

En la **FIGURA 11** se expone un diagrama con la clasificación de las fibras.

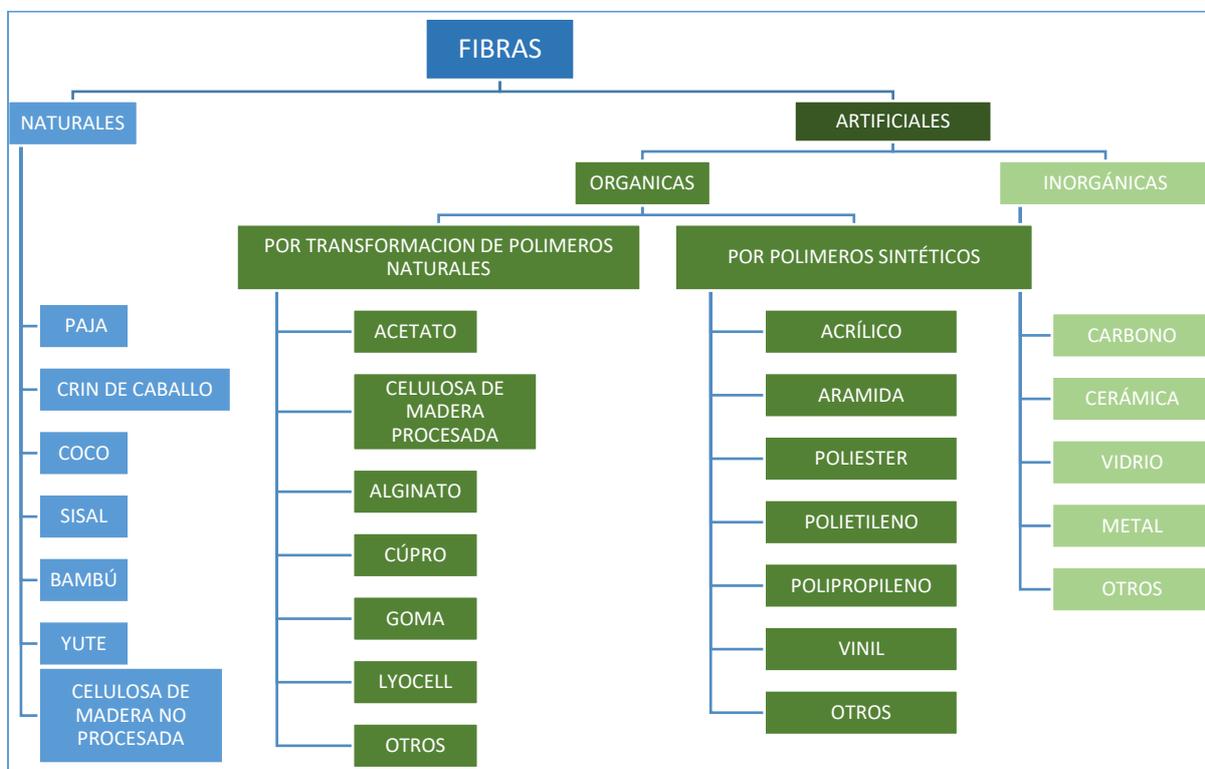


FIGURA 11. Clasificación de fibras usados en la industria de la construcción.

Las fibras también se pueden clasificar según la longitud de corte, así tenemos las: (a) fibras cortas, (< 1 mm), que permiten incrementar la dotación de asfalto en una mezcla sin que este emigre y mejora ligeramente el comportamiento mecánico de las mezclas y (b) fibras largas, (4 – 20 mm), éstas mejoran considerablemente la resistencia a la tensión de las mezclas.

Otra clasificación que se hace es en función del diámetro, así tenemos las: (a) las fibras microsintéticas, son definidas como las fibras cuyos diámetros o diámetros equivalentes son menores que 0.012 pulgadas (0.3 mm); y (b) las fibras macrosintéticas, que tienen diámetros o diámetros equivalentes mayores a los mencionados.

A. Fibras de asbesto.

El asbesto fue usado durante algunas décadas como componente en diferentes materiales de construcción, hoy su uso está prohibido. Ya que es uno de los materiales de construcción que más problemas de patología presenta. El asbesto (también conocido como amianto) está formado por un grupo de seis fibras metamórficas minerales procedentes de silicato de magnesio hidratado.

El asbesto se hizo popular en la segunda mitad del siglo 19 debido a sus cualidades como: (a) resistencia al calor, (b) la absorción de sonido y (c) su resistencia a los daños químicos. Debido a los problemas de salud que ocasionan, las fibras acrílicas se han mostrado como el sustituto más prometedor para las fibras de asbestos.

Las fibras de asbesto en su uso para mezclas asfálticas, aumentaban la rigidez en el asfalto y modificaban sus propiedades de flujo. También aportaron resistencia a la disgregación por el efecto abrasivo del tráfico, a los efectos nocivos del agua y retardaron el inicio de propagación de grietas.

B. Fibra de Polipropileno.

El polipropileno se puede definir como un polímero de hidrocarburo sintético cuya fibra está hecha usando procesos de extrusión por medio de estiramiento en caliente del material a través de un troquel. Estas fibras son obtenidas de polímeros orgánicas que están disponibles en una variedad de formulaciones.

Las fibras de polipropileno son hidrofóbicas, por lo cual no absorben agua y no son corrosivas; tienen una excelente resistencia al ataque de los álcalis, químico y clorhídrico, y tienen una baja conductividad térmica. Las fibras de polipropileno se producen como fibrillas

(fibriladas) finas con sección transversal rectangular o monofilamentos cilíndricos, con el uso de estas se puede controlar el agrietamiento en los pavimentos flexibles.

C. Fibra de Aramida.

Las fibras de aramida tienen alta resistencia a tracción y alto módulo de tracción, son dos veces y media más resistentes que las fibras de vidrio-E y cinco veces más resistentes que las fibras de acero.

Además de las excelentes características de resistencia, las fibras de aramida también tienen excelente retención de resistencia hasta 200°C (320°F), estabilidad dimensional hasta 250°C (392°F), resistencia a fatiga estática y dinámica y resistencia a fluencia. La hebra de aramida está disponible con gran variedad de diámetros.

D. Fibras de Celulosa.

Estas fibras tienen el mismo efecto que las fibras minerales. Es un producto muy variable de acuerdo con su procedencia. Tiene gran afinidad por el agua. En la **Tabla 12** se muestra las propiedades de esta fibra.

Tabla 12. *Propiedades de la fibra celulosa*

PROPIEDADES	ESPECIFICACIÓN
Análisis por tamizado	
Método A: Análisis por tamiz Alpina	
Longitud de fibra (máx)	6 mm
Pasa tamiz n°100	70±10%
Método B: Análisis por tamiz cuadrado	
Longitud de fibra (máx)	6 mm
Pasa tamiz n°20	85% (±10%)
Pasa tamiz n°40	65% (±10%)
Pasa tamiz n°140	30% (±10%)
Contenido de cenizas	18% (±5%) no volátiles
PH	7.5% (±1)
Absorción de petróleo	5 (±10) (vez por peso de fibra)
Contenido de Humedad	< 5% (por peso)

Nota: Tomado de “Diseño Modernos de Pavimentos Asfálticos,” por S. Minaya y A. Ordóñez. 2006. 2ª ed., Lima.

La **Tabla 13** resume las propiedades físicas y mecánicas, de las fibras usadas en la industria de la construcción.

Tabla 13. *Propiedades mecánicas de las fibras*

Tipo de fibra	Densidad relativa (gravedad específica)	Diámetro μm	Resistencia a tracción. MPa.	Módulo de elasticidad, MPa	Deformación en la rotura. %
Acero	7.80	100-1000	500-2600	210,000	0.5-3.5
Vidrio E	2.54	8-15	2000-4000	72,000	3.0-4.8
Acrílica	1.18	5.17	200-1000	17,000-19,000	28-50
Aramida	1.44	10-12	2000-3100	62,000-120,000	2-3.5
Nylon	1.14	23	1000	5,200	20
Poliéster	1.38	10-80	280-1200	10,000-18,000	10-50
Polietileno	0.96	25-1000	80-600	5,000	12-100
Polipropileno	0.90	20-200	450-700	3,500-5,200	6-15

2.2.2.3.2. *Fibras Acrílicas*

Las fibras acrílicas son polímeros sintéticos constituido por macromoléculas lineales cuya cadena contiene un mínimo del 85% en masa de unidad estructural correspondiente al acrilonitrilo.

Según González y García (2004), las fibras se vienen empleando en carpetas asfálticas desde los años 80, donde se ha buscado el mejoramiento de los pavimentos, modificando sus características. Las fibras han sido aplicadas en mezclas convencionales, microaglomerados, mezclas drenantes y mezclas SMA, consiguiendo modificar la reología, bajando la susceptibilidad térmica y aumentando la cohesión de las mezclas.

La adición de fibras reduce entre un 30 a 35 % el desgaste en la prueba del Cántabro en seco¹⁷, demostrando de esta forma el refuerzo que las fibras realizan en las mezclas; mejorando la cohesión, resistencia a la acción abrasiva del tráfico e influyendo directamente en la durabilidad de las mezclas.

¹⁷ NLT 352/86, caracterización de las mezclas bituminosas abiertas por medio del ensayo cántabro de pérdida por desgaste.

A. Principios básicos de la producción.

Las fibras acrílicas se producen a partir de la polimerización del acrilonitrilo, un producto petroquímico. El acrilonitrilo generalmente se combina con pequeñas cantidades de otras sustancias químicas para mejorar la capacidad de la fibra resultante. Las fibras acrílicas se producen por dos métodos básicos de hilado (extrusión), seco y húmedo.

- ❖ *En el método de hilado en seco*, el material a hilar se disuelve en un solvente y luego se extruye. Después de la extrusión a través del hilador, el solvente se evapora, produciendo filamentos continuos que luego se pueden cortar en grapas, si se desea. Los filamentos no entran en contacto con un líquido precipitante, lo que elimina la necesidad de secar y facilita la recuperación del disolvente.
- ❖ *La hilatura en húmedo*, es el proceso más antiguo donde la solución de hilado se extruye en un baño químico líquido para formar filamentos, que se extraen, se secan y se procesan.

Una de las características más importantes de las fibras acrílicas es la forma de su sección transversal irregular en forma de hueso, incluso cuando se extruyen desde un hilador de agujeros redondos; cómo se puede ver en la **FIGURA 12**.

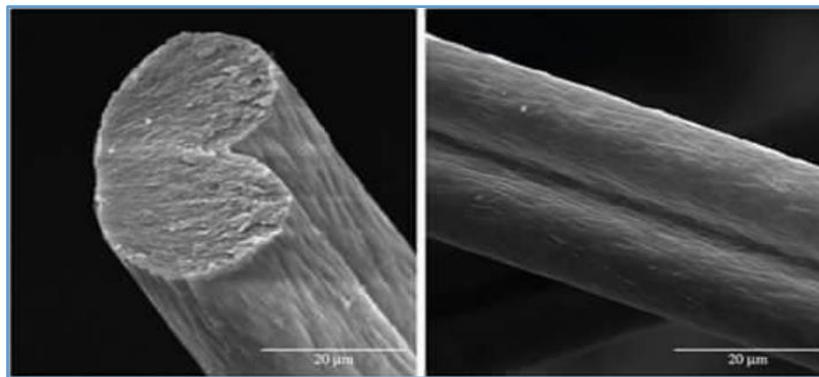


FIGURA 12. Sección transversal de las fibras acrílicas hiladas en seco, forma de hueso.

Nota: Tomado de la empresa Sudamericana de Fibras S.A. (SDF, 2018).

B. Propiedades de las fibras acrílicas.

- ❖ La elongación de ruptura es del 26 % (en estado seco o húmedo).
- ❖ Tiene una recuperación elástica del 85% después de la extensión del 4% cuando la carga se libera inmediatamente.
- ❖ Tiene una buena estabilidad térmica. Cuando se expone a temperaturas superiores a 175 ° C durante períodos prolongados.

- ❖ Las fibras acrílicas se contraen en aproximadamente 1.5% cuando se trata con agua hirviendo durante 30 minutos.
- ❖ Excelente resistencia a la abrasión.
- ❖ Tiene una buena resistencia a los ácidos minerales. La resistencia a los álcalis débiles es bastante buena.
- ❖ Tiene una naturaleza termoplástica.
- ❖ El Punto de fusión (descomposición) es por encima de 270°C.
- ❖ En la producción de asfaltos, estas fibras reemplazan a las fibras de amianto.

C. Fibras acrílicas DRYMIX RC 4020.

Es una fibra acrílica de alta tenacidad, que presenta características especiales que la hacen apropiadas para ser usadas en múltiples aplicaciones. Está fibra es diseñada especialmente para usarla en compuestos de concreto hidráulico y asfáltico mejorando sus propiedades mecánicas.

Las fibras son producidas por el método de hilatura en seco, con lo que se consigue un producto con una sección transversal en forma de hueso y con una superficie redondeada; que le permite a la fibra generar un enclavamiento mecánico en la matriz donde se incorpore, tal y como se muestra en la **FIGURA 13**. Formando una red tridimensional que actúa ante esfuerzos de tensión evitando y retardando la aparición de fisuras, lo cual a su vez podría favorecer el sellado de la mezcla e inhibiendo la penetración del agua.

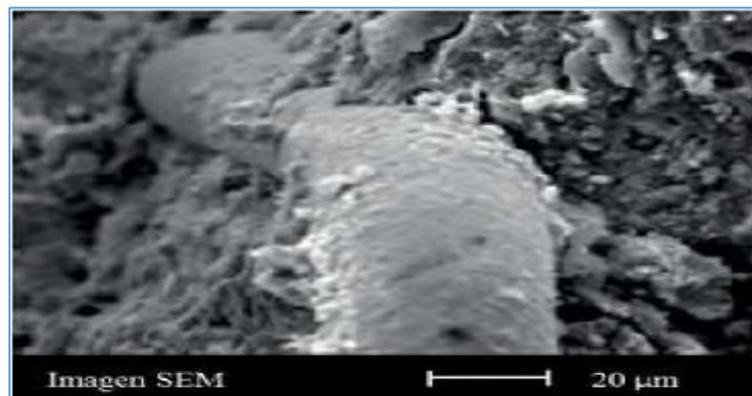


FIGURA 13. Adherencia de la fibra acrílica en una matriz.

Nota: Tomado de Sudamericana de Fibras S.A.

El proceso de fabricación de la fibra acrílica **DRYMIX RC 4020** es la mostrada en la **FIGURA 14**.

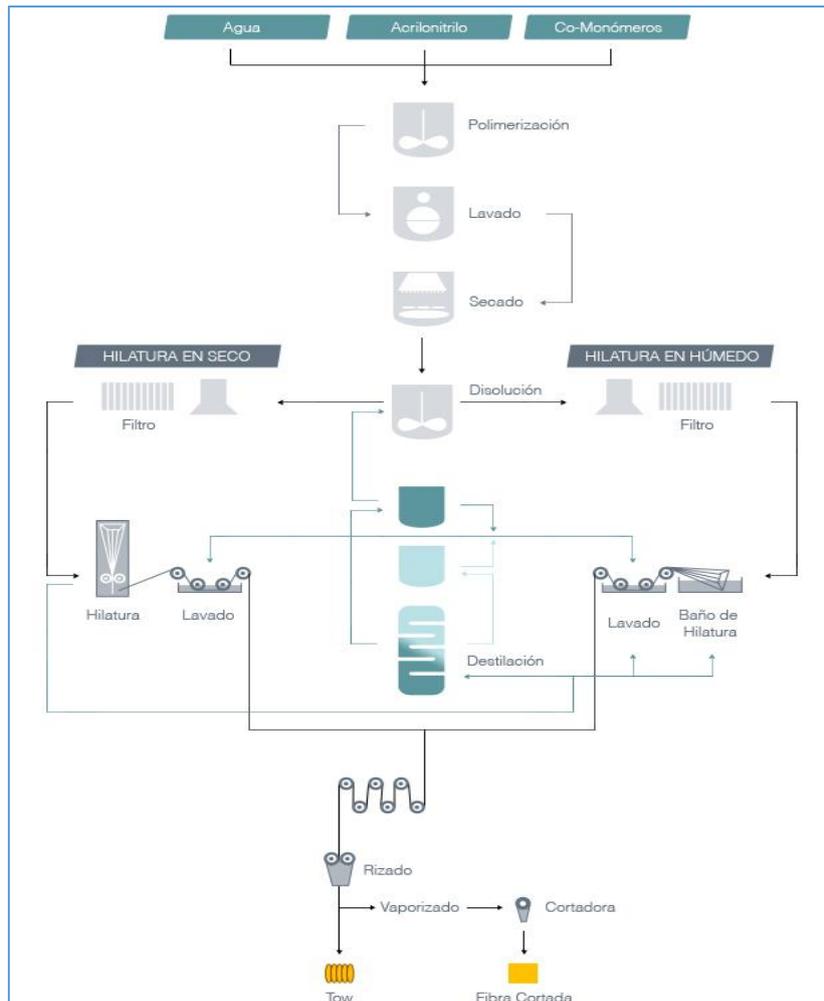


FIGURA 14. Proceso de producción de la fibra DRYMIX RC 4020.
 Nota: Tomado de la empresa Sudamericana de Fibras S.A. (SDF, 2018).

2.2.3. Propiedades de la mezcla asfáltica.

2.2.3.1. Propiedades volumétricas.

Las propiedades volumétricas proporcionan indicaciones del rendimiento potencial de la mezcla como un pavimento. Las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica compactada se determinan en la etapa de diseño del laboratorio y también se pueden incorporar en las especificaciones. Las propiedades volumétricas se utilizan en los dos procedimientos de diseño de laboratorio más comunes, Marshall y Superpave.

2.2.3.1.1. Densidad.

La densidad de la mezcla compactada está definida como la relación entre el peso de la mezcla por unidad de volumen. Esta característica no es utilizada en el diseño de mezcla, pero se emplea para los controles de compactación. A la mezcla asfáltica compactada en el

laboratorio se le asigna la densidad patrón y será ésta el punto de referencia en los controles, para determinar si la densidad del pavimento terminado es o no la adecuada. Las especificaciones requieren que la densidad del pavimento sea un porcentaje de la densidad conseguida en laboratorio. Esto se debe a que la compactación in-situ logre obtener las densidades que se obtienen usando los métodos normalizados de compactación de laboratorio.

2.2.3.1.2. *Vacíos de aire (Va).*

Los vacíos de aire o simplemente vacíos son espacios pequeños ocupados por el aire atrapado en la mezcla compactada, que están presentes entre los agregados revestidos en la mezcla final compactada. Es necesario que todas las mezclas densamente graduadas contengan cierto porcentaje de vacíos para permitir alguna compactación adicional bajo cargas de tráfico, y proporcionar espacios a donde pueda fluir el asfalto durante esta compactación.

La durabilidad de un pavimento asfáltico está en función del contenido de vacíos. Un contenido demasiado alto de vacíos de aire resulta en una mezcla porosa, que proporciona pasajes a través de la mezcla, por donde puede ingresar agua y aire causando deterioro; el deterioro que causa el aire es debido a que oxida al asfalto. En tanto, un contenido demasiado bajo de vacíos puede producir exudación de asfalto; una condición en donde una porción de asfalto es exprimida fuera de la mezcla (hacia la superficie) por no tener un espacio interior donde reacomodarse, cuando la carpeta asfáltica es comprimida por la carga de tránsito.

La densidad y el contenido de vacíos están directamente relacionados. Ya que, entre más alta densidad, se tiene un menor porcentaje de vacíos en la mezcla, y viceversa. Además, a menor porcentaje de vacíos de aire la mezcla será menos permeable. En el diseño de mezclas convencionales, los vacíos de aire están entre 3 a 5% en laboratorio, pero en campo se permite tener vacíos de aire no mayores al 8% permitiendo que la carpeta se compacte bajo tránsito.

Los vacíos de aire (Va) se expresan como porcentaje por volumen de mezcla.

2.2.3.1.3. *Vacíos en el agregado mineral (VMA).*

Los vacíos en el agregado mineral consideran los volúmenes ocupados por los vacíos de aire y el asfalto efectivo. El diseño considera un porcentaje mínimo de VMA dependiendo del tamaño del agregado. Si el porcentaje de vacíos en el agregado mineral son bajos, la película de asfalto será delgada y la mezcla será susceptible a deterioro por oxidación. Con altos porcentajes de vacíos en el agregado mineral, la película de asfalto será más gruesa y la mezcla será más durable.

Una gradación densa puede reducir el porcentaje de vacíos en el agregado mineral, reduciendo la película de asfalto y, por consiguiente, reduciendo la durabilidad de la mezcla y dándole un aspecto seco. Los vacíos en el agregado mineral (VMA) se expresan como porcentaje por volumen de mezcla.

2.2.3.1.4. *Contenido de asfalto.*

Es el porcentaje de asfalto que se incorpora en la mezcla, donde parte de este asfalto será absorbido por el agregado y el resto de asfalto formará una película que rodean las partículas. A los primeros se les llama asfalto absorbido y al segundo asfalto efectivo.

El contenido óptimo de asfalto de una mezcla depende en gran medida de las características del agregado, como la granulometría y la capacidad de absorción. Respecto a la granulometría, cuanto más finos (filler) contenga la gradación de la mezcla, mayor será la superficie específica y mayor será la cantidad requerida de asfalto para cubrir todas las partículas. Por otro lado, las mezclas porosas (con porcentajes de material fino -filler- menores de 2 %) exigen menos asfalto debido a que poseen menos área superficial total.

La relación entre el área superficial del agregado y el contenido óptimo de asfalto es mayor cuando hay relleno mineral. Los pequeños incrementos de filler, pueden absorber gran parte del contenido de asfalto, resultando en una mezcla inestable y seca. Las pequeñas disminuciones tienen el efecto contrario; poco relleno mineral resulta en una mezcla muy rica en cemento asfáltico (húmeda). El contenido de asfalto puede expresarse como porcentaje del peso total de la mezcla, o por peso, del agregado de la mezcla.

2.2.3.1.5. *Contenido de Asfalto efectivo (P_{be}).*

El contenido efectivo de asfalto es el volumen de asfalto no absorbido por el agregado; es la cantidad de asfalto que forma una película ligante efectiva sobre las superficies de los agregados. El contenido efectivo de asfalto se obtiene al restar la cantidad absorbida de asfalto del contenido total de asfalto.

2.2.3.1.6. *Vacíos llenos con asfalto (VFA).*

Es la porción del volumen de vacíos entre las partículas de agregado (VMA) que es ocupado por el asfalto efectivo, por lo que se expresa como un porcentaje del VMA.

Un diagrama de componentes como se ilustra en la **FIGURA 15**, es una herramienta visual utilizada para ayudar al diseñador a comprender las relaciones volumétricas en el diseño

de mezclas. El diagrama de componentes también se usa para comprender las relaciones volumétricas en la mecánica del suelo. Para comprender los conceptos mencionados utilizaremos el esquema del peso volumen para una partícula de agregado.

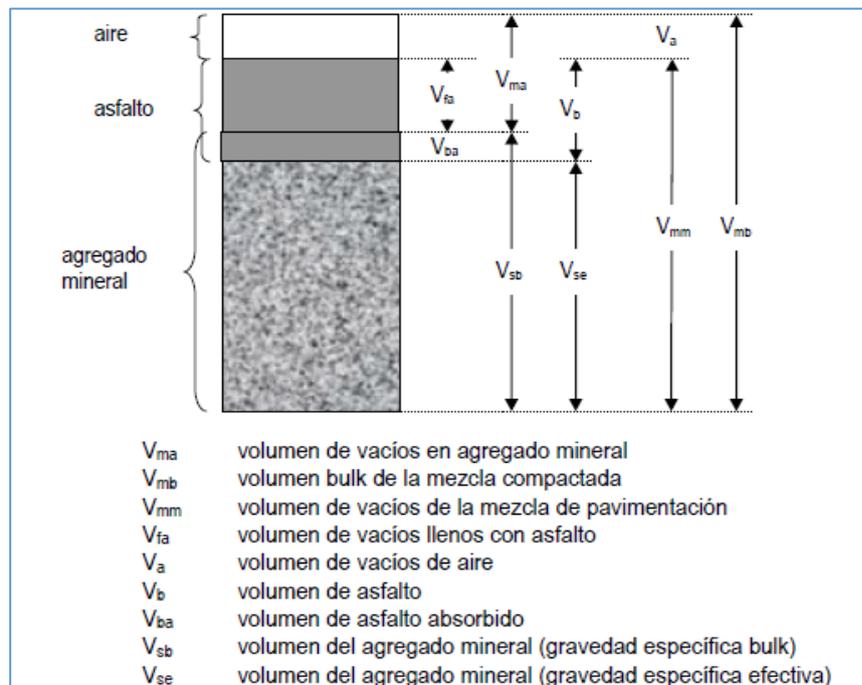


FIGURA 15. Esquema peso-volumen para una partícula de agregado.

Nota: Tomado de “Diseño Modernos de Pavimentos Asfálticos,” por S. Minaya y A. Ordóñez. 2006. 2a ed., Lima.

La gravedad específica es una relación entre la masa de un material de un volumen dado y el peso de un volumen igual de agua, ambos a la misma temperatura. Hay cinco tipos diferentes de medidas de gravedad específicas utilizadas en el análisis volumétrico de mezclas asfálticas:

- ❖ **Gravedad específica bulk, Gsb:** Representa la relación del peso en el aire de un material permeable (incluyendo los vacíos permeables e impermeables del material) a temperatura establecida al volumen del agregado incluyendo los vacíos permeables.
- ❖ **Gravedad específica aparente, Gsa:** Representa la relación del peso en el aire de un material impermeable con respecto al volumen de un agregado impermeable o piedra a una temperatura establecida (incluyendo los vacíos impermeables).
- ❖ **Gravedad específica efectiva, Gse:** Es la relación del peso en el aire de un material permeable (excluyendo los vacíos permeables al asfalto) con respecto al volumen del agregado con los vacíos impermeables y vacíos permeables que no absorbieron asfalto.

- ❖ **Gravedad específica bulk de la mezcla asfáltica compactada, G_{mb} :** Es la relación del peso en el aire de una unidad de volumen de una muestra compactada de mezcla asfáltica, a una temperatura determinada.
- ❖ **Gravedad específica teórica máxima de una mezcla asfáltica, G_{mm} :** Es la relación del peso en el aire de una unidad de volumen de una mezcla asfáltica no compactada o suelta a una temperatura determinada. También se le conoce como la gravedad específica de Rice. Por simplicidad y uso práctico, se supone que la gravedad específica del agua es 1.00 gr/cm³.

2.2.3.2. *Ecuaciones para las propiedades volumétricas de mezclas asfálticas.*

La **Tabla 14** ofrece una lista completa de la nomenclatura utilizada en el análisis volumétrico de mezclas asfálticas.

Tabla 14. *Terminología volumétrica de la mezcla asfáltica*

ID	DESCRIPCIÓN
G	Gravedad específica Bulk de un agregado.
G_a	Gravedad específica Aparente de un agregado
G_b	Gravedad específica del cemento asfáltico.
G_{sb}	Gravedad específica Bulk de la combinación de agregados.
G_{se}	Gravedad específica efectiva de la combinación de agregados.
G_{sa}	Gravedad específica aparente de la combinación de agregados.
G_{mb}	Gravedad específica Bulk de la mezcla asfáltica compactada.
G_{mm}	Gravedad específica teórica máxima de una mezcla asfáltica.
P	Porcentaje en peso de agregado
P_b	Porcentaje de asfalto para el peso total de la mezcla asfáltica.
P_s	Porcentaje de agregado para el peso total de la mezcla asfáltica.
P_{mm}	Porcentaje de mezcla asfáltica no compactada para el peso total de la mezcla asfáltica (generalmente 100%).
P_{be}	Contenido de asfalto efectivo, porcentaje del peso total de la mezcla.
P_a	Porcentaje de vacío de aire de la mezcla compactada para el volumen total.
P_{ba}	Porcentaje de cemento asfáltico absorbido, por peso total de agregado.

Nota: Tomado de “Diseño Modernos de Pavimentos Asfálticos,” por S. Minaya y A. Ordóñez. 2006. 2^a ed., Lima.

Las gravedades específicas (pesos específicos) de todos los componentes en una mezcla de asfalto deben conocerse antes del análisis volumétrico de la mezcla. Para esto existen procedimientos de prueba establecidos para medir las gravedades específicas.

- ❖ Gravedad Específica Bulk de la combinación de agregados.

$$G_{sb} = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_n}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \dots + \frac{P_n}{G_n}} \quad (2.12)$$

- ❖ Gravedad específica aparente de la combinación de agregados.

$$G_{sa} = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_n}{\frac{P_1}{G_a1} + \frac{P_2}{G_a2} + \dots + \frac{P_n}{G_a_n}} \quad (2.13)$$

- ❖ Gravedad Específica efectiva de la combinación de agregados.

$$G_{se} = \frac{P_{mm} - P_b}{\frac{P_{mm}}{G_{mm}} - \frac{P_b}{G_b}} \quad (2.14)$$

El valor de la gravedad específica efectiva de un agregado estaría siempre entre su gravedad específica bulk y aparente. Cuando la gravedad específica efectiva está fuera de estos límites, se debe asumir que este valor es incorrecto.

- ❖ Gravedad Específica Teórica Máxima de Mezclas con Diferentes Contenidos de Asfalto.

Luego de calcular la gravedad específica efectiva de los agregados considerando cada medición de las gravedades específicas teóricas máximas y promediando los resultados de Gse, la gravedad específica teórica máxima para algún otro contenido de asfalto puede obtenerse con la siguiente expresión:

$$G_{mm} = \frac{P_{mm} - P_b}{\frac{P_s}{G_{se}} - \frac{P_b}{G_b}} \quad (2.15)$$

En ausencia de datos proporcionados por el Método Rice, la gravedad específica puede calcularse con una relación matemática que considera las gravedades específicas bulk y aparente de los componentes de la mezcla:

$$G_{mm} = \frac{100}{\frac{\% \text{ asfalto}}{G_b} + \frac{\% \text{ grueso}}{A} + \frac{\% \text{ fino}}{B} + \frac{\% \text{ filler}}{C}} \quad (2.16)$$

Siendo:

$$A = \frac{G + G_a}{2}, \text{ Para el agregado Grueso} \quad (2.17)$$

$$B = \frac{G + G_a}{2}, \text{ Para el agregado Fino} \quad (2.18)$$

$$C = \frac{G + G_a}{2}, \text{ Para el filler} \quad (2.19)$$

La gravedad específica bulk del filler mineral es difícil de determinar, pero si es sustituido por la Gravedad específica aparente del filler, el error es despreciable.

❖ Absorción de Asfalto.

$$P_{ba} = (100) \frac{G_{se} - G_{sb}}{G_{sb} G_{se}} G_b \quad (2.20)$$

❖ Contenido de Asfalto Efectivo de la Mezcla.

$$P_{be} = P_b - \frac{P_{ba}}{100} P_s \quad (2.21)$$

❖ Porcentaje de VMA en Mezcla Compactada.

$$VMA = 100 - \frac{G_{mb} P_s}{G_{sb}} \quad (2.22)$$

❖ Porcentaje de Vacíos de Aire en Mezcla Compactada.

$$P_a = 100 \times \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} \quad (2.23)$$

❖ Porcentaje VFA en Mezclas Compactadas.

$$VFA = 100 \times \frac{(VMA - V_a)}{VMA} \quad (2.24)$$

2.2.3.3. *Propiedades consideradas en el diseño de mezclas asfálticas.*

2.2.3.3.1. *Estabilidad.*

La estabilidad es la capacidad para resistir desplazamientos horizontales y deformaciones bajo las cargas del tránsito, que va a depender de la fricción y cohesión interna. La fricción interna en las partículas de agregado (fricción entre partículas) está relacionada con las características del agregado tales como; la forma y textura superficial. La cohesión resulta de la capacidad ligante del asfalto, un grado propio de fricción y cohesión interna en la mezcla, previene que las partículas de agregado se desplacen unas respecto a otras debido a las fuerzas ejercidas por el tráfico. En términos generales, entre más angular sea la forma de las partículas de agregado y más áspera su textura superficial, más alta será la estabilidad de la mezcla debido al mejor enclavamiento de los agregados y al mayor soporte cortante.

La estabilidad de la mezcla asfáltica se ha medido respecto del porcentaje de asfalto, Para un mayor porcentaje de asfalto se tiene una mezcla bastante estable, hasta cierto punto, pasado este límite (con mayores contenidos de cemento asfáltico) la estabilidad empieza a caer. Esto se debe a que existe un límite donde la cantidad de asfalto es óptima y permite el acomodamiento y enclavamiento de las partículas homogéneamente, y al sobrepasar este límite con mayor contenido de asfalto se genera una película muy gruesa que entorpece o impide el enclavamiento de las partículas.

2.2.3.3.2. *Durabilidad.*

La durabilidad de una mezcla asfáltica es su capacidad para resistir embates tales como; la desintegración del agregado, cambios en las propiedades del asfalto (oxidación) y separación de las películas de asfalto (desprendimiento).

Entonces a mayor cantidad posible de asfalto se aumenta la durabilidad, porque las películas gruesas de asfalto no se oxidan o endurecen tan rápido como lo hacen las películas delgadas. Además, el máximo contenido posible de asfalto sella eficazmente un gran porcentaje de vacíos interconectados en el pavimento, haciendo difícil la penetración del aire y del agua. Pero se debe dejar un cierto porcentaje de vacíos en el pavimento para permitir la expansión del asfalto en los tiempos cálidos o el reacomodamiento del asfalto cuando la carpeta se comprime debido a la compactación por cargas de tráfico.

Una gradación densa de agregado firme, duro y resistente a la separación, contribuye de tres maneras a la durabilidad del pavimento. Una gradación densa proporciona un mejor

enclavamiento entre las partículas, lo cual mejora la impermeabilidad de la mezcla. Un agregado firme y duro resiste la abrasión bajo las cargas de tráfico. Un agregado (cohesivo) resistente a la separación resiste la acción del agua y cargas de tráfico, las cuales tienden a separar la película de asfalto de las partículas de agregado, conduciendo a la desintegración del pavimento. La resistencia de una mezcla a la separación puede ser mejorada, bajo ciertas condiciones, mediante el uso de compuestos adhesivos, fibras o rellenos minerales.

Aunque la impermeabilidad es importante para la durabilidad de las mezclas compactadas, virtualmente todas las mezclas asfálticas usadas en la construcción de carreteras tienen cierto grado de permeabilidad. Esto es aceptable siempre y cuando la permeabilidad esté dentro de los límites especificados.

2.2.3.3.3. Impermeabilidad.

La impermeabilidad de un pavimento asfáltico es la resistencia al paso de aire y agua hacia su interior, o a través de él. Esta característica está relacionada con el contenido de vacíos de la mezcla compactada y el acceso de estos con la superficie. La exposición del interior de las mezclas asfálticas al aire y agua, por los altos porcentajes de vacíos de aire en mezclas porosas, supone una mayor oxidación del asfalto, pero esta condición se mitiga usando asfaltos modificados.

2.2.3.3.4. Flexibilidad.

Flexibilidad es la capacidad de un pavimento asfáltico para acomodarse a movimientos y asentamientos graduales de la subrasante, sin agrietarse. La flexibilidad es una característica deseable en todo pavimento asfáltico debido a que virtualmente todas las subrasantes se asientan (bajo cargas) o se expanden (por expansión del suelo).

2.2.3.3.5. Resistencia a la fatiga

La resistencia a la fatiga de un pavimento es la resistencia a la flexión repetida causada por las cargas de tránsito cíclicos. Esta propiedad está directamente relacionada al asfalto, ya que se ha podido observar en investigaciones que los asfaltos oxidados no son resistentes a la fatiga. La capacidad de soporte de la subrasante junto a sus características de resistencia y el espesor del pavimento, también están asociados a la resistencia a la fatiga. Los pavimentos de gran espesor sobre subrasantes resistentes no se flexionan tanto por la acción de las cargas cíclicas, como los pavimentos delgados o aquellos que se encuentran sobre subrasantes débiles.

Los agrietamientos por fatiga surgen en la fibra inferior de la carpeta asfáltica cuando ésta trabaja a tracción, y se reflejan en la superficie denominándose piel de cocodrilo.

2.2.3.3.6. *Resistencia al deslizamiento.*

Es la capacidad de una superficie de pavimento, para minimizar el deslizamiento de los neumáticos de los vehículos sobre ella, particularmente cuando la superficie está mojada. Para obtener buena resistencia al deslizamiento, el neumático debe ser capaz de mantener contacto con las partículas de agregado en vez de rodar sobre una película de agua en la superficie del pavimento (hydroplaning). Una superficie áspera y rugosa de pavimento tendrá mayor resistencia al deslizamiento que una superficie lisa. La mejor resistencia al deslizamiento se obtiene con un agregado de textura áspera, en una mezcla de gradación abierta y con tamaño máximo de 9.5mm (3/8 pulgada) a 12.5mm (1/2 pulgada). Además de tener una superficie áspera, los agregados deben resistir el pulimiento (alisamiento) bajo el tránsito.

2.2.3.3.7. *Trabajabilidad.*

La trabajabilidad se define como la facilidad con que una mezcla de pavimentación puede ser colocada y compactada. La trabajabilidad puede ser mejorada modificando los parámetros del diseño de mezcla, el tipo de agregado y/o la granulometría.

Las mezclas que contienen un alto porcentaje de agregado grueso tienen una tendencia a segregarse durante su manejo y también pueden ser difíciles de compactar. También en mezclas con demasiado relleno mineral se puede ocasionar que la mezcla se vuelva muy rígida, disminuyendo la trabajabilidad. Aunque el asfalto no es la principal causa de los problemas de trabajabilidad, esta tiene algún efecto sobre la trabajabilidad. Debido a que la temperatura de mezcla afecta la viscosidad del asfalto, ya que una temperatura baja (mezclas frías) hará que la mezcla sea semi-rígida a rígida volviéndola poco trabajable, dificultando la compactación dejando altos porcentajes de vacíos de aire.

2.2.3.3.8. *Resistencia a la deformación plástica (deformación permanente o ahuellamiento).*

El comportamiento reológico condiciona la acumulación de deformaciones plásticas ante fuertes aplicaciones de carga prolongadas en el tiempo, provocando la fluencia del material (ahuellamiento). Una adecuada dosificación de la mezcla, respecto a la relación filler-cemento asfáltico ayuda a paliar este efecto.

Otras veces, la mala calidad de las capas inferiores influye en la mayor deformabilidad de una carpeta asfáltica, produciendo baches de diversa consideración; una mala adherencia, unida a fuertes esfuerzos tangenciales (como los generados en las zonas de parada habitual de vehículos) también contribuye a acentuar este tipo de deformación remanente.

2.2.4. Comportamiento y Caracterización de mezclas asfálticas.

La aplicación de cargas cíclicas de tráfico, hacen que el pavimento flexible típico sufra esfuerzos de tensión debajo de la carpeta asfáltica y compresiones a nivel de las demás capas, incluso el suelo de fundación.

Los esfuerzos horizontales se disipan en la carpeta asfáltica, originando esfuerzos de tracción (σ_t) en su fibra inferior que luego producirán fisuras. Los esfuerzos verticales (σ_v) se disipan en las capas granulares hasta la subrasante, esto se aprecia en la **FIGURA 16**.

Contrario al esquema de esfuerzos en un pavimento flexible típico, se tiene en una estructura de pavimento con base y/o sub-base estabilizada, ya que la carpeta asfáltica está sometida solo a esfuerzos de compresión, y los esfuerzos de tensión son absorbidos por la base estabilizada.

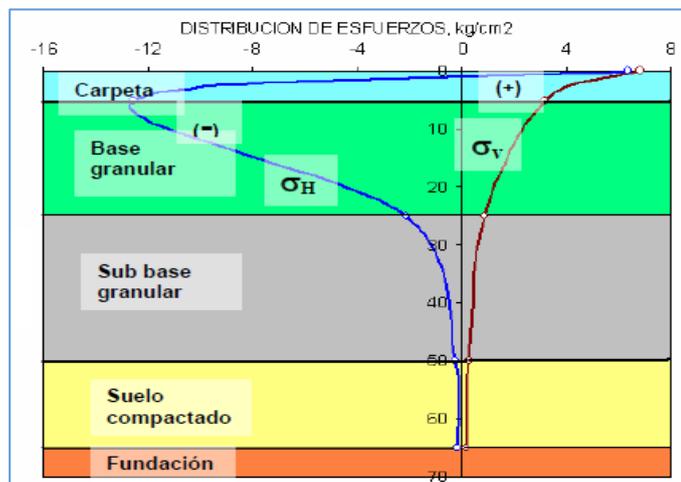


FIGURA 16. Esquema de la distribución de esfuerzos en pavimentos típicos.

Nota: Tomado de “Diseño Modernos de Pavimentos Asfálticos,” por S. Minaya y A. Ordóñez. 2006. 2a ed., Lima.

Entonces para un Pavimento flexible Típico, la determinación del Módulo Resiliente (medida del módulo de elasticidad del suelo de la carretera u otro material de pavimento-

AASHTO 93) por medio del ensayo de Tracción Indirecta (ASTM D 4123¹⁸); resulta representativo solo para este tipo de pavimentos y no representa el comportamiento cuando se hace un diseño tal que la carpeta asfáltica se encuentre trabajando a compresión.

Como se ve, esto se debe a que el método AASHTO 1993 y el Método del Instituto del Asfalto presentan una gran desventaja en el análisis deformacional que hacen, porque no consideran adecuadamente la influencia de la estratigrafía del terreno de fundación. Y proponen la convertibilidad del espesor de la carpeta asfáltica a espesores de bases granulares, sin considerar los módulos elásticos o rigidez de ambos materiales y la variación de la distribución de esfuerzos y deformaciones en la estructura del pavimento.

2.2.4.1. *MÓDULO RESILIENTE, Mr (Parámetro elástico - AASHTO 1993).*

El módulo resiliente es el módulo elástico que se utilizará con la teoría elástica, porque este corresponde solamente a un comportamiento elástico del material. Es sabido que la mayoría de los materiales de pavimentación no son elásticos, pero experimentan una deformación permanente después de cada aplicación de carga. Sin embargo, si la carga es pequeña en comparación con la resistencia del material y se repite una gran cantidad de veces, la deformación en cada repetición de carga es casi completamente recuperable (y proporcional a la carga) y puede considerarse elástica.

El Módulo Resiliente relaciona el esfuerzo aplicado y la deformación elástica en la condición estable o residual cuando el material presente un comportamiento elástico, por lo que el módulo resiliente no representa el comportamiento total, desde el inicio del ciclo de cargas hasta el final.

Como se puede ver en la **FIGURA 17**, ante la aplicación cíclica de cargas y descargas, estas acumulan deformaciones permanentes (plásticas) y las deformaciones recuperables (elásticas) se van haciendo constantes; y cuando el material no acumula más deformaciones plásticas (consolidación del material), existirá una pendiente de recta final que se denomina Módulo Resiliente. Por tanto, el módulo Resiliente no representa el comportamiento elástico final del material.

¹⁸ ASTM D 4123: Standard Test Method for Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures (Withdrawn 2003).

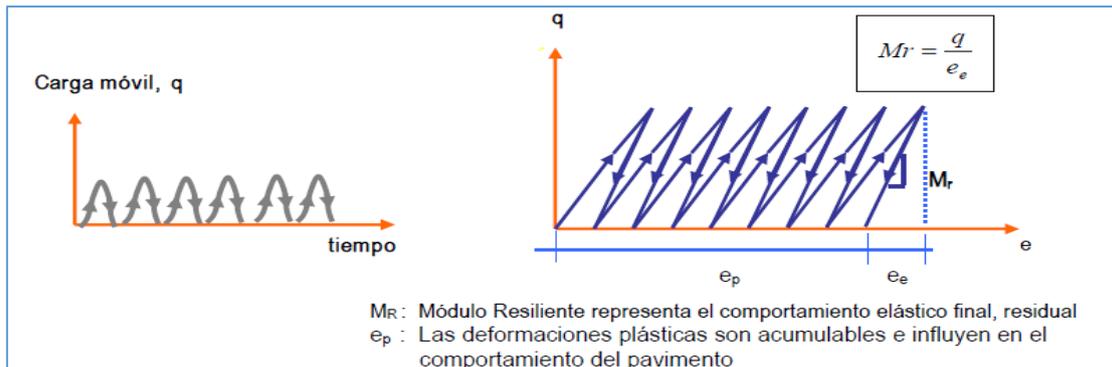


FIGURA 17. Comportamiento y deformaciones ante repeticiones de carga.

Nota: Tomado de “Diseño Modernos de Pavimentos Asfálticos,” por S. Minaya y A. Ordóñez. 2006. 2a ed., Lima.

La nueva Guía de Diseño empírico-mecanístico (AASHTO 2002), recomienda que el módulo elástico de la carpeta asfáltica se evalúe con el Módulo Dinámico complejo (E^*), obtenido de ensayos de compresión triaxial cíclico (ASTM D 4767¹⁹).

2.2.4.1.1. *Correlaciones con otras pruebas para mezclas asfálticas en caliente.*

Se han usado varias pruebas empíricas para determinar las propiedades del material para el diseño del pavimento. La mayoría de estas pruebas miden la resistencia del material y no son una representación real del módulo elástico. Un estudio extenso fue realizado por Van Til et al. (1972) para relacionar el módulo resiliente y otros parámetros de prueba. Estas correlaciones de la FIGURA 18 se pueden utilizar como guía si no se dispone de otra información más confiable. Cabe señalar que cualquier correlación empírica se basa en un conjunto de condiciones locales.

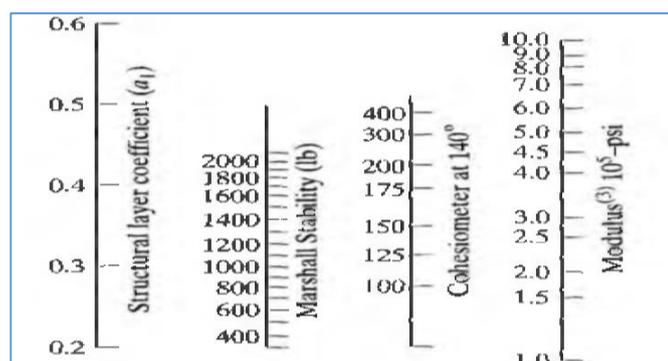


FIGURA 18. Carta de correlación para estimar el Módulo Resiliente de Mezclas asfálticas.

¹⁹ ASTM D 4767: Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils.

2.2.4.2. *Módulo dinámico de mezclas asfálticas (Parámetro Visco – Elástico).*

2.2.4.2.1. *Módulo complejo dinámico E^* .*

La diferencia entre una prueba de Módulo Resiliente y una prueba de Módulo Complejo para mezclas asfálticas es que la primera se utiliza cargas de cualquier forma de onda con un período de descanso dado, mientras que la segunda aplica una carga sinusoidal o de transferencia sin período de descanso.

El módulo complejo es uno de los muchos métodos para describir la relación esfuerzo-deformación de los materiales viscoelásticos. El módulo es una cantidad compleja, de la cual la parte real representa la rigidez elástica y la parte imaginaria caracteriza la amortiguación interna de los materiales. El valor absoluto del módulo complejo se conoce comúnmente como el Módulo Dinámico.

El comportamiento visco-elástico es la respuesta retardada del material, donde la deformación máxima se alcanzará en un instante posterior, cuando la carga que se haya aplicado se encuentre en el instante de la descarga. El módulo dinámico E^* es la relación entre el esfuerzo y la respuesta deformacional.

$$E^* = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \quad (2.25)$$

El Módulo Complejo Dinámico (E^*) es determinado con el ensayo de compresión triaxial cíclico. Sin embargo, se propone la ecuación de predicción de Witzack-National Cooperative Highway Research Program NCHRP – (2004b), el cual considera:

- ❖ El tipo de asfalto (penetración, viscosidad y/o gradación caso de Superpave, asfaltos modificados y envejecidos).
- ❖ La granulometría de la mezcla asfáltica (densa, abierta, incompleta, porosa, etc.)
- ❖ Las variaciones de temperaturas horarias y estacionarias.
- ❖ La velocidad vehicular asociada a la frecuencia de la carga.

A continuación, se presenta la ecuación con la que se estimará los valores del módulo complejo dinámico de las mezclas en la investigación:

$$\begin{aligned} \text{Log}E^* = & 3.750063 + 0.029232 \times p_{200} - 0.001767 \times (p_{200})^2 - 0.002841 \times P_4 - 0.058097 \times V_a - 0.802208 \times \frac{V_{b_{effect}}}{(V_{b_{effect}} + V_a)} + \\ & + \frac{3.871977 - 0.0021p_4 + 0.003958p_{\frac{3}{8}} - 0.000017 \left(p_{\frac{3}{8}}\right)^2 + 0.005470p_{\frac{3}{4}}}{1 + e^{-0.603313 - 0.313351 \times \log(f) - 0.393532 \times \log(\eta)}} \end{aligned} \quad (2.26)$$

Donde:

E*: Módulo dinámico de la mezcla asfáltica, en psi

η : Viscosidad del ligante en 10^6 poise, para una determinada temperatura y grado de envejecimiento.

f: Frecuencia de carga en Hz, relacionada con la velocidad del vehículo.

V_a: % de vacíos de aire en la mezcla, por volumen.

V_{befect}: % de asfalto efectivo, por volumen.

p_{3/4}: % retenido en el tamiz 3/4", por peso total de agregado (acumulado).

p_{3/8}: % retenido en el tamiz 3/8", por peso total de agregado (acumulado).

p₄: % retenido en el tamiz N°4, por peso total de agregado (acumulado).

p₂₀₀: % que pasa el tamiz N°200, por peso total de agregado.

La ecuación considera un rango de temperaturas de 0 a 130°F (-18 a 54°C). La Guía recomienda definir la frecuencia en función de la categoría y velocidad vehicular, como se muestra en la **Tabla 15**.

Tabla 15. Recomendaciones de velocidades y frecuencias

Categoría	Velocidad KPH	Superficie de rodadura (espesor= 1-3")	Frecuencia Recomendada (Hz)
1era	95	45-95	70
2da	70	35-70	50
Vías urbanas	25	10-25	15
Intersecciones viales	0.8	0.5-1	.-

Nota: Tomado de "Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide (MEPDG)," por AASHTO. 2008. Interim ed., USA.

La viscosidad del asfalto a **25°C** puede calcularse conociendo la penetración del asfalto, el modelo desarrollado por Mirza y otros (AAPT 1995) de la Universidad de Maryland es:

$$\log \eta = 10.5012 - 2.2601 \log(\mathit{Pen}) + 0.00389 \log(\mathit{Pen})^2 \quad (2.27)$$

El valor de la viscosidad η se expresa en poises. Esta ecuación es aplicable para penetraciones que oscilan en un rango de 3 a 300 dmm. Sin embargo, cuando no se tenga como dato exacto la penetración del asfalto, su viscosidad puede calcularse con la ecuación propuesta por la Guía de Diseño Empírica-Mecanístico AASHTO 2002:

$$\log \log \eta = A + VTS \log T_R \quad (2.28)$$

Donde la viscosidad η se expresa en centipoises (cP), T_R es la temperatura en Rankine; y los parámetros de regresión A y VTS están en función de la gradación del ligante.

En el nivel de entrada jerárquica 1 (del MEPDG-AASHTO 2015), los parámetros A y VTS se pueden estimar a partir de los datos de prueba del reómetro de cizallamiento dinámico realizados de acuerdo con la norma AASHTO T315, "Determinación de la reología del aglutinante de asfalto utilizando un reómetro de corte dinámico (DSR)".

Alternativamente los parámetros A y VTS se pueden obtener mediante regresión lineal de la ecuación 2.28, después de la transformación a log-log de los datos de viscosidad y la transformación logarítmica de los datos de temperatura. A partir de una serie de pruebas convencionales, que incluyen viscosidad, punto de ablandamiento y penetraciones a distintas temperaturas. La serie de estas pruebas se resumen en la **Tabla 16**.

Tabla 16. Serie de pruebas convencionales para relación A y VTS

Ensayo	Temp. °C	Conversión a Viscosidad, Poise
Penetración	15	Ver ecuación 2.27
Penetración	25	Ver ecuación 2.27
Viscosidad Brookfield	-	Ninguna
Punto de ablandamiento	Medida	13,000 poise
Viscosidad absoluta	60	Ninguna
Viscosidad cinemática	135	Valor x 0.948

A. Efecto del envejecimiento del asfalto

El efecto del envejecimiento se incorpora a la determinación del módulo dinámico utilizando el **Sistema Global de Envejecimiento** (MEPDG-AASHTO 2004). Este sistema proporciona modelos que describen el cambio en la viscosidad que ocurre durante la mezcla y la compactación, así como el envejecimiento in situ a largo plazo. Para poder tomar en cuenta el **envejecimiento a corto plazo** (producido durante la mezcla y compactación) se cuantifica la razón de endurecimiento (HR) y se considera la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} \log \log (\eta_{t=0}) &= a_0 + a_1 \log \log (\eta_{orig}) \\ a_0 &= 0.054405 + 0.004082 \times code \\ a_1 &= 0.972035 + 0.010886 \times code \end{aligned} \quad (2.29)$$

Dónde:

$\eta_{t=0}$ = viscosidad luego del mezclado/colocación, cP.

η_{orig} = viscosidad original, cP.

Código = Coeficiente de endurecimiento (0 para el promedio).

El valor del código está relacionado con la relación de endurecimiento, definida como la relación entre $\log \log [\eta_{t=0} (RTFOT)]$ y $\log \log (\eta_{orig})$. La **Tabla 17** resume los valores de código recomendados por la MEPDG-AASHTO 2004.

Tabla 17. Valores de código recomendados

Resistencia al endurecimiento mezclado/colocación	Valores esperados de razón de endurecimiento	Valor de código
Excelente a bueno	$HR \leq 1,030$	-1
Promedio	$1,030 < HR \leq 1,075$	0
Regular	$1,075 < HR \leq 1,100$	1
Pobre	$HR > 1,100$	2

Los parámetros de regresión recomendados por el (MEPDG-AASHTO 2004) se presentan en la **Tabla 18**:

Tabla 18. *Parámetros A y VTS (RTFOT) recomendados*

PEN	A	VTS
40-50	10.5254	-3.5047
60-70	10.6508	-3.5537
85-100	10.8232	-3.6210
120-150	11.0897	-3.7252
200-300	11.8107	-4.0068

Nota: Tomado de la “Guía para el Diseño Mecánica- Empírica de estructuras de pavimento nuevas y rehabilitadas”. 2004.

La Guía AASHTO 2016 indica que se debe ser cuidadoso al usar la ecuación a bajas temperaturas, pues la viscosidad del ligante asfáltico se aproxima a 2.7×10^{10} Poise, por lo tanto, la viscosidad a bajas temperaturas es igual al menor valor entre el calculado por la ecuación y 2.7×10^{10} Poise.

2.2.4.2.2. *Módulo de rigidez dinámica (Dynamic Stiffness Modulus-S).*

En el ensayo de fatiga de especímenes de vigas de asfalto se debe determinar el módulo elástico en la etapa inicial, de modo que se pueda calcular la deformación inicial.

El módulo elástico basado en la deformación resiliente de la viga en la repetición 200, se llama el módulo de rigidez dinámica.

Debido al uso de cargas sinusoidales, el módulo de rigidez obtenido de nomogramas de Shell, descrito en la Sección ábacos y fórmulas, es en realidad el módulo dinámico. La prueba también puede usarse para determinar el ángulo de fase. A partir del módulo de rigidez y el ángulo de fase, se puede obtener el módulo complejo.

2.2.4.2.3. *Fórmulas y Ábacos.*

Es altamente deseable que el módulo sea predecible mediante nomogramas o fórmulas basadas en la propiedad del asfalto y la concentración de volumen del agregado. Si los datos de prueba reales no están disponibles, los nomogramas de Shell (Bonnaure et al., 1977) o las fórmulas de Asphalt Institute (AI, 1982) se pueden usar para determinar el módulo sin realizar las pruebas de módulo. Los valores típicos del módulo dinámico a diferentes temperaturas y frecuencias también se presentan.

A. Fórmulas y Ábacos de Shell – Módulo de Rigidez.

El término "módulo de rigidez" es utilizado por Shell en lugar del módulo dinámico. Se utilizan dos nomogramas en el que se usan unidades en el sistema internacional:

El primer nomograma se aplica para determinar el módulo de rigidez del cemento asfáltico en función de la temperatura, el tiempo de carga y las características del cemento asfáltico presente en la mezcla.

Las características del cemento asfáltico son expresadas como un índice de penetración, IP, definida como:

$$IP = \frac{20 - 500 A}{1 + 50 A} \quad (2.30)$$

Donde A es la susceptibilidad térmica, que es la pendiente de la gráfica de línea recta entre el logaritmo de penetración (abreviado como PEN) y temperatura.

$$A = \frac{\log(PEN \text{ a } T_1) - \log(PEN \text{ a } T_2)}{T_1 - T_2} \quad (2.31)$$

Donde el valor de T_1 y T_2 son dos temperaturas a las que se miden las penetraciones. Cuando se conoce la penetración del cemento asfáltico recuperado a dos temperaturas diferentes, el índice de penetración puede determinarse mediante las ecuaciones descritas anteriormente.

Una temperatura T_2 conveniente de usar es la temperatura en el anillo y punto de ablandamiento de la bola según lo especificado por AASHTO (1989) en "T53-84 Punto de ablandamiento del asfalto (betún) y alquitrán en etilenglicol (anillo y bola)". Esta es una temperatura de referencia a la cual todos los cementos asfálticos tienen la misma viscosidad o penetración de aproximadamente 800 dmm. Reemplazando en la ecuación el T_2 por $T_{\text{Ablandamiento}}$ y PEN a T_2 por 800.

$$A = \frac{\log(PEN \text{ a } T_1) - \log(800)}{T_1 - T_{\text{Ablandamiento}}} \quad (2.32)$$

Las ecuaciones para A e IP utilizan unidades en el sistema Internacional.

La **FIGURA 19** muestra el nomograma para determinar el módulo de rigidez de los cementos asfálticos (Van der Poel, 1954). Los tres factores a considerar son el tiempo de carga, la temperatura y el índice de penetración. La temperatura que se utilizará es la temperatura normalizada, que es la diferencia entre la prueba de temperatura (Temperatura a la que se desea

determinar el módulo de rigidez del cemento asfáltico) y la temperatura cuando la penetración es 800 décimas de milímetro, o $A_{\text{blandamiento}}$.

El módulo de rigidez del cemento asfáltico S_b puede determinarse mediante una prueba de fluencia con un tiempo de carga t o una prueba dinámica bajo una carga sinusoidal con una frecuencia f . Van Der Poel (1954) descubrió que el mismo módulo de rigidez se obtiene cuando t está relacionado con f por:

$$t = \frac{1}{2\pi f} \quad (2.33)$$

Shell (1978) sugirió que un tiempo de carga de 0.02 s, que corresponde a una frecuencia de 8 Hz de acuerdo con la ecuación de t relacionada con la frecuencia f , es representativo del rango de tiempos de carga que ocurren en la práctica y equivale a una velocidad del vehículo de 30 a 40 mph (48 a 64 Km/h).

Por otra parte, de acuerdo con Ullidtz y Peattie (1980) y con Ullidtz (1987), el módulo de rigidez del asfalto (S_b), en MPa, puede determinarse a través de la siguiente ecuación:

$$S_b = 1.157 \times 10^{-7} \times t^{-0.368} (T_{R\&B} - T_{mix})^5 \times \exp(-IPen) \quad (2.34)$$

$$t = \frac{L}{V} \times 10^{0.004h} ; F = \frac{1}{2\pi t_c}$$

Donde:

t : Es el tiempo de aplicación de la carga en segundos.

$IPen$: Es el índice de penetración del asfalto.

$T_{R\&B}$: Es la temperatura del punto de ablandamiento (anillo y bola) del asfalto en °C.

T_{mix} : Es la temperatura de la mezcla en °C (T_{mix} oscila entre 14 y 16 °C, 21 y 24 °C, 28 y 31 °C, 33 a 37 °C y 39 y 45 °C cuando la temperatura media anual promedio ambiente de la zona es de 10 °C, 15 °C, 20 °C, 25 °C y 30 °C respectivamente y la capa asfáltica presenta espesores entre 40 y 5 cm). Esta ecuación puede ser utilizada dentro de los siguientes rangos: $0.01 \text{ s} < t < 0.1 \text{ s}$; $-1 < IP < 1$ y $10 \text{ °C} < T_{R\&B} - T_{mix} < 70 \text{ °C}$.

L : Es la longitud de contacto de la llanta con el pavimento (generalmente es de 30 cm).

V : es la velocidad del vehículo en cm/s.

h : Es la profundidad en cm a la cual se estima el t , y F es la frecuencia de carga en Hz (Lin, 1989, 1989a).

El segundo nomograma se aplica para determinar el módulo de rigidez de la mezcla bituminosa S_m en función del módulo de rigidez del cemento asfáltico S_b , el porcentaje de volumen del cemento asfáltico y el porcentaje de volumen del agregado mineral.

La **FIGURA 20** muestra el nomograma para determinar el módulo de rigidez de las mezclas bituminosas (Bonnaure et al., 1977). Bonnaure et al. también desarrollaron las siguientes ecuaciones para predecir el módulo de rigidez de la mezcla S_m , basado en V_g , V_b , y el módulo de rigidez del betún S_b :

$$\beta_1 = 10.82 - \frac{1.342(100 - V_g)}{V_g + V_b} \quad (2.35)$$

$$\beta_2 = 8.0 + 0.00568 V_g + 0.0002135 V_g^2 \quad (2.36)$$

$$\beta_3 = 0.6 \log \left(\frac{1.37 V_b^2 - 1}{1.33 V_b - 1} \right) \quad (2.37)$$

$$\beta_4 = 0.7582(\beta_1 - \beta_2) \quad (2.38)$$

Donde:

V_g : Porcentaje de volumen de agregado.

$$V_g = \frac{100 \times (1 - P_b) \times G_{mb}}{G_{sb}} \quad (2.39)$$

V_b : Porcentaje de volumen de cemento asfáltico (betún) para el peso total de la mezcla asfáltica.

$$V_b = \frac{100 \times P_b \times G_{mb}}{G_b} \quad (2.40)$$

G_b : Gravedad específica aparente del cemento asfáltico.

G_{sb} : Gravedad específica Bulk de la combinación de agregados.

G_{mb} : Gravedad específica Bulk de la mezcla asfáltica compactada.

P_b : Porcentaje de asfalto para el peso total de la mezcla asfáltica.

Para: $5 \times 10^6 \frac{N}{m^2} < S_b < 10^9 \frac{N}{m^2}$,

$$\log S_m = \frac{\beta_4 + \beta_3}{2} (\log S_b - 8) + \frac{\beta_4 - \beta_3}{2} |\log S_b - 8| + \beta_2 \quad (2.41)$$

Para $10^9 \frac{N}{m^2} < S_b < 3 \times 10^9 \frac{N}{m^2}$,

$$\log S_m = \beta_2 + \beta_4 + 2.0959 (\beta_1 - \beta_2 - \beta_4)(\log S_b - 9) \quad (2.42)$$

Las ecuaciones se basan en unidades del Sistema Internacional y el S_b en N / m². Según Shell International Petroleum (1978), la precisión del nomograma, comprobado mediante mediciones extensas en una gran cantidad de diferentes mezclas de asfalto, es un factor de 1.5 a 2, que es suficiente para un diseño práctico. Por lo tanto, el uso de las ecuaciones para estimar el módulo en un método computarizado de diseño debe considerarse aceptable.

A. Módulo de rigidez (S_m) según estabilidad y flujo (Nijboer, Dormon Y Jarman) para una Temperatura de 60°C.

De estudios comparativos respecto a la estabilidad/ flujo y módulo de Rigidez (S_m) de mezclas asfálticas, se observó que las características mecánicas de la mezcla obtenidas del ensayo de estabilidad y flujo Marshall, dan una medida del módulo de rigidez. Este Modulo corresponde pura y exclusivamente a las condiciones de temperatura (t) y tiempo de aplicación de las cargas (t) normalizadas para el método Marshall.

Nijboer, Dormon y Jarman, consideraron aplicable la siguiente relación:

$$\diamond S_m, \text{ para } 60^\circ\text{C (T) y } t = \frac{60}{5} F \text{ (cm)}$$

$$S_m = 40 \times \frac{E(\text{lb})}{F(0.01 \text{ pulg})} \rightarrow [S_m] = \frac{\text{lb}}{\text{pulg}^2} \quad (2.43)$$

$$\diamond S_m, \text{ para } 60^\circ\text{C (T) y } t = \frac{6}{200} F \text{ (0.01 pulg)}$$

$$S_m = 0.16 \times \frac{E(\text{kg})}{F(\text{cm})} \rightarrow [S_m] = \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \quad (2.44)$$

Siendo la velocidad del ensayo de 50 mm/min se aclara el valor adoptado para (t). Estas relaciones son establecidas por Nijboer, Dormon y Jarman, que representan el Stiffness (Modulo de rigidez) de las mezclas asfálticas en las condiciones de ensayo Marshall (T = 60°C y velocidad del ensayo 200 (0,01 pulg) en 60 segundos o 50mm/60segundos).

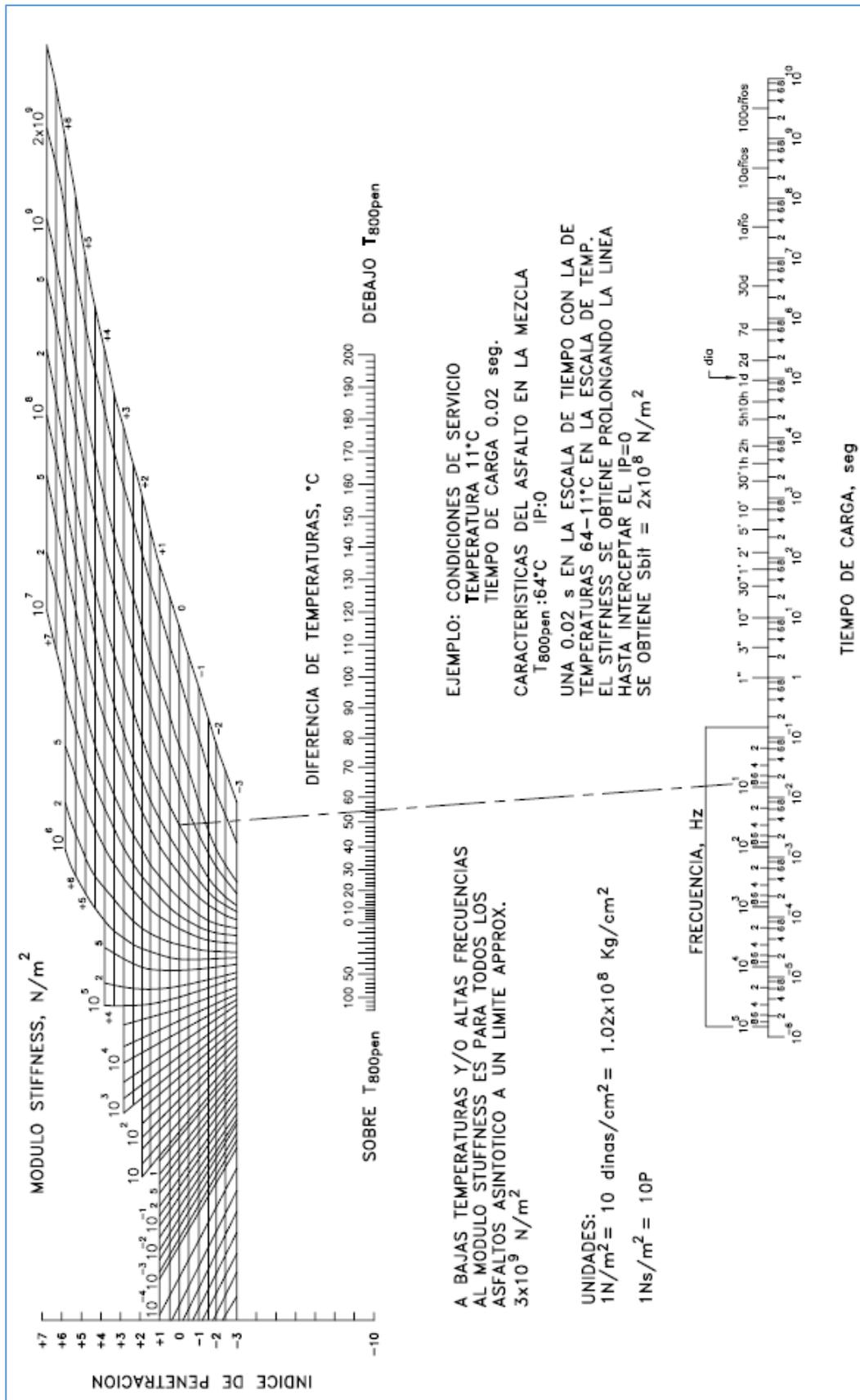


FIGURA 19. Nomograma de Van der Poel para Determinar el Módulo de Rigidez del cemento asfáltico S_b.

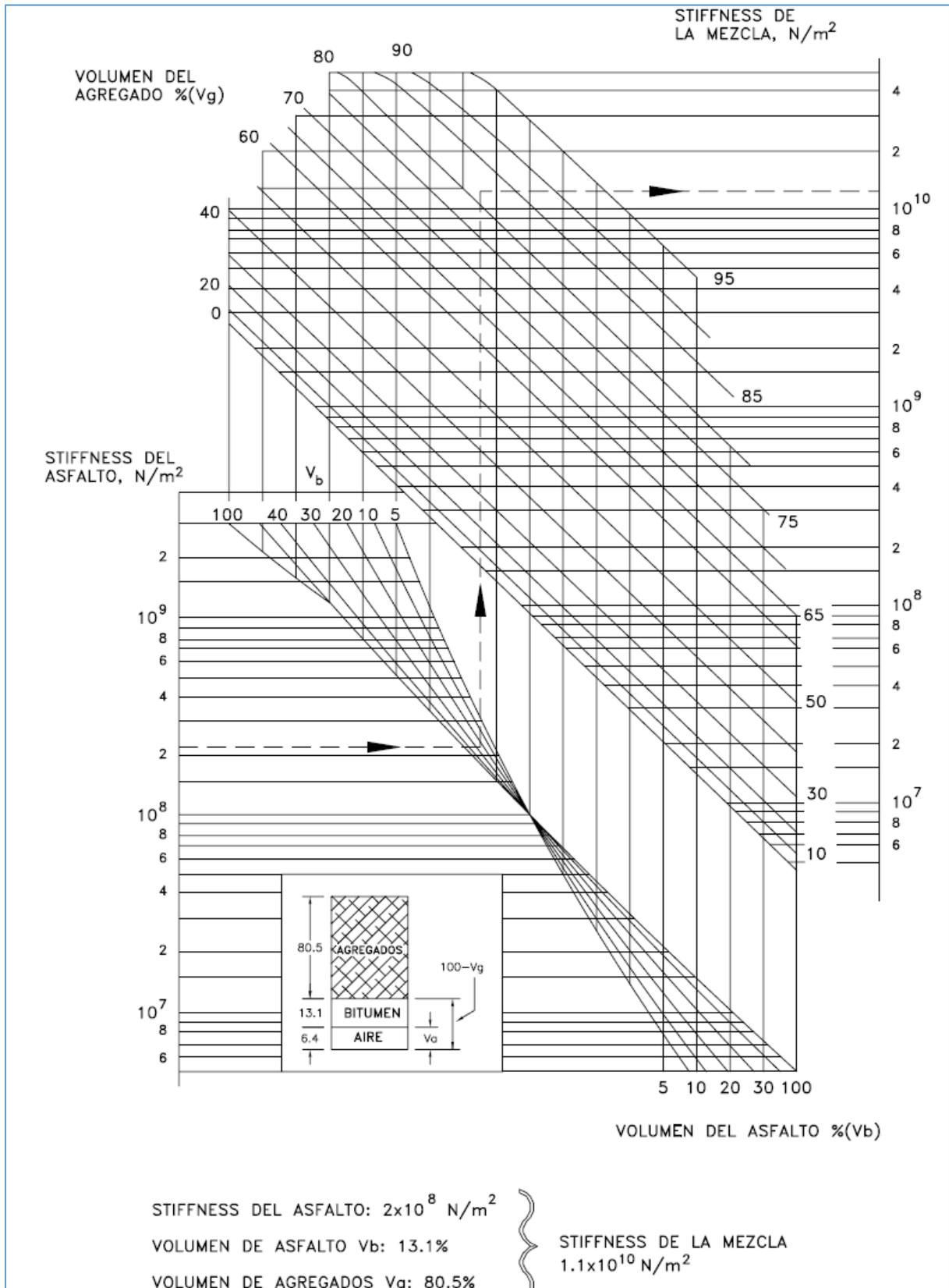


FIGURA 20. Nomograma para el cálculo de Modulo de rigidez de las mezclas asfálticas (Shell, 1978).

2.2.4.3. Características de fatiga y fórmulas de predicción.

La fatiga de las mezclas asfálticas bajo flexiones repetidas es un factor importante en el diseño del pavimento.

Se han desarrollado una variedad de métodos para la prueba de fatiga, la mayoría de los métodos emplean la flexión de vigas, aunque también se ha utilizado la flexión de placas (Jiménez y Gallaway, 1962; Jiménez, 1972).

En las pruebas de flexión de vigas, se ha utilizado una viga simple con carga en el tercer punto (Deacon, 1965) o en el punto central (Franchen y Verstraeten, 1974) o una viga en voladizo con flexión giratoria (Pell, 1962). La ventaja de la carga en el tercer punto respecto a la carga en el punto central es la existencia de un momento de flexión constante sobre el tercio medio de la muestra, por lo que cualquier punto débil debido a propiedades no uniformes del material aparecerá en los resultados de la prueba. Bajo la misma deformación inicial, las pruebas de fatiga en laboratorio muestran que el número de repeticiones hasta alcanzar la falla disminuyen con el aumento del módulo de rigidez.

En vista del hecho de que las pruebas de fatiga son costosas y requieren una gran cantidad de especímenes, también se presentan nomogramas y ecuaciones para predecir la resistencia (vida) a la fatiga.

2.2.4.3.1. Ecuaciones y nomogramas.

La prueba de fatiga es una prueba destructiva y requiere mucho más tiempo que la prueba de módulo resiliente no destructivo. Para determinar la resistencia a la fatiga, se necesitan más de dos docenas de especímenes que deben ser ensayados. Por esto existe la necesidad de estimar las propiedades de fatiga mediante simples nomogramas y ecuaciones sin realizar realmente las pruebas de fatiga, pero sin desmerecer su importancia.

Para determinar la resistencia o vida a la fatiga se pueden aplicar dos tipos de carga controlada:

- ❖ Esfuerzo constante, donde el esfuerzo permanece constante y la deformación aumenta con el número de repeticiones. Este tipo de carga es aplicable a pavimentos más gruesos, donde la carpeta asfáltica tiene más de 6 pulgadas (152 mm) de espesor y es el componente principal que soporta la carga. A medida que la carpeta se debilita bajo cargas repetidas, la deformación debe aumentar con el número de repeticiones.

- ❖ Deformación constante, donde la deformación permanece constante y la carga o esfuerzo disminuye con el número de repeticiones. Este tipo de carga es aplicable a pavimentos delgados, donde la carpeta asfáltica tiene menos de 2 pulgadas (51 mm) de espesor porque la deformación en la carpeta asfáltica se rige por las capas subyacentes y no se ve afectada por la disminución de la rigidez de la mezcla asfáltica.

Para espesores intermedios, existe una combinación de esfuerzo constante y deformación constante.

Como se puede ver en la **FIGURA 21**, tanto el esfuerzo como la deformación son mayores en la prueba de esfuerzo constante, por lo que el uso del esfuerzo constante es más conservador. El uso del esfuerzo constante tiene la ventaja adicional de que la falla ocurre más rápidamente y puede definirse más fácilmente, mientras que un criterio de falla arbitrario, como un esfuerzo igual al 50% del esfuerzo inicial, es frecuentemente usado por la prueba de deformación constante.

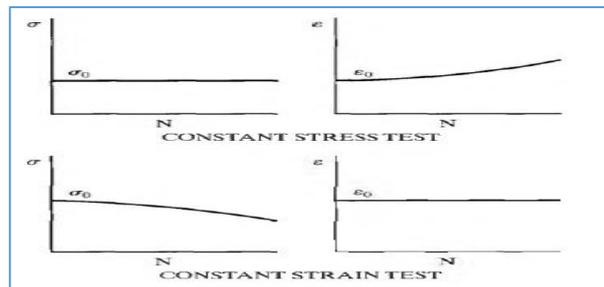


FIGURA 21. Tipos de cargas controladas para la prueba de fatiga.

Nota: Tomado de “Pavement Analysis and Design,” por Y. Huang. 2004. 2a ed., USA.

A. Fórmulas y Ábaco de Shell – Fatiga.

Con base en 146 líneas de fatiga que cubren una amplia gama de mezclas, cementos asfálticos y condiciones de prueba, Shell (Bonnaure et al., 1980) desarrolló ecuaciones separadas para pruebas de esfuerzo constante y deformación constante.

Para pruebas de esfuerzo constante,

$$\epsilon_t = [36.43 IP - 1.82 IP(V_b) + 9.71V_b - 24.04] \times 10^{-6} \left(\frac{S_m}{5 \times 10^9} \right)^{-0.28} \left(\frac{N_f}{10^6} \right)^{-0.2} \quad (2.45)$$

En el que ϵ_t es la deformación de tracción, IP es el índice de penetración definido en fórmulas y ábacos de Shell – Módulo de Rigidez, V_b es el porcentaje de volumen de cemento

asfáltico en la mezcla, S_m es el módulo de rigidez de la mezcla en N / m² (determinado en la **FIGURA 20**), y N_f es el número de repeticiones hasta la falla.

Para pruebas de deformación constante,

$$\epsilon_t = [36.43 IP - 1.82 IP(V_b) + 9.71V_b - 24.04] \times 10^{-6} \left(\frac{S_m}{5 \times 10^{10}}\right)^{-0.36} \left(\frac{N_f}{10^6}\right)^{-0.2} \quad (2.46)$$

Las soluciones de las ecuaciones anteriores se pueden presentar en un nomograma, como se muestra en la **FIGURA 22**. La precisión de las ecuaciones para las pruebas de esfuerzo constante se informó dentro de $\pm 40\%$ para el 90% de los resultados y para las pruebas de deformación constante dentro de $\pm 50\%$.

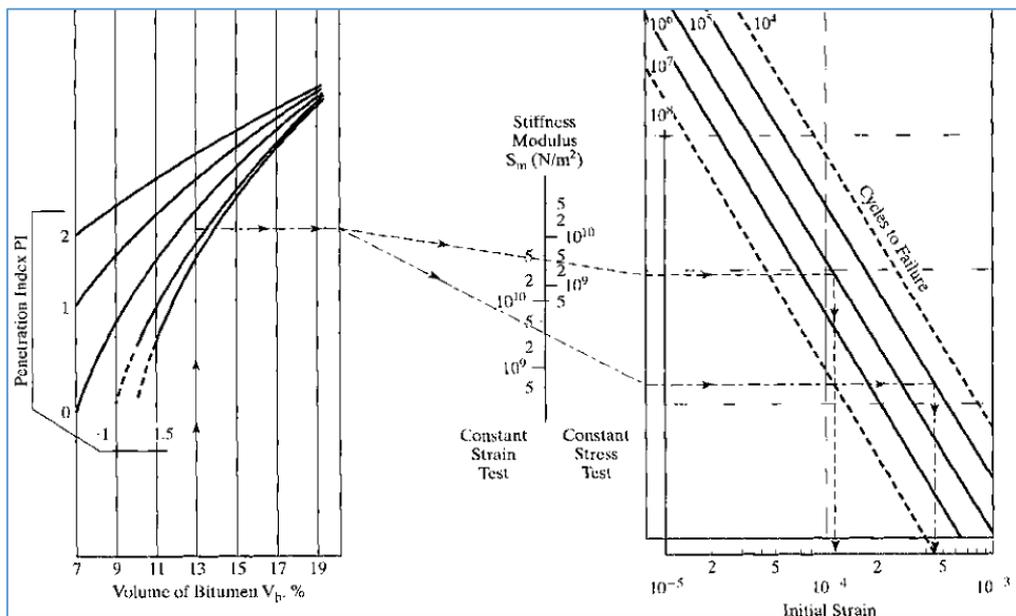


FIGURA 22. Nomograma para predecir la vida a la fatiga de HMA (Bonnaure, 1980).

B. Fórmulas del Instituto del Asfalto – Fatiga.

Las ecuaciones de fatiga del laboratorio, desarrolladas por el Asphalt Institute (AI, 1982) se basan en el criterio del esfuerzo constante y se pueden expresar como:

$$N_f = 0.00432 \epsilon_t^{-3.291} |E^*|^{-0.854} \quad (2.47)$$

Después de multiplicar por un factor de 18.4 para tener en cuenta las diferencias entre las condiciones de laboratorio y de campo, el criterio de falla por fatiga se convierte en:

$$N_f = 0.0796 \epsilon_t^{-3.291} |E^*|^{-0.854} \quad (2.48)$$

Posteriormente se sugirió que f_1 (constante 0.0796) en el criterio del Instituto del Asfalto se reduzca a 0.0636 para las capas de HMA (mezcla asfáltica en caliente) menos de 4 pulg. de espesor; quedando la expresión de la siguiente manera:

$$N_f = 0.0636 \epsilon_t^{-3.291} |E^*|^{-0.854} \quad (2.49)$$

En el que $|E^*|$ es el módulo dinámico en psi, que es equivalente al módulo elástico de la capa de asfalto en un sistema de capas o el módulo de rigidez en el método de Shell y ϵ_t es la deformación de tracción en strain (in. /in.).

2.2.5. Patología en Pavimentos Flexibles.

A lo largo de su vida útil, el pavimento flexible está sometido a múltiples solicitaciones que le hacen entrar en carga; la procedencia de estas acciones no se restringe únicamente a las generadas por el paso del tráfico, sino que también obedecen a variaciones térmicas, fenómenos de infiltración y erosión selectiva, e incluso procesos de tipo sísmico.

Este grupo de incidencias hace inevitable la fatiga y el deterioro del pavimento flexible, ocasionada por el detrimento de las propiedades resistentes de los materiales que conforman sus capas ante los continuos ciclos de carga y descarga que se ven sometidos. Otras veces, las deficiencias constructivas o de diseño son las que ponen en evidencia la incapacidad prematura de un pavimento flexible, acortando su periodo de vida y/o servicio

La consecuencia inmediata y tangible de este detrimento, es la aparición de diversos síntomas que advierten el mal funcionamiento de algún componente de la infraestructura.

Los principales deterioros que pueden producirse en el pavimento flexible son:

2.2.5.1. *Agrietamiento por fatiga o Piel de cocodrilo.*

Es una serie de grietas interconectadas, que son causadas por la falla a la fatiga de una superficie de asfalto o una base estabilizada bajo carga de tráfico repetido. El fisuramiento se inicia en la parte inferior de la carpeta asfáltica o base estabilizada, donde el esfuerzo y deformación por tracción es más alta bajo una carga de rueda como se muestra en la **FIGURA 23**. Estos esfuerzos de tracción pueden exceder la resistencia a la tracción de las

mezclas asfálticas, lo que da como resultado una grieta en la parte inferior de la carpeta asfáltica.

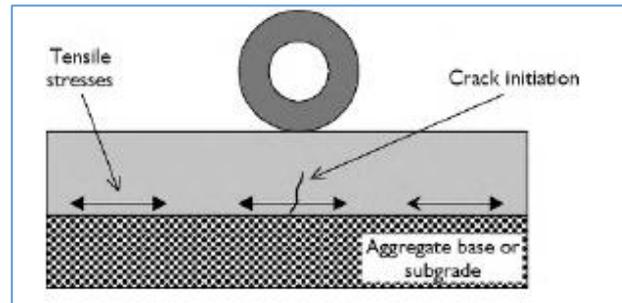


FIGURA 23. Proceso de iniciación del agrietamiento por fatiga.

Nota: Tomado de "Pavement Analysis and Design," por Y. Huang. 2004. 2a ed., USA.

Las grietas se propagan a la superficie inicialmente como una o más grietas longitudinales paralelas. Después de una carga de tráfico repetida, las grietas se conectan y forman piezas multidimensionales con ángulos agudos que desarrollan un patrón parecido a la piel de un cocodrilo, como se muestra en la **FIGURA 24**. Las piezas son por lo general menos de 1 pie (30.48 cm) en el lado más largo.

El agrietamiento por fatiga ocurre solo en áreas que están sujetas a cargas de tráfico repetidas. No ocurriría en un área completa a menos que toda el área estuviera sujeta a la carga de tráfico. El agrietamiento por fatiga no ocurre en las carpetas asfálticas que se encuentran sobre las losas de concreto. El agrietamiento por fatiga también se da cuando se tiene una inadecuada base o poco soporte de la subrasante, en este caso las grietas tendrán una apariencia más aleatoria en todo el pavimento que recibe la carga. La falta de drenaje puede hacer que la subrasante se "lave" o se desintegre, provocando una deflexión excesiva de la estructura del pavimento, lo que provoca el agrietamiento de piel de cocodrilo. De todas las fallas, el agrietamiento por fatiga es la falla más común en los pavimentos de asfalto de los estacionamientos. La dificultad para proporcionar un drenaje adecuado a lo largo de grandes espacios de pavimento en los estacionamientos es la causa típica de la saturación de la subrasante y la base y sus fallas correspondientes.

El agrietamiento por fatiga es un síntoma de insuficiente resistencia estructural en el pavimento, subrasante débil o sobrecarga del pavimento. La insuficiente resistencia estructural es debido a que el espesor no es el adecuado para la carga que se transporta o se tiene una deficiencia en la mezcla asfáltica.

El soporte inestable de la base o la subrasante se debe a que están saturados con agua o están contruidos con materiales de mala calidad como arcilla, agregados de mala calidad, etc. Si se produce el agrietamiento de piel de cocodrilo en áreas que normalmente no hay tráfico o la carga del vehículo no es importante, la causa es una falla en la base o en la subrasante, por lo general, provocado por un drenaje inadecuado. El agrietamiento de tipo patrón, que se produce en un área completa que no está sujeta a carga, se clasifica como agrietamiento por bloques, que no es una falla asociada con la carga. El agrietamiento por fatiga se considera una falla estructural importante y se mide en pies cuadrados o metros cuadrados de superficie.

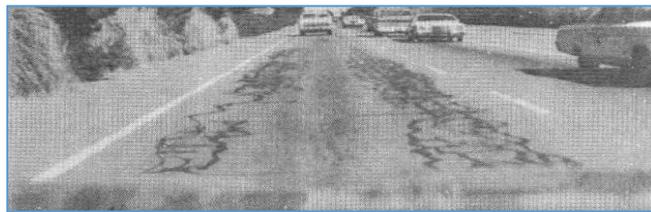


FIGURA 24. Fisuramiento por fatiga, en áreas sujetas a tráfico.

Nota: Tomado de “Pavement Analysis and Design,” por Y. Huang. 2004. 2a ed., USA.

2.2.5.2. Agrietamiento en bloques.

Las grietas dividen la superficie del asfalto en piezas aproximadamente rectangulares, como se muestra en la **FIGURA 25**. Los bloques varían en tamaño desde aproximadamente 1 a 100 pies² (0.1 a 9.3 m²). El agrietamiento en bloques más grande generalmente se clasifica como agrietamiento longitudinal o transversal. El agrietamiento en bloque se produce principalmente por la contracción del asfalto caliente y el ciclo de temperatura diaria, que producen esfuerzos y deformaciones cíclicos. No está asociado a la carga, aunque las cargas pueden aumentar la gravedad de las grietas. La aparición de grietas en bloque generalmente indica que el asfalto se ha endurecido significativamente. Normalmente, el agrietamiento en bloque ocurre en una gran parte del área del pavimento, pero a veces ocurrirá solo en áreas donde no hay tráfico. El agrietamiento en bloques se mide en pies cuadrados o metros cuadrados de superficie.

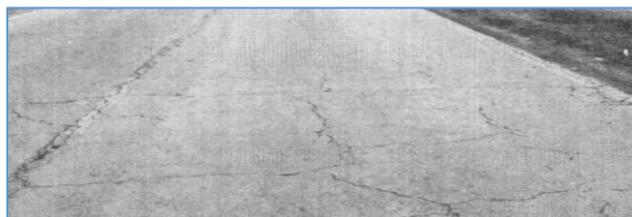


FIGURA 25. Agrietamiento en bloques.

Nota: Tomado de “Pavement Analysis and Design,” por Y. Huang. 2004. 2a ed., USA.

2.2.5.3. *Agrietamiento por reflexión en juntas de losas de concreto*

Esta falla solo ocurre en pavimentos que tienen una superficie de asfalto sobre una losa de concreto articulado. Las grietas ocurren tanto en las juntas transversales como en las juntas longitudinales donde el antiguo pavimento de concreto se ha ensanchado antes de la superposición, como se puede ver en la **FIGURA 26**. Esta falla no incluye el agrietamiento por reflexión lejos de las juntas o de cualquier otro tipo de bases estabilizadas, que se identifica como agrietamiento longitudinal o transversal.

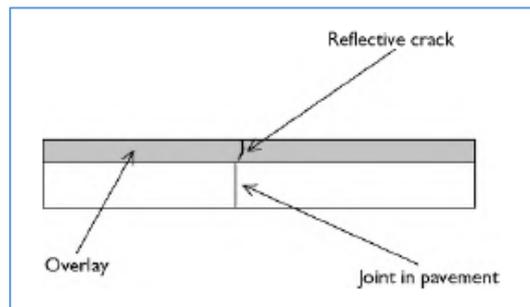


FIGURA 26. Diagrama de proceso de agrietamiento por reflexión.

Nota: Tomado de “Asphalt Pavements,” por P. Laving. 2003. 1a ed., New York.

Este agrietamiento es causado principalmente por el movimiento de la losa de concreto debajo de la superficie de la carpeta asfáltica, debido a cambios térmicos o de humedad y generalmente cuando no se inicia la carga de tráfico. Sin embargo, la carga de tráfico puede causar un colapso de la mezcla asfáltica en caliente cerca de la fisura inicial, causando desprendimiento.

El conocimiento de las dimensiones de la losa debajo de la superficie del asfalto ayudará a identificar estas grietas. El agrietamiento por reflexión conjunta se mide en pies lineales o metros lineales. El agrietamiento por reflexión conjunta se muestra en la **FIGURA 27**.



FIGURA 27. Agrietamiento por reflexión en juntas de losas de concreto.

2.2.5.4. Desnivel entre Carril/Berma.

Esta falla ocurre cuando hay una diferencia de elevación entre el carril de tráfico y berma, como se ve en la **FIGURA 28**. Típicamente, la berma externa se asienta en respuesta a la consolidación, asentamiento o bombeo del material granular o de subrasante subyacente. El levantamiento de la berma puede ser causado por la acción de las heladas o la hinchazón de los suelos.

La caída del material granular o suelo que se encuentra debajo de la berma generalmente es causada por soplar el material de la berma al pasar los camiones. La caída / elevación del carril / berma se mide cada 100 pies (30 m) en pulgadas (o mm) a lo largo del borde del pavimento. La diferencia de medidas en la elevación se calcula y se usa para determinar el nivel de gravedad.



FIGURA 28. Desnivel entre carril/berma.

Nota: Tomado de "Pavement Analysis and Design," por Y. Huang. 2004. 2a ed., USA.

2.2.5.5. Agrietamiento longitudinal y transversal.

Las grietas longitudinales son paralelas a la línea central del pavimento y las grietas transversales se extienden a través de la línea central, como se muestra en la **FIGURA 29**.

Pueden ser causados por una contracción de la carpeta asfáltica debido a las bajas temperaturas o al endurecimiento del asfalto o pueden ser el resultado de grietas reflectivas causadas por grietas debajo de la carpeta asfáltica, incluyendo grietas en las losas de concreto, pero no en las juntas. Las grietas longitudinales también pueden ser causadas por el pavimento mal construido de una junta de carril. Este tipo de grietas no suelen estar asociadas a la carga. Las grietas longitudinales y transversales se miden en pies lineales o metros lineales.

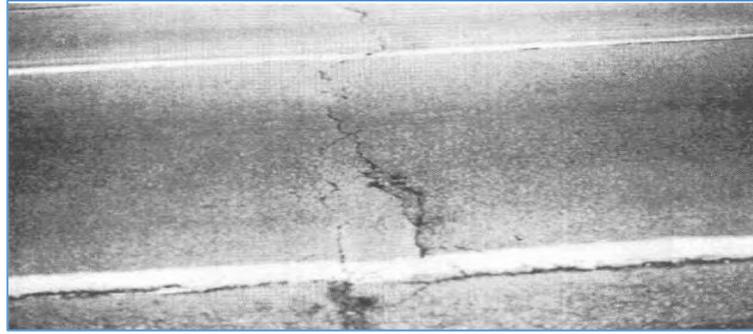


FIGURA 29. Agrietamiento transversal.

Nota: Tomado de “Pavement Analysis and Design,” por Y. Huang, 2004. 2a ed., USA.

2.2.5.6. Bombeo y exudación por agua.

El bombeo es la eyección de agua y materiales finos bajo presión a través de grietas bajo cargas móviles, como se muestra en la **FIGURA 30**. A medida que se expulsa el agua, transporta materiales finos, lo que da como resultado un deterioro progresivo del material y la pérdida de soporte. Las evidencias de bombeo son las manchas superficiales o las acumulaciones de material en la superficie cerca de grietas. La exudación de agua ocurre cuando el agua se filtra lentamente por las grietas en la superficie del pavimento. El bombeo y la exudación de agua se miden contando el número de grietas que existen.

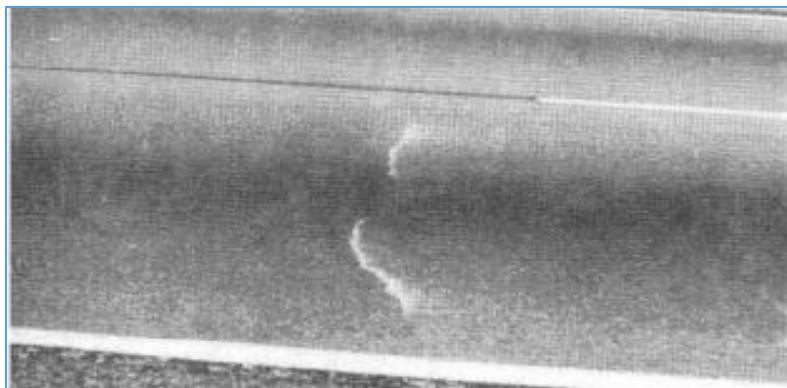


FIGURA 30. Bombeo de base estabilizada bajo un pavimento asfáltico.

2.2.5.7. Roderas o ahuellamientos

Una rodera es una depresión de la superficie en las rutas de las llantas. El levantamiento del pavimento puede ocurrir a lo largo de los lados de la rodera. Sin embargo, en muchos casos, las roderas son notables solo después de una lluvia, cuando las rutas de las ruedas están llenas de agua. Las líneas de ahuellamiento provienen de una deformación permanente en cualquiera de las capas del pavimento o en la subrasante, generalmente causada por una consolidación o movimiento lateral de los materiales debido a las cargas de tráfico. Él ahuellamiento puede ser

causado por el movimiento plástico de la mezcla de asfalto en climas cálidos o por una compactación inadecuada durante la construcción.

El ahuellamiento significativo puede conducir a mayores fallas estructurales y representar un potencial de deslizamiento en agua de los neumáticos (hidroplaning). El ahuellamiento se mide en pies cuadrados o metros cuadrados de área de superficie, para un nivel de severidad basado en la profundidad de la rodera.

2.2.5.8. Exudación.

La exudación es una película de material bituminoso que se encuentra en la superficie del pavimento, que crea una superficie reflectante, brillante, similar al vidrio, que generalmente se vuelve pegajosa. Es causado por un alto contenido de asfalto o un bajo contenido de vacío de aire. El proceso de exudación no se invierte durante los meses fríos, por lo que el asfalto se acumulará en la superficie y disminuirá la resistencia al deslizamiento.

2.2.5.9. Corrugación.

La corrugación es una forma de movimiento plástico tipificado por ondas en la superficie del asfalto. Por lo general, ocurre en paradas de autobús y donde los vehículos aceleran o desaceleran y es el resultado de la acción de cortante en la superficie del pavimento o entre la superficie del pavimento.

2.2.6. Métodos de diseño de mezclas.

La mayoría de las Mezclas Asfálticas en Caliente, entre los años 1940 a 1990, fueron diseñados usando los métodos Marshall o Hveem. En 1995, algunos estados de Norteamérica comienzan a usar el método de diseño Superpave en un número pequeño de proyectos, actualmente se espera que en los próximos años los proyectos del País se realicen con Mezclas Asfálticas en Caliente diseñados con este método. Es importante reconocer que los tres métodos de diseño ayudan en la tecnología del asfalto a elegir un apropiado contenido de asfalto.

2.2.6.1. Método Marshall.

El Método Marshall para el diseño de mezclas fue desarrollado por Bruce Marshall, del Mississippi Highway Department (Asphalt Institute MS-22) alrededor de 1939. El ensayo Marshall, en su forma actual, surgió de una investigación iniciada por The Corps of Engineers Waterways (WES) de los Estados Unidos en 1943.

Este método fue normalizado por la ASTM D-1559, denominado Resistencia al Flujo Plástico de Mezcla Bituminosa usando el equipo Marshall (el método AASHTO T-245 es similar a la Norma ASTM D-1559, excepto en lo referente al martillo operado mecánicamente, en lugar de un martillo operado manualmente).

2.2.6.1.1. *Características de Mezcla*

Al realizar el diseño de mezclas asfálticas en caliente, se deben obtener las siguientes características:

- ❖ Resistencia a la Deformación Permanente.
- ❖ Resistencia a la Fatiga.
- ❖ Resistencia al agrietamiento por bajas temperaturas.
- ❖ Durabilidad.
- ❖ Resistencia a la Humedad.
- ❖ Resistencia al Patinaje.
- ❖ Trabajabilidad.

El Método Marshall tiene como propósito principal determinar el contenido óptimo de asfalto para una combinación específica de agregados. El método también provee información sobre características físicas y mecánicas de la mezcla asfáltica en caliente, y establece densidades y contenidos óptimos de vacío que deben cumplirse durante la construcción del pavimento. El método Marshall que se describe, solo se aplica a mezclas asfálticas para pavimentación que utilizan cemento asfáltico clasificado por viscosidad o penetración, y que contienen agregados con tamaños máximos de 25.0 mm o menos.

El método consiste en ensayar una serie de probetas, cada una preparada con la misma granulometría y con diferentes contenidos de asfalto. El tamaño de las probetas es de 2.5 pulgadas (63.5 mm) de espesor y 4 pulgadas (101.6 mm) de diámetro. Los especímenes se preparan siguiendo un procedimiento específico para calentar el asfalto y los agregados, mezclar y compactar. Los especímenes se rompen en la prensa Marshall mediante la aplicación de una compresión diametral efectuada a través de una mordaza perimetral que sujeta la probeta (la velocidad de aplicación de la carga es constante y de valor 2 pulg/min), determinando su estabilidad (resistencia) y flujo (deformación). Si se desean conocer los porcentajes de vacíos de las mezclas compactadas, se determinarán previamente los pesos específicos (Gravedad específica) de los materiales empleados y de las probetas compactadas, antes del ensayo de rotura.

2.2.6.1.2. *Elaboración, Ensayo de rotura y Análisis de vacíos de las Mezclas Compactadas.*

A. Evaluación de agregados.

A.1. Los agregados deben pasar el control de calidad que se especifica en el proyecto o Manual de Carreteras: Especificaciones técnicas generales para construcción EG-2013 (MTC,2013).

A.2. Por diferentes razones se deben realizar combinaciones de agregados, de manera que cumplan con las especificaciones de gradación mencionadas anteriormente. Además, se deben realizar ensayos de gravedad específica y absorción.

A.3. Medir la Gravedad Específica Bulk del agregado grueso (ASTM C127) y del agregado fino (ASTM C128).

A.4. Calcular la Gravedad Específica Efectiva del Agregado.

A.5. Calcular la Gravedad Específica Bulk de la combinación de agregados en la mezcla.

B. Paso B: Evaluación del cemento asfáltico

B.1. Se Determina el grado apropiado de cemento asfáltico a emplear, según el tipo y ubicación geográfica del proyecto, verificar que las propiedades especificadas sean aceptables.

B.2. Medir la Gravedad Específica del cemento asfáltico (ASTM D70) y del filler mineral (ASTM D854) y grafique la viscosidad versus temperatura (Carta de Viscosidad).

B.3. Determinar la temperatura de mezcla y compactación de la Carta de Viscosidad.

❖ La temperatura a la cual se calentará el cemento asfáltico para la mezcla, se selecciona en el rango de la viscosidad de 170 ± 20 cP.

❖ La temperatura de compactación se encuentra en el rango de la viscosidad de 280 ± 30 Cp.

C. Preparación de los Especímenes Marshall.

Una vez determinadas las características de los componentes de la mezcla se procede a la preparación de series de probetas con diferentes contenidos de asfalto, siempre dentro de unos intervalos (normalmente entre el 3.0 y el 6.0% respecto al peso del agregado); deben prepararse al menos 3 probetas por cada contenido de asfalto. La compactación de la mezcla se realiza con la masa Marshall de características normalizadas, aplicando un número de 75 golpes por cara (para tráfico pesado).

D. Densidad y vacíos de los especímenes.

D.1. Una vez desmoldadas las probetas, y pasado un intervalo de tiempo tal que los especímenes hayan permanecido al aire a temperatura ambiente, por lo menos durante 1 hora, se mide la Gravedad Específica Bulk de la mezcla compactada (ASTM D1188 o ASTM D2726).

D.2. En paralelo o en serie a lo anterior se mide la Gravedad Específica Teórica Máxima de la mezcla suelta (ASTM D2041), también es conocida como RICE.

D.3. Calcular la Gravedad Específica Teórica Máxima de la mezcla para otros contenidos de asfalto.

E. Estabilidad Marshall y Ensayo de Flujo.

Tras mantener las probetas sumergidas en un baño de agua hasta que alcancen una temperatura de 60°C y durante 30 minutos aproximadamente, se procede a la rotura de las mismas por compresión diametral en el aparato Marshall como se ilustra en la **FIGURA 31**, obteniéndose para cada una de ellas la relación entre la carga de rotura (estabilidad Marshall) y la máxima deformación diametral producida.

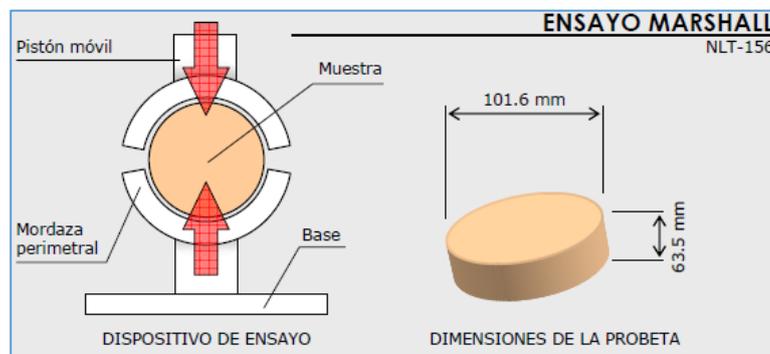


FIGURA 31. Diagrama de Estabilidad y Flujo Marshall.

Nota: Tomado de “Manual de Carreteras. Volumen II: Construcción y Mantenimiento,” por L. Bañón y J. Bevia. 2000b. 2ª ed., Alicante.

- ❖ La estabilidad se puede definir como la capacidad de la mezcla para resistir desplazamientos y deformación. La estabilidad de una mezcla asfáltica depende de la fricción y cohesión interna. La fricción interna entre las partículas de agregado se relaciona con sus características geométricas y textura. La cohesión proviene de la capacidad del ligante para mantener unidas las partículas.
- ❖ El Flujo Marshall, cuyo valor representa la deformación vertical total del espécimen sometido a la máxima carga, punto en el cual la carga empieza a decrecer. Puede indicar el potencial de la deformación permanente en mezclas de gradación densa. Un flujo mayor que 0.16 pulgadas (4.1 mm ó 16 centésimas de pulgada) puede indicar que la mezcla puede ser inestable bajo cargas de tráfico.

F. Tabulación y Gráfico de los Resultados de Ensayo.

- F.1. Calcular el porcentaje de asfalto absorbido por el agregado, Pba.
- F.2. Calcular el contenido de asfalto efectivo de la mezcla, Pbe.
- F.3. Calcular el porcentaje de vacíos en el agregado mineral de la mezcla compactada, VMA.
- F.4. Calcular el porcentaje de vacíos de aire en la mezcla compactada, Va
- F.5. Calcular el porcentaje de vacíos llenos con asfalto (VFA).
- F.6. Los resultados obtenidos son tratados de forma gráfica, confeccionando una serie de gráficos que muestren la variación de cada una de las características en función del contenido de ligante.

G. Determinación del Óptimo Contenido de Asfalto.

Sobre los diagramas se aplican una serie de criterios establecidos por el proyecto o Manual de Carreteras: Especificaciones técnicas generales para construcción EG-2013 (MTC,2013) y se elige el denominado contenido óptimo de asfalto que cumple con las especificaciones.

2.2.7. Requerimientos para las mezclas asfálticas de Diseño Marshall.

Según el manual de Carreteras: Especificaciones técnicas generales para construcción EG-2013 (MTC,2013), la fabricación de mezclas asfálticas en caliente se deberá elaborar con

las siguientes especificaciones para garantizar un buen desempeño durante su vida útil y ante la exposición de cargas cíclicas:

Las características de calidad de la mezcla asfáltica, deberán estar de acuerdo con las exigencias para mezclas de concreto bituminoso que se indican en la **Tabla 19** y **Tabla 20**, según corresponda al tipo de mezcla que se produzca, de acuerdo al diseño del proyecto.

Tabla 19 . Requisitos para mezcla de concreto bituminoso

Parámetro de Diseño	Clase de Mezcla		
	A	B	C
Marshall MTC E 504			
1. Compactación, número de golpes por lado	75	50	35
2. Estabilidad (mínimo)	8,15 kN	5,44 kN	4,53 kN
3. Flujo 0,01" (0,25 mm)	8-14	8-16	8-20
4. Porcentaje de vacíos con aire (1) (MTC E 505)	3-5	3-5	3-5
Inmersión - Compresión (MTC E 518)			
1. Resistencia a la compresión Mpa mín.	2,1	2,1	1,4
2. Resistencia retenida % (mín.)	75	75	75
Relación Polvo - Asfalto (2)	0,6-1,3	0,6-1,3	0,6-1,3
Relación Estabilidad/flujo (kg/cm) (3)	1.700-4.000		
Resistencia conservada en la prueba de tracción indirecta AASHTO T 283	80 Mín.		

(1) A la fecha se tienen tramos efectuados en el Perú que tienen el rango 2% a 4% (es deseable que tienda al menor 2%) con resultados satisfactorios en climas fríos por encima de 3.000 m.s.n.m. que se recomienda en estos casos.

(2) Relación entre el porcentaje en peso del agregado más fino que el tamiz 0,075 mm y el contenido de asfalto efectivo, en porcentaje en peso del total de la mezcla.

(3) Para zonas de clima frío es deseable que la relación Est. /flujo sea de la menor magnitud posible.

(4) El índice de Compactibilidad mínimo será 5.

El índice de Compactibilidad se define como:
$$\frac{1}{GEB\ 50 - GEB\ 5}$$

Siendo GEB50 y GEB5, las gravedades específicas bulk de las briquetas a 50 y 5 golpes.

Nota: Tomado de "Manual de Carreteras: Especificaciones técnicas generales para construcción EG-2013." por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones. 2013.

Tabla 20. Vacíos mínimos en el agregado mineral (VMA)

Tamiz	Vacíos mínimos en el agregado mineral (VMA) %	
	Marshall	Superpave
4,75 mm (N.º 4)	18	-
9,50 mm (3/8")	16	15
12,5 mm (1/2")	15	14
19,0 mm (3/4")	14	13
25,0 mm (1")	13	12

Nota: Tomado de "Manual de Carreteras: Especificaciones técnicas generales para construcción EG-2013." por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones. 2013.

Tabla 21. Vacíos llenos con asfalto (VFA).

Tráfico (millones de ejes equivalentes)	VFA
<0,3	70-80
>0,3-3	65-78
>3	65-75

Nota: Tomado de "Manual de Carreteras: Especificaciones técnicas generales para construcción EG-2013." por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones. 2013.

2.2.8. Análisis multicriterio con métodos discretos (MAUT²⁰ y A.H.P.²¹).

El análisis multicriterio es un método que permite orientar la toma de decisiones a partir de varios criterios comunes. Este método se destina esencialmente a la comprensión y a la resolución de problemas de decisión. Además, se utiliza para emitir un juicio comparativo entre alternativas o medidas heterogéneas, por lo cual se emplea en la evaluación de alternativas.

El análisis multicriterio se fundamenta en distintos métodos, donde el tipo de método multicriterio a usar, es definido por la naturaleza del problema de decisión.

²⁰ MAUT: Multi-Attribute Utility.

²¹ A.H.P.: Analytical Hierarchy Process.

Así, la teoría de Utilidad Multi-Atributo (MAUT) se utiliza cuando se dispone de información completa sobre las preferencias del decisor, sobre un conjunto de alternativas. Y en base a las preferencias, asume la existencia de una función de valor global que agrega las funciones de valor de cada uno de los criterios.

- ❖ En el caso de que el conjunto de alternativas sea discreto (cantidad contable), el problema consiste en construir la función de valor que refleje las preferencias del decisor y que integre los criterios. Si existe incertidumbre, hay que construir una función de utilidad, previa asignación de las funciones de probabilidad correspondientes.
- ❖ En el caso de que el conjunto de alternativas sea continuo (infinito incontable), existen varios algoritmos que resuelven el problema de optimización, y se reduce a un problema de programación matemática.

Donde a la falta de un elemento integrador de las preferencias conocidas del decisor, surge el método A.H.P. (Proceso Analítico Jerárquico); que involucra todos los aspectos concernientes a la toma de decisión. Modelando el problema a través de una estructura jerárquica, utilizando escalas de prioridades basadas en la preferencia de un elemento sobre otro, sintetizando los juicios emitidos y entregando un ranking u ordenamiento de las alternativas de acuerdo a los pesos obtenidos. Esta metodología propone una manera de ordenar el pensamiento analítico, de la cual se destacan tres principios básicos: (a) el principio de la construcción de jerarquías, (b) el principio de establecimiento de prioridades y (c) el principio de la consistencia lógica.

Los denominados “pesos o ponderaciones”, son las medidas de la importancia relativa que los criterios tienen para el decisor, de la amplia gama de métodos de ponderación se describe el utilizado en la investigación. La asignación de pesos por el Método del Autovector, que se realiza directamente mediante un grupo de trabajo o un individuo; para ello se establece una escala que determina el grado de importancia de los criterios en la que cada experto asigna un peso a cada criterio según su apreciación y, posteriormente, se calcula el peso definitivo de cada criterio calculando el valor medio de los valores asignados por los expertos a cada uno de los criterios.

El método MAUT consiste fundamentalmente en seis (6) etapas y se explica a continuación:

i. Generar el árbol de decisión (requerimientos).

Se inicia determinando el eje de requerimientos, que es el aspecto del primer nivel del árbol que se consideran en la decisión. Estos requerimientos pueden ser cualquiera que el decisor defina, por ejemplo; seguridad, funcionalidad, aspectos sociales y económicos. Como se muestra en la **FIGURA 32**.

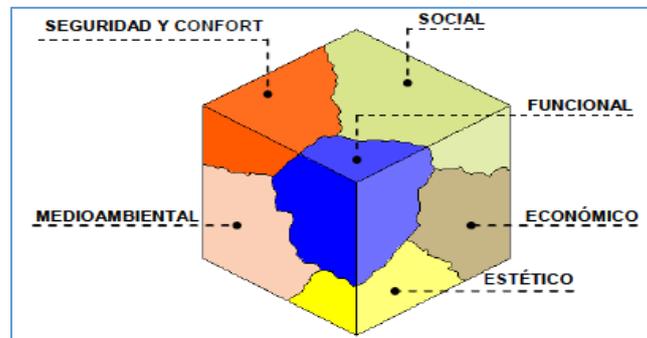


FIGURA 32. Requerimientos generales para análisis multicriterio.

Nota: Tomado de “Análisis de valor en la toma de decisiones aplicado a carreteras,” por N. Villegas. 2009, Catalunya.

Luego, cada requerimiento (o plano) debe estar ordenado en niveles específicos: criterios e indicadores. Es decir, para cada requerimiento “i” se le asignan “n” criterios y a su vez a cada criterio se le asignan “k” indicadores. La cantidad de criterios como de indicadores es variable en base a la naturaleza de cada requerimiento, según sea el caso. *Tanto los requerimientos como los criterios no son medibles, estos son medidos, indirectamente, a través de los indicadores.* Esta estructura proporciona una mejora en la organización de la información, manteniendo los criterios con un carácter cualitativo y los indicadores como elementos de medición del problema; en la **FIGURA 33** se muestra esta disposición recomendada.

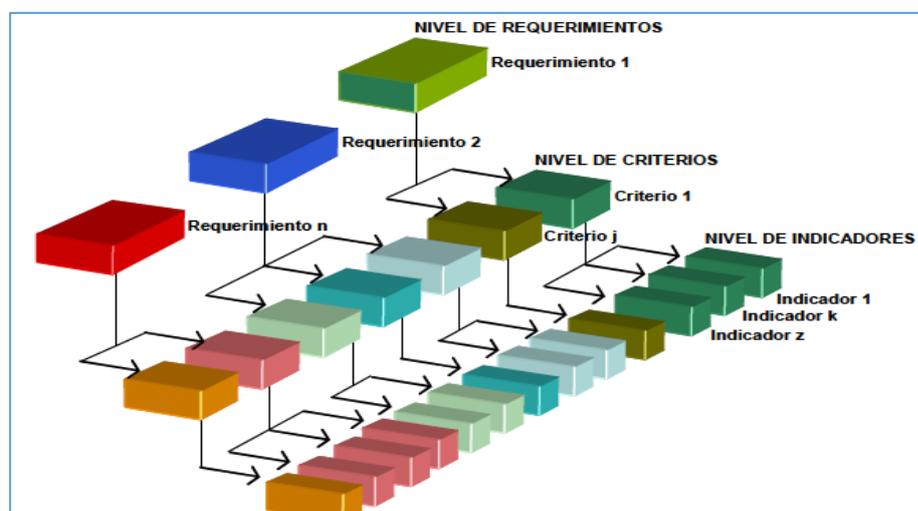


FIGURA 33. Despliegue de los requerimientos en criterios e indicadores.

Antes de cualquier evaluación, es necesario definir y ponerse de acuerdo sobre qué criterios e indicadores son los que se van a utilizar. Tal como se ha dicho, es importante acotar el número de criterios o indicadores a considerar. Para ello, se puede definir “a priori” un nivel de representación por debajo del cual, ese indicador o criterio no debe considerarse.

A continuación, se definen las posibles soluciones que resolverán el problema planteado (alternativas), siendo el número definido por la propia naturaleza del problema (sistemas constructivos, candidatos, departamentos, coches, etc.). Es de gran importancia señalar que, a diferencia de otras herramientas que valoran o priorizan alternativas, la asignación de éstas, puede desarrollarse antes o después de la definición del modelo (árbol de requerimientos), siendo un factor diferencial respecto a otros planteamientos de evaluación.

ii. Ponderar los requerimientos, criterios e indicadores.

La ponderación consiste en asignar pesos (preferencias) entre distintas variables de un mismo grupo, dicha ponderación debe ser realizada para cada nivel jerárquico, determinando el nivel de importancia de cada elemento del árbol de requerimientos, de cada criterio y de cada indicador.

Ésta, puede hacerse de manera directa, que se refiere a la asignación de pesos a cada uno de los aspectos (por la experiencia del decisor, grupo de trabajo, referencias de expertos y para decisiones con un número reducido de aspectos) en donde la suma del conjunto sea la unidad. En esta tesis no se pretende explicar en detalle la metodología A.H.P, ya que su aplicabilidad está demostrada en los distintos ámbitos en que ha sido validada (Grandzol, 2005; School et al, 2005).

El A.H.P. pretende cuantificar y asignar prioridades relativas de cada alternativa según una escala, acentuando la importancia de los criterios intuitivos del decisor y la consistencia de las comparaciones entre alternativas basadas en su juicio. La metodología comparte el principio de que el decisor siempre basa sus juicios en el conocimiento y la experiencia (Pekka, 2000) además de, organizarse factores tanto tangibles como intangibles de una forma sistemática, proporcionando una solución simple y bien estructurada.

iii. Desarrollar las funciones valor.

La función de valor consiste en la transformación de diferentes unidades a través de una escala de valores adimensionales con el objetivo principal de sumar valoraciones de indicadores. Con ello, se plantean diferentes funciones de valor (ecuaciones) para cada uno de

los indicadores y se valoran entre 0 y 1, representando el estado de valoración nula o valoración máxima (saturación), respectivamente, para cada uno de los indicadores.

Es decir, se crea una ecuación que transforme una medición del indicador (estabilidad, flujo, etc.) en una valoración adimensional de 0 (no deseado) a 1 (deseado).

La función valor se define mediante cuatro parámetros que, al variarlos, permite obtener todo tipo de formas: forma de s, cóncavas, convexas, o rectas. Esta función valor viene, genéricamente, dada por la ecuación siguiente:

$$V_{ind} = A + B \times \left[1 - e^{-K_i \times \left(\frac{|X_{ind} - X_{min}|}{C_i} \right)^{P_i}} \right] \quad (2.50)$$

Donde:

V_{ind} : Valor del indicador, será la *respuesta de la alternativa del indicador*, en adelante se simboliza como “ $Valor_{ind}$ ”.

A : Valor que genera la abscisa “ $X_{mín}$ ”, Generalmente $A = 0$.

$X_{mín}$: Abscisa del indicador que genera un valor igual a “A”.

X_{ind} : Abscisa del indicador evaluado que genera un valor $Valor_{ind}$.

P_i : Es un factor que determina la pendiente de la curva en el punto de inflexión de coordenadas (C_i , K_i). Además, define la forma de la curva: cóncava, convexa, lineal y en forma de “S”. Las curvas cóncavas presentan valores de $P_i < 1$; las convexas o en forma de “S” presentan $P_i > 1$ y si $P_i \approx 1$ las curvas tienden a ser rectas.

C_i : Para curvas en forma de “S”, este factor establece el valor de la abscisa del entorno del punto de inflexión.

K_i : Define el valor de la ordenada del punto C_i .

B: Este factor permite que la función se mantenga en el rango de valor de (0,00; 1,00). Es decir, la mejor respuesta resulte en un valor igual a 1. Este factor viene definido por la ecuación siguiente:

$$B = \left[1 - e^{-K_i \times \left(\frac{|X_{máx} - X_{min}|}{C_i} \right)^{P_i}} \right] \quad (2.51)$$

$X_{máx}$: Abscisa del indicador que genera un valor igual a 1.

La función de valor puede ser creciente o decreciente según el tipo de indicador que se requiera evaluar.

Por ejemplo, para evaluar el indicador “consumo de energía (Gw/hr)”, se debe considerar una función de valor descendente, debido a que con un menor consumo de energía se consigue una satisfacción máxima tal y como se muestra en la **FIGURA 34** (a). No obstante, si se tiene un indicador como “resistencia a la flexión por cargas repetidas” se consigue la máxima satisfacción en el máximo tiempo posible, debiendo utilizar una función creciente tal como se aprecia en la figura **FIGURA 34** (b).

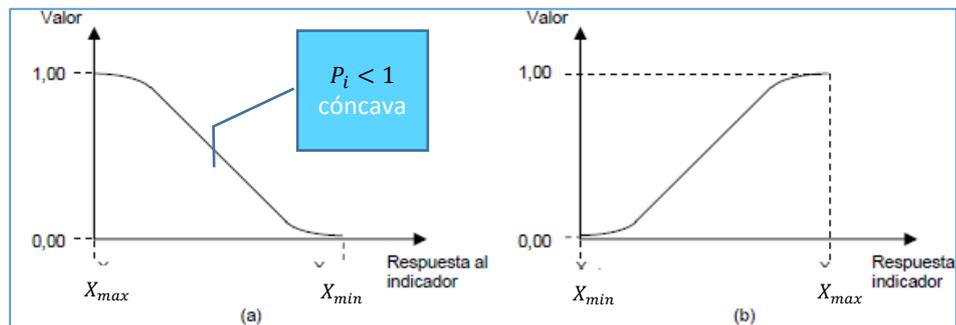


FIGURA 34. Tendencias crecientes y decrecientes de una función de valor.

Los puntos de máxima y mínima satisfacción (“ $x_{mín}$ ” y “ $x_{máx}$ ”) definen los límites de la función de valor. Estos límites son definidos de acuerdo a distintas circunstancias como son:

- Utilizar la normativa vigente: Algunos indicadores se encuentran regulados en diferentes normativas. Estas normas pueden condicionar los puntos de mínima o máxima satisfacción en la función de valor.
- Condiciones propias: Según las necesidades del modelo, cuando los indicadores no estén regulados por una ley, se puede seleccionar los puntos mínimos y máximos, sobre todo en costos y tiempos de ejecución de proyectos.

Los puntos de inflexión en la mayoría de casos, son las medidas promedio de un indicador. Así, por ejemplo, un indicador denominado *Tiempo de construcción* (carretera con pavimento flexible) tendrá un punto de inflexión " C_i " igual a 30 días / kilómetro; por el hecho de representar el tiempo medio de los distintos proyectos revisados de una Dirección Regional de Transportes y Comunicaciones u otra fuente confiable.

Para terminar con el desarrollo de una función, solo queda encontrar los valores de “B” y “ K_i ” con la ecuación 2.51; alternatively se puede ajustar o encontrar estos valores usando

el complemento SOLVER de la aplicación EXCEL. Estableciendo objetivos de 0 y 1 en la forma de la función y cambiando los valores a encontrar o ajustar.

iv. Calcular las respuestas de los indicadores ($Valor_{ind.}$).

Las alternativas se cuantifican de forma escalonada, empezando por los indicadores hasta llegar a los requerimientos, siguiendo la directriz de la **FIGURA 35**.

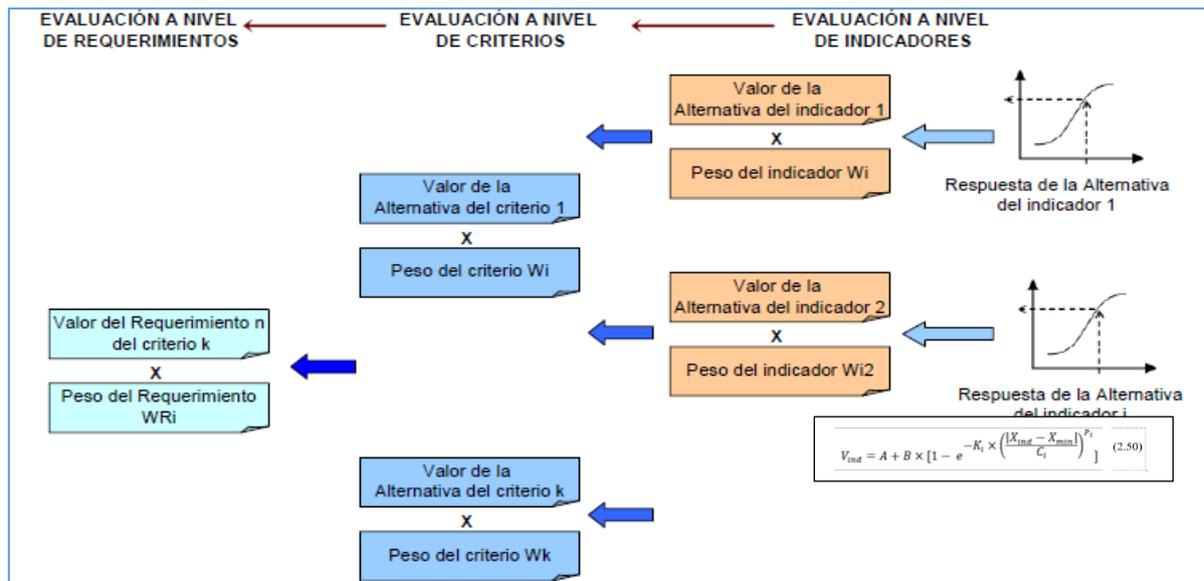


FIGURA 35. Evaluación de alternativa a nivel de indicadores, criterios y requerimientos.

Para definir la respuesta del indicador (valor) de una alternativa, se inserta la medición del indicador (resultado de ensayos, encuestas, datos recopilados, etc.) en la forma de la *función de valor* propia al indicador (ecuación 2.50); obteniendo un valor de satisfacción entre 0 y 1 (adimensional).

v. Calcular el índice de valor ($Iv.$) en todos los niveles.

La obtención del índice de valor a nivel de indicador resulta de la multiplicación del valor de satisfacción (paso iv) y el peso del indicador previamente ponderada.

$$Iv_{indicador\ i} = Valor_{ind.i} \times Peso_{ind.}$$

Los índices valores de los indicadores sirven para definir el valor de los niveles jerárquicos superiores, los cuales se multiplican por los pesos de cada criterio y la suma de todos los resultados de los indicadores de un grupo homogéneo resultando el índice de valor a nivel de criterio.

La evaluación a nivel de requerimientos se realiza de forma similar a lo explicado para la evaluación a nivel de criterios, en la **Tabla 66** (pág.166) se muestra el cálculo desde las respuestas de los indicadores hasta el índice de valor a nivel de alternativa.

vi. Elegir la alternativa óptima en base a la comparación y análisis de los índices de valor para las alternativas planteadas.

La selección de la mejor alternativa se realiza a partir de la suma de los valores obtenidos en el nivel de requerimientos, es decir, la mejor alternativa será, la que obtenga un valor más alto (más próximo a uno), representando la máxima satisfacción.

Capítulo III

Metodología

3.1. Métodos, y alcance de la investigación.

3.1.1. Enfoque de la investigación.

La presente investigación pertenece al enfoque CUANTITATIVO, según a lo que indica Hernández, Fernández y Baptista (2010):

La investigación cuantitativa es secuencial y probatorio. Cada etapa precede a la siguiente y no podemos “brincar o eludir” pasos, el orden es riguroso, aunque, desde luego, podemos redefinir alguna fase. Parte de una idea, que va acotándose y, una vez delimitada, se derivan objetivos y preguntas de investigación, se revisa la literatura y se construye un marco o una perspectiva teórica. De las preguntas se establecen hipótesis y determinan variables; se desarrolla un plan para probarlas (diseño); se miden las variables en un determinado contexto; se analizan las mediciones obtenidas (con frecuencia utilizando métodos estadísticos), y se establece una serie de conclusiones respecto de la(s) hipótesis. (Hernández et al.,2012. P. 4)

3.1.2. Tipo de Investigación.

La investigación es de tipo APLICADA.

Según Tam, Vera, y Oliveros (2008), “La investigación aplicada ha enfocado la atención sobre la solución de teorías el cual concierne solo a un grupo en particular mas no generaliza, se refiere a resultados inmediatos y busca perfeccionar a los individuos implicados en el proceso de investigación” (p. 147).

3.1.3. Alcance.

La investigación tiene un alcance CORRELACIONAL; ya que el presente estudio pretende conocer la relación o grado de asociación que existe entre dos o más variables en un contexto en particular. Además, se asocian las variables mediante un patrón que será predecible para un grupo o población. Para después cuantificar y analizar la vinculación. Ya que las correlaciones se sustentan en hipótesis sometidas a prueba.

3.2. Diseño de la investigación.

La presente investigación realizada es del **tipo experimental**, de diseño con posprueba únicamente y grupo de control, este diseño incluye dos grupos: uno recibe el tratamiento experimental y el otro no (grupo de control). Es decir, la manipulación de la variable independiente alcanza solo dos niveles: presencia y ausencia. Cuando concluye la manipulación, a ambos grupos se le administra una medición sobre la variable dependiente de estudio. (Hernández et al.,2012)

En la investigación los grupos de comparación están conformados por:

- El grupo patrón o de control (sin tratamiento), estuvo conformado por especímenes de la mezcla asfáltica en caliente convencional (sin adición de fibras acrílicas).
- El grupo experimental, lo conformaron las mezclas asfálticas modificadas por adiciones de fibras acrílicas (de 20, 12 y 8 mm de largo) en distintas dosificaciones.
- Se manipulo la variable independiente mediante la adición de fibras acrílicas en ocho dosificaciones: (a) 0.05%, (b) 0.10%, (c) 0.15%, (d) 0.20%, (e) 0.30%, (f) 0.50%, (g) 0.70%, y (h) 1.00%. Éstos, respecto al peso del agregado y cemento asfáltico, para poder analizar y evaluar las variables dependientes mencionadas en el capítulo I, sección 1.6. Variables. El objetivo fue determinar la influencia de la adición de fibras acrílicas de alta tenacidad DRYMIX RC 4020, en la estabilidad, fluencia y reducción de fisuramiento por fatiga en las mezclas asfálticas en caliente, mediante ensayos de laboratorio según el Diagrama de la FIGURA 37.

3.3. Población y muestra.

Para esta investigación se realizarán cuerpos de prueba para cuatro tipos de mezcla asfáltica, una convencional (patrón – sin fibra acrílica) y tres que serán modificadas con la fibra sintética acrílica (de 20, 12 y 8 mm de largo respectivamente); para la determinación del desempeño que tiene cada tipo de mezcla asfáltica.

3.3.1. Población objetivo.

El universo poblacional está conformado por los diseños de mezclas asfálticas en caliente con adiciones de fibras, empleadas en la construcción de pavimentos flexibles en la ciudad de Huancayo para el mejoramiento de vías con tráfico pesado.

3.3.2. Muestra.

3.3.2.1. Descripción de muestra

Las muestras están conformadas por cuatro tipos de mezclas asfálticas:

(a) mezcla asfáltica patrón (Grupo de control):

Conformada por un diseño de mezcla asfáltica convencional de gradación densa (sin adición de fibras acrílicas), esta mezcla contiene proporciones de agregado y asfalto de un ensayo previo para determinar el porcentaje óptimo de cemento asfáltico. El diseño de mezcla patrón está compuesto por cinco especímenes (probetas Marshall).

(b) mezclas asfálticas modificadas con fibras acrílicas de 20 mm – TIPO “A”

A este grupo pertenecen los diseños de mezcla con porcentajes de adición de fibras acrílicas de 20 mm., siendo estos: 0.05%, 0.10%, 0.15%, 0.20%, 0.30%, 0.50%, 0.70% y 1.00% respectivamente. Estas dosificaciones se hicieron respecto al peso total de los agregados y cemento asfáltico, con cinco especímenes Marshall por cada porcentaje.

(c) mezclas asfálticas modificadas con fibras acrílicas de 12 mm – TIPO “B”

A este grupo pertenecen los ocho diseños de mezclas asfálticas modificadas con fibras acrílicas de 12 mm., en los mismos porcentajes de adición descritos anteriormente y también con cinco especímenes por cada porcentaje.

(d) mezclas asfálticas modificadas con fibras acrílicas de 8 mm TIPO C

A este grupo pertenecen ocho diseños de mezclas asfálticas modificadas con fibras acrílicas de 8 mm., con porcentajes de adición y especímenes descritos anteriormente.

3.3.2.2. Cuantificación de muestras

El tamaño de la muestra está conformado por 25 diseños de mezclas, con cinco probetas Marshall por diseño; resultando en 125 especímenes.

Además, se realizan cuatro vigas de 152x152x532 mm (una para la mezcla patrón y una para cada dosificación óptima según tipo de fibra); como se ilustra en la **Tabla 22**.

Tabla 22. Cuantificación de la muestra y número de especímenes Marshall por muestra

Diseños de mezclas asfálticas								
Cod. de mezcla asfáltica	Adición de fibras (%)							
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
	+0.05%	+0.10%	+0.15%	+0.20%	+0.30%	+0.50%	+0.70%	+1.0%
Tipo A: fib.20 mm	5 spec	5 spec	5 spec	5 spec	5 spec	5 spec	5 spec	5 spec
Tipo B: fib.12 mm	5 spec	5 spec	5 spec	5 spec	5 spec	5 spec	5 spec	5 spec
Tipo C: fib. 8 mm	5 spec	5 spec	5 spec	5 spec	5 spec	5 spec	5 spec	5 spec
Patrón (sin fibra)	5 spec.							
TOTAL	125 spec.							
Obs: Se realizan cuatro vigas para evaluar la resistencia a la flexión; una para el patrón y una para cada dosificación óptima según tipo de fibra. *spec: especímenes								

3.3.2.3. Método de Muestreo.

El método usado, es el muestreo no probabilístico dirigido (intencional), por su rapidez y alcance económico que hizo que las muestras presentadas fueran las más representativas posibles.

3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

3.4.1. Observación.

Donde se hizo el registro sistemático de las situaciones y comportamientos observables, que se presentaron en el desarrollo de las pruebas experimentales a nivel de laboratorio. Que en su totalidad fueron pruebas estandarizadas. Para el registro se utilizaron Fichas de Observación.

3.4.2. Realización de pruebas estandarizadas.

Se realizaron ensayos estandarizados por las normas ASTM y el “Manual de Ensayo de Materiales” del Ministerio de Transportes y Comunicaciones, para medir todas las variables

específicas necesarias para el posterior desarrollo completo de los análisis de datos. Estos ensayos se realizaron a los componentes de las mezclas asfálticas y a las mezclas compactadas. La recopilación de datos se efectuó con los siguientes formatos:

- ❖ Formatos de granulometría.
- ❖ Formatos de propiedades físicas de los agregados.
- ❖ Formatos para Ensayo de estabilidad y flujo Marshall de mezclas asfálticas compactadas.

3.4.3. Uso de instrumentos mecánicos y electrónicos

Se usaron estos sistemas de medición para evaluar las características y propiedades específicas de los componentes de las mezclas asfálticas y a sí mismas, entre ellos tenemos:

- ❖ Equipo de prueba para Análisis granulométrico de suelos (tamizado manual).
- ❖ Equipo de prueba para Gravedad Específica De Agregados Finos y Gruesos, y Mezclas Bituminosas compactadas.
- ❖ Prensa y accesorios de Estabilidad Marshall.
- ❖ Equipo de prueba para resistencia a la flexión en vigas simplemente apoyadas con cargas en los tercios del tramo.

3.4.4. Uso de Instrumentos específicos propios de la disciplina (Diseño de pavimentos flexibles)

Se usaron métodos específicos propios para evaluar el comportamiento de las mezclas asfálticas para pavimentación, en términos generales; las normas para ensayos en mezclas bituminosas del “Manual de Ensayos de Materiales” por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2016).

3.4.5. Información secundaria recolectada por otros investigadores.

Se hizo una exhaustiva revisión de documentos de investigación para extraer fórmulas que predicen características y comportamientos (Modulo complejo, Módulo de Rigidez y deformaciones por fatiga) de la mezcla asfáltica que no pudieron ser cuantificadas por las pruebas realizadas. Donde estas ecuaciones integran variables que fueron medidas por los ensayos realizados.

3.5. Procesamiento de Datos

Los datos recopilados de los especímenes analizados, se procesaron mediante hojas de cálculo en el software Excel, generando tablas y gráficos; para luego analizar el grado de correlación entre las variables.

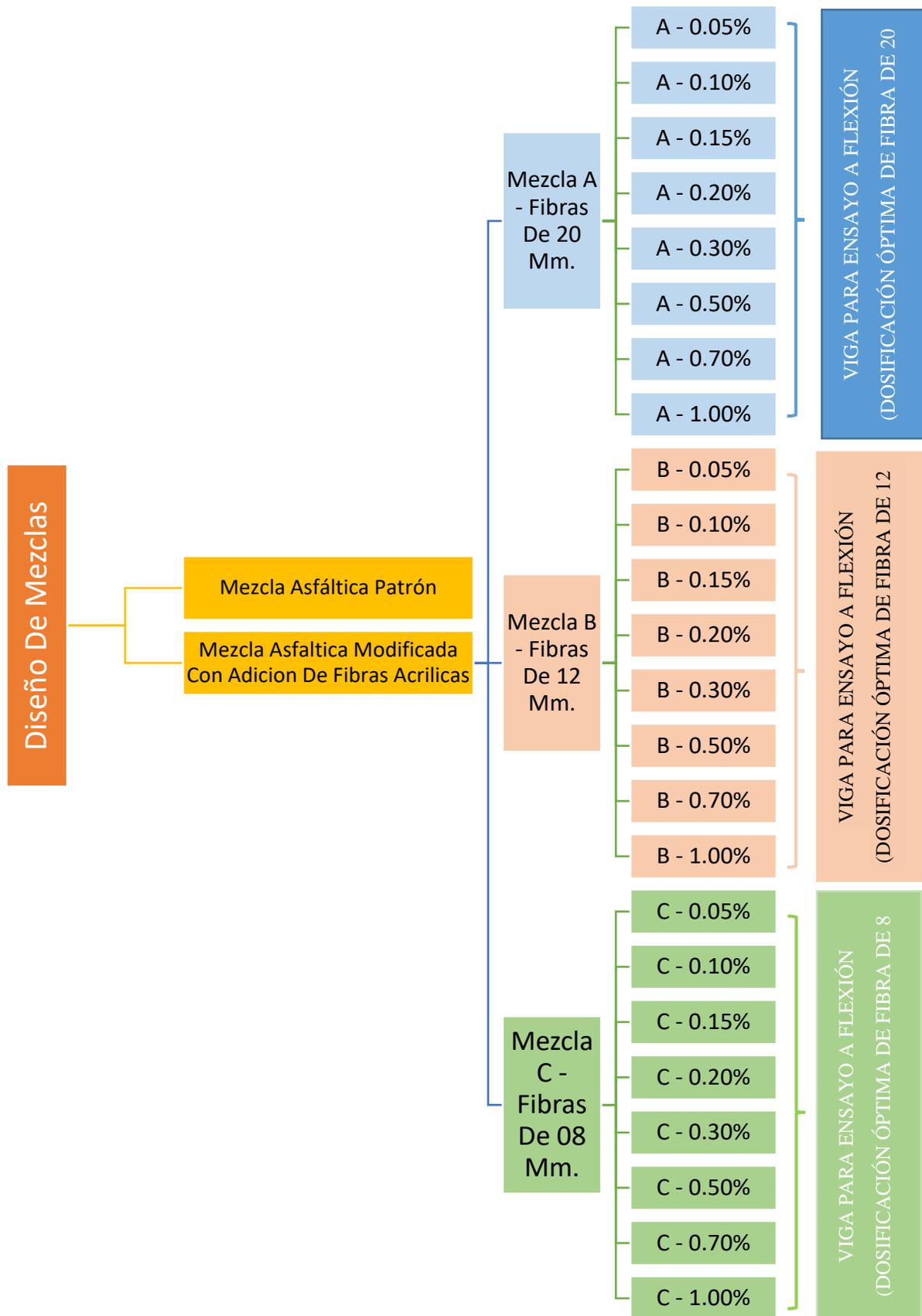


FIGURA 36. Flujograma de mezclas asfálticas a realizar en la investigación.

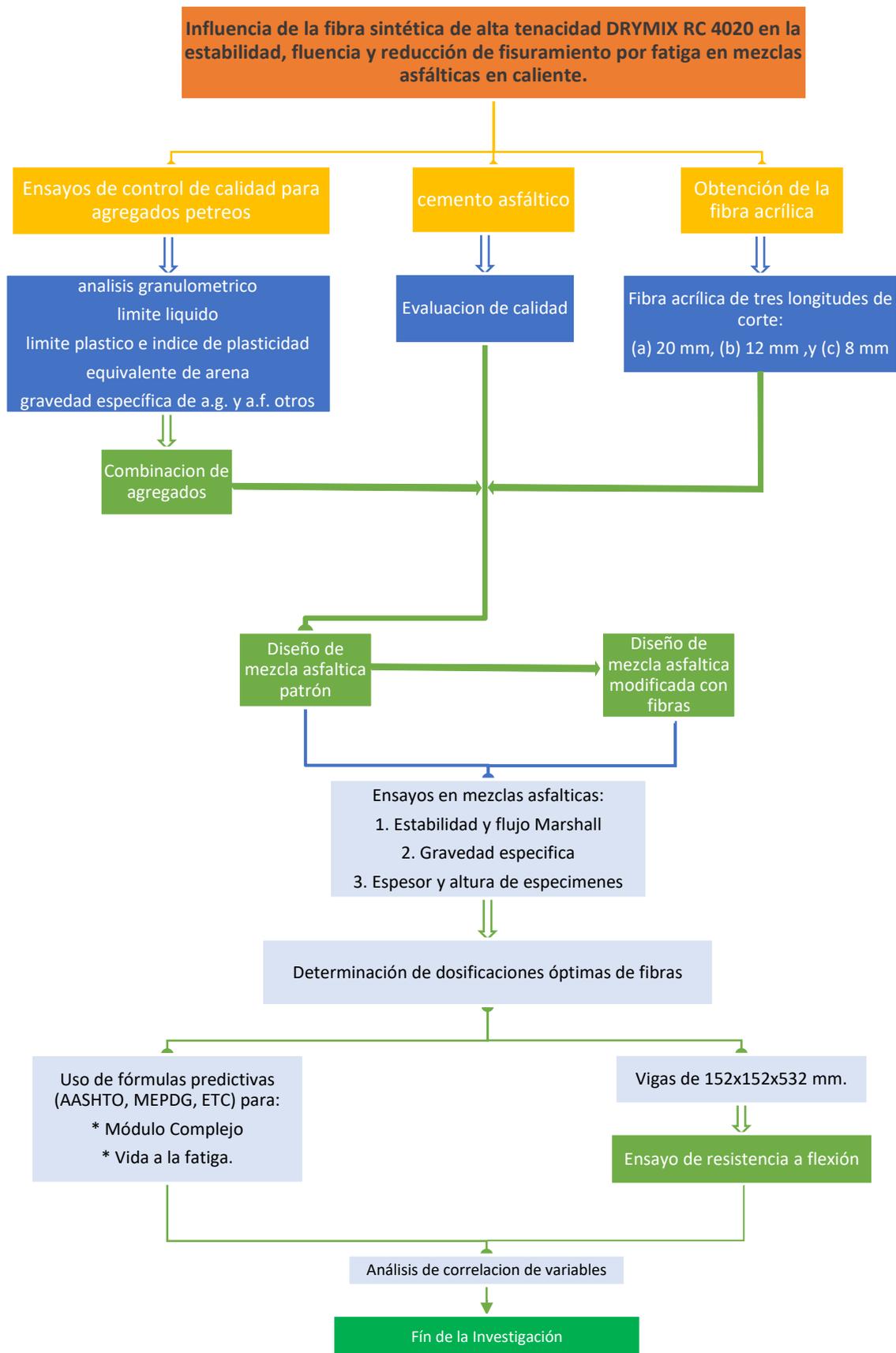


FIGURA 37. Diagrama del desarrollo experimental a nivel de laboratorio.

Capítulo IV

Desarrollo de la Investigación

El procedimiento para la recolección de datos cumple la siguiente secuencia de trabajo:

4.1. Etapa I: Selección y propiedades de los materiales empleados.

4.1.1. Fibra acrílica DRYMIX RC 4020.

4.1.1.1. Caracterización de la fibra.

Las fibras usadas en la presente investigación, están constituidas por fibras acrílicas de alta tenacidad, en la **Tabla 23** se presentan las propiedades de las fibras acrílicas.

Tabla 23. *Propiedades físicas y mecánicas de la fibra acrílica.*

Propiedad:	Magnitud	Propiedad:	Magnitud
Longitud promedio de corte	(A) 20 mm (B) 12 mm (C) 8 mm	Resistencia a la Tracción	468 MPa
Diámetro	20.6 μm	Alargamiento a la rotura	23.4 \pm 12%
N° fibras/gramo	208.3 $\times 10^3$	Contenido de ensimaje	0.20-0.60%
Densidad	1.17 g/cm^3	Finura	3.7 - 4.5 dTex*
Temperatura máxima	180 °C	Absorción	< 2 %
N° de fibras	125K fibras/gr	Sección Transversal	Forma de hueso
Resistencia al álcali	Buena	Punto de carbonización	330 °C

*dTex: masa en gramos por cada 10.000 metros de fibra.

4.1.1.2. Termogravimetría

Recopilado de investigaciones de la empresa Sudamericana De Fibras S.A., que se realizaron en el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica; San José.

Las fibras acrílicas utilizadas fueron evaluadas a partir del ensayo de Análisis Termogravimétrico (TGA) con la intención de verificar la temperatura de descomposición del material. Para esto una muestra fue sometida a una rampa de temperatura de 0 °C a 1000 °C a razón de 10 °C/min. La historia de descomposición de la fibra se muestra en la FIGURA 38.

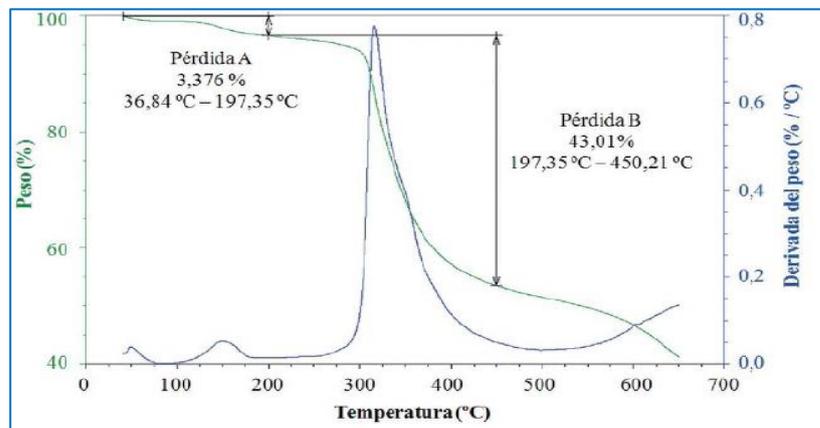


FIGURA 38. Análisis termogravimétrico aplicado a la fibra.

Nota: Tomado de Sudamericana de Fibras S.A.

A grandes rasgos, el análisis TGA revela la ocurrencia de dos eventos importantes: (a) la pérdida de 3.376 % de la muestra antes de alcanzar los 200 °C; y (b) la pérdida del 43.01 % de la muestra entre los 200 y 450 °C aproximadamente, con el proceso de descomposición del material. Posterior a los 450° C la fibra continúa degradándose paulatinamente.

Lo que se rescata de este ensayo, es la temperatura crítica que soportara la fibra durante el mezclado. Y por los resultados se puede ver que la fibra acrílica presenta una buena estabilidad térmica hasta los 180° C, suficientes para resistir la temperatura de mezcla.

4.1.1.3. Procedimiento de incorporación

La modificación de la mezcla asfáltica utilizando fibras acrílicas, se realiza mediante la incorporación de un paso durante el proceso de mezclado. Su adición se realiza durante la dosificación del ligante asfáltico, en donde se incorpora al ligante en la dosificación requerida. De esta manera, se forma una matriz asfalto-fibra que se mezcla inmediatamente después con

los agregados pétreos, garantizando la homogeneidad en la mezcla y a su vez evitando que la fibra entre en contacto directo con el agregado y se corte o deteriore durante el mezclado, como se ilustra en el diagrama de la FIGURA 39.

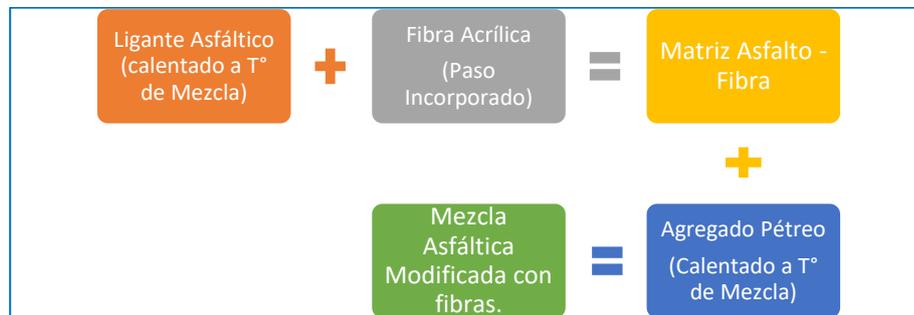


FIGURA 39. Diagrama de incorporación de la fibra acrílica.

4.1.2. Agregados finos y gruesos.

4.1.2.1. Ubicación de Canteras.

Los agregados finos utilizados en la investigación son:

- A. Arena natural zarandeada.
- B. Arena Chancada.

El agregado grueso utilizado en la investigación es:

- C. Piedra Chancada con tamaño máximo nominal de 1/2”.

Provenientes de la cantera “Matahuasi” que se ubica a orillas del río Mantaro.

- Distrito: Matahuasi
- Provincia: Concepción
- Coordenadas UTM: 463181.00 E - 8685365.00 N
- Altitud: 3262 msnm.



FIGURA 40. Ubicación de cantera agregado fino - Matahuasi

4.1.2.2. Muestreo de suelos y rocas (MTC E 101, 2016).

El muestreo de los agregados se realizó de acuerdo a la norma MTC E 101 y con estas muestras de campo se han realizado los ensayos estandarizados siguientes.

4.1.2.3. Obtención en laboratorio de muestras representativas (cuarteo) - MTC E 105, 2016.

A. Objetivo:

Establecer los procedimientos para obtener en laboratorio la muestra necesaria para realizar los ensayos, de forma que sea representativa de la muestra total recibida.

B. Equipos y Materiales utilizados en la Prueba.

Tamices, que cumplan con la NTP 350.001. Los siguientes son requeridos:

- a.- Tamiz 4,750 mm (N° 4)
- b.- Tamiz 2,000 mm (N° 10)
- c.- Tamiz 0,425 mm (N° 40)

- Mortero, con su mazo cubierto de caucho en la parte inferior.
- Cuarteador o aparato para la separación de las muestras.
- Lona, para cubrir aproximadamente 2 m x 2,5 m.
- Pala, cucharón metálico o badilejo para manejar el material.
- Varilla metálica, de longitud apropiada.

C. Procedimiento:

Método B. Cuarteo manual

- Se coloca la muestra sobre una superficie dura, limpia y horizontal evitando cualquier pérdida de material o la adición de sustancias extrañas.
- Se mezcla bien hasta formar una pila en forma de cono, repitiendo esta operación cuatro veces. Cada palada tomada de la base se deposita en la parte superior del cono, de modo que el material caiga uniformemente por los lados del mismo.
- Cuidadosamente se aplana y extiende la pila cónica hasta darle una base circular, espesor y diámetro uniforme, presionando hacia abajo con la cuchara de la pala, de tal manera que cada cuarteo del sector contenga el material original. El diámetro debe ser aproximadamente cuatro a ocho veces el espesor.
- Se procede luego a dividir diametralmente el material en cuatro partes iguales, de las cuales se separan dos cuartos diagonalmente opuestos, incluyendo todo el material fino limpiando luego con cepillo o escoba los espacios libres. Los dos cuartos restantes se mezclan sucesivamente y se repite la operación hasta obtener la cantidad de muestra requerida.



FIGURA 41. Pasos para el cuarteo manual.

Nota: Tomado del “Manual de Ensayo de Materiales.” por el MTC.

4.1.2.4. Análisis granulométrico de suelos por tamizado (MTC E 107 – ASTM D 422).

A. Objetivo:

Determinar cuantitativamente la distribución de tamaños de partículas de suelo.

B. Equipos y Materiales utilizados en la Prueba.

- Dos balanzas: una con sensibilidad de 0,01 g para pesar material que pase el tamiz de 4,760 mm (Nº 4) y otra con sensibilidad de 0,1% del peso de la muestra, para pesar los materiales retenidos en el tamiz de 4,760 mm (Nº 4).

- Estufa, capaz de mantener temperaturas uniformes y constantes hasta de $110^{\circ} \pm 5^{\circ}\text{C}$.
- Se usó, tamices de malla cuadrada e incluyen los mostrados en la **Tabla 24**:

Tabla 24. *Serie de tamices.*

TAMICES	ABERTURA (mm)
3"	75,000
2"	50,800
1 1/2"	38,100
1"	25,400
3/4"	19,000
3/8"	9,500
N° 4	4,760
N° 10	2,000
N° 20	0,840
N° 40	0,425
N° 60	0,260
N° 140	0,106
N° 200	0,075

Nota: Tomado del "Manual de Ensayo de Materiales." por el MTC.

- Según sean las propiedades de los materiales finos de la muestra, el análisis con tamices se hace, bien con la muestra entera, o bien con parte de ella después de separar los finos por lavado. Si la necesidad del lavado no se puede determinar por examen visual, se seca en la estufa una porción húmeda del material y luego se examina su resistencia en seco rompiéndola entre los dedos. Si se puede romper fácilmente y el material fino se pulveriza bajo la presión de aquellos, entonces el análisis con tamices se puede efectuar sin previo lavado.
- Prepárese una muestra para el ensayo como se describe en la preparación de muestras para análisis granulométrico (MTC E 106²²). la cual estará constituida por dos fracciones: una retenida sobre el tamiz de 4.760 mm (N° 4) y otra que pasa dicho tamiz. Ambas fracciones se ensayarán por separado.

C. Procedimiento.

²² MTC E 106: Preparación en seco de muestras para el análisis granulométrico y determinación de las constantes del suelo.

Análisis por medio de tamizado de la fracción retenida en el tamiz de 4,760 mm (N° 4).

C.1. Sepárese la porción de muestra retenida en el tamiz de 4,760 mm (N° 4) en una serie de fracciones usando los tamices de:

Tabla 25. Pesos por tamices.

Diámetro nominal de las partículas más grandes mm (pulg)	Peso mínimo aproximado de la porción (g)
9,5 (3/8")	500
19,6 (3/4")	1000
25,7 (1")	2000

Nota: Tomado del "Manual de Ensayo de Materiales." por el MTC.

O los que sean necesarios dependiendo del tipo de muestra, o de las especificaciones para el material que se ensaya.

C.2. En la operación de tamizado manual, se mueve el tamiz o tamices de un lado a otro y recorriendo circunferencias de forma que la muestra se mantenga en movimiento sobre la malla.

Debe comprobarse al desmontar los tamices que la operación está terminada; esto se sabe cuándo no pasa más del 1 % de la parte retenida al tamizar durante un minuto, operando cada tamiz individualmente. Si quedan partículas apresadas en la malla, deben separarse con ayuda del pincel o cepillo y reunir las con lo retenido en el tamiz.

C.3. Se determina el peso de cada fracción en una balanza con una sensibilidad de 0,1 %. La suma de los pesos de todas las fracciones y el peso, inicial de la muestra no debe diferir en más de 1 %.

D. Reportes de la Arena natural zarandeada.

La **Tabla 26** muestra los datos de granulometría del promedio de las 3 muestras de Arena natural zarandeada.

Tabla 26. Granulometría de la arena zarandeada

Malla		Arena zarandeada		
Tamiz	mm	% retenido	% retenido acumulado	% que pasa
1/2"	12.500	0.00	0.00	100.00
3/8"	9.500	0.00	0.00	100.00
N° 4	4.760	6.60	6.60	93.40
N° 8	2.360	20.60	27.20	72.80
N° 10	2.000	4.70	31.90	68.10
N° 40	0.420	31.20	63.10	36.90
N° 80	0.180	20.40	83.50	16.50
N° 200	0.074	9.50	93.00	7.00
pasa		7.00	100.00	0.00
	TOTAL	100%		

E. Reportes de la arena chancada.

La **Tabla 27** muestra los datos de granulometría de la arena chancada.

Tabla 27. Granulometría de la arena chancada.

MALLA		ARENA CHANCADA		
Tamiz	mm	% retenido	% retenido acumulado	% que pasa
1/2"	12.500	0.00	0.00	100.00
3/8"	9.500	0.00	0.00	100.00
N° 4	4.760	9.60	9.60	90.40
N° 8	2.360	13.60	23.20	76.80
N° 10	2.000	4.40	27.60	72.40
N° 40	0.420	35.10	62.70	37.30
N° 80	0.180	19.50	82.20	17.80
N° 200	0.074	8.70	90.90	9.10
pasa		9.10	100.00	0.00
	TOTAL	100%		

F. Reportes de la piedra chancada.

La **Tabla 28** muestra los datos de granulometría de la piedra chancada.

Tabla 28. Granulometría de la Piedra Chancada

MALLA		PIEDRA CHANCADA - TMN ½"		
Tamiz	mm	% retenido	% retenido acumulado	% que pasa
3/4"	19.000	0.00	0.00	100.00
1/2"	12.500	48.60	48.60	51.40
3/8"	9.500	36.50	85.10	14.90
N° 4	4.760	14.60	99.70	0.30
N° 8	2.360	0.24	99.94	0.06
N.º 10	2.000	0.06	100	0.00
Fondo		0.00	100	0.00
TOTAL		100%		

4.1.2.5. Gravedad (peso) específica y absorción de agregados finos (MTC E 205, 2016 y ASTM C 128).

A. Equipos y Materiales utilizados en la Prueba.

- Balanza, con capacidad mínima de 1000 g y sensibilidad de 0.1 g.
- Horno de tamaño adecuado, capaz de mantener una temperatura uniforme de $110^{\circ} \pm 5^{\circ}\text{C}$.
- Frasco volumétrico de 500 cm³ de capacidad.
- Molde cónico, metálico de 40 ± 3 mm de diámetro interior en su base menor, 90 ± 3 mm de diámetro interior en una base mayor y 75 ± 3 mm de altura.
- Varilla para apisonado con un peso de 340 ± 15 g y terminada en un extremo en una superficie circular plana para el apisonado, de 25 ± 3 mm de diámetro.

B. Procedimiento.

B.1. Se reduce la muestra de campo a una muestra representativa (muestra de ensayo) por el método B: Cuarteo manual hasta obtener aproximadamente 1 kg. Se obtuvieron tres muestras de ensayo para cada tipo de agregado fino, los resultados de las tres muestras de un tipo agregado fino serán promediados.

B.2. Las muestras son secadas a peso constante a una temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ y luego son cubiertos en agua durante 24 horas. Luego se decanta el agua evitando la pérdida de finos.

B.3. Se extiende el agregado para someterla a un proceso de secado uniforme exponiéndola a una corriente de aire y removiéndola constantemente, hasta que las

partículas no se adhieran entre si (condición saturada superficialmente seca). Esto se verificará por intervalos, colocando suficiente muestra en el molde cónico y golpeando la superficie suavemente 25 veces con la varilla de apisonado; luego se levantará el molde y el cono de arena debe derrumbarse.

B.4. Se introduce 500 gramos de material preparado (saturado superficialmente seco) en el frasco volumétrico, para después llenar parcialmente con agua a una temperatura de 23 ± 2 °C hasta la marca de 500 cm³. Se debe eliminar las burbujas de aire.

B.5. Volver a llenar el frasco con agua hasta los 500 cm³.

B.6. Se determina el peso del frasco, muestra y el agua añadida.

B.7. Después de retirar la muestra del frasco, esta es secada en horno a una temperatura de 110 ± 5 °C. Después del secado se determina el peso de la muestra.

C. Cálculos.

Para el reporte de los resultados del presente ensayo, se hace aclaración de la similitud de terminologías empleadas por la norma MTC E 205 y ASTM C 128 respectivamente:

- Peso específico de masa (P_{em}) = Gravedad Específica Seca Bulk (Comúnmente llamada Gravedad Específica Bulk).
- Peso específico de masa saturado con superficie seca (P_{ess}) = Gravedad Específica Saturada Superficialmente Seca Bulk
- Peso específico aparente (P_{ea}) = Gravedad específica seca aparente.

Para determinar los valores de las propiedades se usan las ecuaciones 2.4, 2.6, 2.8 y 2.10 (pág. 23).

D. Reportes de la Arena natural zarandeada.

Los resultados de la Arena natural zarandeada se detallan en la Tabla 29.

Tabla 29. Resultado de peso específico y absorción de la arena natural zarandeada

RESULTADO PROMEDIO DEL ENSAYO		
Peso Específico De Masa	2.62	gr/cm ³
Peso Específico De Masa Saturado Superficialmente Seco	2.66	gr/cm ³
Peso Específico Aparente	2.73	gr/cm ³
Porcentaje De Absorción	1.56%	---

E. Reportes de la arena chancada.

Los resultados promedios de la arena chancada se detallan en la Tabla 30.

Tabla 30. Resultado de peso específico y absorción de la arena chancada

RESULTADO PROMEDIO DEL ENSAYO		
Peso Específico De Masa	2.63	gr/cm ³
Peso específico de masa saturado superficialmente seco	2.67	gr/cm ³
Peso específico aparente	2.74	gr/cm ³
Porcentaje de absorción	1.58%	---

En la **Tabla 31** y **Tabla 32** se muestran el resumen de los resultados de las características físicas de ambos agregados finos, necesarios para verificar el control de calidad de los agregados finos para mezclas asfálticas que especifica el Manual de Carreteras: Especificaciones técnicas generales para construcción EG-2013 (MTC,2013).

Tabla 31. Resumen de propiedades físico - mecánicas de la arena natural zarandeada

Ensayo	Unidad	Resultado	Especificación
Equivalente de Arena	%	75.0	Mín. 70.0
Índice Plástico < N° 200	%	NP	NP
Peso unitario seco suelto	%	1439.0	...
Peso unitario seco varillado	%	1640.0	...
Impurezas orgánicas	%	Aceptable	----

Tabla 32. Resumen de propiedades físico - mecánicas de la arena gruesa triturada

Ensayo	Unidad	Resultado	Especificación
Equivalente de Arena	%	78.0	Mín. 70
Índice Plástico < N° 200	%	NP	NP
Peso unitario seco suelto	%	1435.0	...
Peso unitario seco varillado	%	1642.0	...
Impurezas orgánicas	%	Aceptable	...

4.1.2.6. Peso Específico y Absorción de Agregados Gruesos (MTC E 206, 2016 y ASTM C 127).

A. Equipos y Materiales utilizados en la Prueba.

- Balanza, con capacidad mínima de 5000 g y sensibilidad de 0.5 g, además debe de estar equipada con un dispositivo de suspensión para la cesta de malla de alambre, que estará sumergida en un recipiente con agua.
- Cesta con malla de alambre, con aberturas del tamaño del tamiz N° 6 (3.36 mm) y recipiente con agua para sumergir la cesta.

- Tamiz de 4.75 mm (N° 4).
- Horno de tamaño adecuado, capaz de mantener una temperatura uniforme de $110^{\circ} \pm 5^{\circ}\text{C}$.

B. Procedimiento.

B.1. Se reduce la muestra de campo a una muestra representativa (muestra de ensayo) por el método B: Cuarteo manual, Luego se descarta todo el material que pase el tamiz N° 4 (4.75 mm) hasta obtener como mínimo 2 kg para nuestro tipo de agregado grueso (TMN ½”); esto según la **Tabla 33**. Se obtuvieron tres muestras de ensayo, los resultados de las tres muestras serán promediados.

Tabla 33. Peso mínimo de la muestra de ensayo

Tamaño máximo nominal, mm.	Peso Mínimo de Muestra, Kg.
12,5 (1/2) o menos	2 (4,4)

Nota: Tomado y adaptado del “Manual de Ensayos de Materiales” por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones. 2016.

B.2. Las muestras se secan a peso constante a una temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ y luego son sumergidos por 24 ± 4 horas en agua.

B.3. Las muestras se sacan del agua y son secadas superficialmente con ayuda de una toalla absorbente, haciendo rodar las partículas sobre la toalla hasta desaparecer toda la película de agua visible.

B.4. Se obtiene el peso de la muestra en su condición saturada superficialmente seca, con aproximación de 1 gramo.

B.5. La muestra saturada superficialmente seca se coloca en la cesta y se determina el peso de la muestra sumergida en agua a una temperatura entre $23^{\circ}\text{C} \pm 1.7^{\circ}\text{C}$. La muestra se retira del cesto y es llevado al horno para ser secado hasta tener un peso constante.

B.7. Se retira del horno para dejarlo enfriar hasta que tenga una temperatura ambiente y se pesa.

C. Cálculos.

Para el reporte de los resultados del presente ensayo, se hace aclaración de la similitud de terminologías empleadas por la norma MTC E 206 y ASTM C 127 respectivamente:

- Peso específico de masa (P_{em}) = Gravedad Específica Seca Bulk (Comúnmente llamada Gravedad Específica Bulk).
- Peso específico de masa saturado con superficie seca ($P_{e_{ss}}$)= Gravedad Específica Saturada Superficialmente Seca Bulk.
- Peso específico aparente (P_{ea})= Gravedad específica seca aparente.

Para determinar los valores de las propiedades se usan las ecuaciones 2.5, 2.7, 2.9 y 2.11 (pág. 23). Los datos y resultados detallados del ensayo se observan en el Anexo B, en esta sección solo se procederá a mostrar el resultado final en la **Tabla 34**.

D. Reportes de la piedra chancada.

Tabla 34. Resultado de peso específico y absorción del agregado grueso

RESULTADO PROMEDIO DEL ENSAYO		
Peso específico de masa	2.65	gr/cm ³
Peso específico de masa saturado superficialmente seco	2.68	gr/cm ³
Peso específico aparente	2.74	gr/cm ³
porcentaje de absorción	1.25%	---

En la **Tabla 35** se muestra el resumen de los resultados de las características físicas del agregado grueso, necesarios para verificar el control de calidad de los agregados para mezclas asfálticas que especifica el Manual de Carreteras: Especificaciones técnicas generales para construcción EG-2013 (MTC,2013).

Tabla 35. Resumen de características físico - mecánicas de la piedra triturada

Ensayo	Unidad	Resultado	Especificación
Equivalente de Arena	%
Partículas con una cara fracturada	%	75.0	...
Partículas con dos caras fracturadas	%	70.0	90/70
Partículas chatas y alargadas	%	14.2	10% máx.
Índice Plástico < N° 200	%	NP	...
Peso unitario seco suelto	%	1455.0	...
Peso unitario seco varillado	%	1578.0.0	...
Impurezas orgánicas	%	Aceptable	...

4.1.3. Cemento asfáltico.

El cemento asfáltico usado en la investigación proviene de la refinería La Pampilla y su clasificación por penetración es PEN 85-100. Los certificados son presentados en el Anexo G de la presente tesis. Se resumen sus propiedades en la **Tabla 36**:

Tabla 36. *Reporte de propiedades del cemento asfáltico*

PROPIEDADES	ENSAYOS	
	ASTM/OTROS	RESULTADOS
PENETRACIÓN		
Penetración a 25° C, 100 g. 5 s. 1/10 mm	D 5/AASHTO T 4R	87
VOLATILIDAD		
Gravedad Especifica a 15.6 °C/15.6 °C	D 70 / AASHTO T 228	1.0175
Punto de Inflamación. °C	D92/AASHTO T 48	300.0
FLUIDEZ		
Punto de Ablandamiento. °C	D 36	47.0
Viscosidad cinemática a 100 °C, cSt	D 445	2729
Viscosidad cinemática a 135 °C; cSt	D 2170 /AASHTO T 201	341
ENSAYO DE PELÍCULA FINA		
Pérdida por Calentamiento, % rn	D 1754 / AASHTO T 179	0.17
Penetración retenida. 100g, 5s, 1/10 mm. %	D 5 / AASHTO T 49	57.5
Ductilidad del residuo a 25° C, 5 cm/min, cm	D 113/ AASHTO T 51	107.1
OTROS		
Índice de Penetración	UNE 104-281 /1-5	-0.6

4.2. Etapa II: Diseño de mezclas asfálticas.

4.2.1. Diseño de mezcla asfáltica patrón-Método Marshall.

El diseño de mezclas se realizó con el método Marshall, el primer diseño corresponde a la mezcla asfáltica Patrón (Sin adición de fibras), aquí el objetivo será determinar las proporciones para esta mezcla.

4.2.1.1. Selección de clase y parámetros de diseño de la mezcla Asfáltica.

La mezcla patrón tendrá las siguientes características tipificadas en el Manual de Carreteras: Especificaciones técnicas generales para construcción EG-2013.

- ❖ Mezcla asfáltica en caliente (MAC).
- ❖ Gradación de agregados para mezcla asfáltica en caliente tipo MAC -2 (**Tabla 37**, pág. 122).

- ❖ Requisitos para mezcla de concreto bituminoso, para la Clase de mezcla A; del cual se tomarán los parámetros de diseño (Ver **Tabla 19**, pág. 90).

Para determinar el óptimo contenido de asfalto se elaborarán 18 especímenes, compuestos por 6 grupos de tres especímenes homogéneos, cada grupo tendrán distintos porcentajes de asfalto. Estos porcentajes de asfalto serán en aumentos progresivos del 0.5%, el primer contenido de asfalto será del 4 %. Resultando en seis porcentajes de asfalto los cuales son: (a) 4%, (b) 4.5%, (c) 5%, (d) 5.5%, (e) 6%, y (f) 6.5%.

4.2.1.2. Cálculo de proporciones de los agregados para combinación.

Aquí el objetivo será determinar los porcentajes de cada árido para realizar la mezcla de agregados, de tal forma que la granulometría resultante de la mezcla encaje en el Huso especificado “MAC-2”. Cabe señalar que los agregados empleados deben cumplir con los requerimientos del Manual de Carreteras: Especificaciones técnicas generales para construcción EG-2013.

Los agregados usados fueron ensayados y así mismo reportaron propiedades satisfactorias cumpliendo con las especificaciones. Los reportes de los ensayos y control de calidad se encuentran en el anexo B.

La combinación de agregados propuesta expone:

- ❖ 35 % de Piedra chancada de ½” de TMN.
- ❖ 25 % de Arena natural zarandeada.
- ❖ 40 % de Arena Chancada.

En la **Tabla 37**, se muestra los porcentajes de pasantes de la mezcla de agregados.

La FIGURA 42. muestra la curva granulométrica de la combinación de agregados y el Huso Granulométrico MAC-2, que demuestra un ingreso satisfactorio del agregado combinado dentro de las especificaciones.

Tabla 37. Mezcla Teórica de Agregados para Gradación MAC-2

Tamiz	mm.	Porcentajes pasantes (%)				
Agregados	<i>pedra 3/4"</i>	Arena Natural	Zarandeada	Arena Chancada	<i>Mezcla</i>	MAC-2
Proporciones		<i>35.0%</i>	<i>25.0%</i>	<i>40.0%</i>	<i>100.0%</i>	
1"	25.400	100.0	100.0	100.0		100
3/4"	19.050	100.0	100.0	100.0	100.0	100
1/2"	12.700	51.4	100.0	100.0	83.0	80-100
3/8"	9.525	14.9	100.0	100.0	70.2	70-88
N.º 4	4.760	0.3	93.4	90.4	59.6	51-68
N.º 8	2.360	0.06	72.8	76.8	48.9	---
N.º 10	2.000	0.0	68.1	72.4	46.0	38-52
N.º 40	0.420		36.9	37.3	24.1	17-28
N.º 80	0.180		16.5	17.8	11.2	8-17
N.º 200	0.074		7.0	9.1	5.4	4-8
pasa						

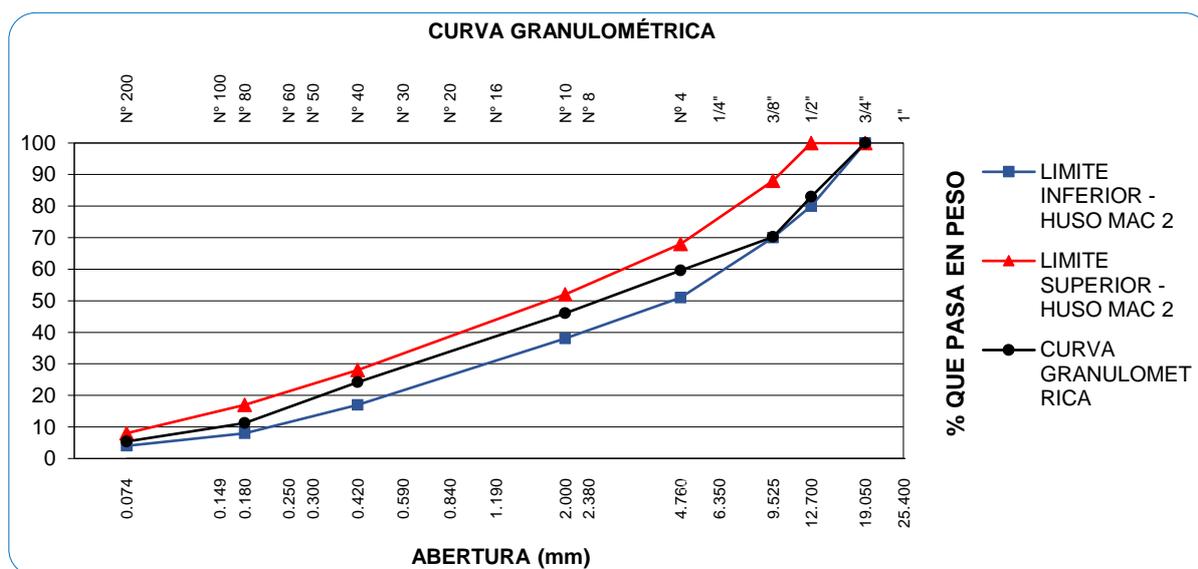


FIGURA 42. Representación de curva granulométrica para el agregado combinado.

4.2.1.3. Resistencia de Mezclas Bituminosas Empleando el Aparato Marshall, MTC-E 504.

ASTM D 6926: “Standard Practice for Preparation of Bituminous Specimens Using Marshall Apparatus” and ASTM D 6927: “Standard Test Method for Marshall Stability and Flow of Bituminous Mixtures”.

El objetivo es determinar a partir de la preparación y compactación de especímenes de mezcla bituminosa para pavimentación, de altura nominal de 64 mm y 102 mm de diámetro, el

diseño de una mezcla asfáltica y calcular sus diferentes parámetros de comportamiento, por medio del método manual Marshall.

4.2.1.3.1. Equipos y materiales.

A. Equipos y materiales para la preparación de los especímenes.

- Molde ensamblado compuesto por: (a) moldes cilíndricos, de 4" de diámetro interior (101.6 mm); (b) placas de base plana; y (c) collarines de extensión. Todos estos componentes son estandarizados por la norma ASTM-D6927.
- Extractor de Especímenes para mezclas asfálticas.
- Martillos de Compactación con manubrio sostenido manualmente (tipo I) operado a mano. El martillo tendrá un pie de compactación plano con un tornillo y una masa deslizante de $4,54 \pm 0,01$ kg con caída libre de $457,2 \pm 1,5$ mm.
- Pedestal de Compactación.
- Sostén de Molde para espécimen.
- Horno termostáticamente controlado.
- Herramientas de mezclado, cucharones de acero y espátulas para batido y mezclado a mano.
- Termómetros calibrados, con rangos de temperatura de 10 a 200 °C con sensibilidad de 3°C.
- Balanza, con aproximación al menos de 0,1 g para las bachadas de mezcla.
- Tamices de 12.5 mm (1/2"), 9.5 mm (3/8"), 4.75 mm (N° 4) y 2.36 mm (N° 8).

B. Equipos Para El Ensayo De Estabilidad Y Flujo.

- Cabezal de Ruptura, Consiste en dos semi-cilindros, con un radio de curvatura interior de 50.8 mm (2") de acero enchapado. El segmento inferior termina en una base plana con dos varillas perpendiculares que sirven de guía.
- Máquina de Carga a Compresión, con una velocidad uniforme de 50.8 mm/min. Dispositivo de Medida de Carga digital y medidor flujo dividido en centésimas de milímetro.
- Baño de agua con 150mm (6") de profundidad mínima y controlado termostáticamente para mantener la temperatura a $60^{\circ} \pm 1^{\circ}$ °C con un falso fondo perforado.

4.2.1.3.2. Determinación de la temperatura de mezcla y compactación.

La determinación de las temperaturas se realiza según la carta de viscosidad del cemento asfáltico empleado.

A. Temperatura de Mezcla.

- El cemento Asfáltico será calentado a una temperatura tal, que se obtenga una viscosidad entre 170 ± 20 cP (1 centipoises= 10^{-3} Pa.s).
- Para el cemento asfaltico usado se determina una temperatura entre 145 °C y 151 °C aproximadamente.

B. Temperatura de Compactación.

- Sera la Temperatura que produzca en el cemento asfaltico una viscosidad de 280 ± 30 cP.
- Para el cemento asfaltico usado se determina una temperatura entre 135 °C y 140 °C aproximadamente.; a continuación, se presentan los parámetros A y VTS utilizados para determinar las temperaturas de mezcla y compactación para el cemento asfaltico PEN 85-100:

$$A = 11.072 ; VTS = -3.7242$$

Estos valores se obtuvieron de la regresión lineal entre el log-log de la viscosidad (en centipoises) y el log temperatura (en grados Rankine²³), también conocida como la relación A y VTS. Usando resultados de viscosidades, punto de ablandamiento y penetraciones del asfalto convencional PEN 85-100.

En la **Tabla 38** se muestra tres de los puntos utilizados para generar la regresión lineal.

²³ Para convertir grados Celsius (°C) a Rankine (°R) se usa la expresión siguiente: $^{\circ}R = ^{\circ}C \times \frac{9}{5} + 491.67$

Tabla 38. Regresión lineal para relación A y VTS

Pto	Ensayo			Abcisa	Ordenada
	Tipo	Result.	Convers. a viscosidad (Poise)	Log. Temp. (°R)	Log Log Visc. (cP)
1	Penetración a 25°C	87 dmm	Ec. 2.27	2.7297	0.9102
2	Punto de ablandamiento	47 °C	13 000	2.7606	0.7863
3	Viscosidad cinemática	341 cSt	Valor x 0.948	2.8661	0.3996

El gráfico muestra un eje X etiquetado como 'Log (Temp, °Rankine)' con valores que van de 2.7000 a 2.9000 en incrementos de 0.0200. El eje Y está etiquetado como 'Log (Log viscosidad, Cp)' y va de 0.0 a 1.2 en incrementos de 0.2. Tres puntos de datos están marcados con círculos rojos. Una línea de regresión negra los conecta, con la ecuación $y = -3.7242x + 11.072$ mostrada en azul.

Los rangos de temperatura de mezcla y compactación se muestran en la **Tabla 39**:

Tabla 39. Rango de temperatura para mezcla y compactación

	η (Pa.s)	η (cP)	log log η	log T_R	T_R	T (°C)
Viscosidad Min. de Mezcla	0.15	150	0.3377	2.8823	762.6	151
Viscosidad Max. de Mezcla	0.19	190	0.3577	2.8769	753.3	145
Viscosidad Min. Compactación	0.25	250	0.3798	2.8710	743.0	140
Viscosidad Max. Compactación	0.31	310	0.3964	2.8665	735.4	135

4.2.1.3.3. Preparación de los Especímenes Marshall (ASTM D 6926, 2010).

- A. Secar los agregados hasta obtener un peso constate, entre 105°C a 110 °C, después del secado, separar los agregados por tamizado en las siguientes fracciones: (a) 12.5 mm (1/2”), (b) 9.5 mm (3/8”), (c) 4.75 mm (N° 4), (d) 2.36 mm (N° 8), y (e) menores a 2.36 mm (N° 8).

La separación en fracciones recomendada para cada agregado se muestra en la FIGURA 43.



FIGURA 43. Fracciones recomendadas para separar los agregados (ASTM D 6926).

B. Ya fijada la composición porcentual de cada tipo de agregado para obtener el HUSO-MAC 2, se determina la cantidad de cada fracción por tipo de agregado para producir una bachada que resultara en un espécimen compactado de 63.5 ± 2.5 mm, vale decir; los pesos del agregado combinado y asfalto sumarán 1250 gramos, la fórmula de trabajo se muestra en la Tabla 40.

Tabla 40. Proporciones y porcentajes de retenidos de los agregados

Proporciones		40 %(A)	25 %(B)	35 %(C)	100%
		Arena Chancada	Arena Zarandeada	Piedra Chancada	MEZCLA DE AGREGADOS
Tamiz	mm	% de Retenido	% de Retenido	% de Retenido	% de Retenido $\frac{A \times a_i + B \times b_i + C \times c_i}{100}$
1/2"	12.500			48.60(c ₁)	17.01
3/8"	9.500			36.50(c ₂)	12.78
Nº 4	4.760	9.60(a ₃)	6.60(b ₃)	14.60(c ₃)	10.60
Nº 8	2.360	13.60(a ₄)	20.60(b ₄)	0.24(c ₄)	10.67
pasante la Nº 8		76.80(a ₅)	72.80(b ₅)	0.06(c ₅)	48.94
TOTAL		100%	100%	100%	100%

C. De la granulometría de agregados se tienen los porcentajes de retenido para cada fracción separada anteriormente. Por lo que se procede a formular las siguientes ecuaciones para determinar los pesos de cada fracción para una bachada específica:

$$1250 = \text{Peso de Asfalto} + \text{Peso de la Mezcla de Agregados} \quad (4.1)$$

$$\text{Peso de Asfalto} = \frac{P_b}{100} \times 1250 \quad (4.2)$$

Donde:

P_b Porcentaje de Asfalto para el peso total de la mezcla (4.0%, 4.5%, 5.0%, 5.5%, 6.0% y 6.5% respectivamente).

D. Peso para cada fracción de la Arena Chancada:

$$PESO_{Fraccion\ i} = A \times \frac{a_i}{10^4} \times \text{Peso de la Mezcla de Agregados} \quad (4.3)$$

Donde:

$PESO_{Fraccion\ i}$ Peso para cada determinada fracción (1/2", 3/8", N.º 4, N.º 8 y pasante la N.º 8).

a_i Porcentaje de retenido para cada determinada fracción de la Arena Chancada.

De forma análoga se calculan los pesos de cada fracción para la arena zarandeada y piedra chancada.

- E. Se pesan las cantidades de cada fracción de los agregados para cada espécimen por separado y se calientan a una temperatura por encima de, pero sin exceder la temperatura de mezcla por más de 28 °C por tratarse de mezclas con cemento asfáltico.
- F. Calentar suficiente cantidad de cemento asfáltico a Temperatura de Mezcla (150° C), para producir 18 especímenes (tres especímenes para cada porcentaje de asfalto y con porcentajes a incrementos de 0.5%).
- G. Se cargar el contenedor de la mezcla con el agregado caliente y se mezcla en seco (por 5 s, aprox.). Luego se forma un cráter en el agregado mezclado seco y se pesa la cantidad requerida de material bituminoso a la temperatura de mezcla dentro de la mezcla.
- H. Mezclar los agregados y el material bituminoso rápidamente hasta que estén cubiertos totalmente por 60 s para bachadas simples (un espécimen).
- I. Verificar la temperatura de la mezcla, si está sobre la temperatura de compactación, se deja enfriar; y si está por debajo, se elimina la mezcla y se prepara una nueva muestra.

4.2.1.3.4. Compactación de los Especímenes.

Ya determinada los golpes por cara en la sección 4.2.1.1. *Selección De Tipo De Mezcla* (75 golpes por cara), se realiza los pasos siguientes para la compactación:

- A. Se limpia completamente el molde ensamblado y la cara del martillo de compactación y éstos son calentados a temperatura entre 90 y 150 °C. Se coloca un pedazo de papel no absorbente cortado del tamaño de la base del molde antes de introducir la mezcla.
- B. Se coloca la mezcla en el molde, luego se chusea la mezcla con una espátula calentada 15 veces alrededor del perímetro y 10 veces en el interior. Colocar otra pieza de papel no absorbente en la parte superior de la mezcla.
- C. La temperatura de la mezcla inmediatamente antes de la compactación deberá estar entre los límites de las temperaturas de compactación, 140 ± 5 °C.
- D. Colocar el molde ensamblado en el pedestal de compactación con el sujetador y aplicar 75 golpes con el martillo. Remover la placa de base y el collar y voltear reensamblando el molde. Y aplicar el mismo número de golpes de compactación en la cara reversa del espécimen.
- E. Después de la compactación, se remueve el collar y la placa de base. Permitir que el espécimen se enfríe lo suficiente para prevenir algún daño y extraer el espécimen de su molde. Cuidadosamente se transfiere el espécimen a una superficie suave y plana, luego se somete a una corriente de aire para enfriarla a temperatura ambiente.

4.2.1.3.5. Ensayo de Estabilidad y Flujo.

Se ensayarán tres especímenes que tendrán el mismo tipo de agregado, calidad y gradación; la misma fuente de ligante, grado y cantidad. Además, los tres especímenes tendrán la misma preparación: (a) temperatura, (b) compactación, y (c) enfriamiento.

- A. Los especímenes deberán enfriarse a temperatura ambiente después de la compactación. Durante el enfriamiento serán colocados sobre una superficie suave y plana.
- B. Se determinará el *Peso Específico Aparente y Peso Unitario de Mezclas Asfálticas Compactadas Empleando Especímenes Saturados con Superficie Seca (MTC E 514 y ASTM D 2726)*.

Equipos y materiales similares a los del ensayo de Peso Específico y Absorción de Agregados Gruesos (MTC E 206, 2016 y ASTM C 127).

B.1. Procedimiento: Ya que los especímenes compactados son completamente secos:

- Se determina la masa pesando la muestra después de que haya permanecido en el aire a temperatura ambiente durante al menos una hora. Se designa esta masa como “A”.
- Se sumerge el espécimen en un baño con agua a 25 ± 1 °C por cinco minutos (provoca una condición de saturado) y luego se pesa en agua (a 25 ± 1 °C), Se designa a este peso como “C”.
- El espécimen es retirado del agua, secando rápidamente la superficie con una toalla húmeda (condición Saturada Superficialmente Seca) y se pesa luego al aire. Llamase “B” a este peso.

B.2. Cálculo:

- Para determinar si los especímenes necesitan ser parafinados, se calcula el porcentaje de agua absorbida por los especímenes (en base al volumen) como sigue:

$$\% \text{ agua absorbida} = \frac{B - A}{B - C} \times 100 \quad (4.4)$$

Si el porcentaje de agua absorbida por los especímenes excede en 2%, se determina que no necesitan el recubrimiento con parafina y se continua con el proceso.

Para el tipo de mezcla densa que se diseña no es común que haya porcentajes de agua absorbida mayor al 2%. Pero se realiza la comprobación, donde todos los especímenes tienen porcentajes de agua absorbida menor al 2% que se resume en la **Tabla 41**.

- La terminología utilizada por la ASTM D 2726 y MTC E 514 son respectivamente: (a) Peso específico Aparente o Gravedad Específica Bulk, y (b) Peso Unitario o Densidad. Se utilizarán las fórmulas siguientes:

$$\text{Gravedad Específica Bulk}(G_{mb}) = \frac{A}{B - C} \quad (4.5)$$

$$\text{Peso unitario} = G_{mb} \times 997.0 \quad (4.6)$$

Donde:

A = Peso del espécimen seco en el aire, g.

B-C = Peso del volumen de agua correspondiente al volumen del espécimen a 25 °C.

B = Peso en el aire del espécimen saturado con superficie seca, g.

C = Peso del espécimen en agua, g

G_{mb}= Peso específico Aparente o Gravedad Específica Bulk.

997.0= Peso unitario del agua en kg/m³ a 25 °C (0,9970 g/cm³).

- Se determina el peso específico bulk promedio de todas las probetas hechas con el mismo contenido asfáltico. El resumen de todos los cálculos se muestra en la **Tabla 4I**.
- C. Para la estabilidad de Marshall y la determinación de flujo de acuerdo con la ASTM D6926, solo se usarán los especímenes hechas con el mismo contenido asfáltico que tengan una Gravedad Específica Bulk dentro de ± 0.020 del promedio. La **Tabla 4I** muestra que todas las briquetas están dentro del límite, por lo que se usaran todas ellas para determinar la estabilidad y flujo.
- D. Se determinará el Espesor o Altura de Especímenes Compactados de Mezclas de Pavimento Asfáltico (MTC E 507, 2016 y ASTM D 3549).
- D.1. Procedimiento:
- Para especímenes de mezclas asfálticas densas para pavimento (menor de 10% de vacíos de aire), con bordes verticales uniformes, puede obtenerse el espesor dividiendo el volumen del espécimen entre el área de su sección transversal. Son ejemplos los especímenes compactados en el laboratorio para el ensayo Marshall, razón por la cual se opta el método de Volumen/Área para determinar el espesor de los especímenes.
 - Se determina el área en cm² de un plano horizontal a través del espécimen aproximadamente equidistante de la superficie superior y de la inferior y aproximadamente perpendicular a sus lados verticales.

$$Area (cm^2) = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi \times 10.16^2}{4} = 81.10 \text{ cm}^2$$

- Se debe determinar el volumen en cm³ del espécimen mediante el método de ensayo MTC-E 514 y ASTM D2726. Realizado anteriormente y de los datos extraídos se resuelve:

$$Volumen = \frac{B - C}{1} \quad (4.7)$$

Donde:

El denominador (1) es el peso unitario del agua en g/cm³, el cual se considera igual a la unidad para los fines de esta norma.

- Se Calcula el espesor promedio del espécimen en la siguiente forma:

$$Espesor, cm = \frac{Volumen (cm^3)}{81.10 (cm^2)} \quad (4.8)$$

La **Tabla 4I** muestra el resumen de los resultados.

Tabla 41. Reporte de espesores, pesos específicos aparentes y pesos unitarios.

% Cemento Asfáltico	No. briqueta	Peso seco en el aire (gr) A	Peso en agua (gr) C	Peso en el aire cond. SSS (gr) B	% agua absorbida	Volumen (cm ³)	Espesor (cm)	Gravedad Específica Bulk		Diferencia de Gravedad específica Bulk entre promedio e individual (± 0.020)	Peso unitario (gr/cm ³)
								Individ.	Promed.		
4.00%	1	1244.9	711.0	1254.0	1.68	543.0	67.00	2.293	2.276	-0.02	2.286
	2	1237.4	703.0	1248.0	1.94	545.0	67.25	2.27		0.01	2.263
	3	1239.1	700.0	1247.0	1.44	547.0	67.50	2.265		0.01	2.258
4.50%	4	1242.6	711.0	1250.0	1.37	539.0	66.50	2.305	2.316	0.01	2.298
	5	1242.3	714.0	1248.0	1.07	534.0	65.75	2.326		-0.01	2.319
	6	1255.4	720.0	1262.0	1.22	542.0	66.75	2.316		0.00	2.309
5.00%	7	1238.9	717.0	1246.0	1.34	529.0	65.25	2.342	2.333	-0.01	2.335
	8	1246.8	716.0	1254.0	1.34	538.0	66.25	2.317		0.02	2.31
	9	1239.6	718.0	1248.0	1.58	530.0	65.25	2.339		-0.01	2.332
5.50%	10	1234.3	715.0	1239.0	0.90	524.0	64.50	2.356	2.369	0.01	2.349
	11	1228.6	716.0	1232.0	0.66	516.0	63.75	2.381		-0.01	2.374
	12	1251.8	728.0	1256.0	0.80	528.0	65.00	2.371		0.00	2.364
6.00%	13	1239.0	716.0	1242.0	0.57	526.0	64.75	2.356	2.356	0.00	2.349
	14	1247.1	723.0	1250.0	0.55	527.0	65.00	2.366		-0.01	2.359
	15	1246.3	718.0	1249.0	0.51	531.0	65.50	2.347		0.01	2.34
6.50%	16	1239.1	709.0	1242.0	0.54	533.0	65.75	2.325	2.343	0.02	2.318
	17	1226.7	708.0	1227.0	0.06	519.0	64.00	2.364		-0.02	2.357
	18	1245.6	716.0	1248.0	0.45	532.0	65.50	2.341		0.00	2.334

E. Estabilidad Marshall y Ensayo de Flujo (ASTM D 6927).

- Las muestras pueden acondicionarse para la prueba tan pronto como alcancen la temperatura ambiente y debe completarse dentro de 24 horas después de la compactación.
- Calentar el agua del baño a 60°C y colocar los especímenes por un período de 30 minutos. Se debe mantener el baño a 60°C ±1°C.
- El cabezal deberá estar a temperatura de 20 a 40 °C.
- Luego de calentar los especímenes el tiempo necesario, se irán sacando uno a la vez, quitando el exceso de agua y colocándolo rápidamente en la mordaza Marshall.
- Colocar el flujómetro en posición sobre una de las líneas guías. El tiempo desde la remoción del espécimen del baño hasta la determinación de la carga máxima no debe exceder los 30 segundos.
- Aplicar la carga al espécimen por medio de una razón constante de 50 mm/min. Hasta que la carga decrezca según lo indique el medidor de carga. Registrar la máxima carga indicada en la máquina de carga como estabilidad Marshall. Anotar la lectura del dial micrómetro(flujómetro) en el instante en que la máxima carga empieza a decrecer. El valor del flujo normalmente se da en unidades de 0,25 mm (0.01” pulg).

4.2.1.3.6. Cálculos.

Los especímenes moldeados en laboratorio deberán satisfacer los requerimientos de espesor de $63,5 \pm 2,5$ mm. Los especímenes dentro de la tolerancia de espesor pueden ser corregidos basados en el volumen del espécimen. De la **Tabla 42** se pueden observar los factores de corrección, además la razón de correlación es empleada de la siguiente manera:

$$A = B \times C \quad (4.9)$$

Donde:

A = Estabilidad corregida.

B = Medida de la estabilidad (carga).

C = Razón de correlación.

Tabla 42. Factores de Correlación para estabilidades (A)

Volumen del espécimen, cm ^{3B}	Espesor del espécimen ^B		Razón de la Correlación
	mm	Pulg	
483 - 495	60,3	2,38 (2 3/8)	1,09
496 - 508	61,9	2,44 (2 7/16)	1,04
509 - 522	63,5	2,50 (2 1/2)	1
523 - 535	65,1	2,56 (2 9/16)	0,96
536 - 546	66,7	2,62 (2 5/8)	0,93
547 - 559	68,3	2,60 (2 11/16)	0,89

Nota: Tomado del "Manual de Ensayo de Materiales." por el MTC.

4.2.1.3.7. Precisión y dispersión (ASTM D 6927).

A. Para la Estabilidad de Marshall:

Los criterios para juzgar la aceptabilidad de los resultados de la prueba de estabilidad de Marshall obtenidos por este método de prueba se dan en la **Tabla 43**. Se considera que un resultado de la prueba es el promedio de las pruebas en tres especímenes de un mismo contenido de asfalto.

Tabla 43. Criterios para juzgar la aceptabilidad de las estabilidades

Prueba y tipo de Índice	Coficiente de variación (C.V) (% de la media) ^A .	Rango aceptable de dos resultados. (% de la media) ^A .
Precisión dentro del laboratorio.	6	16
Precisión entre laboratorios.	16	43

^A Estos números representan, respectivamente, los límites (1s%) y (d2s%), cómo se describe en la Práctica ASTM C670²⁴.

B. Para el flujo Marshall:

Los criterios para juzgar la aceptabilidad de los resultados de la prueba de flujo Marshall obtenidos por este método de prueba se dan en la **Tabla 44**. Se considera que un resultado de la prueba es el promedio de las pruebas en tres especímenes de un mismo contenido de asfalto.

²⁴ ASTM C670: Standard Practice for Preparing Precision and Bias Statements for Test Methods for Construction Materials.

Tabla 44. Criterios para juzgar la aceptabilidad de los flujos

Prueba y tipo de Índice	Coficiente de variación (C.V) (% de la media) ^A .	Rango aceptable de dos resultados. (% de la media) ^A .
Precisión dentro del laboratorio.	9	26
Precisión entre laboratorios.	20	58

Donde se desprenden las ecuaciones de la ASTM C 670:

$$1s\% = C.V = \frac{\text{Desviación Estandar Apropriada}}{\text{Promedio de las mediciones}} \times 100 \quad (4.10)$$

$$d2s\% = \frac{d2s(\text{diferencia entre dos resultados})}{\text{Promedio de las mediciones}} \times 100 \quad (4.11)$$

Para la determinación de la estabilidad y flujo Marshall de acuerdo a la Práctica D 6926, emplee solo aquellos especímenes replicados que tienen peso específico bulk dentro de $\pm 0,02$ de su promedio. La **Tabla 45** muestra los resultados de flujo y la estabilidad, con sus respectivas correcciones. Además de los cálculos del coeficiente de variación, que indican estar dentro de los límites especificados, por lo que los resultados son aceptados para su análisis.

4.2.1.4. Tabulación y Gráfico de los Resultados de Ensayo.

Los resultados se tabulan según la **Tabla 45**, los cálculos se adjuntan en el anexo C.1.

Tabla 45. Tabulación de resultados para cada porcentaje de asfalto

% C.A. EN PESO DE LA MEZCLA	4%	4.5%	5%	5.5%	6%	6.5%
Estabilidad Corregida (Lb)	2460	2580	2390	2360	2220	1990
Peso Unitario (gr/cm ³)	2.269	2.309	2.326	2.362	2.349	2.336
Flujo (mm)	2.75	2.75	3.25	3.25	3.75	4.25
% Vacíos Totales De La Mezcla (VTM)	9.60	7.32	5.92	3.72	3.53	3.35
% Vacíos En Agregado Mineral (VMA)	17.06	16.06	15.88	15.01	15.92	16.83
% Vacíos llenos de asfalto (VFA)	43.79	54.46	62.75	75.25	77.84	80.20
Coficiente de variación (Estab)	5.76	2.27	5.94	5.53	5.63	6.04
Coficiente de variación (Flujo)	5.25	5.25	4.44	8.88	7.70	5.88

Se grafican las siguientes relaciones:

- A. Contenido de asfalto Vs. Porcentaje de vacíos (VTM), que se muestra en la FIGURA 44.

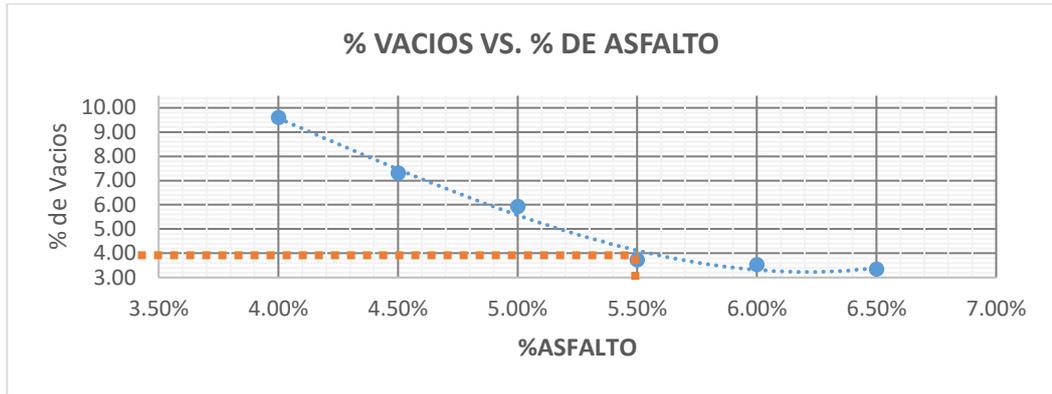


FIGURA 44. Relación del porcentaje de Vacíos y el contenido de Asfalto.

B. Contenido de asfalto Vs. Estabilidad Marshall; que se muestra en la FIGURA 45.

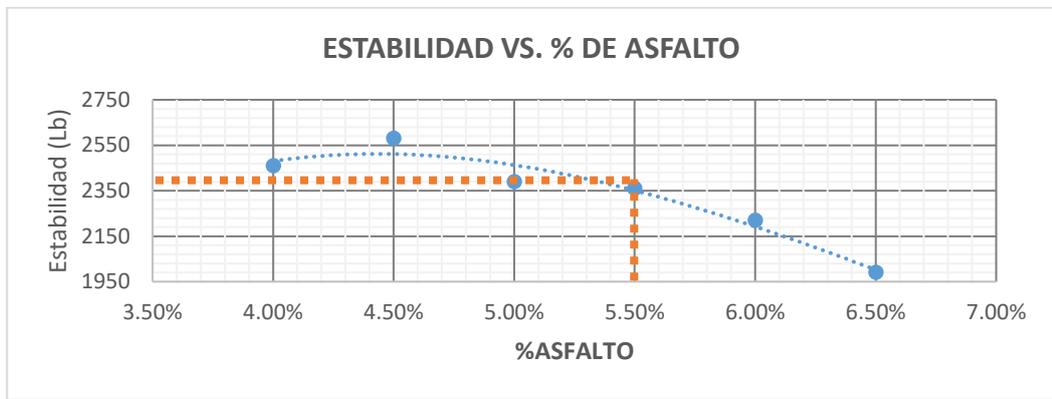


FIGURA 45. Relación de la Estabilidad y Porcentaje de Asfalto.

C. Contenido de asfalto Vs. Flujo, que se muestra en la FIGURA 46.

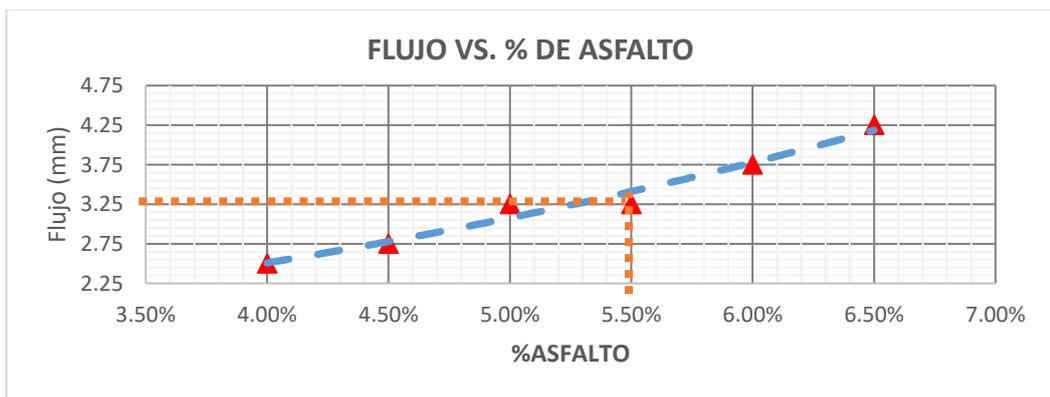


FIGURA 46. Relación del Flujo Y porcentaje de asfalto.

D. Contenido de asfalto Vs. Densidad (por unidad de peso), que se muestra en la FIGURA 47.

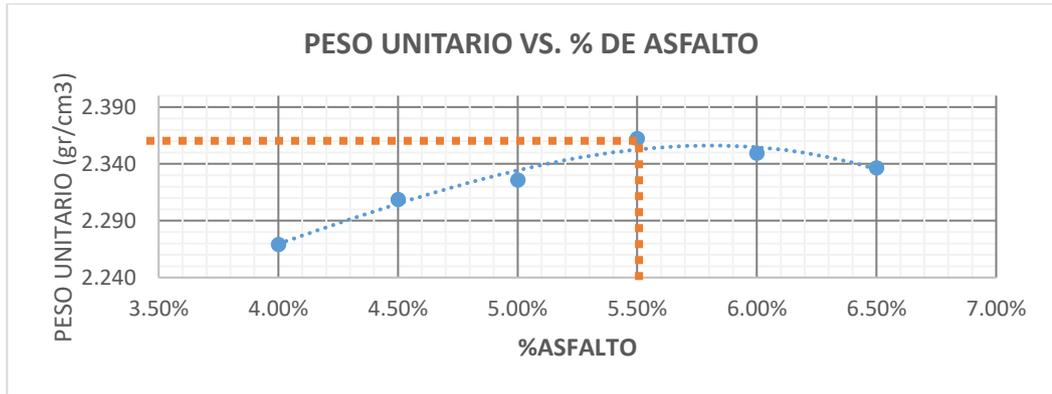


FIGURA 47. Relación del peso unitario y Porcentaje de Asfalto.

E. Contenido de asfalto Vs. Porcentaje de vacíos del agregado mineral, VMA. Que se muestra en la FIGURA 48.

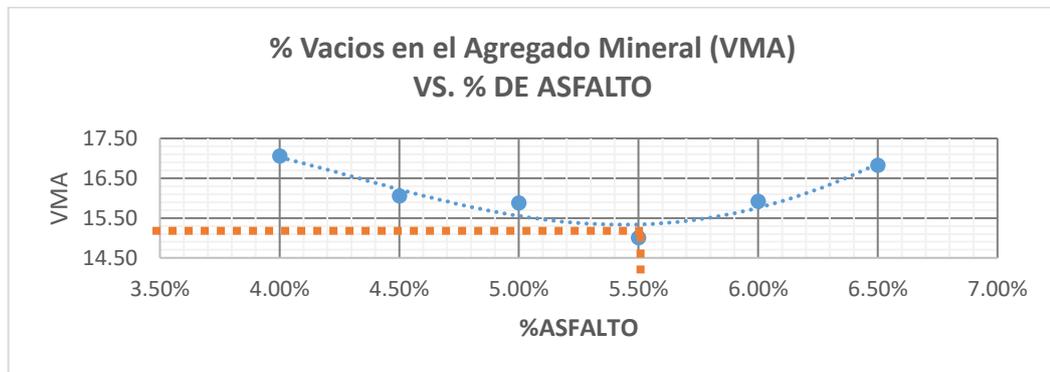


FIGURA 48. Relación del porcentaje de Vacíos en el agregado mineral y el contenido de Asfalto.

F. Contenido de asfalto Vs. Porcentaje de vacíos llenos de asfalto, VFA. Que se muestra en la FIGURA 49.

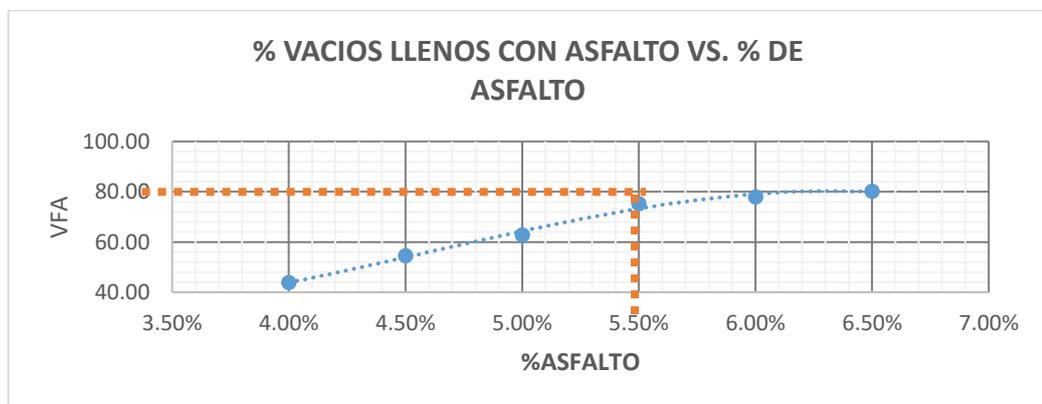


FIGURA 49. Relación del porcentaje de Vacíos Llenos con Asfalto y porcentaje de Asfalto.

4.2.1.5. Determinación del Óptimo Contenido de Asfalto

El óptimo contenido de asfalto para la presente investigación será aquel que luego del ensayo logre alcanzar un 4 % de vacíos con aire (VTM), además respecto a la Estabilidad y Flujo logre alcanzar una estabilidad igual o superior a 8.15 kN (831 kg o 1832 Lb); pero teniendo un flujo entre 2 y 3.5 mm (8 a 14 centésimas de pulgada).

Los resultados de las tabulaciones se reflejan en la **Tabla 46**, donde se puede ver que los criterios cumplen con un porcentaje del 5.5 % del contenido de cemento asfáltico. Por lo que de esta manera se determina un porcentaje óptimo de contenido asfáltico del 5.5%.

Tabla 46. Resultados del óptimo contenido de asfalto

	Contenido de Asfalto= 5.5%	Especificaciones MTC Mezcla "A" - Marshall	Obs.
Estabilidad (Lb)	2360	1832 (min)	Cumple
Flujo (mm)	3.25	2-3.5	Cumple
Porcentaje de vacíos con aire (%)	4.00	3-5	Cumple
VMA (%)	15.25	14 (min)	Cumple

4.2.1.6. Proporciones para la mezcla asfáltica patrón.

La **Tabla 47** presenta los pesos para cada proporción de los materiales.

Tabla 47. Pesos de materiales para la mezcla asfáltica patrón

MATERIALES	MALLA	PESO (GR)
Arena chancada (40% Agreg. Total)	# 4	45.4
	# 8	64.3
	< #8	362.8
	SUB TOTAL	472.5
Arena natural zarandeada (25% Agreg. Total)	# 4	19.5
	# 8	60.8
	< #8	215.0
	SUB TOTAL	295.3
Piedra de 3/4" (35% Agreg. Total)	1/2"	200.9
	3/8"	150.9
	# 4	60.4
	# 8	1.0
	< #8	0.2
	SUB TOTAL	413.4
AGREGADO TOTAL		1181.2
CEMENTO ASFÁLTICO (5.5% Peso total del spec.)		68.8
PESO TOTAL DEL ESPÉCIMEN		1250.0

4.2.2. Diseños de mezclas asfálticas modificadas con fibras acrílicas.

El diseño para mezclas asfálticas modificadas con fibras acrílicas; (a) TIPO A: adiciones de fibras de 20 mm, (b) TIPO B: adiciones de fibras de 12 mm, y (c) TIPO C: adiciones de fibras de 8 mm respectivamente se basarán en los resultados del diseño patrón. Manteniendo las proporciones de peso del cemento asfáltico, agregado grueso y finos. Para cada tipo de mezcla se harán ocho dosificaciones distintas respecto al peso total de los agregados y cemento asfáltico (1250 gr), lo que se traduce en ocho subdiseños para cada tipo de mezcla; donde los porcentajes de adición serán: (1) 0.05%, (2) 0.10%, (3) 0.15%, (4) 0.20%, (5) 0.30%, (6) 0.50%, (7) 0.70% y (8) 1.00%.

$$\text{Peso de (Agregados + Asfalto)} = 1250 \text{ gr} \quad (4.12)$$

$$\text{Peso total de la mezcla modificada} = 1250 + A \times 1250 \quad (4.13)$$

Donde: A es el porcentaje de adición de fibra respectiva.

4.2.2.1. Proporciones para las mezclas asfálticas modificadas con fibras acrílicas.

Bajo las premisas indicadas, en la **Tabla 48** se presentan las proporciones para las distintas dosificaciones de fibras acrílicas.

Tabla 48. Pesos de componentes para las mezclas modificadas con fibras acrílicas

DISEÑO TIPO: "A: Fib. de 20 mm", "B: Fib. de 12 mm" y "C: Fib. de 8 mm"								
Materiales	Peso (gr)							
Arena Chancada	472.5							
Arena Zarandeada	295.3							
Piedra Chancada 3/4"	413.4							
Asfalto	68.8							
Sub-Total	1250							
Fibra Acrílica	0.63	1.25	1.88	2.5	3.75	6.25	8.75	12.5
(gr; %Sub -Total)	0.05 %	0.10 %	0.15 %	0.2 %	0.30 %	0.50 %	0.70 %	1.00 %
TOTAL (gr)	1250.63	1251.25	1251.88	1252.50	1253.75	1256.25	1258.75	1262.50

4.3. Etapa III: Ensayos a las mezclas asfálticas.

En la presente etapa se realizará una descripción de los ensayos utilizados para la recolección de datos del comportamiento en las mezclas modificadas y patrón. La secuencia

de ensayos realizados sigue el mismo modelo que los realizados para determinar el óptimo contenido de asfalto para el diseño de mezcla patrón (metodología Marshall). Por lo que sólo se detallara de manera resumida, el proceso de modificación de las mezclas asfálticas durante su preparación.

4.3.1. Preparación de los especímenes bituminosos (ASTM D 6926, 2010).

- A. Los agregados fueron secados hasta que se obtuvieron pesos constantes.
- B. Se realizó la separación de los agregados por tamizado en fracciones: (a) 12.5 mm (1/2”), (b) 9.5 mm (3/8”), (c) 4.75 mm (N° 4), y (d) 2.36 mm (N° 8).
- C. Se pesan las proporciones de cada tipo de agregado y son calentados a 160° C (mayor a la temperatura de mezcla – 155° C - sin exceder en 28° C). Se calienta suficiente cantidad de cemento asfáltico a 155° C.
- D. Se pesa la cantidad necesaria de fibras acrílicas para un tipo de dosificación respectivo. Este procedimiento es obviado para los especímenes patrón.
- E. Cuando los agregados para una bachada y el cemento asfáltico hayan alcanzado las temperaturas respectivas, se pesa la cantidad requerida de asfalto en un recipiente calentado previamente a 155° C y se añade la cantidad necesaria de fibra. Inmediatamente se procede a mezclar y uniformizar ambos elementos, luego esta mezcla es llevada al horno por 5 minutos a 155° C. Este procedimiento es obviado para los especímenes patrón.
- F. Luego los agregados son cargados en el contenedor donde se realizará la mezcla y pasan a ser mezclados con una espátula por 5 segundos aproximadamente. Inmediatamente después se forma un cráter con los agregados en el centro del recipiente.
 - ✓ Para especímenes patrón; el contenedor se pone sobre una balanza con aproximación de 0.1 gramos. Se tara y se pesa la cantidad requerida de cemento asfáltico, este debe estar a temperatura de mezcla.
 - ✓ Para mezclas con fibras; el contenedor se pone sobre una balanza con aproximación de 0.1 gramos para corroborar el peso del asfalto-fibra. Se tara y se pesa el asfalto-fibra del recipiente del paso E.
- G. Se mezclan los componentes dentro del recipiente rápidamente hasta que estén cubiertos totalmente por el ligante asfáltico. Se debe verificar la temperatura de la mezcla, debiendo estar por encima de la temperatura de compactación que será de 145° C. Y mezclas con temperaturas menores serán desechadas, y cuando las

mezclas tengan mayor temperatura se dejan enfriar hasta que tengan la temperatura de compactación.

- H. Los moldes ensamblados previamente son calentados conjuntamente con el martillo de compactación a 100°C.
- I. Se coloca el papel no absorbente del tamaño de la base del molde y la mezcla es vertida en el molde, luego es chuseada 15 veces alrededor del perímetro y 10 en el interior. Se coloca otro papel no absorbente en la cara superior de la mezcla y se verifica que la temperatura antes de la compactación; esté dentro de los límites de la temperatura de compactación (145 ± 5 °C).
- J. Ya el molde ensamblado en el pedestal de compactación, se aplica 75 golpes con el martillo. Completado los 75 golpes en la primera cara, se remueve la placa base y collar. Y el anillo contenedor de la mezcla es volteado y reensamblado para compactar la cara reversa con otros 75 golpes. Terminada la compactación, el espécimen pasa a una corriente de aire para su enfriado y posterior extracción.

4.3.2. Comportamiento a la fatiga de mezclas asfálticas modificadas.

Para evaluar la fatiga de las mezclas asfálticas, se hace uso de fórmulas predictivas (con variables de entrada extraídos de ensayos en las mezclas asfálticas y viscosidades de los ligantes) y a su vez los resultados predictivos se correlacionarán con el ensayo realizado en vigas para determinar la resistencia a la flexión (con cargas a los tercios del tramo).

La investigación evalúa el comportamiento a la fatiga, de las mezclas con dosificaciones óptimas para cada tipo de fibra acrílica y del patrón.

A. Cálculo del módulo complejo dinámico.

Siendo el Módulo Complejo Dinámico (E^*) una variable de entrada necesaria para conocer el comportamiento a la fatiga, se utiliza la ecuación de predicción 2.26 (pág. 66).

La viscosidad del ligante (η) para el estudio, se analiza para una temperatura de 4°C y un grado de envejecimiento a corto plazo utilizando el Sistema Global de Envejecimiento (MEPDG-AASHTO 2004) usando la ecuación 2.29 (pág.68) y los valores de código recomendados de la **Tabla 17**.

La viscosidad original (η_{orig}) se determina mediante la ecuación 2.28 (pág. 67), donde los parámetros A y VTS fueron obtenidos previamente mediante regresión lineal de la ecuación mencionada. Para esto se realizan ensayos de: (a) penetración a 15°C y 25°C, (b) viscosidades

Brookfield a tres temperaturas, (c) viscosidad cinemática a 135°C, (d) viscosidad absoluta a 60°C, y (e) punto de ablandamiento. Para la conversión a la viscosidad en poises de los resultados de los ensayos se utiliza la **Tabla 16** (pág. 68). El reporte de ensayos de viscosidades y penetraciones se adjunta en el Anexo I.

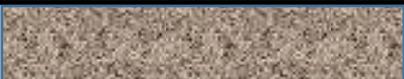
Para el estudio se toma como frecuencia de carga 10 Hz, relacionada con la velocidad del vehículo en vías con tráfico pesado en la ciudad de Huancayo.

B. Cálculo de la deformación a tracción y numero de repeticiones a la falla.

Para la determinación o predicción del comportamiento a la fatiga de las mezclas asfálticas se utiliza la ecuación 2.48 (pág.79).

Para las fórmulas de predicción será necesario una configuración estructural típica de un pavimento flexible para calcular la deformación por tracción en la zona inferior de la carpeta asfáltica, que se muestra en la **Tabla 49** donde se exponen las características necesarias de cada capa.

Tabla 49. Configuración estructural típica del pavimento flexible para estudio

4 pulg.		CARPETA	$E_1 = f$ (Diseño Patrón, Fibras) $\mu_1 = 0.30$
8 pulg.		BASE	$E_2 = 42,000.00$ psi $\mu_2 = 0.50$
10 pulg.		SUB-BASE	$E_3 = 28,000.00$ psi $\mu_3 = 0.50$
		SUB-RASANTE	$E_4 = 8,000.00$ psi $\mu_4 = 0.50$

Donde $\mu_{2,3}$ y μ_4 o $PR_{2,3}$ y PR_4 son las relaciones de Poisson de las capas granulares (base, sub-base y sub-rasante respectivamente). Por lo general $\mu_{2,3}$ y μ_4 se asume igual a 0.5, valor en el cual se representa la condición más crítica (saturada y en condición no drenada). Además, se tiene una relación de Poisson de la capa asfáltica μ_1 o PR_1 igual a 0.3, en referencia de los valores típicos de relaciones de Poisson que se presentan en la AASHTO 2004 (Guía de Diseño mecanístico empírica) que se exponen en la **Tabla 50**.

Tabla 50. Rangos típicos de relaciones Poisson para HMA de gradación densa

Temperatura °F	Temperatura °C	μ range
40 – 70 °F	4°C a 21°C	0.20 – 0.30
70 – 100 °F	21°C a 38°C	0.30 – 0.40

Se determinará la deformación a tracción (ϵ_t) mediante el software KENPAVE. La carga para el análisis será para un eje simple dual (Load = 1) como se ilustra en la FIGURA 50.

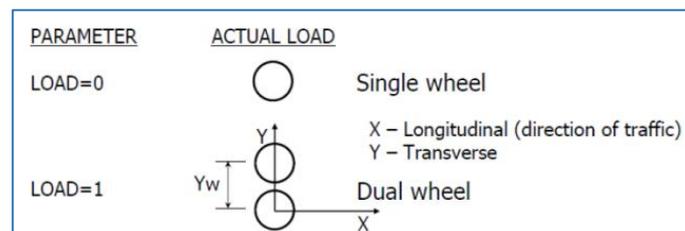


FIGURA 50. Gráfico para el ingreso de cargas y puntos de análisis.

Para el CR (radio de contacto de áreas cargadas circulares), se toma el valor de **5.90 pulgadas (15cm)**; el CP (presión de contacto en áreas cargadas circulares) se toma un valor de **80 psi (5.6 kg/cm²)**. Además, el YW (espaciado de centro a centro entre dos ruedas duales a lo largo del eje) será de **14 pulgadas (35.0 cm)**. Para los NPT (número de puntos en las coordenadas x e y) que se analizarán, son presentados en la **Tabla 51**, del cual se tomara el punto de análisis donde presente mayor deformación a tracción (Punto N° 1 y/o Punto N° 5).

Tabla 51. Número de puntos en las coordenadas x e y en las ruedas

Punto N°	X PT (coordenadas x de los puntos a analizar) - Pulgadas	Y PT (coordenadas y de los puntos a analizar) - Pulgadas
1	0	0
2	0	5.9
3	0	7
4	0	8.1
5	0	14

4.3.3. Ensayo realizado en vigas para determinar la resistencia a la flexión (con cargas a los tercios del tramo).

Para la correlación de los resultados de la resistencia a la fatiga por Modelos predictivos y la resistencia real, se procedió a realizar vigas para el ensayo a resistencia a la flexión con cargas a los tercios del tramo. Una viga para cada dosificación optima de fibras (A, B y C) y

un espécimen para el patrón, resultando en cuatro vigas de 152x152x532 mm aproximadamente. Esto se muestra en la FIGURA 51 y FIGURA 52.

El ensayo de rotura se realizó a una temperatura de 21 °C, donde los especímenes permanecieron a dicha temperatura por aproximadamente 3 horas. La longitud de la luz libre entre apoyos para determinar el módulo de rotura era de 432 mm (17”).



FIGURA 51. Vigas de mezclas asfálticas de 6”x6”x21”.



FIGURA 52. Ensayo de resistencia a la flexión en vigas con cargas a los tercios del tramo.

El procedimiento para la mezcla, compactación y rotura se adjunta en el Anexo J. La fractura en todas las vigas se inicia en la zona de tensión, dentro del tercio medio de la luz libre, por lo que el módulo de rotura se calcula con la siguiente ecuación:

$$R = \frac{P \cdot l}{b \cdot d^2} \quad (4.14)$$

R = módulo de rotura MPa (psi),

P = máxima carga aplicada indicada por la máquina de ensayo N (lbf),

l = longitud libre entre apoyos mm, (pulg),

b = ancho promedio de la muestra mm, (pulg), y

d = altura promedio de la muestra mm, (pulg).

4.4. Etapa IV: Toma de decisión por métodos multicriterio discretos (MAUT y AHP).

Para la investigación se analizan cuatro alternativas las cuales son:

- (1) Mezcla convencional (patrón).
- (2) Mezcla modificada tipo “A” con la dosificación óptima de fibras de 20 mm.
- (3) Mezcla modificada tipo “B” con la dosificación óptima de fibras de 12 mm.
- (4) Mezcla modificada tipo “C” con la dosificación óptima de fibras de 8 mm.

A. Árbol de decisión.

En la **Tabla 52** se presenta el árbol de requerimientos, el despliegue del árbol conduce a ocho indicadores y se ha prestado especial atención en que el número de indicadores no sea excesivo en cada grupo homogéneo (rama del árbol), entendiendo que una cifra de 4 indicadores, como máximo, en cada grupo es una cifra aceptable en cuanto a la manejabilidad.

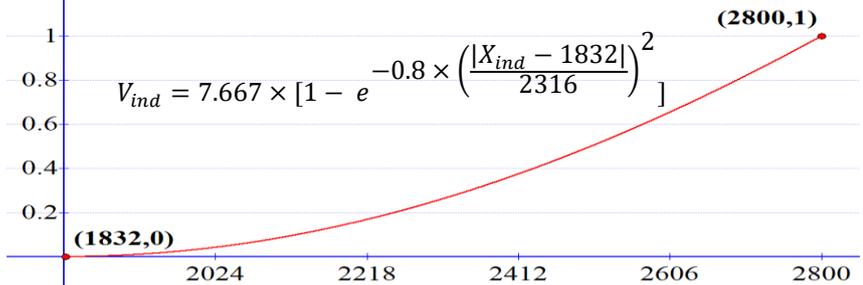
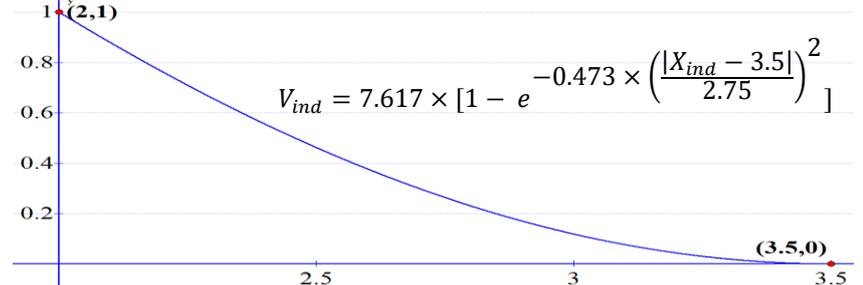
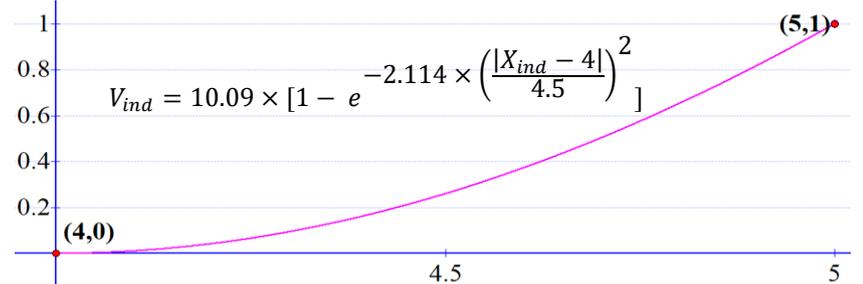
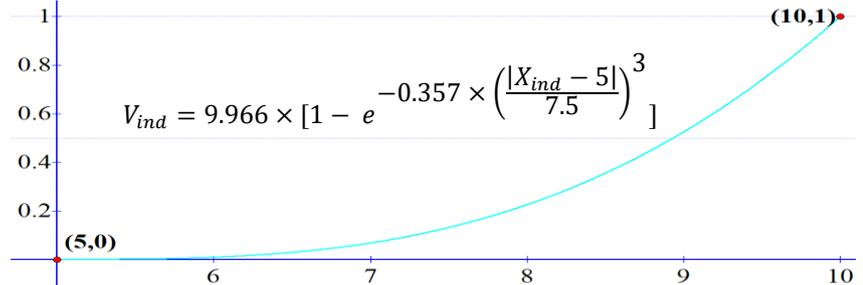
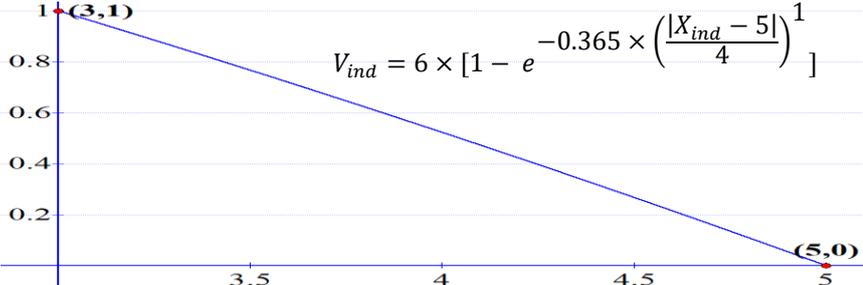
Tabla 52. *Árbol de requerimientos*

Req.	Criterio	Indicador
Estructural	Resistencia Mecánica	Estabilidad (Lb.)
		Flujo (mm.)
		Numero de repeticiones a la falla $N_f (10^6)$
		Resistencia a la flexión $R (Kg/cm^2)$
	Volumetría	Vacíos con aire (%)
		Vacíos en el agregado mineral (%)
Económico	Costo	Costo de preparación por m3 (S/.)
		Costo de espaciado y compactado por m2 (S/.)

B. Construcción de la función de valor.

En la **Tabla 53** se muestran las formas y ecuaciones respectivas de las funciones valor, el procedimiento se describe en la sección 2.2.8. Análisis multicriterio con métodos discretos (MAUT y A.H.P.). Pág. 91.

Tabla 53. Funciones de valor

Indicador	Forma de la función valor
Estabilidad (Lb.)	 $V_{ind} = 7.667 \times \left[1 - e^{-0.8 \times \left(\frac{ X_{ind} - 1832 }{2316} \right)^2} \right]$
Flujo (mm.)	 $V_{ind} = 7.617 \times \left[1 - e^{-0.473 \times \left(\frac{ X_{ind} - 3.5 }{2.75} \right)^2} \right]$
Numero de repeticiones a la falla N_f (10^6)	 $V_{ind} = 10.09 \times \left[1 - e^{-2.114 \times \left(\frac{ X_{ind} - 4 }{4.5} \right)^2} \right]$
Resistencia a la flexión R (Kg/cm2)	 $V_{ind} = 9.966 \times \left[1 - e^{-0.357 \times \left(\frac{ X_{ind} - 5 }{7.5} \right)^3} \right]$
Vacíos con aire (%)	 $V_{ind} = 6 \times \left[1 - e^{-0.365 \times \left(\frac{ X_{ind} - 5 }{4} \right)^1} \right]$

Indicador	Forma de la función valor
Vacíos en el agregado mineral (%)	$V_{ind} = 31.75 \times \left[1 - e^{-0.8 \times \left(\frac{ X_{ind} - 14 }{15} \right)^2} \right]$
Costo de preparación por m3 (S/.)	$V_{ind} = 8.702 \times \left[1 - e^{-0.8 \times \left(\frac{ X_{ind} - 450 }{320} \right)^4} \right]$
Costo de espaciado y compactado por m2 (S/.)	$V_{ind} = 3.336 \times \left[1 - e^{-1.97 \times \left(\frac{ X_{ind} - 3.0 }{2.3} \right)^4} \right]$

C. Ponderación de requerimientos, criterios e indicadores

Para esta investigación, se ha optado por la asignación directa de pesos debido a su facilidad de aplicación en matrices pequeñas y por la evaluación de un conjunto finito de alternativas a través de aspectos respecto a criterios representativos. Además, ésta se basa en un criterio académico, estructural e ideal. En la **Tabla 54** se muestra la matriz para los requerimientos, criterios e indicadores propuestos.

Tabla 54. Ponderación para el árbol de requerimientos

Req.	Peso _{req}	Criterio	Peso _{crit}	Indicador	Peso
Estructural	65 %	Resistencia Mecánica	75 %	Estabilidad	10 %
				Flujo	10 %
				Numero de repeticiones a la falla	25 %
				Resistencia a la flexión	55 %
		Volumetría	25 %	Vacíos con aire	60 %
				Vacíos en el agregado mineral	40 %
Económico	35 %	Costo	100 %	Costo de preparación	40 %
				Costo de esp. y compact.	60 %

Capítulo V

Resultados y análisis de la investigación

El presente capítulo expone y analiza los resultados, mediante tablas y figuras, los análisis se direccionan en base a cada una de las hipótesis planteadas. Los resultados presentados, corresponderán a los promedios de cinco especímenes para cada tipo de mezcla específica. Los resultados se presentan en los Anexos C.2.

5.1. Mezcla asfáltica patrón.

La **Tabla 55** muestra el resumen de resultados de los ensayos en la mezcla asfáltica patrón.

Tabla 55. Resultados de la Mezcla Asfáltica Patrón (0.0 % de adición de fibra)

MEZCLA ASFÁLTICA PATRÓN (MEZCLA CONVENCIONAL)		
Propiedades	Resultado	Especificaciones MTC
Estabilidad Corregida Promedio (Lb.)	2270	1832 (mín.)
Peso Unitario Promedio (gr/cm ³)	2.360	-
Flujo (mm.)	3.50	2.0 – 3.5
Vacíos totales de la mezcla VTM – Promedio (%)	3.83	3.0 – 5.0
Vacíos en el agregado mineral VMA – Promedio (%)	15.11	14 (mín.)
Vacíos llenos de asfalto VFA – Promedio (%)	74.68	-

El valor de la estabilidad de la mezcla asfáltica patrón es de **2270 Lb**, resultado de la gradación densa tipo Mac-02, con un porcentaje del cemento asfáltico de 5.50 % y sin la incorporación de fibras.

El Flujo para la mezcla patrón expone **3.50 mm** (14 centésimas de pulgada - 0.01”-).

5.2. Mezcla asfáltica modificada con fibras acrílicas de 20 mm – TIPO A.

5.2.1. Estabilidad Marshall.

La **Tabla 56** presenta el resumen de resultados de los ensayos en las mezclas asfálticas modificadas TIPO A.

Tabla 56. Resultados de mezclas asfálticas modificada con fibras acrílicas de 20 mm.

Propiedades	Patrón	MEZCLAS ASFÁLTICAS “TIPO A”							
		con adición de fibras de 20 mm.							
		+0.05%	+0.10%	+0.15%	+0.20%	+0.30%	+0.50%	+0.70%	+1.00%
Estabilidad Corregida (Lb)	2270	2360	2400	2560	2390	2320	2240	2160	2080
		mayor al patrón	mayor al patrón	máximo	mayor al patrón	mayor al patrón	menor al patrón	menor al patrón	mínimo
Peso Unitario (gr/cm ³)	2.360	2.363	2.364	2.367	2.366	2.364	2.359	2.354	2.348
Flujo (mm)	3.50	3.25	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	2.75	2.75
		menor al patrón	menor al patrón	menor al patrón	menor al patrón	menor al patrón	menor al patrón	menor al patrón	mínimo
% Vacíos totales de la mezcla	3.83	3.63	3.53	3.37	3.35	3.33	3.34	3.31	3.28
% Vacíos en el agregado mineral	15.11	15.01	15.02	14.96	15.03	15.20	15.56	15.88	16.37
% Vacíos llenos de asfalto	74.68	75.89	76.53	77.53	77.75	78.21	78.67	79.18	80.08

Se ha elaborado un diagrama de barras en la FIGURA 53 que nos permitirán analizar como varía la estabilidad conforme se le adiciona dosis de fibras acrílicas de 20 mm.

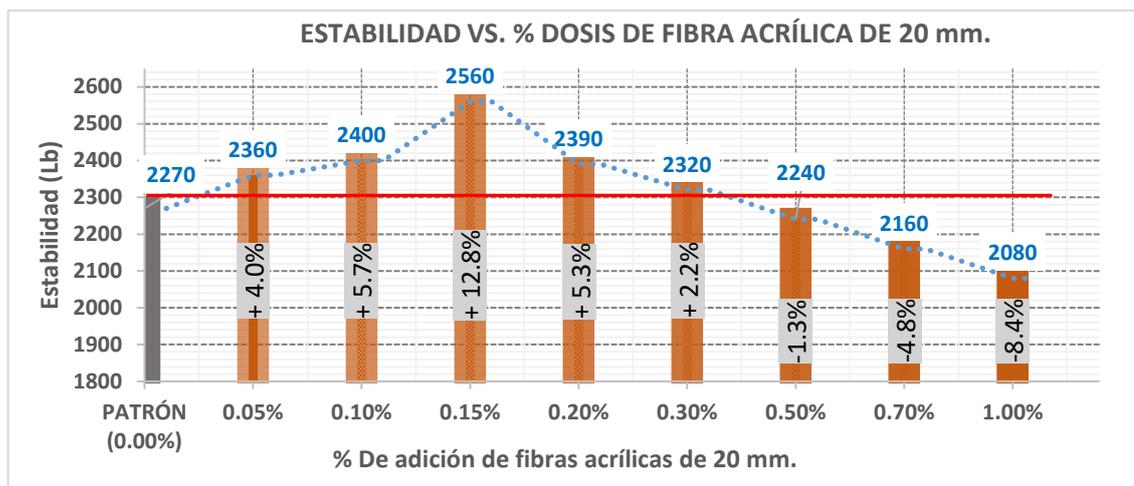


FIGURA 53. Estabilidad vs dosis de fibras acrílicas de 20 mm.

Se observa un efecto positivo en la estabilidad de las mezclas modificadas para dosificaciones menores al 0.5%, pasado este límite se evidencia una caída en la estabilidad de las mezclas. Los aumentos más importantes se presentan en dosificaciones comprendidas entre el 0.10 % y 0.20 %. La pérdida en la Estabilidad no se ve afectada en gran medida respecto al patrón, la dosificación para el 1 % de fibra acrílica de 20 mm presenta la menor estabilidad, con **2080 Lb**. La máxima estabilidad se registra para una dosificación del **0.15 %** con **2560 Lb**.

Las fibras acrílicas largas de 20 mm, exponen estos resultados debido a problemas de trabajabilidad cuando se usan dosificaciones mayores al 0.2 %, dificultando el proceso de mezclado y por ende entorpeciendo el recubrimiento de la película del asfalto en el agregado. Debido a que se presenta un fenómeno al que llamaremos ovillado, esto se presenta debido a que las fibras de 20 mm se doblan y agrupan durante el proceso de mezclado; formando una especie de ovillo en la mezcla que agrupa a la mayoría de las fibras que tratan de homogenizarse e incluirse en la mezcla.

La dosificación al **0.15 %** de adición de fibras de 20 mm, expone un incremento en la Estabilidad del **12.8 %** respecto del patrón. Para porcentajes de adiciones mayores al 0.15 % se evidencia una caída paulatina en la Estabilidad, como se mencionó, estas caídas no fueron significativas, siendo el más crítico el debilitamiento del **8.4 %** respecto del patrón para una adición del 1.00 % de fibras de 20 mm.

Siendo la dosificación óptima de fibras acrílicas de 20 mm. el 0.15 %. Se presentan las tabulaciones de las propiedades volumétricas desde la FIGURA 54 hasta la FIGURA 57.

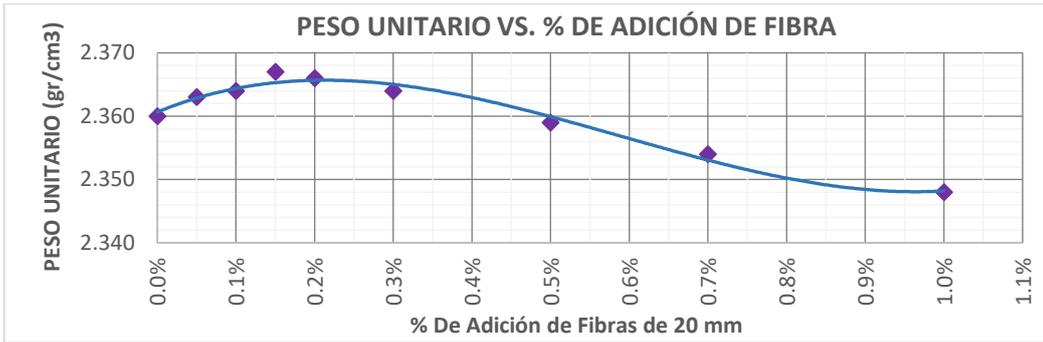


FIGURA 54. Relación del peso unitario y dosificación de Fibras de 20 mm.

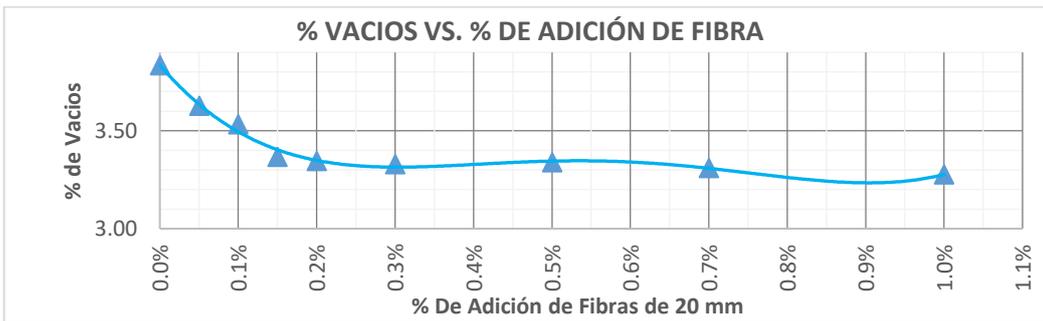


FIGURA 55. Relación del Porcentaje de Vacíos y dosificación de Fibras de 20 mm.

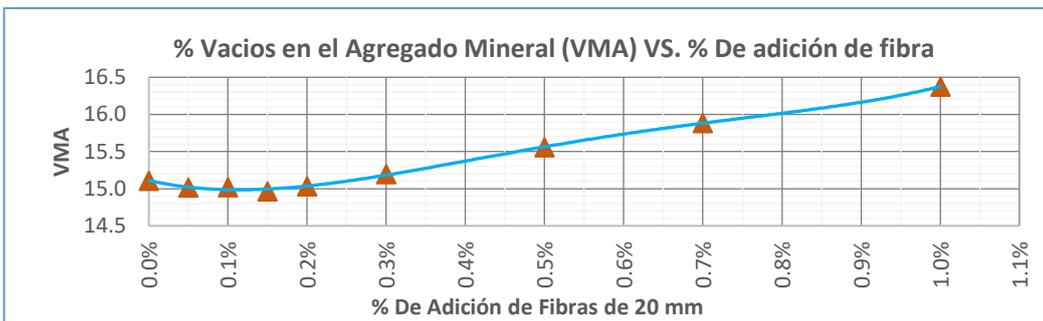


FIGURA 56. Relación del porcentaje de Vacíos en el agregado mineral y dosificación de Fibras de 20 mm.

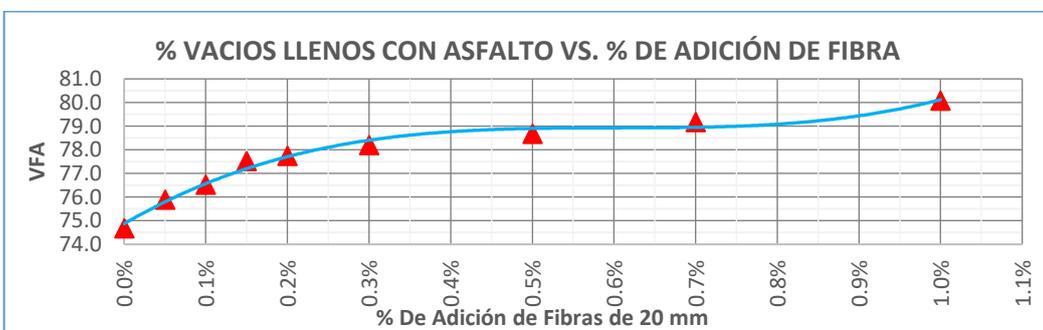


FIGURA 57. Relación del porcentaje de vacíos llenos con asfalto y dosis de fibras de 20 mm.

5.2.2. Flujo.

Se ha realizado un diagrama de líneas en la FIGURA 58 donde se representa el flujo versus los diseños de mezcla. En el eje “x” se tienen los diseños de mezcla (patrón o 0.0%, con 0.1% de fibra, con 0.15% de fibra, con 0.2% de fibra, etc.). Siendo en total 9 puntos y en el eje “y” se tiene el valor del flujo.

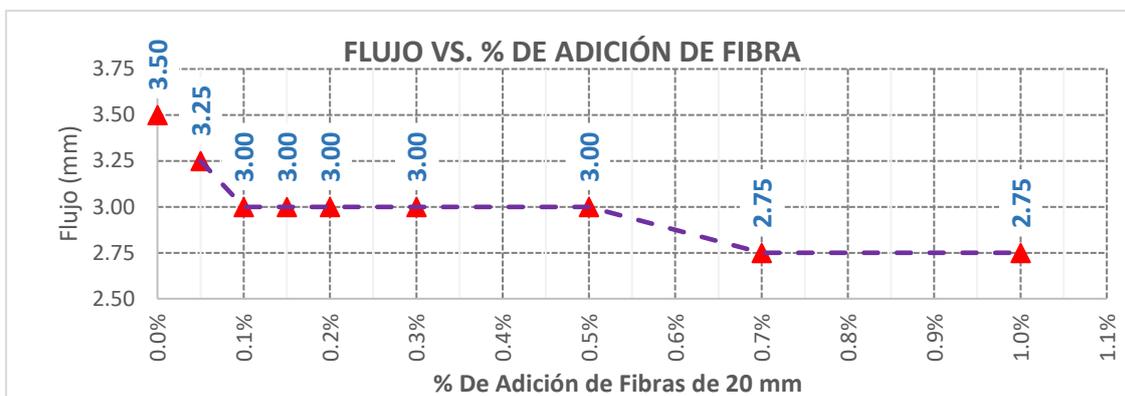


FIGURA 58. Flujo vs dosis de fibras acrílicas de 20 mm.

De los resultados, se encontró que existe un decremento del flujo de las mezclas modificadas; conforme se realizan las adiciones de fibras acrílicas de 20 mm. Se observa un menor flujo debido al aporte de la fibra, que de cierta forma hace más rígida la mezcla asfáltica modificada. Otorgándole menores deformaciones con incrementos en la capacidad de carga de fractura (estabilidad).

Para la máxima estabilidad (0.15% de adición de fibra de 20 mm) se tiene un flujo de **3.00 mm (12 centésimas de pulgada)**, es decir se da un decremento del flujo en 0.50 mm respecto del Patrón (decremento del 14 %). El flujo mínimo se presenta para la dosificación del 1.00% y 0.70% con **2.75 mm (11 centésimas de pulgada)**, que se traduce en un decremento del **21%** respecto del Patrón.

5.3. Mezcla asfáltica modificada con fibras acrílicas de 12 mm – TIPO B.

5.3.1. Estabilidad Marshall.

Se muestran los resultados encontrados en la Tabla 57, producto de las diferentes dosificaciones de fibras acrílicas de 12 mm.

Tabla 57. Resultados de mezclas Asfálticas modificada con fibras acrílicas de 12 mm.

Propiedades	Patrón	MEZCLAS ASFÁLTICAS "TIPO B"							
		con adición de fibras de 12 mm.							
		+0.05%	+0.10%	+0.15%	+0.20%	+0.30%	+0.50%	+0.70%	+1.00%
Estabilidad Corregida (Lb)	2270	2370	2500	2580	2610	2560	2270	2160	2180
		Mayor al patrón	Mayor al patrón	Mayor al patrón	Mayor/Máximo	Mayor al patrón	Igual al patrón	Menor/Mínimo	Menor al patrón
Peso Unitario (gr/cm ³)	2.360	2.364	2.368	2.371	2.371	2.369	2.365	2.360	2.353
Flujo (mm)	3.50	3.25	3.00	3.00	3.00	2.75	2.75	2.75	2.50
		Menor al patrón	Menor al patrón	Menor al patrón	Menor al patrón	Menor al patrón	Menor al patrón	Menor al patrón	Menor/Mínimo
% Vacíos totales de la mezcla	3.83	3.59	3.37	3.21	3.17	3.15	3.10	3.06	3.04
% Vacíos en el agregado mineral	15.11	14.99	14.88	14.83	14.88	15.04	15.35	15.67	16.17
% Vacíos llenos de asfalto	74.68	76.03	77.35	78.38	78.68	79.09	79.82	80.46	81.23

Del diagrama de barras en la FIGURA 59, se observa un efecto positivo en la estabilidad, este efecto inicia a la primera dosificación al 0.05% de fibras acrílicas de 12 mm y culmina al 0.50 % de dosificación. Los aumentos más importantes en la estabilidad para estas mezclas se presentan en dosificaciones comprendidas entre el 0.15 % y 0.30 %.

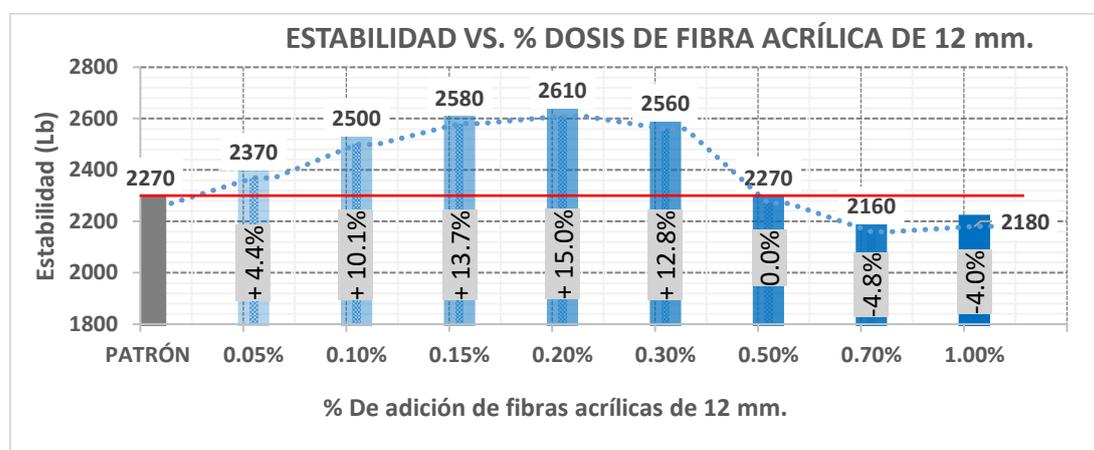


FIGURA 59. Estabilidad vs dosis de fibras acrílicas de 12 mm.

La máxima estabilidad se registra para una dosificación al **0.20 %** con **2610 Lb** (incremento en **15%** respecto al patrón).

La dosificación al 0.70 % de fibras de 12 mm presenta la menor estabilidad, con **2160 Lb** (debilitamiento del **4.8 %** respecto del patrón). Este debilitamiento resulta menor respecto al debilitamiento crítico en mezclas con fibras de 20 mm que fueron del 8.4% (para una dosificación al 1.0%). De lo visto solo se debe adicionar hasta un máximo del 0.25 % de fibras

acrílicas de 12 mm. Para producir mezclas asfálticas con estabildades mayores a una convencional.

Siendo la dosificación óptima de fibras acrílicas de 12 mm. el 0.20 %.

Las fibras acrílicas de 12 mm. al no presentar problemas de doblado durante la mezcla, mejora la trabajabilidad; presentando un incremento en la densidad con cambios de volumen en menor proporción respecto al de mezclas con fibras de 20 mm.

Se presentan las tabulaciones de las propiedades volumétricas desde la FIGURA 60 hasta la FIGURA 63. Donde se observa una mayor efectividad de la película del asfalto hasta el 0.30 % de dosificación, generando menores vacíos de aire.

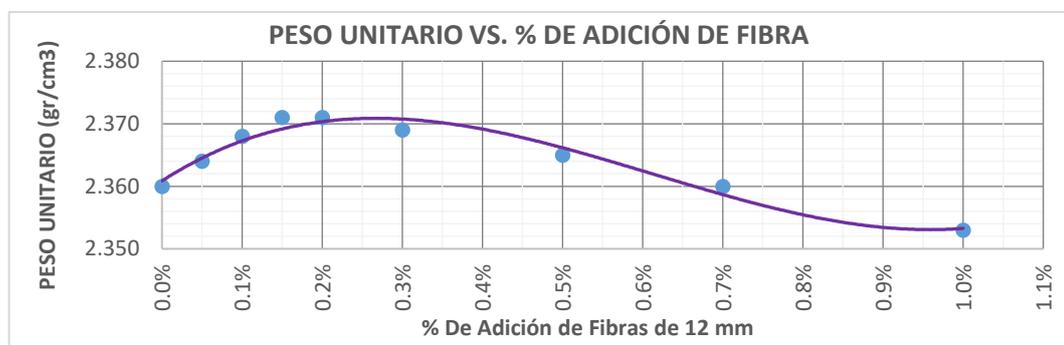


FIGURA 60. Relación del peso unitario y Porcentaje de Adición de Fibras de 12 mm.

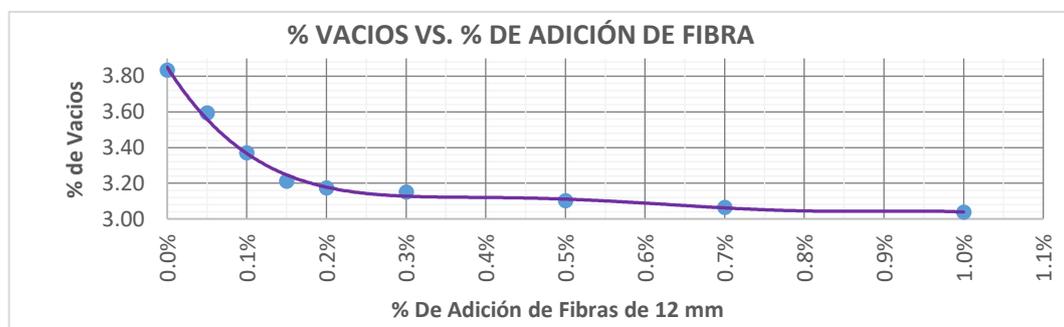


FIGURA 61. Relación del Porcentaje de Vacíos y Adición de Fibras de 12 mm.

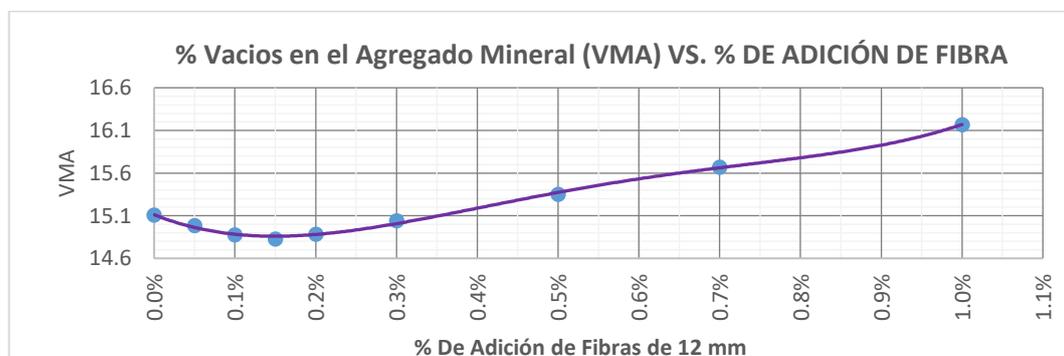


FIGURA 62. Relación del porcentaje de Vacíos en el agregado mineral y Porcentaje de adición de Fibras de 12 mm.



FIGURA 63. Relación del porcentaje de vacíos llenos con asfalto y dosis de fibras de 12 mm.

5.3.2. Flujo.

La correlación entre flujos y dosificaciones de fibra acrílica de 12 mm, se observa en la FIGURA 64.

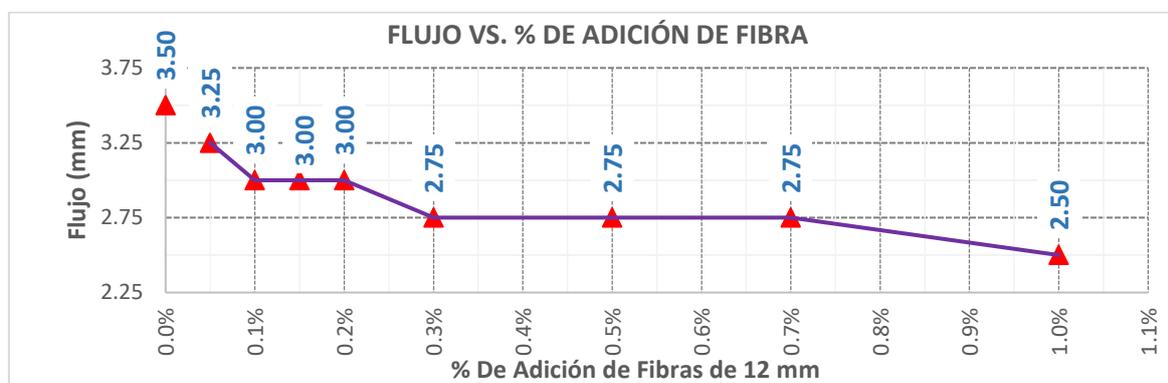


FIGURA 64. Flujo vs dosis de fibras acrílicas de 12 mm.

De las pruebas, se encontró un decremento más pronunciado en el flujo respecto de las mezclas modificadas con fibras de 20 mm.

Para la máxima estabilidad (0.20% de adición de fibra de 12mm) se tiene un flujo de **3.00 mm** (12 centésimas de pulgada), es decir se da un decremento del flujo en 0.50 mm respecto del Patrón (decremento del 14 %). El mínimo flujo se presenta para la dosificación al 1.00% con **2.50 mm** (10 centésimas de pulgada), que se traduce en un decremento del 29% respecto del Patrón.

5.4. Mezcla asfáltica modificada con fibras acrílicas de 8 mm – TIPO C.

5.4.1. Estabilidad Marshall.

La **Tabla 58** presenta el resumen de resultados de los ensayos realizados.

Tabla 58. Resultados de las mezclas Asfálticas modificada con fibras acrílicas de 8 mm.

Propiedades	Patrón	MEZCLAS ASFÁLTICAS "TIPO C"							
		con adición de fibras de 8 mm.							
		+0.05%	+0.10%	+0.15%	+0.20%	+0.30%	+0.50%	+0.70%	+1.00%
Estabilidad Corregida (Lb)	2270	2390	2470	2540	2470	2420	2310	2190	2110
		Mayor al patrón	Mayor al patrón	Mayor/Máximo	Mayor al patrón	Mayor al patrón	Mayor al patrón	Menor al patrón	Menor/Mínimo
Peso Unitario (gr/cm ³)	2.360	2.365	2.370	2.371	2.370	2.368	2.364	2.362	2.354
Flujo (mm)	3.50	3.25	3.00	3.00	2.75	2.75	2.75	2.50	2.50
		Menor al patrón	Menor al patrón	Menor al patrón	Menor al patrón	Menor al patrón	Menor al patrón	Menor al patrón	Menor/Mínimo
% Vacíos totales de la mezcla	3.83	3.56	3.31	3.22	3.21	3.16	3.13	3.01	3.01
% Vacíos en el agregado mineral	15.11	14.96	14.82	14.83	14.91	15.05	15.37	15.62	16.15
% Vacíos llenos de asfalto	74.68	76.19	77.71	78.30	78.53	79.07	79.67	80.79	81.42

Se ha elaborado un diagrama de barras en la FIGURA 65 que nos permitirán analizar como varía la estabilidad conforme se le adiciona dosis de fibras acrílicas de 8 mm.

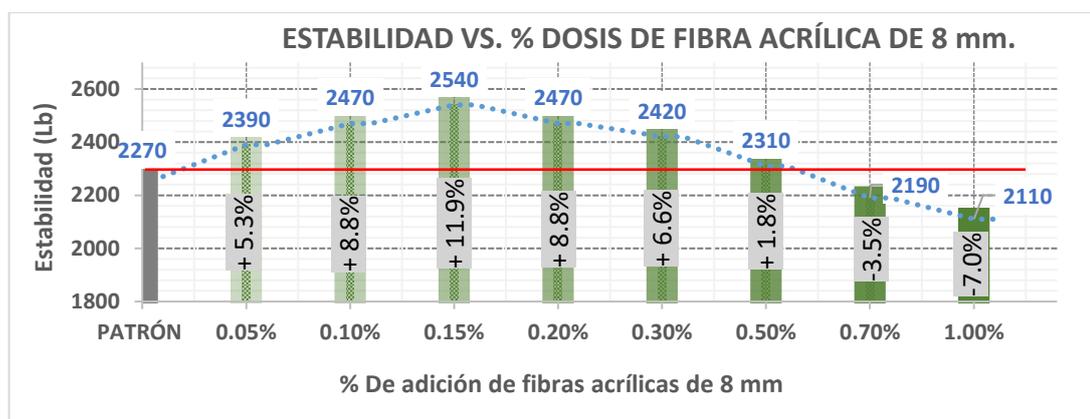


FIGURA 65. Estabilidad vs dosis de fibras acrílicas de 8 mm.

Los resultados indican que la incorporación de fibras de 8mm generan un efecto positivo en la estabilidad (crecimiento), que inicia en la primera dosificación al 0.05% hasta su punto máximo para una dosificación al 0.15%.

La dosificación del 0.15 % de fibra a acrílica de 8 mm presenta la máxima estabilidad, con **2540 Lb** (incremento en **12%** respecto al patrón).

La menor estabilidad se registra para una dosificación del 1.0 % con **2110 Lb** (debilitamiento del **7.0 %** respecto del patrón). Este debilitamiento resulta menor con relación al debilitamiento crítico en mezclas con fibras de 20 mm que fue del 8.0% (para una adición

del 1.00%), además este debilitamiento resulta mayor al debilitamiento crítico en mezclas con fibras de 12 mm que fue del 4.8% (para una adición del 0.70 %). La dosificación óptima de fibras de 8 mm, será el **0.15%**.

Las mezclas con fibras acrílicas de 8 mm, no presentan problemas de trabajabilidad hasta dosificaciones al 0.3 %, debido a la menor longitud de éstas (no presentan el fenómeno de doblado durante la mezcla facilitando su acomodamiento en la matriz). Pero la eficacia en la estabilidad de estas fibras respecto a mezclas con fibras de 12mm, resulta menor. Se presentan las tabulaciones de las propiedades volumétricas desde la FIGURA 66 hasta la FIGURA 69.

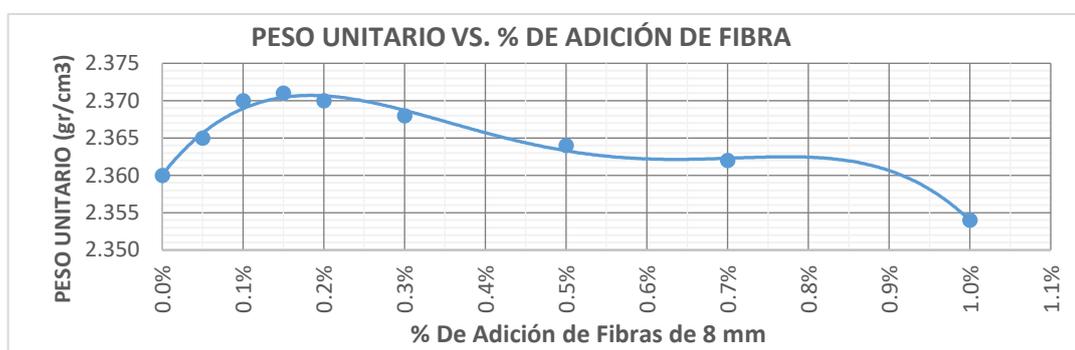


FIGURA 66. Relación del peso unitario y Porcentaje de Adición de Fibras de 8 mm.

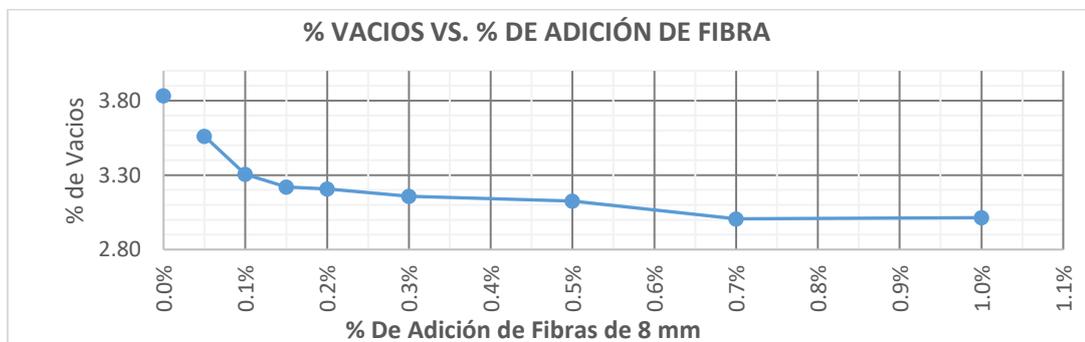


FIGURA 67. Relación del Porcentaje de Vacíos y dosificación de Fibras de 8 mm.

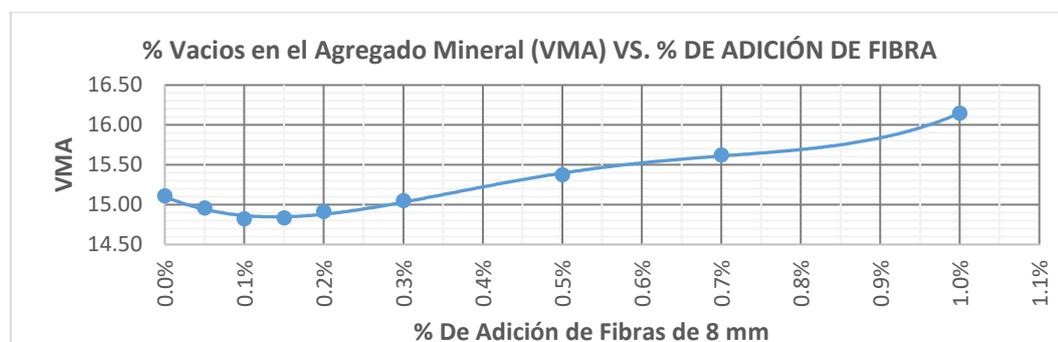


FIGURA 68. Relación del porcentaje de Vacíos en el agregado mineral y dosificación de fibras de 8 mm.

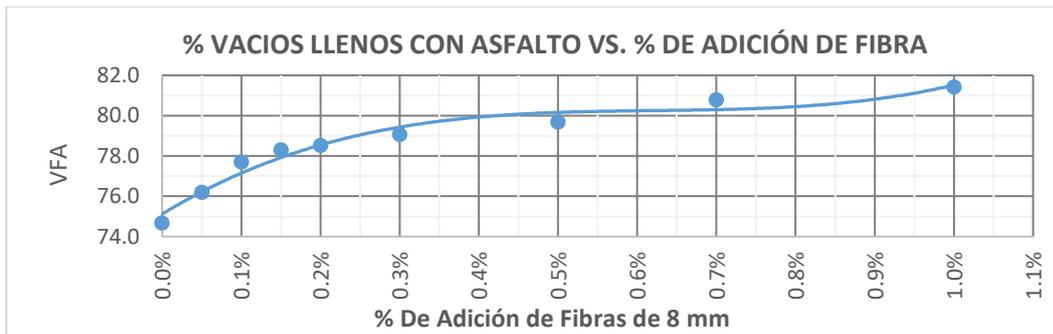


FIGURA 69. Relación del porcentaje de vacíos llenos con asfalto y dosis de fibras de 8 mm.

5.4.2. Flujo.

Se ha realizado un diagrama de líneas en la FIGURA 70 donde se representa el flujo versus los diseños de mezcla. En el eje “x” se tienen los diseños de mezcla (patrón o 0.0%, con 0.1% de fibra, con 0.15% de fibra, con 0.2% de fibra, etc.). Siendo en total 9 puntos y en el eje “y” se tiene el valor del flujo.

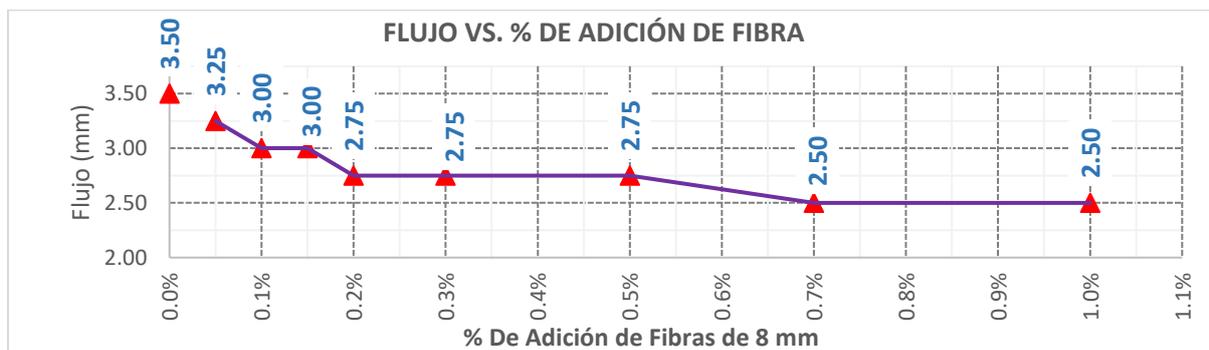


FIGURA 70. Flujo vs dosis de fibras acrílicas de 8 mm.

Para la máxima estabilidad (0.15% de adición de fibra de 8mm) se tiene un flujo de **3.00 mm** (12 centésimas de pulgada), existiendo un decremento del flujo en 0.50 mm respecto del patrón (decremento del 14%). Siendo un flujo igual para la máxima estabilidad para fibras de 12 y 20 mm (flujo de 3.00 mm).

El mínimo flujo se presenta para la adición del 0.70% y 1.00% con **2.50 mm** (10 centésimas de pulgada), que se traduce en un decremento del 29 % respecto del patrón. Debido a que el flujo debe estar comprendido entre 2 y 3.5 mm, la dosificación óptima de fibras acrílicas de 8 mm, será el 0.15 % (flujo de 3.00 mm).

5.5. Comportamiento a la fatiga.

En la **Tabla 59** se muestra el resumen de los Módulo Complejos Dinámicos (E*).

Tabla 59. Variables de entrada para calcular el Módulo Complejo Dinámico (E^*) y resultados

Variables	PATRÓN	0.15% FIB.ACRILIK (20 mm)	0.20% FIB.ACRILIK (12 mm)	0.15% FIB.ACRILIK (8 mm)
A	11.0720	11.0330	11.1050	11.0720
VTS	-3.7242	-3.7067	-3.7302	-3.7192
T (Celsius)	5	5	5	5
T(Ranking)	500.67	500.67	500.67	500.67
f (Hertz)	10	10	10	10
η_{orig} (Cp)	2.70E+10	4.53E+10	6.72E+10	5.60E+10
η_{orig} (10^6 p)	269.8	452.7	672.3	559.7
E^* Promedio (psi)	1,958,196	2,160,776	2,313,070	2,248,861
η_{envej} (cP)	4.93E+10	8.20E+10	1.21E+11	1.01E+11
η_{envej} (10^6 p)	492.9	820.4	1210.9	1011.1
E^* Promedio (psi)	2,169,595	2,375,314	2,528,278	2,464,566
Relación Viscosidad-Temp. (A-VTS)				

5.5.1. Fatiga en mezcla modificada con dosificación óptima de fibras acrílicas de 20 mm (óptimo Tipo A).

La FIGURA 71 muestra el procesamiento del software kenpave para la mezcla patrón y se extrae el valor de la deformación a tracción.

POINT NO.	VERTICAL COORDINATE	VERTICAL DISPL. (HORIZONTAL P. STRAIN)	VERTICAL STRESS (STRAIN)	MAJOR PRINCIPAL STRESS (STRAIN)	MINOR PRINCIPAL STRESS (STRAIN)	INTERMEDIATE PRINCIPAL STRESS (STRAIN)
1	0.00000	0.03051	80.000	436.463	67.677	396.551
	(STRAIN)	1.253E-04	-9.306E-05	1.518E-04	-9.306E-05	1.253E-04
1	4.00000	0.03039	21.780	21.809	-414.978	-324.456
	(STRAIN)	-1.656E-04	1.244E-04	1.244E-04	-1.656E-04	-1.055E-04

FIGURA 71. Deformación a tracción en la Mezcla Asfáltica Patrón.

La FIGURA 72 muestra el procesamiento del software para la mezcla modificada al porcentaje óptimo de adición de fibra de 20 mm (0.15%).

POINT NO.	VERTICAL COORDINATE	VERTICAL DISPL. (HORIZONTAL P. STRAIN)	VERTICAL STRESS (STRAIN)	MAJOR PRINCIPAL STRESS (STRAIN)	MINOR PRINCIPAL STRESS (STRAIN)	INTERMEDIATE PRINCIPAL STRESS (STRAIN)
1	0.00000	0.03007	80.000	455.337	67.677	413.507
	(STRAIN)	1.188E-04	-8.931E-05	1.439E-04	-8.931E-05	1.188E-04
1	4.00000	0.02996	20.781	20.806	-435.745	-341.922
	(STRAIN)	-1.571E-04	1.176E-04	1.176E-04	-1.571E-04	-1.006E-04

FIGURA 72. Deformación a tracción en la Mezcla Asfáltica "A": 0.15% fibra de 20 mm.

La **Tabla 60**, presenta el resumen de resultados del procesamiento de datos.

Tabla 60. Resultados predictivos de fatiga para mezclas asfálticas modificadas TIPO A

MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA CON FIBRAS ACRÍLICAS DE 20 mm				
TIPO A				
INDICADOR	Patrón	Dosificación óptima de fibra al 0.15%		
	Resultado	Resultado	% Var. respecto al patrón	OBS.
Estabilidad Corregida (Lb)	2270	2560	12.8%	Mayor al patrón
Flujo (mm)	3.50	3.00	14.3%	Menor al patrón
E/F(kg/cm)	2942	3871	31.6%	Mayor al patrón
E ₁ (psi)	1,958,196	2,160,776	10.3%	Mayor al patrón
Va (%)	3.83	3.37	12.0%	Menor al patrón
Vb (%)	11.27	11.60	2.9%	Mayor al patrón
$\epsilon_t \left(\frac{in}{in}\right) 10^{-4}$	1.055	1.006	4.6%	Menor al patrón
$N_f (10^6)$	4.12	4.43	7.5%	Mayor al patrón

Se observa que la dosificación óptima de fibras acrílicas de 20 mm (al 0.15%), mejora la resistencia de la vida a la fatiga en **7.5%**; aumentando el número de repeticiones a la falla

(Nf) para un Patrón de **4.12 millones** de ejes a **4.43 millones**. Debido a que ligeramente incrementa su módulo de rigidez y reduce los vacíos de aire, además de incrementar el volumen de asfalto efectivo.

5.5.2. Fatiga en mezcla modificada con dosificación óptima de fibras acrílicas de 12 mm (óptimo Tipo B).

En la FIGURA 73. se muestra el procesamiento del software kenpave para la mezcla modificada al porcentaje óptimo de adición de fibra de 12 mm (**0.20%**).

POINT NO.	VERTICAL COORDINATE	VERTICAL DISPL. (HORIZONTAL P. STRAIN)	VERTICAL STRESS (STRAIN)	MAJOR PRINCIPAL STRESS (STRAIN)	MINOR PRINCIPAL STRESS (STRAIN)	INTERMEDIATE PRINCIPAL STRESS (STRAIN)
1	0.00000	0.02977	80.000	468.667	67.677	425.502
	(STRAIN)	1.144E-04	-8.671E-05	1.387E-04	-8.671E-05	1.144E-04
1	4.00000	0.02967	20.106	20.129	-450.377	-354.301
	(STRAIN)	-1.514E-04	1.131E-04	1.131E-04	-1.514E-04	-9.737E-05

FIGURA 73. Deformación a tracción en la Mezcla Asfáltica "B": 0.20% fibra de 12 mm.

La **Tabla 61**, presenta el resumen de resultados del modelo predictivo.

Tabla 61. Resultados predictivos de fatiga para mezclas asfálticas modificadas TIPO B

MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA CON FIBRAS ACRÍLICAS DE 12 mm				
TIPO B				
INDICADOR	Patrón	Dosificación óptima de fibra al 0.20%		
	Resultado	Resultado	% Var. Respecto al patrón	OBS.
Estabilidad Corregida (Lb)	2270	2610	15.0%	Mayor al patrón
Flujo (mm)	3.50	3.00	14.3%	Menor al patrón
E/F(kg/cm)	2942	3946	34.1%	Mayor al patrón
E ₁ (psi)	1,958,196	2,313,070	18.1%	Mayor al patrón
V _a (%)	3.83	3.17	17.2%	Menor al patrón
V _b (%)	11.27	11.71	3.9%	Mayor al patrón
$\epsilon_t \left(\frac{in}{in}\right) 10^{-4}$	1.055	0.9737	7.7%	Menor al patrón
N _f (10 ⁶)	4.12	4.66	13.0%	Mayor al patrón

De los resultados se deduce que al aplicar una dosificación óptima de fibras acrílicas de 12 mm (al **0.20%**), se incrementa la resistencia a la fatiga en **13.0%**; aumentando el número de repeticiones a la falla (Nf) para un Patrón de **4.12 millones** a **4.66 millones** de ejes. Lo que evidencia considerando los resultados anteriores respecto al comportamiento del flujo y

estabilidad, ser el tipo adecuado de fibras para el uso en mezclas asfálticas modificadas con fibras acrílicas.

5.5.3. Fatiga en mezcla modificada con dosificación óptima de fibras acrílicas de 8 mm (óptimo Tipo C).

En la FIGURA 74. se muestra el procesamiento del software kenpave para la mezcla modificada al porcentaje óptimo de adición de fibra de 8 mm (0.15%).

POINT NO.	VERTICAL COORDINATE	VERTICAL DISPL. (HORIZONTAL P. STRAIN)	VERTICAL STRESS (STRAIN)	MAJOR PRINCIPAL STRESS (STRAIN)	MINOR PRINCIPAL STRESS (STRAIN)	INTERMEDIATE PRINCIPAL STRESS (STRAIN)
1	0.00000	0.02990	80.000	463.130	67.677	420.517
	(STRAIN)	1.162E-04	-8.779E-05	1.408E-04	-8.779E-05	1.162E-04
1	4.00000	0.02979	20.383	20.407	-444.303	-349.155
	(STRAIN)	-1.537E-04	1.149E-04	1.149E-04	-1.537E-04	-9.871E-05

FIGURA 74. Deformación a tracción en la Mezcla Asfáltica "C": 0.15% fibra de 8 mm.

Los resultados del análisis de fatiga para las mezclas asfálticas modificadas con fibras de 8 mm (Tipo C) se presentan en la **Tabla 62**.

Tabla 62. Características de fatiga para mezclas asfálticas modificadas TIPO C

MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA CON FIBRAS ACRÍLICAS DE 8 mm				
TIPO C				
INDICADOR	Patrón	Dosificación óptima de fibra al 0.15%		
	Resultado	Resultado	% Var. Respecto al patrón	OBS.
Estabilidad Corregida (Lb)	2270	2540	11.9%	Mayor al patrón
Flujo (mm)	3.50	3.00	14.3%	Menor al patrón
E/F(kg/cm)	2942	3840	30.5%	Mayor al patrón
E ₁ (psi)	1,958,196	826,383	14.8%	Mayor al patrón
V _a (%)	3.83	3.22	15.9%	Menor al patrón
V _b (%)	11.27	11.61	3.0%	Mayor al patrón
$\epsilon_t \left(\frac{in}{in} \right) 10^{-4}$	1.055	0.9871	6.4%	Menor al patrón
N _f (10 ⁶)	4.12	4.56	10.6%	Mayor al patrón

Las mezclas modificadas con fibras de 8 mm presentan un comportamiento intermedio en la resistencia de la vida a la fatiga, si son comparadas con las mezclas modificadas con fibras de 20 y 12 mm respectivamente.

Para la dosificación óptima de fibras de 8 mm (0.15%), se mejora la Resistencia de la vida a la fatiga en **10.6%**; aumentando el número de repeticiones a la falla (Nf) para un Patrón de **4.12 millones a 4.57 millones de ejes**.

5.5.4. Ensayo realizado en vigas para determinar la resistencia a la flexión (con cargas a los tercios del tramo).

En la **Tabla 63** se muestran los resultados del ensayo de flexión en vigas.

Tabla 63. Resultados de la resistencia a la flexión en vigas

Características físicas			Max. carga aplicada			Módulo de rotura		
VIGA		Promedio (mm)	Long. libre (mm)	Pmáx (Kg)	P (N)	R (MPa)	R (Kg/cm ²)	% Var. Respecto al patrón
PATRÓN	ancho	150.00	432	450	4413	0.6	6.4	-
	altura	142.50						
0.15% (Fib. 20mm)	ancho	150.00	432	490	4805	0.7	7.0	+ 9 %
	altura	142.25						
0.20% (Fib. 12mm)	ancho	150.00	432	620	6080	0.9	9.0	+ 41 %
	altura	141.25						
0.15% (Fib. 8mm)	ancho	150.00	432	530	5198	0.7	7.5	+ 17 %
	altura	142.50						

De los resultados se observa una misma tendencia que los encontrados con las fórmulas predictivas, los ensayos indican una mayor resistencia de las mezclas modificadas con fibras de 12 mm al 0.20% con una mejora del 41 % respecto al patrón. Las mezclas con fibras de 20 mm al 0.15% presentan una mejora al 9% y las mezclas con adición al 0.15% de fibras de 8 mm presentan una mejora intermedia con 17%. Como se muestra en la **Tabla 64**.

Tabla 64. Comparación de valores predictivos y resultados del ensayo realizado en vigas

COD. DE DISEÑO MEZCLA	Numero de repeticiones a la falla		Resistencia a la flexión	
	% Var. Respecto al patrón	Observación	% Var. Respecto al patrón	Observación
Patrón (Convencional)	-	-	-	-
+ 0.15% (Fib. 20mm)	7.5 %	Mayor al patrón	9 %	Mayor al patrón
+ 0.20% (Fib. 12mm)	13.0 %	Mayor al patrón	41 %	Mayor al patrón
+ 0.15% (Fib. 8mm)	10.6 %	Mayor al patrón	17 %	Mayor al patrón

5.6. Comparación de mezclas modificadas y su influencia por longitud de corte de las fibras.

5.6.1. Estabilidad Marshall, flujo y fatiga.

Como se puede observar en la FIGURA 75, las mezclas asfálticas modificadas con 12 mm. presentan mejores comportamientos referidos a la estabilidad y claro también respecto a la trabajabilidad. Pero en menor medida si se compara con la trabajabilidad de mezclas asfálticas con fibras de 8 mm. Por lo tanto, las fibras de 12 mm presentan una buena trabajabilidad, y un desempeño óptimo en alcanzar estabilidades máximas; con decrementos en el flujo de al menos 14% o 0.50 mm.

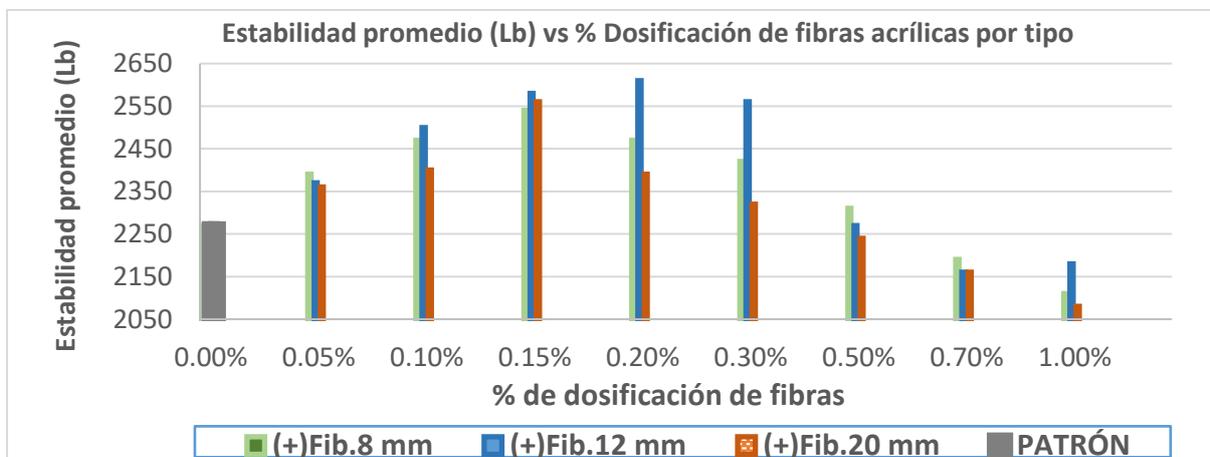


FIGURA 75. Estabilidades en mezclas modificadas con fibras acrílicas de 20, 12 y 8 mm.

Las mezclas con fibras de 20 mm. presentan problemas importantes en la trabajabilidad, cuando se usan dosificaciones mayores del 0.20%. Además, presentan un desempeño aceptable en alcanzar estabilidades máximas; con decrementos ligeros en el flujo de al menos un 14% o 0.50 mm. Para dosificaciones mayores del 0.50% de fibras de 20 mm, se expone un efecto contrario en la búsqueda del aumento en la estabilidad.

En las mezclas con fibras de 8 mm. se presentan una excelente trabajabilidad, y un desempeño regular en alcanzar estabilidades máximas, con decrementos en el flujo de al menos un 14% o 0.50 mm. En la FIGURA 76 se muestra la relación y comparación de las tres diferentes fibras acrílicas usadas y el flujo respecto a las dosis de cada fibra.

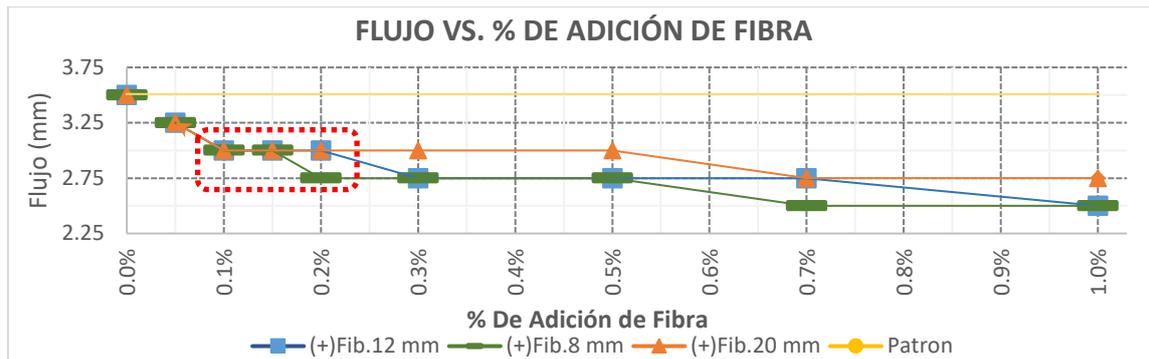


FIGURA 76. Flujos en mezclas modificadas con fibras acrílicas de 20, 12 y 8 mm.

La **Tabla 65** muestra la comparación de resultados de las mezclas asfálticas modificadas (con la dosificación óptima de cada una), con respecto a la mezcla convencional. Obteniéndose cuatro alternativas de diseño que se analizarán por el método multicriterio, para identificar la mejor alternativa.

Tabla 65. Resumen de resultados de mezclas modificadas con la dosificación óptima

Propiedades	Especific. MTC	ALTERNATIVAS DE DISEÑO DE MEZCLA						
		Patrón	TIPO "A": + 0.15% Fib. 20mm		TIPO "B": + 0.20% Fib. 12mm		TIPO "C": + 0.15% Fib. 8mm	
		Rdo.	Rdo.	% Var. respecto al patrón	Rdo.	% Var. respecto al patrón	Rdo.	% Var. respecto al patrón
Estabilidad (Lb)	1832 (mín.)	2270	2560	+12.8%	2610	+15.0%	2540	+11.9%
Flujo (mm.)	2.0–3.5	3.50	3.00	-14.3%	3.00	-14.3%	3.00	-14.3%
Numero de repeticiones a la falla N_f (10^6)	-	4.12	4.43	+7.5%	4.66	+13.0%	4.56	+10.6%
Resistencia a la flexión R (Kg/cm ²)	-	6.40	7.00	+9.0%	9.00	+41.0%	7.50	+17.0%
Vacíos de aire (%)	3.0–5.0	3.83	3.37	-12.0%	3.17	-17.2%	3.22	-15.9%
Vacíos en el agregado mineral (%)	14 (mín.)	15.11	14.96	-1.00	14.88	-1.50%	14.83	-1.00%
Costo de preparación/m ³ (S/.) <i>Anexo A</i>	-	326.86	366.73	+12.2%	379.71	+16.2%	366.73	+12.2%
Costo de colocación/m ² (S/.)	-	2.03	2.53	+24.6%	2.53	+24.6%	2.53	+24.6%

5.7. Análisis multicriterio (Método MAUT y AHP).

En las tablas 66, 67, 68 y 69, se muestran los resultados del índice valor de las alternativas; con el proceso de evaluación de cada variable.

Tabla 66. Resultado del índice de valor para la alternativa 1- “Mezcla asfáltica convencional”

Mezcla asfáltica convencional														
	Indicadores	X_{ind} Tabla 65	$Valor_{ind.}$ $X_{ind} \rightarrow$ Tabla 53 (1)	Peso ind. Tabla 54 (2)	Índice valor (1)x(2)	Suma (4)	Peso criterio (5)	critérios	Índice valor (4)x(5)	Suma (6)	Peso Req. (7)	Índice valor (6)x(7)		Iv_{alt}
Estructural	Estabilidad	2270	0.216	0.10	0.022	0.039	0.75	Resistencia Mecánica	0.029	0.134	0.650	0.087	Estructural	0.199
	Flujo	3.5	0.000	0.10	0.000									
	Número de repeticiones a la falla	4.12	0.015	0.25	0.004									
	Resistencia a la flexión	6.4	0.023	0.55	0.013									
	Vacíos con aire	3.83	0.607	0.60	0.364									
Econ.	Vacíos en el agregado mineral	15.11	0.139	0.40	0.056	0.420	0.25	Volumetría	0.105					
	Costo de preparación	283.5	0.496	0.40	0.198	0.319	1.00	Costo	0.319	0.319	0.350	0.112	Econ.	
	Costo de espaciado y compactado	2.03	0.202	0.60	0.121									

Tabla 67. Resultado del índice de valor para la alternativa 2- Mezcla asfáltica TIPO “A”

Mezcla asfáltica TIPO “A”: + 0.15% Fib. 20mm														
	Indicadores	X_{ind}	$Valor_{ind.}$ $X_{ind} \rightarrow$ Tabla 53	Peso indicador	Índice valor	suma	Peso criterio	critérios	Índice valor	suma	Peso Req.	Índice valor		Iv_{alt}
Estructural	Estabilidad	2560	0.583	0.10	0.058	0.155	0.75	Resistencia Mecánica	0.116	0.251	0.650	0.163	Estructural	0.189
	Flujo	3	0.118	0.10	0.012									
	Número de repeticiones a la falla	4.43	0.193	0.25	0.048									
	Resistencia a la flexión	7	0.067	0.55	0.037									
	Vacíos con aire	3.37	0.828	0.60	0.497									
Econ.	Vacíos en el agregado mineral	14.96	0.104	0.40	0.042	0.539	0.25	Volumetría	0.135					
	Costo de preparación	323.39	0.169	0.40	0.068	0.075	1.00	Costo	0.075	0.075	0.350	0.026	Econ.	
	Costo de espaciado y compactado	2.53	0.011	0.60	0.007									

Tabla 68. Resultado del índice de valor para la alternativa 3- Mezcla asfáltica TIPO “B”

Mezcla asfáltica TIPO “B”: + 0.20% Fib. 12mm														
	Indicadores	X_{ind}	$Valor_{ind.}$ $X_{ind} \rightarrow$ Tabla 53	Peso indicador	Índice valor	suma	Peso criterio	criterios	Índice valor	suma	Peso Req.	Índice valor		Iv_{alt}
Estructural	Estabilidad	2610	0.662	0.10	0.066	0.479	0.75	Resistencia Mecánica	0.359	0.506	0.650	0.329	Estructural	0.347
	Flujo	3	0.118	0.10	0.012									
	Número de repeticiones a la falla	4.66	0.448	0.25	0.112									
	Resistencia a la flexión	9	0.525	0.55	0.289									
	Vacíos con aire	3.17	0.922	0.60	0.553	0.588	0.25	Volumetría	0.147					
	Vacíos en el agregado mineral	14.88	0.087	0.40	0.035									
Econ.	Costo de preparación	336.37	0.110	0.40	0.044	0.051	1.00	Costo	0.051	0.051	0.350	0.018	Econ.	
	Costo de espaciado y compactado	2.53	0.011	0.60	0.007									

Tabla 69. Resultado del índice de valor para la alternativa 4- Mezcla asfáltica TIPO “C”

Mezcla asfáltica TIPO “C”: + 0.15% Fib. 8mm														
	Indicadores	X_{ind}	$Valor_{ind.}$ $X_{ind} \rightarrow$ Tabla 53	Peso indicador	Índice valor	suma	Peso criterio	criterios	Índice valor	suma	Peso Req.	Índice valor		Iv_{alt}
Estructural	Estabilidad	2540	0.552	0.10	0.055	0.220	0.75	Resistencia Mecánica	0.165	0.308	0.650	0.200	Estructural	0.226
	Flujo	3	0.118	0.10	0.012									
	Número de repeticiones a la falla	4.56	0.325	0.25	0.081									
	Resistencia a la flexión	7.5	0.131	0.55	0.072									
	Vacíos con aire	3.22	0.899	0.60	0.539	0.570	0.25	Volumetría	0.143					
	Vacíos en el agregado mineral	14.83	0.078	0.40	0.031									
Econ.	Costo de preparación	323.39	0.169	0.40	0.068	0.075	1.00	Costo	0.075	0.075	0.350	0.026	Econ.	
	Costo de espaciado y compactado	2.53	0.011	0.60	0.007									

En definitiva, la alternativa con mayor índice de valor es la alternativa “3” con 0.347. Finalmente, en la FIGURA 77 se muestra cada una de las alternativas desglosadas en cada uno de los requerimientos planteados y evaluados. Como se puede observar el plano estructural resulto con mayor índice de valor que los restantes, en este requerimiento se refleja una importante diferencia entre las alternativas, **siendo mejor la solución con Mezcla asfáltica TIPO “B”: + 0.20% Fib. 12mm.** No obstante, en los requerimientos económicos la diferencia de índices de valor es significativa en función al estudio desarrollado.

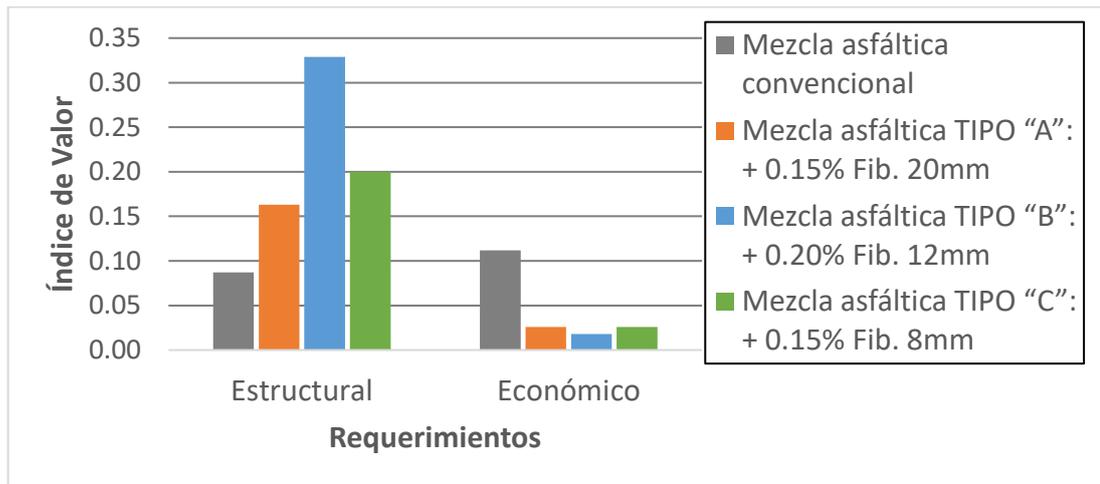


FIGURA 77. Índices de valor por cada requerimiento.

Capítulo VI

Análisis estadístico

6.1. Validación de hipótesis.

6.1.1. Hipótesis de la investigación N° 01.

PASO 1. Formulación de hipótesis de investigación.

Ho: El efecto de la adición de fibras acrílicas de alta tenacidad DRYMIX RC 4020 en la estabilidad de la mezcla asfáltica no es favorable, respecto a la mezcla asfáltica patrón. Para $\alpha = 0.05$, es decir: $\mu_{sv} = \mu_{cv}$.

H1: El efecto de la adición de fibras acrílicas de alta tenacidad DRYMIX RC 4020 en la estabilidad de la mezcla asfáltica es favorable, respecto a la mezcla asfáltica patrón. Para $\alpha = 0.05$, es decir: $\mu_{sv} \neq \mu_{cv}$.

PASO 2. Nivel de significación $\alpha=5\%$.

PASO 3. Estadística de prueba, para dicha prueba se empleará la distribución de la “t” de student, se considera que las varianzas de las poblaciones son desiguales y no existe evidencia para asumir una igualdad (prueba con muestras pequeñas) por lo que se tiene:

- Prueba estadística “t” de student.
- Nivel de aplicación: $\alpha = 0,05$.
- Probabilidad de error: 5%

- Probabilidad (Intervalo) de confianza: 95%
- Grado de libertad

$$g.l. = \frac{\left(\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}\right)^2}{\frac{\left(\frac{S_1^2}{n_1}\right)^2}{(n_1 - 1)} + \frac{\left(\frac{S_2^2}{n_2}\right)^2}{(n_2 - 1)}}$$

PASO 4. Valor (es) críticos de la estadística de prueba, la siguiente formula se usará para hallar la t calculada (t_c):

$$t_c = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}}}$$

Dónde: (a) $\bar{X}_{1,2}$ = Media de muestra, (b) $S^2_{1,2}$ = Varianza de muestra, y (c) $n_{1,2}$ = Número de datos de la muestra.

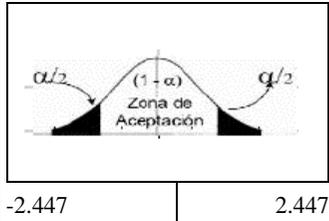
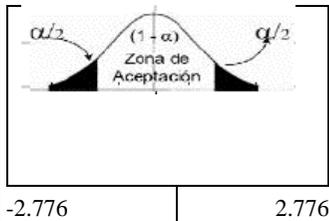
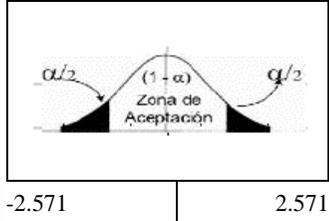
PASO 5. Toma de decisión.

Para la toma de decisión, nos basamos en la regla de decisión siguiente:

- $|t_c| > |t_{tabla}|$: Se rechaza la hipótesis nula (H_0) y se acepta la hipótesis alterna (H_1).
- $|t_c| < |t_{tabla}|$: Se Acepta la hipótesis nula (H_0) y se rechaza la hipótesis alterna (H_1).

La **Tabla 70** presenta el resumen de los cálculos para la Toma de decisión.

Tabla 70. Cálculos de la prueba de hipótesis 1

MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA CON FIBRAS ACRÍLICAS DE 20 mm															
TIPO A													0.15%		
Indicador	Unid.	M.A. Patrón	n_1	\bar{X}_1	Varianza S^2	0.15% Fibra Acrílica	n_2	\bar{X}_2	Varianza S^2	Grados de Libertad	Tt	Gráfica	Tc	Regla de Decisión	
Estabilidad Corregida (Lb)	Lb	2130	5	2270.00	9980	2700.0	5	2560.00	24830	6	2.447		3.476	Tc > Tt	Se rechaza la Ho
		2320				2710.0									
		2400				2360.0									
		2240				2430.0									
		2280				2580.0									
MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA CON FIBRAS ACRÍLICAS DE 12 mm															
TIPO B													0.20%		
Indicador	Unid.	M.A. Patrón	n_1	\bar{X}_1	Varianza S^2	0.20% Fibra Acrílica	n_2	\bar{X}_2	Varianza S^2	Grados de Libertad	Tt	Gráfica	Tc	Regla de Decisión	
Estabilidad Corregida (Lb)	Lb	2130	5	2270.00	9980	2570.0	5	2610.00	1000	4	2.776		7.255	Tc > Tt	Se rechaza la Ho
		2320				2650.0									
		2400				2610.0									
		2240				2630.0									
		2280				2590.0									
MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA CON FIBRAS ACRÍLICAS DE 8 mm															
TIPO C													0.15%		
Indicador	Unid.	M.A. Patrón	n_1	\bar{X}_1	Varianza S^2	0.15% Fibra Acrílica	n_2	\bar{X}_2	Varianza S^2	Grados de Libertad	Tt	Gráfica	Tc	Regla de Decisión	
Estabilidad Corregida (Lb)	Lb	2130	5	2270.00	9980	2550.0	5	2540.00	2650	5	2.571		5.372	Tc > Tt	Se rechaza la Ho
		2320				2610.0									
		2400				2480.0									
		2240				2560.0									
		2280				2500.0									

❖ Toma De Decisión:

De los resultados se observa que:

- (a) Respecto a la estabilidad para la adición de las fibras acrílicas de 20 mm, se tiene un $|t_c| > |t_{tabla}|$ por lo tanto se rechaza la hipótesis nula (H_0) y se acepta la Hipótesis Alternativa (H_1).
- (b) Para la estabilidad en mezclas con adición de fibras acrílicas de 12 mm, se tiene un $|t_c| > |t_{tabla}|$ por lo tanto se rechaza la hipótesis nula (H_0) y se acepta la Hipótesis Alternativa (H_1).
- (c) Para la estabilidad en mezclas con adición de fibras acrílicas de 8 mm, se tiene un $|t_c| > |t_{tabla}|$ por lo tanto se rechaza la hipótesis nula (H_0) y se acepta la Hipótesis Alternativa (H_1).

6.1.2. Hipótesis de la investigación N° 02.

H_0 : El efecto de la adición de fibras acrílicas de alta tenacidad DRYMIX RC 4020 en el flujo de la mezcla asfáltica no es favorable, respecto a la mezcla asfáltica patrón. Para $\alpha = 0.05$, es decir: $\mu_{sv} = \mu_{cv}$.

H_1 : El efecto de la adición de fibras acrílicas de alta tenacidad DRYMIX RC 4020 en el flujo de la mezcla asfáltica es favorable (decremento), respecto a la mezcla asfáltica patrón. Para $\alpha = 0.05$, es decir: $\mu_{sv} \neq \mu_{cv}$. Para esta prueba se empleará igualmente la distribución “t” de student y con las mismas consideraciones citadas en la hipótesis 1.

La **Tabla 71** presenta el resumen de los cálculos para la Toma de decisión.

Tabla 71. Cálculos de la prueba de hipótesis 2

MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA CON FIBRAS ACRÍLICAS DE 20 mm															
TIPO A													0.15%		
Indicador	Unid.	M.A. Patrón	n_1	\bar{X}_1	Varianza S^2	0.15% Fibra Acrílica	n_2	\bar{X}_2	Varianza S^2	Grados de Libertad	Tt	Gráfica	Tc	Regla de Decisión	
Flujo (mm)	mm	3.50	5	3.50	0.01875	3.25	5	3.00	0.03125	7	2.365		5.0000	Tc > Tt	Se rechaza la Ho
		3.50				3.00									
		3.50				3.00									
		3.25				2.75									
		3.25				3.00									
MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA CON FIBRAS ACRÍLICAS DE 12 mm															
Tipo B													0.20%		
Indicador	Unid.	M.A. Patrón	n_1	\bar{X}_1	Varianza S^2	0.20% Fibra Acrílica	n_2	\bar{X}_2	Varianza S^2	Grados de Libertad	Tt	Gráfica	Tc	Regla de Decisión	
Flujo (mm)	mm	3.50	5	3.50	0.01875	3.00	5	3.00	0.0125	7	2.365		6.325	Tc > Tt	Se rechaza la Ho
		3.50				3.00									
		3.50				2.75									
		3.25				3.00									
		3.25				3.00									
MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA CON FIBRAS ACRÍLICAS DE 8 mm															
TIPO C													0.15%		
Indicador	Unid.	M.A. Patrón	n_1	\bar{X}_1	Varianza S^2	0.15% Fibra Acrílica	n_2	\bar{X}_2	Varianza S^2	Grados de Libertad	Tt	Gráfica	Tc	Regla de Decisión	
Flujo (mm)	mm	3.50	5	3.50	0.01875	3.00	5	3.00	0.01875	8	2.306		5.774	Tc > Tt	Se rechaza la Ho
		3.50				3.25									
		3.50				3.25									
		3.25				3.00									
		3.25				3.00									

❖ Toma De Decisión:

De los resultados se observa que:

- (a) Respecto al flujo para la adición de las fibras acrílicas de 20 mm, se tiene un $|t_c| > |t_{tabla}|$ por lo tanto se rechaza la hipótesis nula (H_0) y se acepta la Hipótesis Alterna (H_1).
- (b) Para el flujo en mezclas asfálticas con adición de fibras acrílicas de 12 mm, se tiene un $|t_c| > |t_{tabla}|$ por lo tanto se rechaza la hipótesis nula (H_0) y se acepta la Hipótesis Alterna (H_1).
- (c) Para el flujo en mezclas con adición de fibras acrílicas de 8 mm, se tiene un $|t_c| > |t_{tabla}|$ por lo tanto se rechaza la hipótesis nula (H_0) y se acepta la Hipótesis Alterna (H_1).

6.1.3. Hipótesis de la investigación N° 03.

H_0 : Las fibras acrílicas de alta tenacidad DRYMIX RC 4020 no influyen favorablemente en la reducción del proceso de fisuración por fatiga (N_f , número de repeticiones a la falla), respecto a la mezcla asfáltica patrón. Para $\alpha = 0.05$, es decir: $\mu_{sv} = \mu_{cv}$.

H_1 : Las fibras acrílicas de alta tenacidad DRYMIX RC 4020 influyen favorablemente en la reducción del proceso de fisuración, respecto a la mezcla asfáltica patrón. Para $\alpha = 0.05$, es decir: $\mu_{sv} \neq \mu_{cv}$.

Mediante la prueba de hipótesis se determinará la validez de la hipótesis nula (H_0) o de la hipótesis alterna (H_1). Para esta prueba se empleará igualmente la distribución “t” de student.

La **Tabla 72** presenta el resumen de los cálculos para la Toma de decisión.

Tabla 72. Cálculos de la prueba de hipótesis 3

MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA CON FIBRAS ACRÍLICAS DE 20 mm														
TIPO A													0.15%	
Indicador	M.A. Patrón	n_1	\bar{X}_1	Varianza S^2	0.15% Fibra Acrílica	n_2	\bar{X}_2	Varianza S^2	Grados de Libertad	Tt	Gráfica	Tc	Regla de Decisión	
Número de repeticiones a la falla (N_f) 21°C	2.47E+06	5	2.40 E+06	1.57E+9	2.57E+06	5	2.59 E+06	5.92E+08	6	2.447		7.568	Tc > Tt	Se rechaza la Ho
	2.48E+06				2.63E+06									
	2.44E+06				2.57E+06									
	2.40E+06				2.59E+06									
	2.39E+06				2.60E+06									
MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA CON FIBRAS ACRÍLICAS DE 12 mm														
TIPO B													0.20%	
Indicador	M.A. Patrón	n_1	\bar{X}_1	Varianza S^2	0.20% Fibra Acrílica	n_2	\bar{X}_2	Varianza S^2	Grados de Libertad	Tt	Gráfica	Tc	Regla de Decisión	
Número de repeticiones a la falla (N_f) 21°C	2.47E+06	5	2.40 E+06	1.57E+9	2.71E+06	5	2.71 E+06	1.39E+08	5	2.571		15.00	Tc > Tt	Se rechaza la Ho
	2.48E+06				2.71E+06									
	2.44E+06				2.72E+06									
	2.40E+06				2.73E+06									
	2.39E+06				2.70E+06									
MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA CON FIBRAS ACRÍLICAS DE 8 mm														
TIPO C													0.15%	
Indicador	M.A. Patrón	n_1	\bar{X}_1	Varianza S^2	0.15% Fibra Acrílica	n_2	\bar{X}_2	Varianza S^2	Grados de Libertad	Tt	Gráfica	Tc	Regla de Decisión	
Número de repeticiones a la falla (N_f) 21°C	2.47E+06	5	2.40 E+06	1.57E+9	2.67E+06	5	2.66 E+06	3.37E+7	4	2.776		12.628	Tc > Tt	Se rechaza la Ho
	2.48E+06				2.66E+06									
	2.44E+06				2.67E+06									
	2.40E+06				2.65E+06									
	2.39E+06				2.67E+06									

❖ **Toma De Decisión:**

De los resultados se observa que:

- (a) Respecto a la reducción del proceso de fisuración de la mezcla con fibras acrílicas de 20 mm, se tiene un $|t_c| > |t_{tabla}|$ por lo tanto se rechaza la hipótesis nula (H_0) y se acepta la Hipótesis Alternativa (H_1).
- (b) Para el caso de la reducción del proceso de fisuración de la mezcla con fibras acrílicas de 12 mm, se tiene un $|t_c| > |t_{tabla}|$ por lo tanto se rechaza la hipótesis nula (H_0) y se acepta la Hipótesis Alternativa (H_1).
- (c) Para el caso de la reducción del proceso de fisuración de la mezcla modificada con fibras acrílicas de 8 mm, se tiene un $|t_c| > |t_{tabla}|$ por lo tanto se rechaza la hipótesis nula (H_0) y se acepta la Hipótesis Alternativa (H_1).

Capítulo VII

Conclusiones y recomendaciones

7.1. Conclusiones.

- De la Estabilidad: De acuerdo a los análisis estadísticos y gráficos realizados, se puede inferir que la adición de las fibras acrílicas contribuye favorablemente en la estabilidad de las mezclas asfálticas; donde para cada tipo de fibra acrílica se contribuye favorablemente para un determinado porcentaje de adición (óptimo porcentaje de adición). Por lo que se deduce que:
 - (a) Las fibras de 20 mm contribuyen favorablemente para una dosis de 0.15 % (respecto del peso del agregado y cemento asfáltico), con esta dosificación se logra incrementar un 12.8% la estabilidad respecto de la mezcla asfáltica patrón.
 - (b) Las fibras de 12 mm resultan eficientes para un óptimo porcentaje de adición del 0.20 %, que expone un incremento en la Estabilidad Marshall del 15% respecto del patrón.
 - (c) Las fibras de 8 mm manifiestan su mejor contribución en mejorar la estabilidad para un óptimo porcentaje de adición del 0.15%, resultando en mezclas asfálticas modificadas con un incremento del 12 % en la estabilidad respecto al patrón.
- De la estabilidad: La hipótesis planteada para los grupos experimentales se validó con la prueba estadística de la “t” de student, considerando que las

varianzas de las poblaciones son desiguales ya que no existe evidencia para asumir una igualdad (prueba con muestras pequeñas, menores de 30). Se estableció una relación entre $|t_c|$ y $|t_{tabla}|$ siendo $|t_c| > |t_{tabla}|$ para las tres pruebas (fibras acrílicas de 20 mm, 12mm y 8 mm) de la Estabilidad Marshall; lo cual permite rechazar la hipótesis nula y aceptar la hipótesis alterna. Por lo que la evidencia sugiere que el efecto de la adición de fibras acrílicas (para los tres diferentes tipos) en la estabilidad de la mezcla asfáltica es favorable, respecto a la mezcla asfáltica patrón.

- Del Flujo: El aporte en la evolución (decremento) del flujo de las mezclas asfálticas, se ve reflejada para todos los porcentajes de adición de fibras; pero existe un óptimo porcentaje de adición para cada tipo de fibra (20mm, 12mm y 8 mm). Ya que los flujos son decrecientes según se aumenta la adición de fibras y el decremento excesivo del flujo no es recomendable cuando sobrepasan los límites establecidos en el diseño de mezcla. El porcentaje óptimo de adición de fibras garantiza una contribución favorable en el flujo (decremento para el estudio) y estabilidad Marshall. Por lo que se infiere de los resultados que:
 - (a) Las fibras acrílicas de 20 mm contribuyen favorablemente para una dosis de 0.15 %, con este óptimo porcentaje de adición se disminuye el flujo en 14.30% respecto de la mezcla asfáltica patrón (de 3.50mm \approx 14 *centesimas de pulgada* a 3.00 mm \approx 12 *centesimas de pulgada*).
 - (b) Las fibras de 12 mm resultan favorables para un óptimo porcentaje de adición del 0.20 %, que expone un decremento en el flujo de 14.30% (a 3.00mm) respecto del patrón (de 3.50mm).
 - (c) Las fibras de 8 mm exponen un aporte en el flujo para un óptimo porcentaje de adición del 0.15%, resultando en mezclas asfálticas modificadas con un decremento del flujo en 14.30 % (a 3.00mm) respecto al patrón (de 3.50mm). Todos los flujos disminuidos en las mezclas asfálticas modificadas con los óptimos porcentajes de adición son admisibles, porque están dentro de los límites establecidos para el diseño de mezclas para tráfico pesado que especifica el Manual de Carreteras: Especificaciones técnicas generales para construcción EG-2013 (MTC,2013). Que señala que el flujo debe estar comprendido desde 2.00mm a 3.50mm (8 a 14 centésimas de pulgada-0.01”).

- Del Flujo: La hipótesis planteada para los grupos experimentales se validó con la prueba estadística de la “t” de student, considerando que las varianzas de las poblaciones son desiguales ya que no existe evidencia para asumir una igualdad (prueba con muestras pequeñas, menores de 30). Se estableció una relación entre $|t_c|$ y $|t_{tabla}|$ siendo $|t_c| > |t_{tabla}|$ para las tres pruebas (fibras acrílicas de 20 mm, 12mm y 8 mm) del flujo; lo cual por la toma de decisión se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna. Por lo que la evidencia sugiere que el efecto de la adición de fibras acrílicas de alta tenacidad DRYMIX RC 4020 (para los tres diferentes tipos) en el flujo de la mezcla asfáltica es favorable(decremento), respecto a la mezcla asfáltica patrón.
- De la reducción del proceso de fisuración por fatiga: La contribución favorable respecto a la vida por fatiga, fue determinado mediante la cuantificación por predicción de los números de repeticiones a la falla (N_f) para una deformación por tracción (ϵ_t) extraído del procesamiento del software kenpave planteando una estructura típica de pavimento flexible; de acuerdo a los análisis y gráficos construidos se aprecia que la adición de las fibras acrílicas contribuye favorablemente en la resistencia de la vida a la fatiga para las dosificaciones óptimas siguientes:

 - (a) Las fibras acrílicas de 20 mm contribuyen favorablemente para una dosis de 0.15% (porcentaje óptimo), incrementando los números de repeticiones a la falla admisibles ($N_{f \rightarrow 0.15\% \rightarrow fib\ 20\ mm}$) en 7.5 % respecto a los números de repeticiones a la falla admisibles que se conseguiría con la mezcla asfáltica patrón.
 - (b) Mientras que las fibras de 12 mm aportan de manera más eficiente en la resistencia a la fatiga para una dosis de 0.20%, incrementando los números de repeticiones a la falla admisibles ($N_{f \rightarrow 0.20\% \rightarrow fib\ 12\ mm}$) en 13.0%.
 - (c) Para el caso de las mezclas asfálticas modificadas con fibras acrílicas de 8 mm se tiene una contribución favorable para una dosificación de 0.15%, aumentando los números de repeticiones a la falla admisibles ($N_{f \rightarrow 0.15\% \rightarrow fib\ 8\ mm}$) en 10.6 %.
- De la reducción del proceso de fisuración por fatiga: La hipótesis planteada para los grupos experimentales se validó con la prueba estadística de la “t” de student. Se estableció una relación entre $|t_c|$ y $|t_{tabla}|$ siendo $|t_c| > |t_{tabla}|$ para las

tres pruebas (mezclas modificadas con fibras acrílicas de 20mm, 12mm y 8 mm) de la resistencia de la vida a la fatiga, por lo cual se rechaza la hipótesis nula y consecuentemente la evidencia sugiere y demuestra que las mezclas asfálticas modificadas con fibras de 20mm, 12 mm y 8 mm influyen favorablemente en la reducción del proceso de fisuración por fatiga.

- De la resistencia a la flexión: La evidencia de las pruebas en vigas sometidas a flexión, reflejan y contrastan los resultados de los modelos predictivos usados y se concluye que:
 - (a) Los resultados demuestran una mayor resistencia a la flexión para la mezcla modificada con fibras acrílicas de 12 mm al 0.20%, con un incremento del 41% respecto al patrón.
 - (b) La mezcla con fibras de 20 mm al 0.15%, incrementa un 9 % su resistencia a la flexión respecto al patrón.
 - (b) Para el caso de la mezcla con fibras de 8 mm al 0.15%, aumenta su resistencia un 17 % respecto al patrón.

La tendencia de la resistencia a la flexión en las tres mezclas modificadas, es similar al del número de repeticiones a la falla (N_f), por lo que el ensayo a flexión resulta ser un apropiado instrumento y prueba de medición para valorar la resistencia a la flexión. En caso de no contar con el equipo necesario del ensayo a fatiga propiamente dicho.

- Los resultados de los ensayos en conjunto con la estadística inferencial demuestran que la *máxima dosificación permisible* de las fibras acrílicas (porcentaje respecto del peso del agregado y cemento asfáltico) para el uso en la producción de mezclas asfálticas son: (a) Para las fibras acrílicas de 20 mm se tiene una máxima dosificación de 0.20%; (b) para fibras acrílicas de 12 mm la máxima dosificación es de 0.25 %, y (c) en fibras de 8 mm se tiene una máxima dosificación de 0.30%. Las máximas dosificaciones conservan un cambio en el volumen admisible respecto al patrón, además de garantizar un aumento en la estabilidad con flujos bajos pero admisibles.
- Para adiciones superiores a las *máximas dosificaciones permisibles* mencionadas para cada tipo de fibra, se generan variaciones importantes a nivel de volumetría; debido al incremento de la superficie específica de la fibra que debe ser recubierta por asfalto y por lo cual se requeriría una mayor cantidad de

asfalto. Todo esto se interpreta en una mezcla inestable con reducida resistencia al corte, con propiedades poco predecibles asociados a problemas de trabajabilidad.

- La evaluación de las diferentes dosificaciones de fibras acrílicas permite identificar que, para el tratamiento de la mezcla asfáltica modificada con 0.20% de fibras acrílicas de 12 mm se presenta el mejor comportamiento; tanto a nivel de estabilidad, flujo, resistencia a la fatiga y trabajabilidad. Por lo que las fibras de 12 mm son las más prometedoras en comparación de las fibras de 20mm y 8 mm.

7.2. Recomendaciones.

De lo concluido en la presente tesis se plantean las siguientes recomendaciones:

- Los criterios para determinar el porcentaje óptimo de la adición de las fibras acrílicas conllevan a considerar los cambios en las propiedades, por lo que se debe tener en consideración todas o la mayoría de las variaciones de las propiedades buscando un equilibrio que permite la aceptación de los requerimientos que pueda tener la mezcla asfáltica.
- Se recomienda la adición de las fibras acrílicas de 20 mm para dosificaciones comprendidas desde el 0.10% al 0.20%, para poder garantizar la elaboración de mezclas asfálticas modificadas con aumentos en la estabilidad del orden del 5.2% al 12.9%. Siendo el óptimo porcentaje de adición un 0.15%, que permite garantizar la máxima estabilidad, así mismo los flujos estarán comprendidos en un decremento del orden del 14.3% respecto al patrón (mezcla asfáltica convencional sin fibra).
- Se recomienda la adición de las fibras acrílicas de 12 mm para dosificaciones comprendidas desde el 0.10% al 0.25%, para poder garantizar la elaboración de mezclas asfálticas tratadas con aumentos en la estabilidad del orden del 13.7% al 15.0%. Siendo el óptimo porcentaje de adición un 0.20% que permite garantizar la máxima estabilidad, además los flujos estarán comprendidos en un decremento del orden del 14.3% respecto al patrón.
- Se recomienda la adición de las fibras acrílicas de 8 mm para dosificaciones comprendidas desde el 0.10 % al 0.30%, para poder garantizar la elaboración de mezclas asfálticas con aumentos en la estabilidad del orden del 8.8 % al 12.0%.

Siendo el óptimo porcentaje de adición un 0.15% que permite garantizar la máxima estabilidad, además los flujos estarán comprendidos en un decremento del orden del 21.4% respecto al patrón.

- Se recomienda la aplicación de fibras acrílicas en mezclas asfálticas con estabilidades bajas (cerca al mínimo establecido por las especificaciones técnicas generales para construcción) y/o flujos altos (cerca al máximo permitido). Para incrementar la estabilidad y reducir los flujos de manera óptima, evitando y previniendo la aparición de patologías asociadas a las características de la mezcla inicial.
- Se debe tener en consideración y precaución, la aplicación de fibras acrílicas en mezclas asfálticas con flujos muy bajos y estabilidades muy altas. cuando la temperatura de servicio fluctúa sobre valores muy bajos.
- Se propone como línea de investigación realizar: (a) ensayos empíricos para evaluar la susceptibilidad de las mezclas asfálticas modificadas con fibras acrílicas a la deformación permanente (Prueba APA-Norma AASHTO TP 63; (b) ensayos de fatiga en vigas a flexo-compresión, norma AASHTO T 321; y (c) Ensayos de Módulo dinámico (Norma AASHTO TP 62).

Referencias bibliográficas

- Allen Webster, L. (2000). *Estadística aplicada* (Tercera ed.). México: Mc Graw Hill Education.
- American Association of State Highway and Transportation Officials [AASHTO]. (2008). *Mechanistic–Empirical Pavement Design Guide* (Interim ed.). USA.
- American Association of State Highway and Transportation Officials [AASHTO]. (1993). *AASHTO Guide for design of pavement structures*. Washington:AASHTO.
- American Society for Testing and Materials [ASTM]. (2004). Annual books of ASTM Standards: *Road and Paving Materials, Vehicle–Pavement Systems* (Volumen 04.03). United States of America: ASTM.
- Ballena Tapia, C.J. (Perú, 2016). “*Utilización de fibras de polietileno de botellas de plástico para su aplicación en el diseño de mezclas asfálticas ecológicas en frío*”. Tesis de Licenciatura, Universidad Señor De Sipán.
- Bañón Blazquez, L. & Bevía García, J.F. (2000). Manual de carreteras: *Construcción y mantenimiento* (Tomo 2). España: Ortiz e Hijos, Contratista de Obras.
- Dormon, G. M. & Jarman, A. W. (1958). “*Some factors Influencing the Behavior of bitumen roads surfacings*”. Journal of Applied Chemistry Vol. 8.
- Fonseca Rodríguez, C. H., (1995), *Estudio de capas antifisuras para retardar el inicio y propagación de grietas en pavimentos flexibles y semirrígidos*, Tesis Doctoral, ETS de Ingenieros en Canales, Caminos y Puertos de Barcelona, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.
- Fonseca Rodríguez, C. H. & y Martínez Bringas, C. L. (1999), “*El empleo de fibras en la elaboración de mezclas asfálticas para pavimentos de gradación abierta*”, presentados en los cuadernos Fica de la fundación Ica, México.
- Grandzol, J. R. (2005). *Improving the Faculty Selection Process in Higher Education: A Case for the Analytic Hierarchy Process. IR Applications* (Volume 6). Florida: Association for Institutional Research.
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, M. d. (2010). *Metodología de la Investigación* (Quinta ed.). México: Mc Graw Hill Education.

- Huang Yang, H. (2004). *Pavement analysis and design* (Segunda ed.). United States of America: Pearson Education.
- Marín Hernández, A. (México,2004). “*Asfaltos modificados y pruebas de laboratorio para caracterizarlos*”. Tesis para obtener el título de ingeniero civil, Instituto politécnico superior de ingeniería y arquitectura de México.
- Menéndez Acurio, J. R. (2009). *Ingeniería de pavimentos: Materiales y variables de diseño* (Segunda ed.). Lima: ICG.
- Minaya González, S. & Ordóñez Huamán, A. (2006). *Diseño moderno de pavimentos asfálticos* (Segunda ed.). Lima: Universidad Nacional de Ingeniería - Facultad de Ingeniería Civil. Instituto de Investigaciones.
- Minaya González, S. & Ordóñez Huamán, A. (2001). *Manual de laboratorio: Ensayos para pavimentos* (Volumen I). Lima: Universidad Nacional de Ingeniería - Facultad de Ingeniería Civil. Instituto de Investigaciones.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones, Dirección General de Caminos y Ferrocarriles (Abril de 2014). *Manual de carreteras: Suelos, geología, geotecnia y pavimentos*. Perú.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones, Dirección General de Caminos y Ferrocarriles (Mayo de 2016). *Manual de ensayo de materiales*. Perú.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones, Dirección General de Caminos y Ferrocarriles (Junio de 2013). *Manual de carreteras: Especificaciones técnicas generales para construcción EG-2013*. Perú.
- Montejo Fonseca, A. (2010). *Ingeniería de pavimentos para carreteras* (Segunda ed.). Bogotá: Agora Editores.
- Nijboer, L. W. (1957). *Einige Betrachtungen über das Marshallverfahren zur Untersuchung bituminöser Massen. Bielefeld* (Consideraciones sobre el método Marshall para examinar masas bituminosas). Alemania: Kirschbaum Verlag.
- Patrick Lavin, G. (2003). *Asphalt Pavements: A practical guide to design, production, and maintenance for engineers and architects* (Primera ed.). New York: Spon Press.
- Reyes Ortiz, O. J. & Reyes Lizcano, F. A. (2005), “*Comportamiento mecánico y dinámico de una mezcla asfáltica con adición de fibras*”. Presentados en la red de revistas científicas de américa latina y el caribe, España y Portugal, México.

- Rico Rodríguez, A. & Del Castillo, H. (2005). La ingeniería de suelos en las vías terrestres: *Carreteras, ferrocarriles y aeropistas* (Vol. 1). México: Limusa.
- Tam Málaga, J., Vera, G., & Oliveros Ramos, R. (2008). *Tipos y estrategias de investigación científica*. s.n. Perú: Morata.

Anexos

Anexo A: Comparación de costos

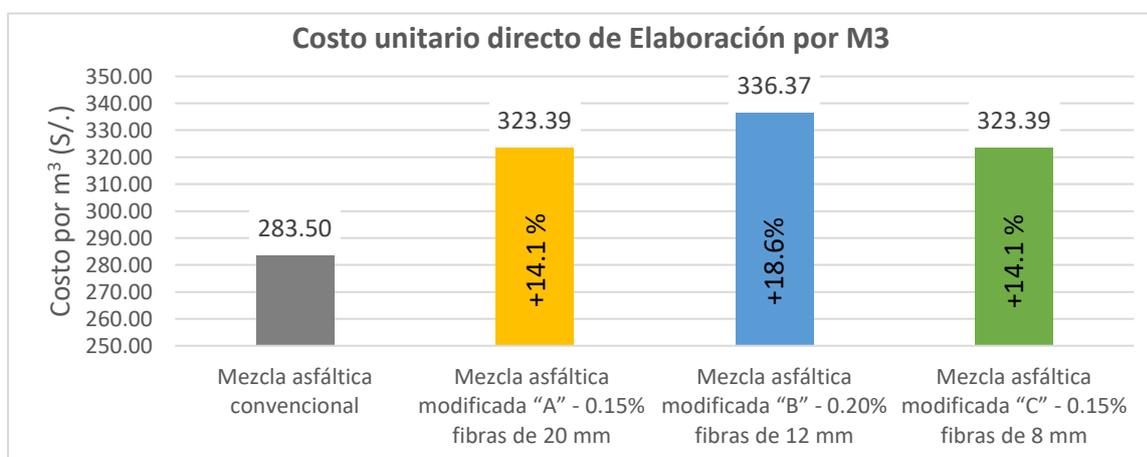
A.1. COSTOS DE PREPARACIÓN

MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL						
Rend.	233	M3/DIA	Costo Unitario Directo por M3			283.50
Código	Descripción Insumo	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio	Parcial
	Mano de Obra					
470103	Oficial	HH	2.00	0.0687	16.99	1.17
470104	Peón	HH	10.00	0.3433	15.29	5.25
470121	Operario	HH	1.00	0.0343	21.4	0.73
						7.15
	Materiales					
200103	Ligante asfáltico PEN 85/100	GLN		34.000	5.92	201.28
290175	Fibra Acrílica	KG		0.000	11.00	0.00
						201.28
	Equipos					
370101	Herramientas Manuales	%MO		3.0000	7.15	0.21
491505	Secador Áridos 65-115 Tn/H.	HM	1.00	0.0343	46.46	1.59
491406	Cargador sobre llantas 95 HP, 1.7 yd3.	HM	1.00	0.0343	140.57	4.82
492605	Planta de asfalto en caliente 65-115 Tn/H.	HM	1.00	0.0343	318.61	10.93
						17.55
	Insumo Partida					
910112	Arena Triturada para Mezcla Asfáltica	M3		0.4800	47.84	22.96
910113	Arena Gruesa para Mezcla Asfáltica	M3		0.3000	43.29	12.99
910117	Piedra Chancada para Mezcla Asfáltica	M3		0.4100	52.61	21.57
						57.52
TOTAL:						283.50

(1) MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA: TIPO "A" Con fibras de 20 mm. +0.15%						
(3) MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA: TIPO "C" Con fibras de 8 mm. +0.15%						
Rend.	233	M3/DIA	Costo Unitario Directo por M3			323.39
Código	Descripción Insumo	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio	Parcial
	Mano de Obra					
470103	Oficial	HH	2.00	0.0687	16.99	1.17
470104	Peón	HH	10.00	0.3433	15.29	5.25
470121	Operario	HH	1.00	0.0343	21.4	0.73
						7.15
	Materiales					
200103	Ligante asfáltico PEN 85/100	GLN		34.000	5.92	201.28
290175	Fibra Acrílica	KG		3.540	11.00	38.94
						240.22
	Equipos					
370101	Herramientas Manuales	%MO		3.0000	7.15	0.21
491505	Secador Áridos 65-115 Tn/H.	HM	1.00	0.0343	46.46	1.59
491406	Cargador sobre llantas 95 HP, 1.7 yd3.	HM	1.00	0.0343	140.57	4.82
491504	Dosificador de Fibra	HM	1.00	0.0343	27.8	0.95
492605	Planta de asfalto en caliente 65-115 Tn/H.	HM	1.00	0.0343	318.61	10.93
						18.5
	Insumo Partida					
910112	Arena Triturada para Mezcla Asfáltica	M3		0.4800	47.84	22.96
910113	Arena Gruesa para Mezcla Asfáltica	M3		0.3000	43.29	12.99
910117	Piedra Chancada para Mezcla Asfáltica	M3		0.4100	52.61	21.57
						57.52
TOTAL:						323.39

(2) MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA: TIPO "B"				Con fibras de 12 mm.		+0.20%
Rend.	233	M3/DIA	Costo Unitario Directo por	M3	336.37	
Código	Descripción Insumo	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio	Parcial
Mano de Obra						
470103	Oficial	HH	2.00	0.0687	16.99	1.17
470104	Peón	HH	10.00	0.3433	15.29	5.25
470121	Operario	HH	1.00	0.0343	21.4	0.73
						7.15
Materiales						
200103	Ligante asfáltico PEN 85/100	GLN		34.000	5.92	201.28
290175	Fibra Acrílica	KG		4.720	11.00	51.92
						253.2
Equipos						
370101	Herramientas Manuales	%MO		3.0000	7.15	0.21
491505	Secador Áridos 65-115 Tn/H.	HM	1.00	0.0343	46.46	1.59
491406	Cargador sobre llantas 95 HP, 1.7 yd3.	HM	1.00	0.0343	140.57	4.82
491504	Dosificador de Fibra	HM	1.00	0.0343	27.8	0.95
492605	Planta de asfalto en caliente 65-115 Tn/H.	HM	1.00	0.0343	318.61	10.93
						18.5
Insumo Partida						
910112	Arena Triturada para Mezcla Asfáltica	M3		0.4800	47.84	22.96
910113	Arena Gruesa para Mezcla Asfáltica	M3		0.3000	43.29	12.99
910117	Piedra Chancada para Mezcla Asfáltica	M3		0.4100	52.61	21.57
						57.52
TOTAL:						336.37

De los cuadros de precios unitarios en partidas de mezcla asfáltica convencional y modificadas, se puede establecer la diferencia entre los costos por metro cúbico de mezcla asfáltica preparada en planta, no incluyen los costos de transporte ni colocación en obra (los procesos de construcción del pavimento usando mezclas asfálticas modificadas es similar a las de operaciones con asfaltos convencionales, pero se incrementa la compactación necesaria). Se tienen los precios de cada tipo de mezcla en el diagrama de barras siguiente:



Se observa que la variación en el costo de preparación de la mezcla asfáltica modificada con fibras de 20 mm y 8 mm (al 0.15% de fibra) con respecto a la mezcla asfáltica convencional es del 14.1% más, lo que significa que el uso de fibras requiere de una mayor inversión inicial;

pero que a largo plazo compensa y resulta más económico por la mayor resistencia a la fatiga que presenta estas mezclas. Con respecto a las mezclas modificadas con fibras de 12 mm (al 0.20% de fibra) el costo se eleva en 18.6 % respecto a las mezclas convencionales.

A.2. COSTO DE ESPACIADO Y COMPACTADO

Para evaluar el costo de colocación, se asume una carpeta asfáltica de espesor igual a 4 pulgadas (0.10 m), se utiliza el rendimiento de elaboración como referente para el espaciado y compactado.

MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL						
Rend.	2330 (233/0.1)		M2/DIA	Costo Unitario Directo por		M2(e=0.1m) 2.03
Código	Descripción Insumo	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio	Parcial
	Mano de Obra					
470103	Oficial	HH	3.00	0.0103	16.99	0.17
470104	Peón	HH	6.00	0.0206	15.29	0.31
470121	Operario	HH	1.00	0.0034	21.4	0.07
						0.55
	Equipos					
370101	Herramientas Manuales	%MO		3.0000	0.55	0.02
491408	Pavimentador 69 HP	HM	1.00	0.0034	138.91	0.47
495016	Rodillo Tandem. 8-10 Tn.	HM	1.00	0.0034	156.13	0.53
495001	Rodillo neumático 5.5-20 Tn	HM	1.00	0.0034	136.38	0.46
						1.48
TOTAL:						2.03

Para la mezcla modificada se reduce el rendimiento en 10% debido a los incrementos en la compactación durante el colocado de estas mezclas.

MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA: TIPO "A", "B" y "C" (Con fibras al % óptimo)						
Rend.	1890 (210*0.9/0.1)		M2/DIA	Costo Unitario Directo por		M2(e=0.1m) 2.53
Código	Descripción Insumo	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio	Parcial
	Mano de Obra					
470103	Oficial	HH	3.00	0.0127	16.99	0.22
470104	Peón	HH	6.00	0.0254	15.29	0.39
470121	Operario	HH	1.00	0.0042	21.4	0.09
						0.7
	Equipos					
370101	Herramientas Manuales	%MO		3.0000	0.7	0.02
491408	Pavimentador 69 HP	HM	1.00	0.0042	138.91	0.58
495016	Rodillo Tandem. 8-10 Tn.	HM	1.00	0.0042	156.13	0.66
495001	Rodillo neumático 5.5-20 Tn	HM	1.00	0.0042	136.38	0.57
						1.83
TOTAL:						2.53

Anexo B:

Ensayos para

agregados

LABORATORIO DE AGREGADOS, SUELOS, ASFALTO Y CONCRETO

GRAVEDAD ESPECIFICA Y ABSORCIÓN DE AGREGADOS FINOS (MTC E 205 Y ASTM C 128)

Laboratorio Mecánica De Suelos Concretos Y Pavimentos		
TIPO DE AGREGADO	: Arena Gruesa Zarandeada	Hoja 1/1
PROCEDENCIA	: Cantera "Matahuasi"	
NOMBRE DE LA TESIS	: INFLUENCIA DE LA FIBRA SINTÉTICA DE ALTA TENACIDAD DRYMIX RC 4020 EN LA ESTABILIDAD, FLUENCIA Y REDUCCIÓN DE FISURAMIENTO POR FATIGA EN MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE.	
TESISTA	: Bach. DANILO GUTARRA LARA.	
REVISADO POR	: ING. MILLER RODRIGUEZ	
FECHA DE ENSAYO	: 20/03/2018	FECHA DE EMISIÓN: 22/03/2018

I. DATOS		MUESTRA N° 01	MUESTRA N° 02	MUESTRA N° 03	
1	Peso de la arena superficialmente seca + peso del balón + peso del agua	968.2	968.3	968.7	
2	Peso de la arena superficialmente seca + peso del balón	656.2	656.2	656.2	
3	Peso del agua (W = 1-2)	312	312.1	312.5	
4	Peso de la arena secada al horno + peso del balón	648.5	648.3	648.7	
5	Peso del balón	156.2	156.2	156.2	
6	Peso de la arena secada al horno (A = 4-5)	492.3	492.1	492.5	
7	Volumen del balón V = 500 ml	500	500	500	
II. RESULTADOS					PROMEDIO
1	Peso Especifico De Masa [P.E.M. = A / (V - W)]	2.62	2.62	2.63	2.62
2	Peso Especifico De Masa Saturado Superficialmente Seco [P.E.M.S.S.S. = 500 / (V - W)]	2.66	2.66	2.67	2.66
3	Peso Especifico Aparente [P E A. = A / (V - W) - (500 - A)]	2.73	2.73	2.74	2.73
4	Porcentaje De Absorción [(500 - A) / A * 100]	1.56	1.61	1.52	1.56

LABORATORIO DE AGREGADOS, SUELOS, ASFALTO Y CONCRETO

GRAVEDAD ESPECIFICA Y ABSORCIÓN DE AGREGADOS FINOS (MTC E 205 Y ASTM C 128)

Laboratorio Mecánica De Suelos Concretos Y Pavimentos		
TIPO DE AGREGADO	: Arena Gruesa Chancada	Hoja 1/1
PROCEDENCIA	: Cantera "Matahuasi"	
NOMBRE DE LA TESIS	: INFLUENCIA DE LA FIBRA SINTÉTICA DE ALTA TENACIDAD DRYMIX RC 4020 EN LA ESTABILIDAD, FLUENCIA Y REDUCCIÓN DE FISURAMIENTO POR FATIGA EN MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE.	
TESISTA	: Bach. DANILO GUTARRA LARA.	
REVISADO POR	: ING. MILLER RODRIGUEZ	
FECHA DE ENSAYO	: 20/03/2018	FECHA DE EMISIÓN: 22/03/2018

I. DATOS		MUESTRA N° 01	MUESTRA N° 02	MUESTRA N° 03	
1	Peso de la arena superficialmente seca + peso del balón + peso del agua	968.8	968.5	968.9	
2	Peso de la arena superficialmente seca + peso del balón	656.2	656.2	656.2	
3	Peso del agua (W = 1-2)	312.6	312.3	312.7	
4	Peso de la arena secada al horno + peso del balón	648.5	648.1	648.7	
5	Peso del balón	156.2	156.2	156.2	
6	Peso de la arena secada al horno (A = 4-5)	492.3	491.9	492.5	
7	Volumen del balón V = 500 ml	500	500	500	
II. RESULTADOS					PROMEDIO
1	Peso Especifico De Masa [P.E.M. = A / (V - W)]	2.63	2.62	2.63	2.63
2	Peso Especifico De Masa Saturado Superficialmente Seco [P.E.M.S.S.S. = 500 / (V - W)]	2.67	2.66	2.67	2.67
3	Peso Especifico Aparente [P E A. = A / (V - W) - (500 - A)]	2.74	2.74	2.74	2.74
4	Porcentaje De Absorción [(500 - A) / A * 100]	1.56	1.65	1.52	1.58

LABORATORIO DE AGREGADOS, SUELOS, ASFALTO Y CONCRETO

GRAVEDAD ESPECIFICA Y ABSORCIÓN DE AGREGADOS GRUESOS (MTC E 206 Y ASTM C 127)

Laboratorio Mecánica De Suelos Concretos Y Pavimentos		
TIPO DE AGREGADO	: Piedra Triturada de 3/4"	Hoja 1/1
PROCEDENCIA	: Cantera "Matahuasi"	
NOMBRE DE LA TESIS	: INFLUENCIA DE LA FIBRA SINTÉTICA DE ALTA TENACIDAD DRYMIX RC 4020 EN LA ESTABILIDAD, FLUENCIA Y REDUCCIÓN DE FISURAMIENTO POR FATIGA EN MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE.	
TESISTA	: Bach. DANILO GUTARRA LARA.	
REVISADO POR	: ING. MILLER RODRIGUEZ	
FECHA DE ENSAYO	: 20/03/2018	FECHA DE EMISIÓN: 22/03/2018

I. DATOS		MUESTRA N° 01	MUESTRA N° 02	MUESTRA N° 03	
1	Peso de la muestra secada al homo (A)	2963	2960	2966	
2	Peso de la muestra saturada con superficie seca (B)	3000	3000	3000	
3	Peso de la muestra saturada dentro del agua + peso de la canastilla dentro del agua	2870	2867	2873	
4	Peso de la canastilla dentro del agua	989	989	989	
5	Peso de la muestra saturada dentro del agua (C)	1881	1878	1884	
II. RESULTADOS					PROMEDIO
1	Peso Específico De Masa [P.E.M. = A / B-C]	2.65	2.64	2.66	2.65
2	Peso Específico De Masa Saturado Superficialmente Seco [P.E.M.S.S.S. = B / (B - C)]	2.68	2.67	2.69	2.68
3	Peso Específico Aparente [P.E.A. = A / (A - C)]	2.74	2.74	2.74	2.74
4	Porcentaje De Absorción (B - A) / A * 100	1.25	1.35	1.15	1.25

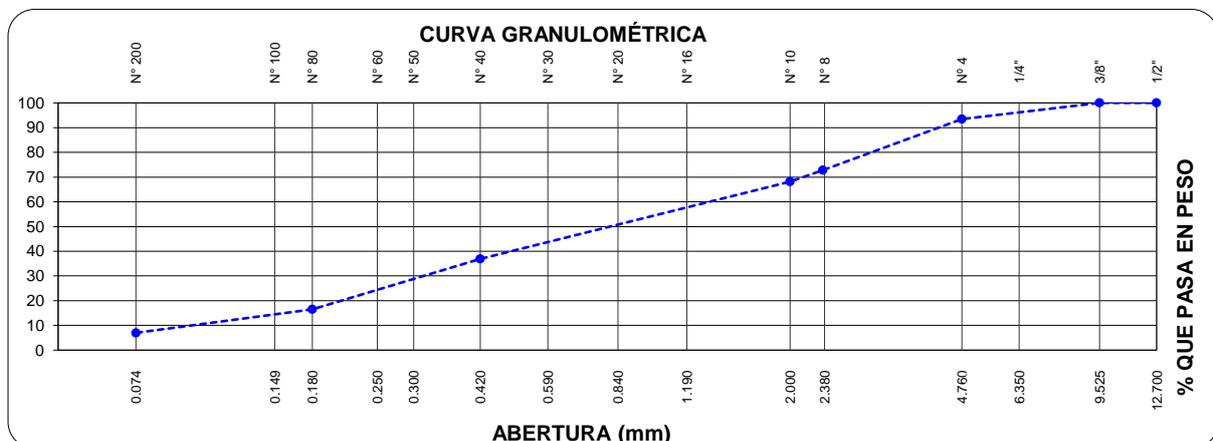
LABORATORIO DE AGREGADOS, SUELOS, ASFALTO Y CONCRETO

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DEL AGREGADO FINO (AASHTO T 88 y ASTM D 422)

Laboratorio Mecánica De Suelos Concretos Y Pavimentos

TIPO DE AGREGADO	: Arena Gruesa Zarandeada	Hoja 1/1
PROCEDENCIA	: Cantera "Matahuasi"	
NOMBRE DE LA TESIS	: INFLUENCIA DE LA FIBRA SINTÉTICA DE ALTA TENACIDAD DRYMIX RC 4020 EN LA ESTABILIDAD, FLUENCIA Y REDUCCIÓN DE FISURAMIENTO POR FATIGA EN MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE.	
TESISTA	: Bach. DANILO GUTARRA LARA.	
REVISADO POR	: ING. MILLER RODRIGUEZ	
FECHA DE ENSAYO	: 20/03/2018	FECHA DE EMISIÓN: 22/03/2018

MALLA		Arena Gruesa Zarandeada			
Tamiz	mm	PESO RETENIDO	% RETENIDO	% RETENIDO ACUMULADO	% QUE PASA
1"	25.400	0.00	0.00	0.00	100.00
3/4"	19.025	0.00	0.00	0.00	100.00
1/2"	12.500	0.00	0.00	0.00	100.00
3/8"	9.500	0.00	0.00	0.00	100.00
Nº 4	4.760	69.30	6.60	6.60	93.40
Nº 8	2.360	216.30	20.60	27.20	72.80
Nº 10	2.000	49.40	4.70	31.90	68.10
Nº 40	0.420	327.60	31.20	63.10	36.90
Nº 80	0.180	214.20	20.40	83.50	16.50
Nº 200	0.074	99.80	9.50	93.00	7.00
< 200		73.50	7.00	100.00	0.00
TOTAL		1050.10	100%		



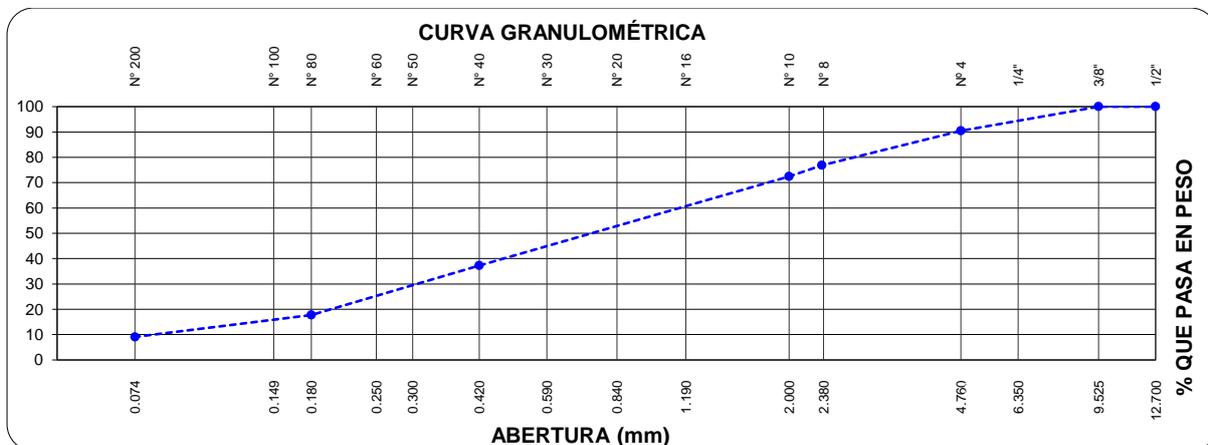
LABORATORIO DE AGREGADOS, SUELOS, ASFALTO Y CONCRETO

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DEL AGREGADO FINO (AASHTO T 88 y ASTM D 422)

Laboratorio Mecánica De Suelos Concretos Y Pavimentos

TIPO DE AGREGADO	: Arena Gruesa Chancada	Hoja 1/1
PROCEDENCIA	: Cantera "Matahuasi"	
NOMBRE DE LA TESIS	: INFLUENCIA DE LA FIBRA SINTÉTICA DE ALTA TENACIDAD DRYMIX RC 4020 EN LA ESTABILIDAD, FLUENCIA Y REDUCCIÓN DE FISURAMIENTO POR FATIGA EN MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE.	
TESISTA	: Bach. DANILO GUTARRA LARA.	
REVISADO POR	: ING. MILLER RODRIGUEZ	
FECHA DE ENSAYO	: 21/03/2018	FECHA DE EMISIÓN: 23/03/2018

MALLA		Arena Gruesa Chancada			
Tamiz	mm	PESO RETENIDO	% RETENIDO	% RETENIDO ACUMULADO	% QUE PASA
1"	25.400	0.00	0.00	0.00	100.00
3/4"	19.025	0.00	0.00	0.00	100.00
1/2"	12.500	0.00	0.00	0.00	100.00
3/8"	9.500	0.00	0.00	0.00	100.00
Nº 4	4.760	117.60	9.60	9.60	90.40
Nº 8	2.360	166.60	13.60	23.20	76.80
Nº 10	2.000	53.90	4.40	27.60	72.40
Nº 40	0.420	430.00	35.10	62.70	37.30
Nº 80	0.180	238.90	19.50	82.20	17.80
Nº 200	0.074	106.60	8.70	90.90	9.10
< 200		111.50	9.10	100.00	0.00
TOTAL		1225.10	100		



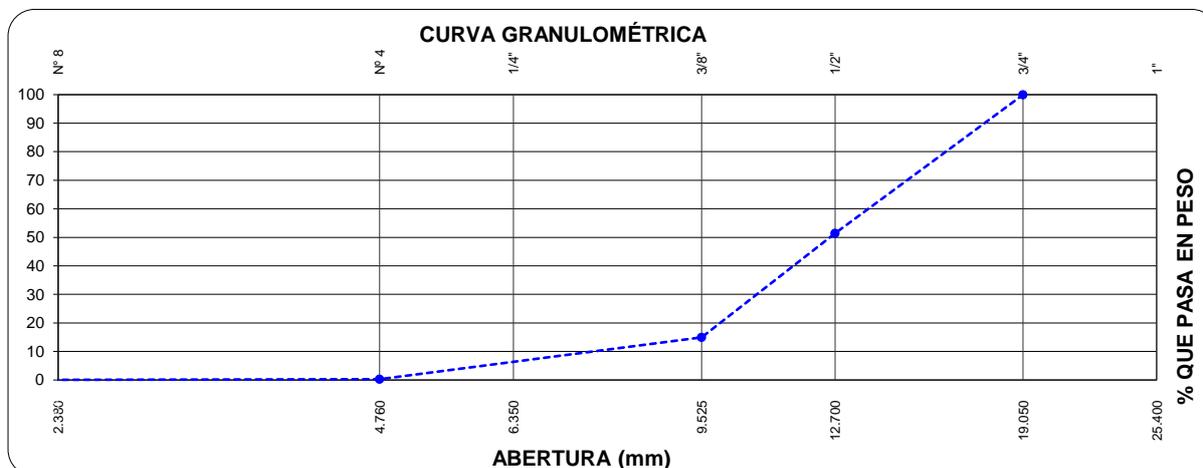
LABORATORIO DE AGREGADOS, SUELOS, ASFALTO Y CONCRETO

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DEL AGREGADO GRUESO (AASHTO T 88 y ASTM D 422)

Laboratorio Mecánica De Suelos Concretos Y Pavimentos

TIPO DE AGREGADO	: Piedra Triturada de 3/4"	Hoja 1/1
PROCEDENCIA	: Cantera "Matahuasi"	
NOMBRE DE LA TESIS	: INFLUENCIA DE LA FIBRA SINTÉTICA DE ALTA TENACIDAD DRYMIX RC 4020 EN LA ESTABILIDAD, FLUENCIA Y REDUCCIÓN DE FISURAMIENTO POR FATIGA EN MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE.	
TESISTA	: Bach. DANILO GUTARRA LARA.	
REVISADO POR	: ING. MILLER RODRIGUEZ	
FECHA DE ENSAYO	: 21/03/2018	FECHA DE EMISIÓN: 23/03/2018

MALLA		Piedra Triturada de 3/4"			
Tamiz	mm	PESO RETENIDO	% RETENIDO	% RETENIDO ACUMULADO	% QUE PASA
2"	50,800	0.00	0.00	0.00	100.00
1 1/2"	38,100	0.00	0.00	0.00	100.00
1"	25,400	0.00	0.00	0.00	100.00
3/4"	19,000	0.00	0.00	0.00	100.00
1/2"	12,500	1628.10	48.60	48.60	51.40
3/8"	9,500	1222.80	36.50	85.10	14.90
Nº 4	4,760	489.10	14.60	99.70	0.30
Nº 8	2,360	8.00	0.24	99.94	0.06
Nº 10	2,000	2.00	0.06	100	0.00
FONDO		0.00	0.00	100	0.00
TOTAL		3350.00	100%		



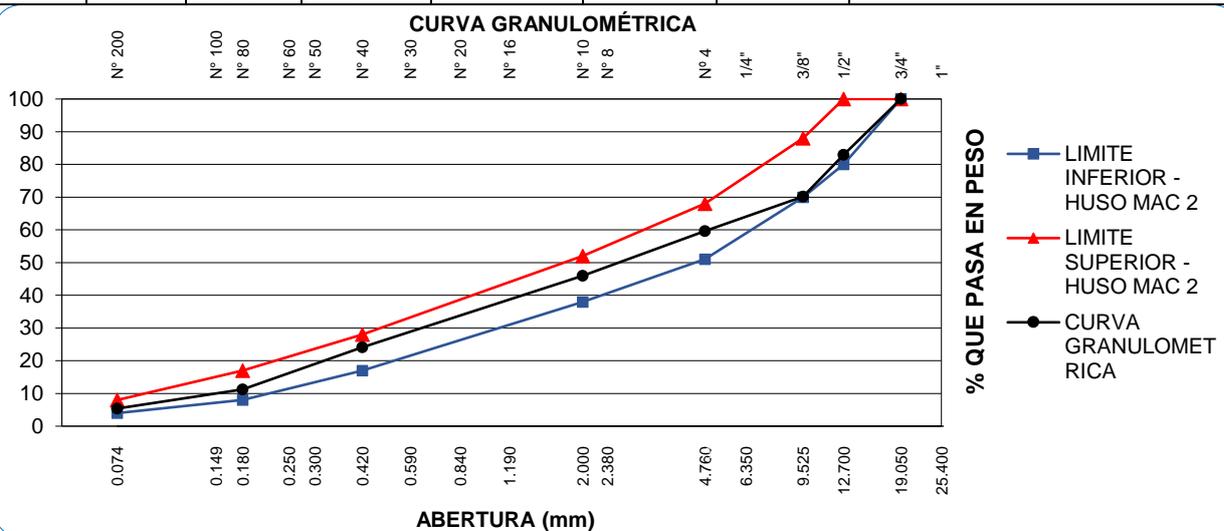
LABORATORIO DE AGREGADOS, SUELOS, ASFALTO Y CONCRETO

**ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DEL AGREGADO GLOBAL
(ASTM C 136)**

Laboratorio Mecánica De Suelos Concretos Y Pavimentos

TIPO DE AGREGADO	: Agregado Global	Hoja 1/1
PROCEDENCIA	: Piedra Triturada de 3/4" (35%), Arena Gruesa Chancada (40%) y Arena Gruesa Zarandeada (25%) - Cantera "Matahuasi"	
NOMBRE DE LA TESIS	: INFLUENCIA DE LA FIBRA SINTÉTICA DE ALTA TENACIDAD DRYMIX RC 4020 EN LA ESTABILIDAD, FLUENCIA Y REDUCCIÓN DE FISURAMIENTO POR FATIGA EN MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE.	
TESISTA	: Bach. DANILO GUTARRA LARA.	
REVISADO POR	: ING. MILLER RODRIGUEZ	
FECHA DE ENSAYO	: 21/03/2018	FECHA DE EMISIÓN: 23/03/2018

Tamiz	mm	Peso Retenido (gramos)	PORCENTAJE			Especific.	Descripción de la muestra
			retenido	acumulado	que pasa		
1 1/2"	38,100	0.0	0.00	0.00	100.00	100	
1"	25.400	0.0	0.00	0.00	100.00	100	
3/4"	19.000	0.0	0.00	0.00	100.00	100	Tamaño Máximo 3/4"
1/2"	12.500	681.7	17.00	17.00	83.00	80-100	Tamaño Máximo Nominal 1/2"
3/8"	9.500	513.3	12.80	29.80	70.20	70-88	
N.º 4	4.760	425.1	10.60	40.40	59.60	51-68	
N.º 10	2.000	545.4	13.60	54.00	46.00	38-52	DISEÑO:
N.º 40	0.420	878.2	21.90	75.90	24.10	17-28	Piedra Triturada de 3/4" 35%
N.º 80	0.180	517.3	12.90	88.80	11.20	8-17	Arena Gruesa Chancada 40%
N.º 200	0.074	232.6	5.80	94.60	5.40	4-8	Arena Gruesa Zarandeada 25%
< 200	--	216.5	5.40	100.00	0.00		
TOTAL		4010.1	100				



LABORATORIO DE AGREGADOS, SUELOS, ASFALTO Y CONCRETO

CALIDAD DE AGREGADOS PARA PAVIMENTOS

Laboratorio Mecánica De Suelos Concretos Y Pavimentos			
TIPO DE AGREGADO	: Agregado Global	Hoja 1/1	
PROCEDENCIA	: Piedra Triturada de 3/4" (35%), Arena Gruesa Chancada (40%) y Arena Gruesa Zarandeada (25%) - Cantera "Matahuasi"		
NOMBRE DE LA TESIS	: INFLUENCIA DE LA FIBRA SINTÉTICA DE ALTA TENACIDAD DRYMIX RC 4020 EN LA ESTABILIDAD, FLUENCIA Y REDUCCIÓN DE FISURAMIENTO POR FATIGA EN MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE.		
TESISTA	: Bach. DANILO GUTARRA LARA.		
REVISADO POR	: ING. MILLER RODRIGUEZ		
FECHA DE ENSAYO	: 23/03/2018	FECHA DE EMISIÓN: 24/03/2018	
IDENTIFICACIÓN			ARENA
DESCRIPCIÓN	PIEDRA DE 3/4"	ARENA CHANCADA	NATURAL ZARANDEADA
Índice Plasticidad (Malla -N°200) (%)		N.P.	N.P.
Peso Unitario Seco Suelto (Kg/m ³)	1455.0	1435.0	1439.0
Peso Unitario Seco Varillado (Kg/m ³)	1578.0	1642.0	1640.0
Abrasión (%)	26.0	...	0.0
Impurezas Orgánicas	Aceptable	Aceptable	Aceptable
Partículas chatas y alargadas (%)	14.2
Caras de fractura (1 o más) (%)	75.0
Caras de fractura (2 o más) (%)	70.0
Equivalente de Arena (%)	78.0	75.0

Anexo C:
Diseño de
mezcla asfáltica
patrón
MÉTODO MARSHALL

C.1. Determinación del óptimo contenido de asfalto

PRE-DISEÑO

LABORATORIO DE AGREGADOS, SUELOS, ASFALTO Y CONCRETO

ENSAYO MARSHALL ASTM D – 6926 y 6927

Laboratorio Mecánica De Suelos Concretos Y Pavimentos		
MATERIAL	: Diseño de Mezcla Asfáltica Patrón – Tesis De Titulación	Hoja 1/7
TESISTA	: Bach. DANILO GUTARRA LARA.	
REVISADO POR	: ING. MILLER RODRIGUEZ	
FECHA DE ENSAYO	: 26/03/2018	FECHA DE EMISIÓN: 27/03/2018

TIPO DE MEZCLA:	DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA PATRÓN		
DISEÑO:	Cemento Asfáltico (C.A.)	4.0%	1250 (gr)
	Piedra Triturada de 3/4" (35%)		
	Arena Gruesa Chancada (40%)	96.0%	
	Arena Gruesa Zarandeada (25%)		
			Peso Por Briqueta
			1250 gramos

BRIQUETA		N°	1A	1B	1C
1	PESO ESPECIFICO DE LA PIEDRA CHANCADA DE 3/4" - BULK		2.65	2.65	2.65
2	PESO ESPECIFICO DE LA ARENA GRUESA CHANCADA - BULK		2.63	2.63	2.63
3	PESO ESPECIFICO DE LA ARENA NATURAL ZARANDEADA - BULK		2.62	2.62	2.62
4	PESO ESPECIFICO APARENTE DEL CEMENTO ASFALTICO		1.018	1.018	1.018
5	C.A. EN PESO DE LA MEZCLA	%	4	4	4
6	ARENA GRUESA CHANCADA EN PESO DE LA MEZCLA	%	38.40	38.40	38.40
7	ARENA NATURAL ZARANDEADA EN PESO DE LA MEZCLA	%	24.00	24.00	24.00
8	PIEDRA CHANCADA DE 3/4" EN PESO DE LA MEZCLA	%	33.60	33.60	33.60
9	TOTAL DE MEZCLA	%	100.00	100.00	100.00
10	PESO ESPECIFICO TEÓRICO MÁXIMO		2.52	2.52	2.52
11	PESO ESPECIFICO BULK DE LA COMBINACIÓN DE AGREGADOS		2.63	2.63	2.63
12	PESO DE LA BRIQUETA AL AIRE	gr	1244.9	1237.4	1239.1
13	PESO DE LA BRIQUETA EN EL AIRE (CONDICIÓN SSS)	gr	1254	1248	1247
14	PESO DE LA BRIQUETA EN EL AGUA	gr	711	703	700
15	Agua absorbida	%	1.70	1.90	1.40
16	VOLUMEN DE LA BRIQUETA	c.c.	543	545	547
17	PESO ESPECIFICO BULK DE LA BRIQUETA	gr/c.c.	2.293	2.27	2.265
18	VACÍOS TOTALES EN LA MEZCLA(VTM)	%	8.92	9.83	10.03
19	VACÍOS EN AGREGADO MINERAL (V.M.A.)	%	16.44	17.28	17.46
20	ASFALTO ABSORBIDO POR EL AGREGADO TOTAL (VFA)	%	45.74	43.09	42.54
21	ESTABILIDAD SIN CORREGIR	Lb	2590.0	2820.0	2640.0
22	FACTOR DE ESTABILIDAD	K	0.93	0.93	0.89
23	ESTABILIDAD CORREGIDA	Lb	2410	2620	2350
24	ESTABILIDAD CORREGIDA - PROMEDIO	Lb	2460		
25	Peso Unitario	gr/c.c.	2.286	2.263	2.258
26	Peso Unitario - Promedio	gr/c.c.	2.269		
27	FLUJO	mm	2.75	2.5	2.5
28	FLUJO - PROMEDIO	mm	2.50		
29	VACÍOS TOTALES EN LA MEZCLA(VTM) - PROMEDIO	%	9.60		
30	VMA - PROMEDIO	%	17.06		
31	VFA - PROMEDIO	%	43.79		
32	coeficiente de variación para la estabilidad		5.76		
33	coeficiente de variación para el flujo		5.77		

LABORATORIO DE AGREGADOS, SUELOS, ASFALTO Y CONCRETO

ENSAYO MARSHALL ASTM D – 6926 y 6927

Laboratorio Mecánica De Suelos Concretos Y Pavimentos		
MATERIAL	: Diseño de Mezcla Asfáltica Patrón – Tesis De Titulación	Hoja 2/7
TESISTA	: Bach. DANILO GUTARRA LARA.	
REVISADO POR	: ING. MILLER RODRIGUEZ	
FECHA DE ENSAYO	: 26/03/2018	FECHA DE EMISIÓN: 27/03/2018

TIPO DE MEZCLA:	DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA PATRÓN		
DISEÑO:	Cemento Asfáltico (C.A.)	4.5%	1250 (gr)
	Piedra Triturada de 3/4" (35%)	95.5%	
	Arena Gruesa Chancada (40%)		
	Arena Gruesa Zarandeada (25%)		
	Peso Por Briqueta		1250 gramos

BRIQUETA		N°	2A	2B	2C
1	PESO ESPECIFICO DE LA PIEDRA CHANCADA DE 3/4" - BULK		2.65	2.65	2.65
2	PESO ESPECIFICO DE LA ARENA GRUESA CHANCADA - BULK		2.63	2.63	2.63
3	PESO ESPECIFICO DE LA ARENA NATURAL ZARANDEADA - BULK		2.62	2.62	2.62
4	PESO ESPECIFICO APARENTE DEL CEMENTO ASFALTICO		1.018	1.018	1.018
5	C.A. EN PESO DE LA MEZCLA	%	4.5	4.5	4.5
6	ARENA GRUESA CHANCADA EN PESO DE LA MEZCLA	%	38.20	38.20	38.20
7	ARENA NATURAL ZARANDEADA EN PESO DE LA MEZCLA	%	23.88	23.88	23.88
8	PIEDRA CHANCADA DE 3/4" EN PESO DE LA MEZCLA	%	33.43	33.43	33.43
9	TOTAL DE MEZCLA	%	100.00	100.00	100.00
10	PESO ESPECIFICO TEÓRICO MÁXIMO		2.50	2.50	2.50
11	PESO ESPECIFICO BULK DE LA COMBINACIÓN DE AGREGADOS		2.63	2.63	2.63
12	PESO DE LA BRIQUETA AL AIRE	gr	1242.6	1242.3	1255.4
13	PESO DE LA BRIQUETA EN EL AIRE (CONDICIÓN SSS)	gr	1250	1248	1262
14	PESO DE LA BRIQUETA EN EL AGUA	gr	711	714	720
15	Agua absorbida	%	1.40	1.10	1.20
16	VOLUMEN DE LA BRIQUETA	c.c.	539	534	542
17	PESO ESPECIFICO BULK DE LA BRIQUETA	gr/c.c.	2.305	2.326	2.316
18	VACÍOS TOTALES EN LA MEZCLA(VTM)	%	7.74	6.90	7.30
19	VACÍOS EN AGREGADO MINERAL (V.M.A.)	%	16.44	15.68	16.04
20	ASFALTO ABSORBIDO POR EL AGREGADO TOTAL (VFA)	%	52.91	55.99	54.49
21	ESTABILIDAD SIN CORREGIR	Lb	2750.0	2650.0	2850.0
22	FACTOR DE ESTABILIDAD	K	0.93	0.96	0.93
23	ESTABILIDAD CORREGIDA	Lb	2560	2540	2650
24	ESTABILIDAD CORREGIDA - PROMEDIO	Lb	2580		
25	Peso Unitario	gr/c.c.	2.298	2.319	2.309
26	Peso Unitario - Promedio	gr/c.c.	2.309		
27	FLUJO	mm	3.00	2.75	2.75
28	FLUJO - PROMEDIO	mm	2.75		
29	VACÍOS TOTALES EN LA MEZCLA(VTM) - PROMEDIO	%	7.32		
30	VMA - PROMEDIO	%	16.06		
31	VFA - PROMEDIO	%	54.46		
32	coeficiente de variación para la estabilidad		2.27		
33	coeficiente de variación para el flujo		5.25		

LABORATORIO DE AGREGADOS, SUELOS, ASFALTO Y CONCRETO

ENSAYO MARSHALL ASTM D – 6926 y 6927

Laboratorio Mecánica De Suelos Concretos Y Pavimentos		
MATERIAL	: Diseño de Mezcla Asfáltica Patrón – Tesis De Titulación	Hoja 3/7
TESISTA	: Bach. DANILO GUTARRA LARA.	
REVISADO POR	: ING. MILLER RODRIGUEZ	
FECHA DE ENSAYO	: 26/03/2018	FECHA DE EMISIÓN: 27/03/2018

TIPO DE MEZCLA:	DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA PATRÓN		
DISEÑO:	Cemento Asfáltico (C.A.)	5.0%	1250 (gr)
	Piedra Triturada de 3/4" (35%)	95.0%	
	Arena Gruesa Chancada (40%)		
	Arena Gruesa Zarandeada (25%)		
	Peso Por Briqueta		1250 gramos

BRIQUETA		N°	3A	3B	3C
1	PESO ESPECIFICO DE LA PIEDRA CHANCADA DE 3/4" - BULK		2.65	2.65	2.65
2	PESO ESPECIFICO DE LA ARENA GRUESA CHANCADA - BULK		2.63	2.63	2.63
3	PESO ESPECIFICO DE LA ARENA NATURAL ZARANDEADA - BULK		2.62	2.62	2.62
4	PESO ESPECIFICO APARENTE DEL CEMENTO ASFALTICO		1.018	1.018	1.018
5	C.A. EN PESO DE LA MEZCLA	%	5	5	5
6	ARENA GRUESA CHANCADA EN PESO DE LA MEZCLA	%	38.00	38.00	38.00
7	ARENA NATURAL ZARANDEADA EN PESO DE LA MEZCLA	%	23.75	23.75	23.75
8	PIEDRA CHANCADA DE 3/4" EN PESO DE LA MEZCLA	%	33.25	33.25	33.25
9	TOTAL DE MEZCLA	%	100.00	100.00	100.00
10	PESO ESPECIFICO TEÓRICO MÁXIMO		2.48	2.48	2.48
11	PESO ESPECIFICO BULK DE LA COMBINACIÓN DE AGREGADOS		2.63	2.63	2.63
12	PESO DE LA BRIQUETA AL AIRE	gr	1238.9	1246.8	1239.6
13	PESO DE LA BRIQUETA EN EL AIRE (CONDICIÓN SSS)	gr	1246	1254	1248
14	PESO DE LA BRIQUETA EN EL AGUA	gr	717	716	718
15	Agua absorbida	%	1.30	1.30	1.60
16	VOLUMEN DE LA BRIQUETA	c.c.	529	538	530
17	PESO ESPECIFICO BULK DE LA BRIQUETA	gr/c.c.	2.342	2.317	2.339
18	VACÍOS TOTALES EN LA MEZCLA(VTM)	%	5.55	6.56	5.67
19	VACÍOS EN AGREGADO MINERAL (V.M.A.)	%	15.55	16.45	15.65
20	ASFALTO ABSORBIDO POR EL AGREGADO TOTAL (VFA)	%	64.31	60.14	63.79
21	ESTABILIDAD SIN CORREGIR	Lb	2350.0	2730.0	2460.0
22	FACTOR DE ESTABILIDAD	K	0.96	0.93	0.96
23	ESTABILIDAD CORREGIDA	Lb	2260	2540	2360
24	ESTABILIDAD CORREGIDA - PROMEDIO	Lb	2390		
25	Peso Unitario	gr/c.c.	2.335	2.310	2.332
26	Peso Unitario - Promedio	gr/c.c.	2.326		
27	FLUJO	mm	3.5	3.25	3.25
28	FLUJO - PROMEDIO	mm	3.25		
29	VACÍOS TOTALES EN LA MEZCLA(VTM) - PROMEDIO	%	5.92		
30	VMA - PROMEDIO	%	15.88		
31	VFA - PROMEDIO	%	62.75		
32	coeficiente de variación para la estabilidad		5.94		
33	coeficiente de variación para el flujo		4.44		

LABORATORIO DE AGREGADOS, SUELOS, ASFALTO Y CONCRETO

ENSAYO MARSHALL ASTM D – 6926 y 6927

Laboratorio Mecánica De Suelos Concretos Y Pavimentos		
MATERIAL	: Diseño de Mezcla Asfáltica Patrón – Tesis De Titulación	Hoja 4/7
TESISTA	: Bach. DANILO GUTARRA LARA.	
REVISADO POR	: ING. MILLER RODRIGUEZ	
FECHA DE ENSAYO	: 26/03/2018	FECHA DE EMISIÓN: 27/03/2018

TIPO DE MEZCLA:	DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA PATRÓN		
DISEÑO:	Cemento Asfáltico (C.A.)	5.5%	1250 (gr)
	Piedra Triturada de 3/4" (35%)	94.5%	
	Arena Gruesa Chancada (40%)		
	Arena Gruesa Zarandeada (25%)		
			Peso Por Briqueta 1250 gramos

BRIQUETA		N°	4A	4B	4C
1	PESO ESPECIFICO DE LA PIEDRA CHANCADA DE 3/4" - BULK		2.65	2.65	2.65
2	PESO ESPECIFICO DE LA ARENA GRUESA CHANCADA - BULK		2.63	2.63	2.63
3	PESO ESPECIFICO DE LA ARENA NATURAL ZARANDEADA - BULK		2.62	2.62	2.62
4	PESO ESPECIFICO APARENTE DEL CEMENTO ASFALTICO		1.018	1.018	1.018
5	C.A. EN PESO DE LA MEZCLA	%	5.5	5.5	5.5
6	ARENA GRUESA CHANCADA EN PESO DE LA MEZCLA	%	37.80	37.80	37.80
7	ARENA NATURAL ZARANDEADA EN PESO DE LA MEZCLA	%	23.63	23.63	23.63
8	PIEDRA CHANCADA DE 3/4" EN PESO DE LA MEZCLA	%	33.08	33.08	33.08
9	TOTAL DE MEZCLA	%	100.00	100.00	100.00
10	PESO ESPECIFICO TEÓRICO MÁXIMO		2.46	2.46	2.46
11	PESO ESPECIFICO BULK DE LA COMBINACIÓN DE AGREGADOS		2.63	2.63	2.63
12	PESO DE LA BRIQUETA AL AIRE	gr	1234.3	1228.6	1251.8
13	PESO DE LA BRIQUETA EN EL AIRE (CONDICIÓN SSS)	gr	1239	1232	1256
14	PESO DE LA BRIQUETA EN EL AGUA	gr	715	716	728
15	Agua absorbida	%	0.90	0.70	0.80
16	VOLUMEN DE LA BRIQUETA	c.c.	524	516	528
17	PESO ESPECIFICO BULK DE LA BRIQUETA	gr/c.c.	2.356	2.381	2.371
18	VACÍOS TOTALES EN LA MEZCLA(VTM)	%	4.27	3.25	3.66
19	VACÍOS EN AGREGADO MINERAL (V.M.A.)	%	15.49	14.59	14.95
20	ASFALTO ABSORBIDO POR EL AGREGADO TOTAL (VFA)	%	72.46	77.73	75.55
21	ESTABILIDAD SIN CORREGIR	Lb	2420.0	2260.0	2610.0
22	FACTOR DE ESTABILIDAD	K	0.96	1.00	0.96
23	ESTABILIDAD CORREGIDA	Lb	2320	2260	2510
24	ESTABILIDAD CORREGIDA - PROMEDIO	Lb		2360	
25	Peso Unitario	gr/c.c.	2.349	2.374	2.364
26	Peso Unitario - Promedio	gr/c.c.		2.362	
27	FLUJO	mm	3	3.5	3.5
28	FLUJO - PROMEDIO	mm		3.25	
29	VACÍOS TOTALES EN LA MEZCLA(VTM) - PROMEDIO	%		3.72	
30	VMA - PROMEDIO	%		15.01	
31	VFA - PROMEDIO	%		75.25	
32	coeficiente de variación para la estabilidad			5.53	
33	coeficiente de variación para el flujo			8.88	

LABORATORIO DE AGREGADOS, SUELOS, ASFALTO Y CONCRETO

ENSAYO MARSHALL ASTM D – 6926 y 6927

Laboratorio Mecánica De Suelos Concretos Y Pavimentos		
MATERIAL	: Diseño de Mezcla Asfáltica Patrón – Tesis De Titulación	Hoja 5/7
TESISTA	: Bach. DANILO GUTARRA LARA.	
REVISADO POR	: ING. MILLER RODRIGUEZ	
FECHA DE ENSAYO	: 26/03/2018	FECHA DE EMISIÓN: 27/03/2018

TIPO DE MEZCLA:	DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA PATRÓN		
DISEÑO:	Cemento Asfáltico (C.A.)	6.0%	1250 (gr)
	Piedra Triturada de 3/4" (35%)	94.0%	
	Arena Gruesa Chancada (40%)		
	Arena Gruesa Zarandeada (25%)		
			Peso Por Briqueta 1250 gramos

BRIQUETA		N°	5A	5B	5C
1	PESO ESPECIFICO DE LA PIEDRA CHANCADA DE 3/4" - BULK		2.65	2.65	2.65
2	PESO ESPECIFICO DE LA ARENA GRUESA CHANCADA - BULK		2.63	2.63	2.63
3	PESO ESPECIFICO DE LA ARENA NATURAL ZARANDEADA - BULK		2.62	2.62	2.62
4	PESO ESPECIFICO APARENTE DEL CEMENTO ASFALTICO		1.018	1.018	1.018
5	C.A. EN PESO DE LA MEZCLA	%	6	6	6
6	ARENA GRUESA CHANCADA EN PESO DE LA MEZCLA	%	37.60	37.60	37.60
7	ARENA NATURAL ZARANDEADA EN PESO DE LA MEZCLA	%	23.50	23.50	23.50
8	PIEDRA CHANCADA DE 3/4" EN PESO DE LA MEZCLA	%	32.90	32.90	32.90
9	TOTAL DE MEZCLA	%	100.00	100.00	100.00
10	PESO ESPECIFICO TEÓRICO MÁXIMO		2.44	2.44	2.44
11	PESO ESPECIFICO BULK DE LA COMBINACIÓN DE AGREGADOS		2.63	2.63	2.63
12	PESO DE LA BRIQUETA AL AIRE	gr	1239	1247.1	1246.3
13	PESO DE LA BRIQUETA EN EL AIRE (CONDICIÓN SSS)	gr	1242	1250	1249
14	PESO DE LA BRIQUETA EN EL AGUA	gr	716	723	718
15	Agua absorbida	%	0.60	0.60	0.50
16	VOLUMEN DE LA BRIQUETA	c.c.	526	527	531
17	PESO ESPECIFICO BULK DE LA BRIQUETA	gr/c.c.	2.356	2.366	2.347
18	VACÍOS TOTALES EN LA MEZCLA(VTM)	%	3.55	3.14	3.92
19	VACÍOS EN AGREGADO MINERAL (V.M.A.)	%	15.94	15.58	16.26
20	ASFALTO ABSORBIDO POR EL AGREGADO TOTAL (VFA)	%	77.74	79.86	75.91
21	ESTABILIDAD SIN CORREGIR	Lb	2410.0	2380.0	2170.0
22	FACTOR DE ESTABILIDAD	K	0.96	0.96	0.96
23	ESTABILIDAD CORREGIDA	Lb	2310	2280	2080
24	ESTABILIDAD CORREGIDA - PROMEDIO	Lb	2220		
25	Peso Unitario	gr/c.c.	2.349	2.359	2.340
26	Peso Unitario - Promedio	gr/c.c.	2.349		
27	FLUJO	mm	3.5	4.0	4.0
28	FLUJO - PROMEDIO	mm	3.75		
29	VACÍOS TOTALES EN LA MEZCLA(VTM) - PROMEDIO	%	3.53		
30	VMA - PROMEDIO	%	15.92		
31	VFA - PROMEDIO	%	77.84		
32	coeficiente de variación para la estabilidad		5.63		
33	coeficiente de variación para el flujo		7.70		

LABORATORIO DE AGREGADOS, SUELOS, ASFALTO Y CONCRETO

ENSAYO MARSHALL ASTM D – 6926 y 6927

Laboratorio Mecánica De Suelos Concretos Y Pavimentos		
MATERIAL	: Diseño de Mezcla Asfáltica Patrón – Tesis De Titulación	Hoja 6/7
TESISTA	: Bach. DANILO GUTARRA LARA.	
REVISADO POR	: ING. MILLER RODRIGUEZ	
FECHA DE ENSAYO	: 26/03/2018	FECHA DE EMISIÓN: 27/03/2018

TIPO DE MEZCLA:	DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA PATRÓN		
DISEÑO:	Cemento Asfáltico (C.A.)	6.5%	1250 (gr)
	Piedra Triturada de 3/4" (35%)	93.5%	
	Arena Gruesa Chancada (40%)		
	Arena Gruesa Zarandeada (25%)		
	Peso Por Briqueta		1250 gramos

BRIQUETA		N°	6A	6B	6C
1	PESO ESPECIFICO DE LA PIEDRA CHANCADA DE 3/4" - BULK		2.65	2.65	2.65
2	PESO ESPECIFICO DE LA ARENA GRUESA CHANCADA - BULK		2.63	2.63	2.63
3	PESO ESPECIFICO DE LA ARENA NATURAL ZARANDEADA - BULK		2.62	2.62	2.62
4	PESO ESPECIFICO APARENTE DEL CEMENTO ASFALTICO		1.018	1.018	1.018
5	C.A. EN PESO DE LA MEZCLA	%	6.5	6.5	6.5
6	ARENA GRUESA CHANCADA EN PESO DE LA MEZCLA	%	37.40	37.40	37.40
7	ARENA NATURAL ZARANDEADA EN PESO DE LA MEZCLA	%	23.38	23.38	23.38
8	PIEDRA CHANCADA DE 3/4" EN PESO DE LA MEZCLA	%	32.73	32.73	32.73
9	TOTAL DE MEZCLA	%	100.00	100.00	100.00
10	PESO ESPECIFICO TEÓRICO MÁXIMO		2.42	2.42	2.42
11	PESO ESPECIFICO BULK DE LA COMBINACIÓN DE AGREGADOS		2.63	2.63	2.63
12	PESO DE LA BRIQUETA AL AIRE	gr	1239.1	1226.7	1245.6
13	PESO DE LA BRIQUETA EN EL AIRE (CONDICIÓN SSS)	gr	1242	1227	1248
14	PESO DE LA BRIQUETA EN EL AGUA	gr	709	708	716
15	Agua absorbida	%	0.50	0.10	0.50
16	VOLUMEN DE LA BRIQUETA	c.c.	533	519	532
17	PESO ESPECIFICO BULK DE LA BRIQUETA	gr/c.c.	2.325	2.364	2.341
18	VACÍOS TOTALES EN LA MEZCLA(VTM)	%	4.11	2.50	3.45
19	VACÍOS EN AGREGADO MINERAL (V.M.A.)	%	17.48	16.10	16.91
20	ASFALTO ABSORBIDO POR EL AGREGADO TOTAL (VFA)	%	76.50	84.48	79.62
21	ESTABILIDAD SIN CORREGIR	Lb	1950.0	2110.0	2060.0
22	FACTOR DE ESTABILIDAD	K	0.96	1.00	0.96
23	ESTABILIDAD CORREGIDA	Lb	1870	2110	1980
24	ESTABILIDAD CORREGIDA - PROMEDIO	Lb	1990		
25	Peso Unitario	gr/c.c.	2.318	2.357	2.334
26	Peso Unitario - Promedio	gr/c.c.	2.336		
27	FLUJO	mm	4.25	4.5	4
28	FLUJO - PROMEDIO	mm	4.25		
29	VACÍOS TOTALES EN LA MEZCLA(VTM) - PROMEDIO	%	3.35		
30	VMA - PROMEDIO	%	16.83		
31	VFA - PROMEDIO	%	80.20		
32	coeficiente de variación para la estabilidad		6.04		
33	coeficiente de variación para el flujo		5.88		

LABORATORIO DE AGREGADOS, SUELOS, ASFALTO Y CONCRETO

ENSAYO MARSHALL ASTM D – 6926 y 6927

Laboratorio Mecánica De Suelos Concretos Y Pavimentos

MATERIAL	: Diseño de Mezcla Asfáltica Patrón – Tesis De Titulación	Hoja 7/7
TESISTA	: Bach. DANILO GUTARRA LARA.	
REVISADO POR	: ING. MILLER RODRIGUEZ	
FECHA DE ENSAYO	: 26/03/2018	FECHA DE EMISIÓN: 27/03/2018

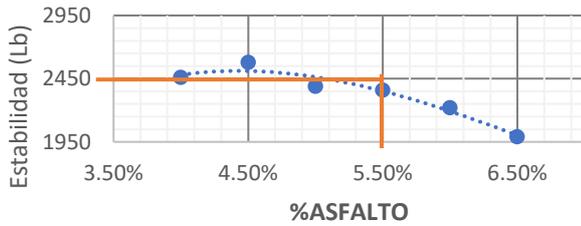
TIPO DE MEZCLA: DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA PATRÓN

RESUMEN DE RESULTADOS

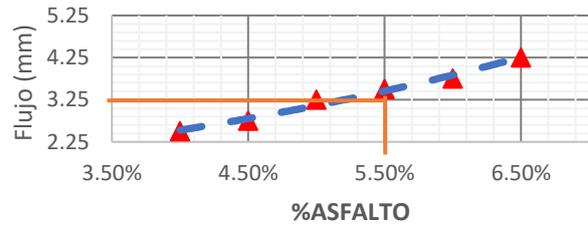
BRIQUETA	UNID.	-0.3%	ÓPTIMO % C.A.	-0.3%	ESPECIFICACIÓN
1 GOLPES POR LADO			75		75
2 CEMENTO ASFÁLTICO	%	5.48	5.50	5.52	(+/- 0.3%)
3 VACÍOS TOTALES EN LA MEZCLA(VTM)	%		4.00		3 - 5
4 VACÍOS EN AGREGADO MINERAL (VMA)	%		15.00		Min. 14
5 ASFALTO ABSORBIDO POR EL AGREGADO TOTAL (VFA)	%		75.00		65-75
6 ESTABILIDAD	Lb		2360		1832
7 PESO UNITARIO	gr/c.c.		2.362		
8 FLUJO	mm		3.25		2 - 3.5
9 ESTABILIDAD/FLUJO	Kg/cm		3294		1700-4000

El óptimo contenido de asfalto para la presente investigación será aquel que luego del ensayo de Estabilidad y Flujo logre alcanzar un contenido de vacíos igual a 4%, además una estabilidad como Mínimo de 8.15 kN (1832 Lb). Pero teniendo un flujo entre 2 y 3.5 mm. Este criterio obedece al objetivo trazado para la presente investigación, ya que se pretende evaluar la Estabilidad, Flujo y Resistencia al fisuramiento por fatiga.

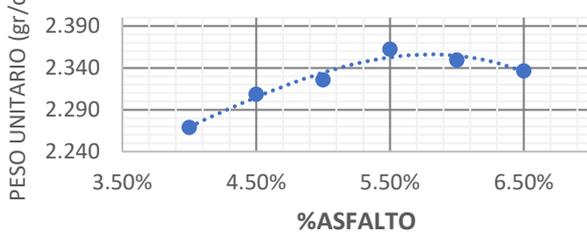
ESTABILIDAD VS. % DE ASFALTO



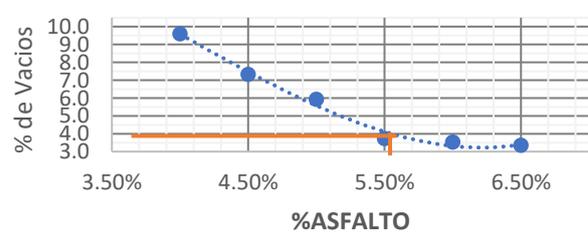
FLUJO VS. % DE ASFALTO



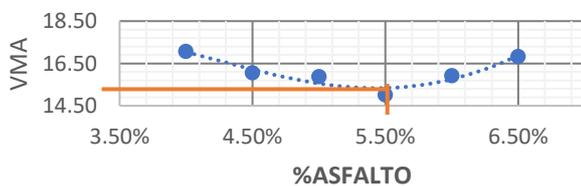
PESO UNITARIO VS. % DE ASFALTO



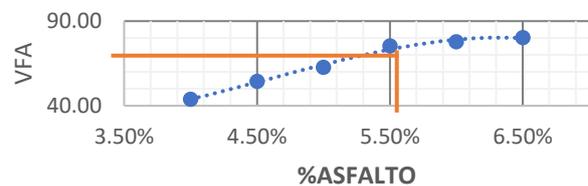
% VACIOS VS. % DE ASFALTO



% Vacios en el Agregado Mineral (VMA) VS. % DE ASFALTO



% VACIOS LLENOS CON ASFALTO VS. % DE ASFALTO



C.2. Mezcla asfáltica patrón

LABORATORIO DE AGREGADOS, SUELOS, ASFALTO Y CONCRETO

ENSAYO MARSHALL ASTM D – 6926 y 6927

Laboratorio Mecánica De Suelos Concretos Y Pavimentos		
MATERIAL	: Mezcla Asfáltica Patrón – Tesis De Titulación	Hoja 1/1
TESISTA	: Bach. DANILO GUTARRA LARA.	
REVISADO POR	: ING. MILLER RODRIGUEZ	
FECHA DE ENSAYO	: 02/04/2018	FECHA DE EMISIÓN: 03/04/2018

TIPO DE MEZCLA: MEZCLA ASFÁLTICA PATRÓN								
DISEÑO:		Cemento Asfáltico (C.A.)	5.5%	1250 (gr)			Peso Por Briqueta	
		Piedra Triturada de 3/4" (35%)	94.5%				1250 gramos	
		Arena Gruesa Chancada (40%)						
		Arena Gruesa Zarandeada (25%)						
		Fibra Acrílica	0.0%	0.0 (gr)				
BRIQUETA		N°	1A	1B	1C	1D	1E	
1	PESO ESPECIFICO DE LA PIEDRA CHANCADA DE 3/4" - BULK		2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	
2	PESO ESPECIFICO DE LA ARENA GRUESA CHANCADA - BULK		2.63	2.63	2.63	2.63	2.63	
3	PESO ESPECIFICO DE LA ARENA NATURAL ZARANDEADA - BULK		2.62	2.62	2.62	2.62	2.62	
4	PESO ESPECIFICO APARENTE DE LA FIBRA		1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	
5	PESO ESPECIFICO APARENTE DEL CEMENTO ASFALTICO		1.018	1.018	1.018	1.018	1.018	
6	FIBRA ACRÍLICA EN PESO DE LA MEZCLA	%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
7	C.A. EN PESO DE LA MEZCLA	%	5.50	5.50	5.50	5.50	5.50	
8	ARENA GRUESA CHANCADA EN PESO DE LA MEZCLA	%	37.80	37.80	37.80	37.80	37.80	
9	ARENA NATURAL ZARANDEADA EN PESO DE LA MEZCLA	%	23.63	23.63	23.63	23.63	23.63	
10	PIEDRA CHANCADA DE 3/4" EN PESO DE LA MEZCLA	%	33.08	33.08	33.08	33.08	33.08	
11	TOTAL DE MEZCLA	%	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	
12	PESO ESPECIFICO TEÓRICO MÁXIMO		2.461	2.461	2.461	2.461	2.461	
13	PESO ESPECIFICO BULK DE LA COMBINACIÓN DE AGREGADOS		2.63	2.63	2.63	2.63	2.63	
14	PESO DE LA BRIQUETA AL AIRE	gr	1239.8	1242.4	1246.1	1238.7	1237.5	
15	PESO DE LA BRIQUETA EN EL AIRE (CONDICIÓN SSS)	gr	1243	1247	1249	1242	1240	
16	PESO DE LA BRIQUETA EN EL AGUA	gr	717	719	722	721	720	
17	Agua absorbida	%	0.60	0.90	0.60	0.6	0.5	
18	VOLUMEN DE LA BRIQUETA	c.c.	526	528	527	521	520	
19	PESO ESPECIFICO BULK DE LA BRIQUETA	gr/c.c.	2.357	2.353	2.365	2.378	2.38	
20	VACÍOS TOTALES EN LA MEZCLA(VTM)	%	4.22	4.39	3.90	3.37	3.29	
21	VACÍOS EN AGREGADO MINERAL (V.M.A.)	%	15.45	15.60	15.17	14.70	14.63	
22	ASFALTO ABSORBIDO POR EL AGREGADO TOTAL (VFA)	%	72.66	71.87	74.29	77.07	77.51	
23	ESTABILIDAD SIN CORREGIR	Lb	2220.0	2420.0	2500.0	2240.0	2280.0	
24	FACTOR DE ESTABILIDAD	K	0.96	0.96	0.96	1	1	
25	ESTABILIDAD CORREGIDA	Lb	2130	2320	2400	2240	2280	
26	ESTABILIDAD CORREGIDA - PROMEDIO	Lb	2270					
27	Peso Unitario	gr/c.c.	2.350	2.346	2.358	2.371	2.373	
28	Peso Unitario - Promedio	gr/c.c.	2.360					
29	FLUJO	mm	3.50	3.50	3.50	3.25	3.25	
30	FLUJO - PROMEDIO	mm	3.50					
31	VACÍOS TOTALES EN LA MEZCLA(VTM) - PROMEDIO	%	3.83					
32	VMA - PROMEDIO	%	15.11					
33	VFA - PROMEDIO	%	74.68					
34	coeficiente de variación para la estabilidad		4.40					
35	coeficiente de variación para el flujo		3.91					

**Anexo D:
Diseño de
mezcla asfáltica
modificada
TIPO A**

MÉTODO MARSHALL

FIBRA ACRÍLICA DE 8 mm

LABORATORIO DE AGREGADOS, SUELOS, ASFALTO Y CONCRETO

ENSAYO MARSHALL ASTM D – 6926 y 6927

Laboratorio Mecánica De Suelos Concretos Y Pavimentos		
MATERIAL	: Mezcla Asfáltica Modificada-Tipo A – Tesis De Titulación	Hoja 1/9
TESISTA	: Bach. DANILO GUTARRA LARA.	
REVISADO POR	: ING. MILLER RODRIGUEZ	
FECHA DE ENSAYO	: 03/04/2018	FECHA DE EMISIÓN: 04/04/2018

TIPO DE MEZCLA:	MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA CON FIBRAS ACRÍLICAS DE 20 mm – TIPO A.		
DISEÑO:	Cemento Asfáltico (C.A.)	5.5%	1250 (gr)
	Piedra Triturada de 3/4" (35%)	94.5%	
	Arena Gruesa Chancada (40%)		
	Arena Gruesa Zarandeada (25%)		
	Fibra Acrílica de 20 mm	0.05%	0.63 (gr)
Peso Por Briqueta			1250.63 gramos

BRIQUETA		N°	1A	1B	1C	1D	1E
1	PESO ESPECIFICO DE LA PIEDRA CHANCADA DE 3/4" - BULK		2.65	2.65	2.65	2.65	2.65
2	PESO ESPECIFICO DE LA ARENA GRUESA CHANCADA - BULK		2.63	2.63	2.63	2.63	2.63
3	PESO ESPECIFICO DE LA ARENA NATURAL ZARANDEADA - BULK		2.62	2.62	2.62	2.62	2.62
4	PESO ESPECIFICO APARENTE DE LA FIBRA		1.17	1.17	1.17	1.17	1.17
5	PESO ESPECIFICO APARENTE DEL CEMENTO ASFALTICO		1.018	1.018	1.018	1.018	1.018
6	FIBRA ACRÍLICA EN PESO DE LA MEZCLA	%	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
7	C.A. EN PESO DE LA MEZCLA	%	5.497	5.497	5.497	5.497	5.497
8	ARENA GRUESA CHANCADA EN PESO DE LA MEZCLA	%	37.78	37.78	37.78	37.78	37.78
9	ARENA NATURAL ZARANDEADA EN PESO DE LA MEZCLA	%	23.61	23.61	23.61	23.61	23.61
10	PIEDRA CHANCADA DE 3/4" EN PESO DE LA MEZCLA	%	33.06	33.06	33.06	33.06	33.06
11	TOTAL DE MEZCLA	%	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
12	PESO ESPECIFICO TEÓRICO MÁXIMO		2.460	2.460	2.460	2.460	2.460
13	PESO ESPECIFICO BULK DE LA COMBINACIÓN DE AGREGADOS		2.63	2.63	2.63	2.63	2.63
14	PESO DE LA BRIQUETA AL AIRE	gr	1244.5	1242.4	1242.8	1245.8	1241.4
15	PESO DE LA BRIQUETA EN EL AIRE (CONDICIÓN SSS)	gr	1247.0	1244.0	1246.0	1249.0	1245.0
16	PESO DE LA BRIQUETA EN EL AGUA	gr	724.0	722.0	720.0	724.0	718.0
17	Agua absorbida	%	0.5	0.3	0.6	0.6	0.7
18	VOLUMEN DE LA BRIQUETA	c.c.	523	522	526	525.00	527.00
19	PESO ESPECIFICO BULK DE LA BRIQUETA	gr/c.c.	2.38	2.38	2.363	2.37	2.36
20	VACÍOS TOTALES EN LA MEZCLA(VTM)	%	3.24	3.24	3.93	3.52	4.21
21	VACÍOS EN AGREGADO MINERAL (V.M.A.)	%	14.67	14.67	15.28	14.92	15.53
22	ASFALTO ABSORBIDO POR EL AGREGADO TOTAL (VFA)	%	77.94	77.94	74.29	76.40	72.88
23	ESTABILIDAD SIN CORREGIR	Lb	2330.0	2350.0	2450.0	2480.0	2570.0
24	FACTOR DE ESTABILIDAD	K	0.96	1	0.96	0.96	0.96
25	ESTABILIDAD CORREGIDA	Lb	2240	2350	2350	2380	2470
26	ESTABILIDAD CORREGIDA - PROMEDIO	Lb	2360				
27	Peso Unitario	gr/c.c.	2.373	2.373	2.356	2.37	2.35
28	Peso Unitario - Promedio	gr/c.c.	2.363				
29	FLUJO	mm	3.5	3.25	3	3.25	3.50
30	FLUJO - PROMEDIO	mm	3.25				
31	VACÍOS TOTALES EN LA MEZCLA(VTM) - PROMEDIO	%	3.63				
32	VMA - PROMEDIO	%	15.01				
33	VFA - PROMEDIO	%	75.89				
34	coeficiente de variación para la estabilidad		3.49				
35	coeficiente de variación para el flujo		6.44				

LABORATORIO DE AGREGADOS, SUELOS, ASFALTO Y CONCRETO

ENSAYO MARSHALL ASTM D – 6926 y 6927

Laboratorio Mecánica De Suelos Concretos Y Pavimentos		
MATERIAL	: Mezcla Asfáltica Modificada-Tipo A – Tesis De Titulación	Hoja 2/9
TESISTA	: Bach. DANILO GUTARRA LARA.	
REVISADO POR	: ING. MILLER RODRIGUEZ	
FECHA DE ENSAYO	: 03/04/2018	FECHA DE EMISIÓN: 04/04/2018

TIPO DE MEZCLA:	MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA CON FIBRAS ACRÍLICAS DE 20 mm – TIPO A.		
DISEÑO:	Cemento Asfáltico (C.A.)	5.5%	1250 (gr)
	Piedra Triturada de 3/4" (35%)	94.5%	
	Arena Gruesa Chancada (40%)		
	Arena Gruesa Zarandeada (25%)		
	Fibra Acrílica de 20 mm	0.10%	1.25 (gr)
Peso Por Briqueta			1251.25 gramos

BRIQUETA		N°	2A	2B	2C	2D	2E
1	PESO ESPECIFICO DE LA PIEDRA CHANCADA DE 3/4" - BULK		2.65	2.65	2.65	2.65	2.65
2	PESO ESPECIFICO DE LA ARENA GRUESA CHANCADA - BULK		2.63	2.63	2.63	2.63	2.63
3	PESO ESPECIFICO DE LA ARENA NATURAL ZARANDEADA - BULK		2.62	2.62	2.62	2.62	2.62
4	PESO ESPECIFICO APARENTE DE LA FIBRA		1.17	1.17	1.17	1.17	1.17
5	PESO ESPECIFICO APARENTE DEL CEMENTO ASFALTICO		1.018	1.018	1.018	1.018	1.018
6	FIBRA ACRÍLICA EN PESO DE LA MEZCLA	%	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
7	C.A. EN PESO DE LA MEZCLA	%	5.49	5.49	5.495	5.49	5.49
8	ARENA GRUESA CHANCADA EN PESO DE LA MEZCLA	%	37.76	37.76	37.76	37.76	37.76
9	ARENA NATURAL ZARANDEADA EN PESO DE LA MEZCLA	%	23.60	23.60	23.60	23.60	23.60
10	PIEDRA CHANCADA DE 3/4" EN PESO DE LA MEZCLA	%	33.04	33.04	33.04	33.04	33.04
11	TOTAL DE MEZCLA	%	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
12	PESO ESPECIFICO TEÓRICO MÁXIMO		2.458	2.458	2.458	2.458	2.458
13	PESO ESPECIFICO BULK DE LA COMBINACIÓN DE AGREGADOS		2.63	2.63	2.63	2.63	2.63
14	PESO DE LA BRIQUETA AL AIRE	gr	1229.5	1245.4	1222.6	1264.1	1258.0
15	PESO DE LA BRIQUETA EN EL AIRE (CONDICIÓN SSS)	gr	1232.0	1248.0	1226.0	1266.0	1265.0
16	PESO DE LA BRIQUETA EN EL AGUA	gr	716.0	724.0	712.0	730.0	732.0
17	Agua absorbida	%	0.5	0.5	0.7	0.4	1.3
18	VOLUMEN DE LA BRIQUETA	c.c.	516	524	514	536	533
19	PESO ESPECIFICO BULK DE LA BRIQUETA	gr/c.c.	2.383	2.377	2.379	2.358	2.36
20	VACÍOS TOTALES EN LA MEZCLA(VTM)	%	3.06	3.31	3.22	4.08	4.00
21	VACÍOS EN AGREGADO MINERAL (V.M.A.)	%	14.60	14.82	14.75	15.50	15.43
22	ASFALTO ABSORBIDO POR EL AGREGADO TOTAL (VFA)	%	79.04	77.70	78.14	73.69	74.10
23	ESTABILIDAD SIN CORREGIR	Lb	2450.0	2610.0	2330.0	2460.0	2530.0
24	FACTOR DE ESTABILIDAD	K	1	0.96	1	0.93	0.96
25	ESTABILIDAD CORREGIDA	Lb	2450	2500	2330	2290	2430
26	ESTABILIDAD CORREGIDA - PROMEDIO	Lb	2400				
27	Peso Unitario	gr/c.c.	2.376	2.370	2.372	2.351	2.353
28	Peso Unitario - Promedio	gr/c.c.	2.364				
29	FLUJO	mm	2.75	3	3	3.25	2.75
30	FLUJO - PROMEDIO	mm	3.00				
31	VACÍOS TOTALES EN LA MEZCLA(VTM) - PROMEDIO	%	3.53				
32	VMA - PROMEDIO	%	15.02				
33	VFA - PROMEDIO	%	76.53				
34	coeficiente de variación para la estabilidad		3.63				
35	coeficiente de variación para el flujo		6.97				

LABORATORIO DE AGREGADOS, SUELOS, ASFALTO Y CONCRETO

ENSAYO MARSHALL ASTM D – 6926 y 6927

Laboratorio Mecánica De Suelos Concretos Y Pavimentos

MATERIAL	: Mezcla Asfáltica Modificada-Tipo A – Tesis De Titulación	Hoja 3/9
TESISTA	: Bach. DANILO GUTARRA LARA.	
REVISADO POR	: ING. MILLER RODRIGUEZ	
FECHA DE ENSAYO	: 03/04/2018	FECHA DE EMISIÓN: 04/04/2018

TIPO DE MEZCLA: MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA CON FIBRAS ACRÍLICAS DE 20 mm – TIPO A.

DISEÑO:	Cemento Asfáltico (C.A.)	5.5%	1250 (gr)	Peso Por Briqueta	
	Piedra Triturada de 3/4" (35%)	94.5%		1251.88	gramos
	Arena Gruesa Chancada (40%)				
	Arena Gruesa Zarandeada (25%)				
Fibra Acrílica de 20 mm	0.15%	1.88 (gr)			

BRIQUETA		N°	3A	3B	3C	3D	3E
1	PESO ESPECIFICO DE LA PIEDRA CHANCADA DE 3/4" - BULK		2.65	2.65	2.65	2.65	2.65
2	PESO ESPECIFICO DE LA ARENA GRUESA CHANCADA - BULK		2.63	2.63	2.63	2.63	2.63
3	PESO ESPECIFICO DE LA ARENA NATURAL ZARANDEADA - BULK		2.62	2.62	2.62	2.62	2.62
4	PESO ESPECIFICO APARENTE DE LA FIBRA		1.17	1.17	1.17	1.17	1.17
5	PESO ESPECIFICO APARENTE DEL CEMENTO ASFALTICO		1.018	1.018	1.018	1.018	1.018
6	FIBRA ACRÍLICA EN PESO DE LA MEZCLA	%	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
7	C.A. EN PESO DE LA MEZCLA	%	5.492	5.492	5.492	5.492	5.492
8	ARENA GRUESA CHANCADA EN PESO DE LA MEZCLA	%	37.74	37.74	37.74	37.74	37.74
9	ARENA NATURAL ZARANDEADA EN PESO DE LA MEZCLA	%	23.59	23.59	23.59	23.59	23.59
10	PIEDRA CHANCADA DE 3/4" EN PESO DE LA MEZCLA	%	33.03	33.03	33.03	33.03	33.03
11	TOTAL DE MEZCLA	%	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
12	PESO ESPECIFICO TEÓRICO MÁXIMO		2.457	2.457	2.457	2.457	2.457
13	PESO ESPECIFICO BULK DE LA COMBINACIÓN DE AGREGADOS		2.63	2.63	2.63	2.63	2.63
14	PESO DE LA BRIQUETA AL AIRE	gr	1247.4	1242.8	1245.3	1239.8	1240.1
15	PESO DE LA BRIQUETA EN EL AIRE (CONDICIÓN SSS)	gr	1252.0	1249.0	1250.0	1244.0	1244.0
16	PESO DE LA BRIQUETA EN EL AGUA	gr	728.0	723.0	727.0	722.0	721.0
17	Agua absorbida	%	0.9	1.2	0.9	0.8	0.7
18	VOLUMEN DE LA BRIQUETA	c.c.	524	526	523	522.00	523.00
19	PESO ESPECIFICO BULK DE LA BRIQUETA	gr/c.c.	2.381	2.363	2.381	2.38	2.37
20	VACÍOS TOTALES EN LA MEZCLA(VTM)	%	3.09	3.82	3.09	3.33	3.50
21	VACÍOS EN AGREGADO MINERAL (V.M.A.)	%	14.72	15.36	14.72	14.93	15.08
22	ASFALTO ABSORBIDO POR EL AGREGADO TOTAL (VFA)	%	79.01	75.12	79.01	77.68	76.81
23	ESTABILIDAD SIN CORREGIR	Lb	2810.0	2830.0	2460.0	2430.0	2690.0
24	FACTOR DE ESTABILIDAD	K	0.96	0.96	0.96	1	0.96
25	ESTABILIDAD CORREGIDA	Lb	2700	2710	2360	2430	2580
26	ESTABILIDAD CORREGIDA - PROMEDIO	Lb	2560				
27	Peso Unitario	gr/c.c.	2.374	2.356	2.374	2.37	2.36
28	Peso Unitario - Promedio	gr/c.c.	2.367				
29	FLUJO	mm	3.25	3	3	2.75	3.00
30	FLUJO - PROMEDIO	mm	3				
31	VACÍOS TOTALES EN LA MEZCLA(VTM) - PROMEDIO	%	3.37				
32	VMA - PROMEDIO	%	14.96				
33	VFA - PROMEDIO	%	77.53				
34	coeficiente de variación para la estabilidad		6.16				
35	coeficiente de variación para el flujo		5.89				

LABORATORIO DE AGREGADOS, SUELOS, ASFALTO Y CONCRETO

ENSAYO MARSHALL ASTM D – 6926 y 6927

Laboratorio Mecánica De Suelos Concretos Y Pavimentos		
MATERIAL	: Mezcla Asfáltica Modificada-Tipo A – Tesis De Titulación	Hoja 4/9
TESISTA	: Bach. DANILO GUTARRA LARA.	
REVISADO POR	: ING. MILLER RODRIGUEZ	
FECHA DE ENSAYO	: 03/04/2018	FECHA DE EMISIÓN: 04/04/2018

TIPO DE MEZCLA:	MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA CON FIBRAS ACRÍLICAS DE 20 mm – TIPO A.		
DISEÑO:	Cemento Asfáltico (C.A.)	5.5%	1250 (gr)
	Piedra Triturada de 3/4" (35%)	94.5%	
	Arena Gruesa Chancada (40%)		
	Arena Gruesa Zarandeada (25%)		
	Fibra Acrílica de 20 mm	0.20%	2.50 (gr)
			Peso Por Briqueta
			1252.5 gramos

BRIQUETA		N°	4A	4B	4C	4D	4E
1	PESO ESPECIFICO DE LA PIEDRA CHANCADA DE 3/4" - BULK		2.65	2.65	2.65	2.65	2.65
2	PESO ESPECIFICO DE LA ARENA GRUESA CHANCADA - BULK		2.63	2.63	2.63	2.63	2.63
3	PESO ESPECIFICO DE LA ARENA NATURAL ZARANDEADA - BULK		2.62	2.62	2.62	2.62	2.62
4	PESO ESPECIFICO APARENTE DE LA FIBRA		1.17	1.17	1.17	1.17	1.17
5	PESO ESPECIFICO APARENTE DEL CEMENTO ASFALTICO		1.018	1.018	1.018	1.018	1.018
6	FIBRA ACRÍLICA EN PESO DE LA MEZCLA	%	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
7	C.A. EN PESO DE LA MEZCLA	%	5.49	5.49	5.49	5.49	5.49
8	ARENA GRUESA CHANCADA EN PESO DE LA MEZCLA	%	37.72	37.72	37.72	37.72	37.72
9	ARENA NATURAL ZARANDEADA EN PESO DE LA MEZCLA	%	23.58	23.58	23.58	23.58	23.58
10	PIEDRA CHANCADA DE 3/4" EN PESO DE LA MEZCLA	%	33.01	33.01	33.01	33.01	33.01
11	TOTAL DE MEZCLA	%	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
12	PESO ESPECIFICO TEÓRICO MÁXIMO		2.456	2.456	2.456	2.456	2.456
13	PESO ESPECIFICO BULK DE LA COMBINACIÓN DE AGREGADOS		2.63	2.63	2.63	2.63	2.63
14	PESO DE LA BRIQUETA AL AIRE	gr	1247.1	1247.9	1251.0	1243.8	1252.1
15	PESO DE LA BRIQUETA EN EL AIRE (CONDICIÓN SSS)	gr	1250.0	1251.0	1253.0	1247.0	1253.0
16	PESO DE LA BRIQUETA EN EL AGUA	gr	724.0	724.0	727.0	723.0	726.0
17	Agua absorbida	%	0.6	0.6	0.4	0.6	0.2
18	VOLUMEN DE LA BRIQUETA	c.c.	526	527	526	524	527
19	PESO ESPECIFICO BULK DE LA BRIQUETA	gr/c.c.	2.371	2.368	2.378	2.374	2.376
20	VACÍOS TOTALES EN LA MEZCLA(VTM)	%	3.44	3.57	3.16	3.32	3.24
21	VACÍOS EN AGREGADO MINERAL (V.M.A.)	%	15.12	15.23	14.87	15.01	14.94
22	ASFALTO ABSORBIDO POR EL AGREGADO TOTAL (VFA)	%	77.23	76.58	78.76	77.88	78.32
23	ESTABILIDAD SIN CORREGIR	Lb	2180.0	2430.0	2490.0	2470.0	2870.0
24	FACTOR DE ESTABILIDAD	K	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96
25	ESTABILIDAD CORREGIDA	Lb	2090	2340	2390	2370	2760
26	ESTABILIDAD CORREGIDA - PROMEDIO	Lb	2390				
27	Peso Unitario	gr/c.c.	2.364	2.361	2.371	2.367	2.369
28	Peso Unitario - Promedio	gr/c.c.	2.366				
29	FLUJO	mm	3.5	2.75	2.75	3	3.25
30	FLUJO - PROMEDIO	mm	3.00				
31	VACÍOS TOTALES EN LA MEZCLA(VTM) - PROMEDIO	%	3.35				
32	VMA - PROMEDIO	%	15.03				
33	VFA - PROMEDIO	%	77.75				
34	coeficiente de variación para la estabilidad		10.03				
35	coeficiente de variación para el flujo		10.87				

LABORATORIO DE AGREGADOS, SUELOS, ASFALTO Y CONCRETO

ENSAYO MARSHALL ASTM D – 6926 y 6927

Laboratorio Mecánica De Suelos Concretos Y Pavimentos

MATERIAL	: Mezcla Asfáltica Modificada-Tipo A – Tesis De Titulación	Hoja 5/9
TESISTA	: Bach. DANILO GUTARRA LARA.	
REVISADO POR	: ING. MILLER RODRIGUEZ	
FECHA DE ENSAYO	: 03/04/2018	FECHA DE EMISIÓN: 04/04/2018

TIPO DE MEZCLA: MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA CON FIBRAS ACRÍLICAS DE 20 mm – TIPO A.

DISEÑO:	Cemento Asfáltico (C.A.)	5.5%	1250 (gr)	Peso Por Briqueta	
	Piedra Triturada de 3/4" (35%)			1253.75	gramos
	Arena Gruesa Chancada (40%)	94.5%			
	Arena Gruesa Zarandeada (25%)				
Fibra Acrílica de 20 mm	0.30%	3.75 (gr)			

BRIQUETA		N°	5A	5B	5C	5D	5E
1	PESO ESPECIFICO DE LA PIEDRA CHANCADA DE 3/4" - BULK		2.65	2.65	2.65	2.65	2.65
2	PESO ESPECIFICO DE LA ARENA GRUESA CHANCADA - BULK		2.63	2.63	2.63	2.63	2.63
3	PESO ESPECIFICO DE LA ARENA NATURAL ZARANDEADA - BULK		2.62	2.62	2.62	2.62	2.62
4	PESO ESPECIFICO APARENTE DE LA FIBRA		1.17	1.17	1.17	1.17	1.17
5	PESO ESPECIFICO APARENTE DEL CEMENTO ASFALTICO		1.018	1.018	1.018	1.018	1.018
6	FIBRA ACRÍLICA EN PESO DE LA MEZCLA	%	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
7	C.A. EN PESO DE LA MEZCLA	%	5.484	5.484	5.484	5.484	5.484
8	ARENA GRUESA CHANCADA EN PESO DE LA MEZCLA	%	37.69	37.69	37.69	37.69	37.69
9	ARENA NATURAL ZARANDEADA EN PESO DE LA MEZCLA	%	23.55	23.55	23.55	23.55	23.55
10	PIEDRA CHANCADA DE 3/4" EN PESO DE LA MEZCLA	%	32.98	32.98	32.98	32.98	32.98
11	TOTAL DE MEZCLA	%	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
12	PESO ESPECIFICO TEÓRICO MÁXIMO		2.453	2.453	2.453	2.453	2.453
13	PESO ESPECIFICO BULK DE LA COMBINACIÓN DE AGREGADOS		2.63	2.63	2.63	2.63	2.63
14	PESO DE LA BRIQUETA AL AIRE	gr	1248.6	1256.5	1251.2	1248.2	1252.7
15	PESO DE LA BRIQUETA EN EL AIRE (CONDICIÓN SSS)	gr	1252.0	1258.0	1253.0	1251.0	1255.0
16	PESO DE LA BRIQUETA EN EL AGUA	gr	722.0	732.0	728.0	726.0	722.0
17	Agua absorbida	%	0.6	0.3	0.3	0.5	0.4
18	VOLUMEN DE LA BRIQUETA	c.c.	530	526	525	525.00	533.00
19	PESO ESPECIFICO BULK DE LA BRIQUETA	gr/c.c.	2.356	2.389	2.383	2.38	2.35
20	VACÍOS TOTALES EN LA MEZCLA(VTM)	%	3.95	2.60	2.85	3.05	4.19
21	VACÍOS EN AGREGADO MINERAL (V.M.A.)	%	15.74	14.56	14.78	14.95	15.96
22	ASFALTO ABSORBIDO POR EL AGREGADO TOTAL (VFA)	%	74.91	82.12	80.72	79.59	73.72
23	ESTABILIDAD SIN CORREGIR	Lb	2370.0	2320.0	2480.0	2540.0	2360.0
24	FACTOR DE ESTABILIDAD	K	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96
25	ESTABILIDAD CORREGIDA	Lb	2280	2230	2380	2440	2270
26	ESTABILIDAD CORREGIDA - PROMEDIO	Lb	2320				
27	Peso Unitario	gr/c.c.	2.349	2.382	2.376	2.37	2.34
28	Peso Unitario - Promedio	gr/c.c.	2.364				
29	FLUJO	mm	3.25	3	3	3.25	2.75
30	FLUJO - PROMEDIO	mm	3				
31	VACÍOS TOTALES EN LA MEZCLA(VTM) - PROMEDIO	%	3.33				
32	VMA - PROMEDIO	%	15.20				
33	VFA - PROMEDIO	%	78.21				
34	coeficiente de variación para la estabilidad		3.75				
35	coeficiente de variación para el flujo		6.97				

LABORATORIO DE AGREGADOS, SUELOS, ASFALTO Y CONCRETO

ENSAYO MARSHALL ASTM D – 6926 y 6927

Laboratorio Mecánica De Suelos Concretos Y Pavimentos		
MATERIAL	: Mezcla Asfáltica Modificada-Tipo A – Tesis De Titulación	Hoja 6/9
TESISTA	: Bach. DANILO GUTARRA LARA.	
REVISADO POR	: ING. MILLER RODRIGUEZ	
FECHA DE ENSAYO	: 03/04/2018	FECHA DE EMISIÓN: 04/04/2018

TIPO DE MEZCLA:	MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA CON FIBRAS ACRÍLICAS DE 20 mm – TIPO A.				
DISEÑO:	Cemento Asfáltico (C.A.)	5.5%	1250 (gr)	Peso Por Briqueta	
	Piedra Triturada de 3/4" (35%)			1256.25	gramos
	Arena Gruesa Chancada (40%)	94.5%			
	Arena Gruesa Zarandeada (25%)				
Fibra Acrílica de 20 mm	0.50%	6.25 (gr)			

BRIQUETA		N°	6A	6B	6C	6D	6E
1	PESO ESPECIFICO DE LA PIEDRA CHANCADA DE 3/4" - BULK		2.65	2.65	2.65	2.65	2.65
2	PESO ESPECIFICO DE LA ARENA GRUESA CHANCADA - BULK		2.63	2.63	2.63	2.63	2.63
3	PESO ESPECIFICO DE LA ARENA NATURAL ZARANDEADA - BULK		2.62	2.62	2.62	2.62	2.62
4	PESO ESPECIFICO APARENTE DE LA FIBRA		1.17	1.17	1.17	1.17	1.17
5	PESO ESPECIFICO APARENTE DEL CEMENTO ASFALTICO		1.018	1.018	1.018	1.018	1.018
6	FIBRA ACRÍLICA EN PESO DE LA MEZCLA	%	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
7	C.A. EN PESO DE LA MEZCLA	%	5.47	5.47	5.47	5.47	5.47
8	ARENA GRUESA CHANCADA EN PESO DE LA MEZCLA	%	37.61	37.61	37.61	37.61	37.61
9	ARENA NATURAL ZARANDEADA EN PESO DE LA MEZCLA	%	23.51	23.51	23.51	23.51	23.51
10	PIEDRA CHANCADA DE 3/4" EN PESO DE LA MEZCLA	%	32.91	32.91	32.91	32.91	32.91
11	TOTAL DE MEZCLA	%	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
12	PESO ESPECIFICO TEÓRICO MÁXIMO		2.448	2.448	2.448	2.448	2.448
13	PESO ESPECIFICO BULK DE LA COMBINACIÓN DE AGREGADOS		2.63	2.63	2.63	2.63	2.63
14	PESO DE LA BRIQUETA AL AIRE	gr	1248.1	1239.1	1258.6	1253.4	1251.2
15	PESO DE LA BRIQUETA EN EL AIRE (CONDICIÓN SSS)	gr	1253.0	1246.0	1263.0	1262.0	1259.0
16	PESO DE LA BRIQUETA EN EL AGUA	gr	729.0	727.0	727.0	728.0	730.0
17	Agua absorbida	%	0.9	1.3	0.8	1.6	1.5
18	VOLUMEN DE LA BRIQUETA	c.c.	524	519	536	534	529
19	PESO ESPECIFICO BULK DE LA BRIQUETA	gr/c.c.	2.382	2.387	2.348	2.347	2.365
20	VACÍOS TOTALES EN LA MEZCLA(VTM)	%	2.68	2.47	4.07	4.11	3.37
21	VACÍOS EN AGREGADO MINERAL (V.M.A.)	%	14.98	14.80	16.19	16.23	15.59
22	ASFALTO ABSORBIDO POR EL AGREGADO TOTAL (VFA)	%	82.13	83.29	74.89	74.69	78.37
23	ESTABILIDAD SIN CORREGIR	Lb	2290.0	2340.0	2430.0	2120.0	2440.0
24	FACTOR DE ESTABILIDAD	K	0.96	1	0.93	0.96	0.96
25	ESTABILIDAD CORREGIDA	Lb	2200	2340	2260	2040	2350
26	ESTABILIDAD CORREGIDA - PROMEDIO	Lb	2240				
27	Peso Unitario	gr/c.c.	2.375	2.380	2.341	2.34	2.358
28	Peso Unitario - Promedio	gr/c.c.	2.359				
29	FLUJO	mm	3	3.25	3.25	3	3
30	FLUJO - PROMEDIO	mm	3.00				
31	VACÍOS TOTALES EN LA MEZCLA(VTM) - PROMEDIO	%	3.34				
32	VMA - PROMEDIO	%	15.56				
33	VFA - PROMEDIO	%	78.67				
34	coeficiente de variación para la estabilidad		5.65				
35	coeficiente de variación para el flujo		4.56				

LABORATORIO DE AGREGADOS, SUELOS, ASFALTO Y CONCRETO

ENSAYO MARSHALL ASTM D – 6926 y 6927

Laboratorio Mecánica De Suelos Concretos Y Pavimentos		
MATERIAL	: Mezcla Asfáltica Modificada-Tipo A – Tesis De Titulación	Hoja 7/9
TESISTA	: Bach. DANILO GUTARRA LARA.	
REVISADO POR	: ING. MILLER RODRIGUEZ	
FECHA DE ENSAYO	: 03/04/2018	FECHA DE EMISIÓN: 04/04/2018

TIPO DE MEZCLA:	MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA CON FIBRAS ACRÍLICAS DE 20 mm – TIPO A.		
DISEÑO:	Cemento Asfáltico (C.A.)	5.5%	1250 (gr)
	Piedra Triturada de 3/4" (35%)	94.5%	
	Arena Gruesa Chancada (40%)		
	Arena Gruesa Zarandeada (25%)		
	Fibra Acrílica de 20 mm	0.70%	8.75 (gr)
			Peso Por Briqueta
			1258.75 gramos

BRIQUETA		N°	7A	7B	7C	7D	7E
1	PESO ESPECIFICO DE LA PIEDRA CHANCADA DE 3/4" - BULK		2.65	2.65	2.65	2.65	2.65
2	PESO ESPECIFICO DE LA ARENA GRUESA CHANCADA - BULK		2.63	2.63	2.63	2.63	2.63
3	PESO ESPECIFICO DE LA ARENA NATURAL ZARANDEADA - BULK		2.62	2.62	2.62	2.62	2.62
4	PESO ESPECIFICO APARENTE DE LA FIBRA		1.17	1.17	1.17	1.17	1.17
5	PESO ESPECIFICO APARENTE DEL CEMENTO ASFALTICO		1.018	1.018	1.018	1.018	1.018
6	FIBRA ACRÍLICA EN PESO DE LA MEZCLA	%	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70
7	C.A. EN PESO DE LA MEZCLA	%	5.462	5.462	5.462	5.462	5.462
8	ARENA GRUESA CHANCADA EN PESO DE LA MEZCLA	%	37.54	37.54	37.54	37.54	37.54
9	ARENA NATURAL ZARANDEADA EN PESO DE LA MEZCLA	%	23.46	23.46	23.46	23.46	23.46
10	PIEDRA CHANCADA DE 3/4" EN PESO DE LA MEZCLA	%	32.85	32.85	32.85	32.85	32.85
11	TOTAL DE MEZCLA	%	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
12	PESO ESPECIFICO TEÓRICO MÁXIMO		2.442	2.442	2.442	2.442	2.442
13	PESO ESPECIFICO BULK DE LA COMBINACIÓN DE AGREGADOS		2.63	2.63	2.63	2.63	2.63
14	PESO DE LA BRIQUETA AL AIRE	gr	1263.3	1256.0	1258.5	1241.8	1250.2
15	PESO DE LA BRIQUETA EN EL AIRE (CONDICIÓN SSS)	gr	1269.0	1263.0	1266.0	1247.0	1259.0
16	PESO DE LA BRIQUETA EN EL AGUA	gr	734.0	731.0	733.0	723.0	728.0
17	Agua absorbida	%	1.1	1.3	1.4	1.0	1.7
18	VOLUMEN DE LA BRIQUETA	c.c.	535	532	533	524.00	531.00
19	PESO ESPECIFICO BULK DE LA BRIQUETA	gr/c.c.	2.361	2.361	2.361	2.37	2.35
20	VACÍOS TOTALES EN LA MEZCLA(VTM)	%	3.33	3.33	3.33	2.96	3.61
21	VACÍOS EN AGREGADO MINERAL (V.M.A.)	%	15.90	15.90	15.90	15.58	16.15
22	ASFALTO ABSORBIDO POR EL AGREGADO TOTAL (VFA)	%	79.08	79.08	79.08	81.01	77.63
23	ESTABILIDAD SIN CORREGIR	Lb	2050.0	2310.0	2230.0	2290.0	2360.0
24	FACTOR DE ESTABILIDAD	K	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96
25	ESTABILIDAD CORREGIDA	Lb	1970	2210	2140	2200	2270
26	ESTABILIDAD CORREGIDA - PROMEDIO	Lb	2160				
27	Peso Unitario	gr/c.c.	2.354	2.354	2.354	2.36	2.35
28	Peso Unitario - Promedio	gr/c.c.	2.354				
29	FLUJO	mm	2.75	2.75	3	3.00	2.75
30	FLUJO - PROMEDIO	mm	2.75				
31	VACÍOS TOTALES EN LA MEZCLA(VTM) - PROMEDIO	%	3.31				
32	VMA - PROMEDIO	%	15.88				
33	VFA - PROMEDIO	%	79.18				
34	coeficiente de variación para la estabilidad		5.31				
35	coeficiente de variación para el flujo		4.98				

LABORATORIO DE AGREGADOS, SUELOS, ASFALTO Y CONCRETO

ENSAYO MARSHALL ASTM D – 6926 y 6927

Laboratorio Mecánica De Suelos Concretos Y Pavimentos		
MATERIAL	: Mezcla Asfáltica Modificada-Tipo A – Tesis De Titulación	Hoja 8/9
TESISTA	: Bach. DANILO GUTARRA LARA.	
REVISADO POR	: ING. MILLER RODRIGUEZ	
FECHA DE ENSAYO	: 03/04/2018	FECHA DE EMISIÓN: 04/04/2018

TIPO DE MEZCLA:	MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA CON FIBRAS ACRÍLICAS DE 20 mm – TIPO A.		
DISEÑO:	Cemento Asfáltico (C.A.)	5.5%	1250 (gr)
	Piedra Triturada de 3/4" (35%)	94.5%	
	Arena Gruesa Chancada (40%)		
	Arena Gruesa Zarandeada (25%)		
	Fibra Acrílica de 20 mm	1.00%	12.50 (gr)
Peso Por Briqueta			1262.50 gramos

BRIQUETA		N°	8A	8B	8C	8D	8E
1	PESO ESPECIFICO DE LA PIEDRA CHANCADA DE 3/4" - BULK		2.65	2.65	2.65	2.65	2.65
2	PESO ESPECIFICO DE LA ARENA GRUESA CHANCADA - BULK		2.63	2.63	2.63	2.63	2.63
3	PESO ESPECIFICO DE LA ARENA NATURAL ZARANDEADA - BULK		2.62	2.62	2.62	2.62	2.62
4	PESO ESPECIFICO APARENTE DE LA FIBRA		1.17	1.17	1.17	1.17	1.17
5	PESO ESPECIFICO APARENTE DEL CEMENTO ASFALTICO		1.018	1.018	1.018	1.018	1.018
6	FIBRA ACRÍLICA EN PESO DE LA MEZCLA	%	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
7	C.A. EN PESO DE LA MEZCLA	%	5.45	5.45	5.45	5.45	5.45
8	ARENA GRUESA CHANCADA EN PESO DE LA MEZCLA	%	37.43	37.43	37.43	37.43	37.43
9	ARENA NATURAL ZARANDEADA EN PESO DE LA MEZCLA	%	23.39	23.39	23.39	23.39	23.39
10	PIEDRA CHANCADA DE 3/4" EN PESO DE LA MEZCLA	%	32.75	32.75	32.75	32.75	32.75
11	TOTAL DE MEZCLA	%	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
12	PESO ESPECIFICO TEÓRICO MÁXIMO		2.434	2.434	2.434	2.434	2.434
13	PESO ESPECIFICO BULK DE LA COMBINACIÓN DE AGREGADOS		2.63	2.63	2.63	2.63	2.63
14	PESO DE LA BRIQUETA AL AIRE	gr	1258.5	1252.3	1270.9	1266.7	1254.5
15	PESO DE LA BRIQUETA EN EL AIRE (CONDICIÓN SSS)	gr	1267.0	1260.0	1277.0	1273.0	1263.0
16	PESO DE LA BRIQUETA EN EL AGUA	gr	733.0	727.0	735.0	732.0	736.0
17	Agua absorbida	%	1.6	1.4	1.1	1.2	1.6
18	VOLUMEN DE LA BRIQUETA	c.c.	534	533	542	541	527
19	PESO ESPECIFICO BULK DE LA BRIQUETA	gr/c.c.	2.357	2.35	2.345	2.341	2.38
20	VACÍOS TOTALES EN LA MEZCLA(VTM)	%	3.18	3.47	3.67	3.84	2.23
21	VACÍOS EN AGREGADO MINERAL (V.M.A.)	%	16.29	16.54	16.72	16.86	15.47
22	ASFALTO ABSORBIDO POR EL AGREGADO TOTAL (VFA)	%	80.49	79.04	78.04	77.25	85.57
23	ESTABILIDAD SIN CORREGIR	Lb	2180.0	2110.0	2230.0	2220.0	2240.0
24	FACTOR DE ESTABILIDAD	K	0.96	0.96	0.93	0.93	0.96
25	ESTABILIDAD CORREGIDA	Lb	2090	2020	2080	2060	2150
26	ESTABILIDAD CORREGIDA - PROMEDIO	Lb	2080				
27	Peso Unitario	gr/c.c.	2.350	2.343	2.338	2.334	2.373
28	Peso Unitario - Promedio	gr/c.c.	2.348				
29	FLUJO	mm	2.75	3	3	2.75	2.75
30	FLUJO - PROMEDIO	mm	2.75				
31	VACÍOS TOTALES EN LA MEZCLA(VTM) - PROMEDIO	%	3.28				
32	VMA - PROMEDIO	%	16.37				
33	VFA - PROMEDIO	%	80.08				
34	coeficiente de variación para la estabilidad		2.28				
35	coeficiente de variación para el flujo		4.98				

LABORATORIO DE AGREGADOS, SUELOS, ASFALTO Y CONCRETO

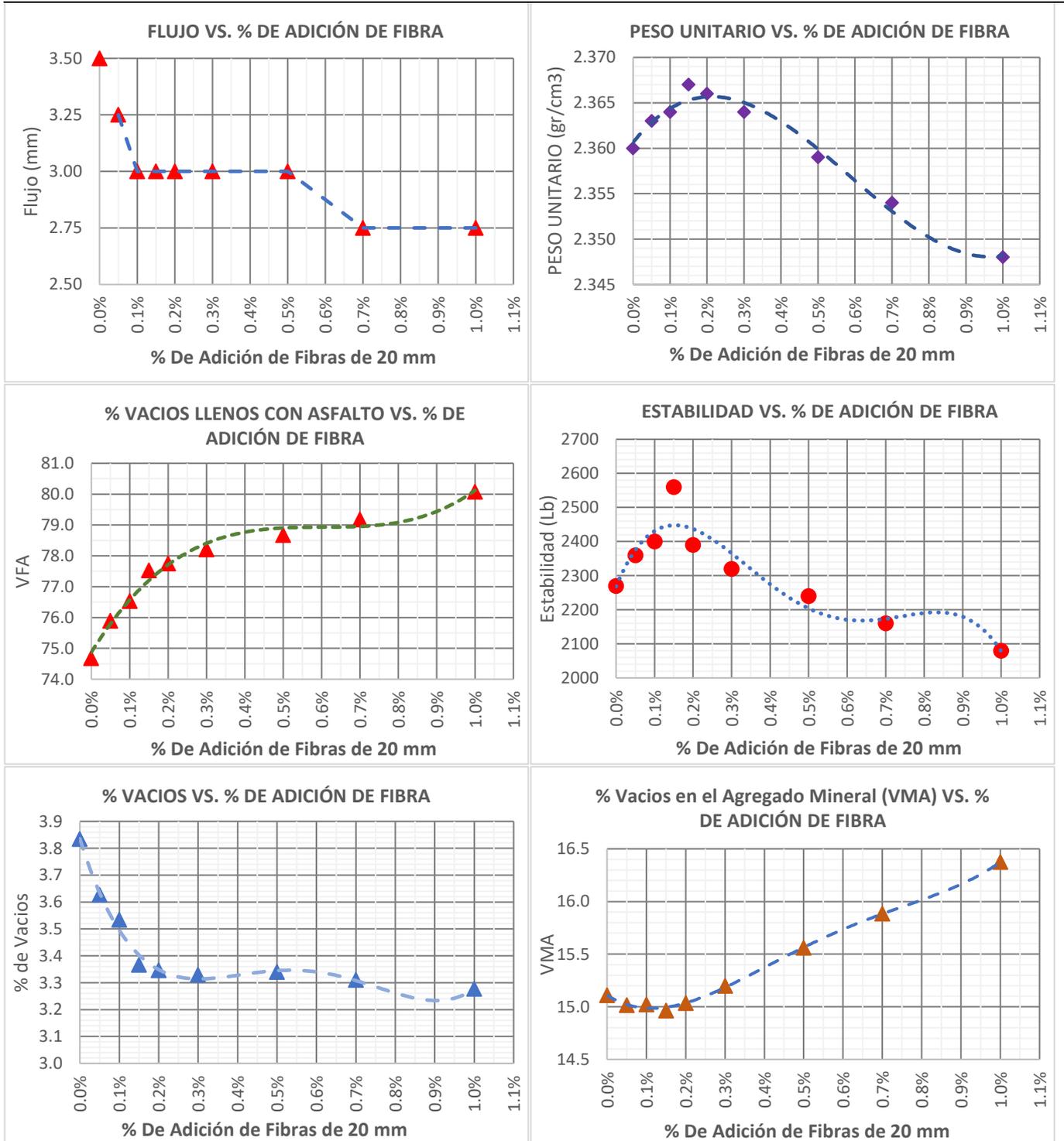
ENSAYO MARSHALL ASTM D – 6926 y 6927

Laboratorio Mecánica De Suelos Concretos Y Pavimentos

MATERIAL	: Mezcla Asfáltica Modificada-Tipo A – Tesis De Titulación	Hoja 9/9
TESISTA	: Bach. DANILO GUTARRA LARA.	
REVISADO POR	: ING. MILLER RODRIGUEZ	
FECHA DE ENSAYO	: 03/04/2018	FECHA DE EMISIÓN: 04/04/2018

TIPO DE MEZCLA: MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA CON FIBRAS ACRÍLICAS DE 20 mm – TIPO A.

RESUMEN DE RESULTADOS



**Anexo E:
Diseño de
mezcla asfáltica
modificada
TIPO B**

MÉTODO MARSHALL

FIBRA ACRÍLICA DE 12 mm

LABORATORIO DE AGREGADOS, SUELOS, ASFALTO Y CONCRETO

ENSAYO MARSHALL ASTM D – 6926 y 6927

Laboratorio Mecánica De Suelos Concretos Y Pavimentos

MATERIAL	: Mezcla Asfáltica Modificada-Tipo B – Tesis De Titulación	Hoja 1/9
TESISTA	: Bach. DANILO GUTARRA LARA.	
REVISADO POR	: ING. MILLER RODRIGUEZ	
FECHA DE ENSAYO	: 05/04/2018	FECHA DE EMISIÓN: 06/04/2018

TIPO DE MEZCLA: MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA CON FIBRAS ACRÍLICAS DE 12 mm – TIPO B.

DISEÑO:	Cemento Asfáltico (C.A.)	5.5%	1250 (gr)	Peso Por Briqueta	
	Piedra Triturada de 3/4" (35%)			1250.63	gramos
	Arena Gruesa Chancada (40%)	94.5%			
	Arena Gruesa Zarandeada (25%)				
Fibra Acrílica de 12 mm	0.05%	0.63 (gr)			

BRIQUETA		N°	1A	1B	1C	1D	1E
1	PESO ESPECIFICO DE LA PIEDRA CHANCADA DE 3/4" - BULK		2.65	2.65	2.65	2.65	2.65
2	PESO ESPECIFICO DE LA ARENA GRUESA CHANCADA - BULK		2.63	2.63	2.63	2.63	2.63
3	PESO ESPECIFICO DE LA ARENA NATURAL ZARANDEADA - BULK		2.62	2.62	2.62	2.62	2.62
4	PESO ESPECIFICO APARENTE DE LA FIBRA		1.17	1.17	1.17	1.17	1.17
5	PESO ESPECIFICO APARENTE DEL CEMENTO ASFALTICO		1.018	1.018	1.018	1.018	1.018
6	FIBRA ACRÍLICA EN PESO DE LA MEZCLA	%	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
7	C.A. EN PESO DE LA MEZCLA	%	5.50	5.50	5.50	5.50	5.50
8	ARENA GRUESA CHANCADA EN PESO DE LA MEZCLA	%	37.78	37.78	37.78	37.78	37.78
9	ARENA NATURAL ZARANDEADA EN PESO DE LA MEZCLA	%	23.61	23.61	23.61	23.61	23.61
10	PIEDRA CHANCADA DE 3/4" EN PESO DE LA MEZCLA	%	33.06	33.06	33.06	33.06	33.06
11	TOTAL DE MEZCLA	%	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
12	PESO ESPECIFICO TEÓRICO MÁXIMO		2.460	2.460	2.460	2.460	2.460
13	PESO ESPECIFICO BULK DE LA COMBINACIÓN DE AGREGADOS		2.63	2.63	2.63	2.63	2.63
14	PESO DE LA BRIQUETA AL AIRE	gr	1243.9	1243.0	1238.5	1242.0	1233.4
15	PESO DE LA BRIQUETA EN EL AIRE (CONDICIÓN SSS)	gr	1246.0	1246.0	1242.0	1245.0	1242.0
16	PESO DE LA BRIQUETA EN EL AGUA	gr	720.0	723.0	719.0	721.0	723.0
17	Agua absorbida	%	0.4	0.6	0.7	0.6	1.7
18	VOLUMEN DE LA BRIQUETA	c.c.	526	523	523	524	519
19	PESO ESPECIFICO BULK DE LA BRIQUETA	gr/c.c.	2.365	2.377	2.368	2.370	2.376
20	VACÍOS TOTALES EN LA MEZCLA(VTM)	%	3.85	3.36	3.72	3.64	3.40
21	VACÍOS EN AGREGADO MINERAL (V.M.A.)	%	15.21	14.78	15.10	15.03	14.81
22	ASFALTO ABSORBIDO POR EL AGREGADO TOTAL (VFA)	%	74.71	77.27	75.34	75.76	77.05
23	ESTABILIDAD SIN CORREGIR	Lb	2470.0	2510.0	2420.0	2450.0	2400.0
24	FACTOR DE ESTABILIDAD	K	0.96	0.96	0.96	0.96	1.00
25	ESTABILIDAD CORREGIDA	Lb	2370	2410	2320	2350	2400
26	ESTABILIDAD CORREGIDA - PROMEDIO	Lb	2370				
27	Peso Unitario	gr/c.c.	2.358	2.370	2.361	2.363	2.369
28	Peso Unitario - Promedio	gr/c.c.	2.364				
29	FLUJO	mm	3.25	3.5	3.5	3.25	3.25
30	FLUJO - PROMEDIO	mm	3.25				
31	VACÍOS TOTALES EN LA MEZCLA(VTM) - PROMEDIO	%	3.59				
32	VMA - PROMEDIO	%	14.99				
33	VFA - PROMEDIO	%	76.03				
34	coeficiente de variación para la estabilidad		1.55				
35	coeficiente de variación para el flujo		4.21				

LABORATORIO DE AGREGADOS, SUELOS, ASFALTO Y CONCRETO

ENSAYO MARSHALL ASTM D – 6926 y 6927

Laboratorio Mecánica De Suelos Concretos Y Pavimentos		
MATERIAL	: Mezcla Asfáltica Modificada-Tipo B – Tesis De Titulación	Hoja 2/9
TESISTA	: Bach. DANILO GUTARRA LARA.	
REVISADO POR	: ING. MILLER RODRIGUEZ	
FECHA DE ENSAYO	: 05/04/2018	FECHA DE EMISIÓN: 06/04/2018

TIPO DE MEZCLA:	MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA CON FIBRAS ACRÍLICAS DE 12 mm – TIPO B.		
DISEÑO:	Cemento Asfáltico (C.A.)	5.5%	1250 (gr)
	Piedra Triturada de 3/4" (35%)	94.5%	
	Arena Gruesa Chancada (40%)		
	Arena Gruesa Zarandeada (25%)		
	Fibra Acrílica de 12 mm	0.10%	1.25 (gr)
Peso Por Briqueta			1251.25 gramos

BRIQUETA		N°	2A	2B	2C	2D	2E
1	PESO ESPECIFICO DE LA PIEDRA CHANCADA DE 3/4" - BULK		2.65	2.65	2.65	2.65	2.65
2	PESO ESPECIFICO DE LA ARENA GRUESA CHANCADA - BULK		2.63	2.63	2.63	2.63	2.63
3	PESO ESPECIFICO DE LA ARENA NATURAL ZARANDEADA - BULK		2.62	2.62	2.62	2.62	2.62
4	PESO ESPECIFICO APARENTE DE LA FIBRA		1.17	1.17	1.17	1.17	1.17
5	PESO ESPECIFICO APARENTE DEL CEMENTO ASFALTICO		1.018	1.018	1.018	1.018	1.018
6	FIBRA ACRÍLICA EN PESO DE LA MEZCLA	%	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
7	C.A. EN PESO DE LA MEZCLA	%	5.49	5.49	5.49	5.49	5.49
8	ARENA GRUESA CHANCADA EN PESO DE LA MEZCLA	%	37.76	37.76	37.76	37.76	37.76
9	ARENA NATURAL ZARANDEADA EN PESO DE LA MEZCLA	%	23.60	23.60	23.60	23.60	23.60
10	PIEDRA CHANCADA DE 3/4" EN PESO DE LA MEZCLA	%	33.04	33.04	33.04	33.04	33.04
11	TOTAL DE MEZCLA	%	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
12	PESO ESPECIFICO TEÓRICO MÁXIMO		2.458	2.458	2.458	2.458	2.458
13	PESO ESPECIFICO BULK DE LA COMBINACIÓN DE AGREGADOS		2.63	2.63	2.63	2.63	2.63
14	PESO DE LA BRIQUETA AL AIRE	gr	1244.0	1242.5	1234.2	1243.2	1243.0
15	PESO DE LA BRIQUETA EN EL AIRE (CONDICIÓN SSS)	gr	1246.0	1245.0	1241.0	1245.0	1244.0
16	PESO DE LA BRIQUETA EN EL AGUA	gr	722.0	723.0	721.0	721.0	721.0
17	Agua absorbida	%	0.4	0.5	1.3	0.3	0.2
18	VOLUMEN DE LA BRIQUETA	c.c.	524	522	520	524	523
19	PESO ESPECIFICO BULK DE LA BRIQUETA	gr/c.c.	2.374	2.380	2.373	2.373	2.377
20	VACÍOS TOTALES EN LA MEZCLA(VTM)	%	3.43	3.18	3.47	3.47	3.31
21	VACÍOS EN AGREGADO MINERAL (V.M.A.)	%	14.93	14.71	14.96	14.96	14.82
22	ASFALTO ABSORBIDO POR EL AGREGADO TOTAL (VFA)	%	77.04	78.36	76.82	76.82	77.70
23	ESTABILIDAD SIN CORREGIR	Lb	2610.0	2530.0	2490.0	2610.0	2590.0
24	FACTOR DE ESTABILIDAD	K	0.96	1.00	1.00	0.96	0.96
25	ESTABILIDAD CORREGIDA	Lb	2500	2530	2490	2500	2490
26	ESTABILIDAD CORREGIDA - PROMEDIO	Lb	2500				
27	Peso Unitario	gr/c.c.	2.367	2.373	2.366	2.366	2.370
28	Peso Unitario - Promedio	gr/c.c.	2.368				
29	FLUJO	mm	3	2.75	3	3	3
30	FLUJO - PROMEDIO	mm	3.00				
31	VACÍOS TOTALES EN LA MEZCLA(VTM) - PROMEDIO	%	3.37				
32	VMA - PROMEDIO	%	14.88				
33	VFA - PROMEDIO	%	77.35				
34	coeficiente de variación para la estabilidad		0.66				
35	coeficiente de variación para el flujo		3.73				

LABORATORIO DE AGREGADOS, SUELOS, ASFALTO Y CONCRETO

ENSAYO MARSHALL ASTM D – 6926 y 6927

Laboratorio Mecánica De Suelos Concretos Y Pavimentos

MATERIAL	: Mezcla Asfáltica Modificada-Tipo B – Tesis De Titulación	Hoja 3/9
TESISTA	: Bach. DANILO GUTARRA LARA.	
REVISADO POR	: ING. MILLER RODRIGUEZ	
FECHA DE ENSAYO	: 05/04/2018	FECHA DE EMISIÓN: 06/04/2018

TIPO DE MEZCLA: MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA CON FIBRAS ACRÍLICAS DE 12 mm – TIPO B.

DISEÑO:	Cemento Asfáltico (C.A.)	5.5%	1250 (gr)	Peso Por Briqueta	
	Piedra Triturada de 3/4" (35%)			1251.88	gramos
	Arena Gruesa Chancada (40%)	94.5%			
	Arena Gruesa Zarandeada (25%)				
Fibra Acrílica de 12 mm	0.15%	1.88 (gr)			

BRIQUETA		N°	3A	3B	3C	3D	3E	
1	PESO ESPECIFICO DE LA PIEDRA CHANCADA DE 3/4" - BULK		2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	
2	PESO ESPECIFICO DE LA ARENA GRUESA CHANCADA - BULK		2.63	2.63	2.63	2.63	2.63	
3	PESO ESPECIFICO DE LA ARENA NATURAL ZARANDEADA - BULK		2.62	2.62	2.62	2.62	2.62	
4	PESO ESPECIFICO APARENTE DE LA FIBRA		1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	
5	PESO ESPECIFICO APARENTE DEL CEMENTO ASFALTICO		1.018	1.018	1.018	1.018	1.018	
6	FIBRA ACRÍLICA EN PESO DE LA MEZCLA	%	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	
7	C.A. EN PESO DE LA MEZCLA	%	5.49	5.49	5.49	5.49	5.49	
8	ARENA GRUESA CHANCADA EN PESO DE LA MEZCLA	%	37.74	37.74	37.74	37.74	37.74	
9	ARENA NATURAL ZARANDEADA EN PESO DE LA MEZCLA	%	23.59	23.59	23.59	23.59	23.59	
10	PIEDRA CHANCADA DE 3/4" EN PESO DE LA MEZCLA	%	33.03	33.03	33.03	33.03	33.03	
11	TOTAL DE MEZCLA	%	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	
12	PESO ESPECIFICO TEÓRICO MÁXIMO		2.457	2.457	2.457	2.457	2.457	
13	PESO ESPECIFICO BULK DE LA COMBINACIÓN DE AGREGADOS		2.63	2.63	2.63	2.63	2.63	
14	PESO DE LA BRIQUETA AL AIRE	gr	1247.1	1244.5	1247.8	1246.5	1246.7	
15	PESO DE LA BRIQUETA EN EL AIRE (CONDICIÓN SSS)	gr	1248.0	1247.0	1250.0	1247.0	1249.0	
16	PESO DE LA BRIQUETA EN EL AGUA	gr	726.0	725.0	723.0	723.0	723.0	
17	Agua absorbida	%	0.2	0.5	0.4	0.1	0.4	
18	VOLUMEN DE LA BRIQUETA	c.c.	522	522	527	524	526	
19	PESO ESPECIFICO BULK DE LA BRIQUETA	gr/c.c.	2.389	2.384	2.368	2.379	2.370	
20	VACÍOS TOTALES EN LA MEZCLA(VTM)	%	2.76	2.97	3.62	3.17	3.54	
21	VACÍOS EN AGREGADO MINERAL (V.M.A.)	%	14.43	14.61	15.18	14.79	15.11	
22	ASFALTO ABSORBIDO POR EL AGREGADO TOTAL (VFA)	%	80.85	79.69	76.17	78.56	76.60	
23	ESTABILIDAD SIN CORREGIR	Lb	2540.0	2580.0	2660.0	2710.0	2730.0	
24	FACTOR DE ESTABILIDAD	K	1.00	1.00	0.96	0.96	0.96	
25	ESTABILIDAD CORREGIDA	Lb	2540	2580	2560	2600	2620	
26	ESTABILIDAD CORREGIDA - PROMEDIO	Lb	2580					
27	Peso Unitario	gr/c.c.	2.382	2.377	2.361	2.372	2.363	
28	Peso Unitario - Promedio	gr/c.c.	2.371					
29	FLUJO	mm	2.75	3	3.25	3.00	3.00	
30	FLUJO - PROMEDIO	mm	3					
31	VACÍOS TOTALES EN LA MEZCLA(VTM) - PROMEDIO	%	3.21					
32	VMA - PROMEDIO	%	14.83					
33	VFA - PROMEDIO	%	78.38					
34	coeficiente de variación para la estabilidad		1.23					
35	coeficiente de variación para el flujo		5.89					

LABORATORIO DE AGREGADOS, SUELOS, ASFALTO Y CONCRETO

ENSAYO MARSHALL ASTM D – 6926 y 6927

Laboratorio Mecánica De Suelos Concretos Y Pavimentos

MATERIAL	: Mezcla Asfáltica Modificada-Tipo B – Tesis De Titulación	Hoja 4/9
TESISTA	: Bach. DANILO GUTARRA LARA.	
REVISADO POR	: ING. MILLER RODRIGUEZ	
FECHA DE ENSAYO	: 05/04/2018	FECHA DE EMISIÓN: 06/04/2018

TIPO DE MEZCLA: MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA CON FIBRAS ACRÍLICAS DE 12 mm – TIPO B.

DISEÑO:	Cemento Asfáltico (C.A.)	5.5%	1250 (gr)	Peso Por Briqueta	
	Piedra Triturada de 3/4" (35%)	94.5%			1252.5 gramos
	Arena Gruesa Chancada (40%)				
	Arena Gruesa Zarandeada (25%)				
Fibra Acrílica de 12 mm	0.20%	2.50 (gr)			

BRIQUETA		N°	4A	4B	4C	4D	4E
1	PESO ESPECIFICO DE LA PIEDRA CHANCADA DE 3/4" - BULK		2.65	2.65	2.65	2.65	2.65
2	PESO ESPECIFICO DE LA ARENA GRUESA CHANCADA - BULK		2.63	2.63	2.63	2.63	2.63
3	PESO ESPECIFICO DE LA ARENA NATURAL ZARANDEADA - BULK		2.62	2.62	2.62	2.62	2.62
4	PESO ESPECIFICO APARENTE DE LA FIBRA		1.17	1.17	1.17	1.17	1.17
5	PESO ESPECIFICO APARENTE DEL CEMENTO ASFALTICO		1.018	1.018	1.018	1.018	1.018
6	FIBRA ACRÍLICA EN PESO DE LA MEZCLA	%	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
7	C.A. EN PESO DE LA MEZCLA	%	5.49	5.49	5.49	5.49	5.49
8	ARENA GRUESA CHANCADA EN PESO DE LA MEZCLA	%	37.72	37.72	37.72	37.72	37.72
9	ARENA NATURAL ZARANDEADA EN PESO DE LA MEZCLA	%	23.58	23.58	23.58	23.58	23.58
10	PIEDRA CHANCADA DE 3/4" EN PESO DE LA MEZCLA	%	33.01	33.01	33.01	33.01	33.01
11	TOTAL DE MEZCLA	%	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
12	PESO ESPECIFICO TEÓRICO MÁXIMO		2.456	2.456	2.456	2.456	2.456
13	PESO ESPECIFICO BULK DE LA COMBINACIÓN DE AGREGADOS		2.63	2.63	2.63	2.63	2.63
14	PESO DE LA BRIQUETA AL AIRE	gr	1246.4	1248.9	1247.0	1247.7	1248.8
15	PESO DE LA BRIQUETA EN EL AIRE (CONDICIÓN SSS)	gr	1250.0	1250.0	1248.0	1250.0	1251.0
16	PESO DE LA BRIQUETA EN EL AGUA	gr	726.0	725.0	723.0	724.0	727.0
17	Agua absorbida	%	0.7	0.2	0.2	0.4	0.4
18	VOLUMEN DE LA BRIQUETA	c.c.	524	525	525	526	524
19	PESO ESPECIFICO BULK DE LA BRIQUETA	gr/c.c.	2.379	2.379	2.375	2.372	2.383
20	VACÍOS TOTALES EN LA MEZCLA(VTM)	%	3.12	3.12	3.28	3.40	2.95
21	VACÍOS EN AGREGADO MINERAL (V.M.A.)	%	14.83	14.83	14.98	15.08	14.69
22	ASFALTO ABSORBIDO POR EL AGREGADO TOTAL (VFA)	%	78.98	78.98	78.10	77.44	79.89
23	ESTABILIDAD SIN CORREGIR	Lb	2680.0	2760.0	2720.0	2740.0	2700.0
24	FACTOR DE ESTABILIDAD	K	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96
25	ESTABILIDAD CORREGIDA	Lb	2570	2650	2610	2630	2590
26	ESTABILIDAD CORREGIDA - PROMEDIO	Lb	2610				
27	Peso Unitario	gr/c.c.	2.372	2.372	2.368	2.365	2.376
28	Peso Unitario - Promedio	gr/c.c.	2.371				
29	FLUJO	mm	3	3	2.75	3	3
30	FLUJO - PROMEDIO	mm	3.00				
31	VACÍOS TOTALES EN LA MEZCLA(VTM) - PROMEDIO	%	3.17				
32	VMA - PROMEDIO	%	14.88				
33	VFA - PROMEDIO	%	78.68				
34	coeficiente de variación para la estabilidad		1.21				
35	coeficiente de variación para el flujo		3.73				

LABORATORIO DE AGREGADOS, SUELOS, ASFALTO Y CONCRETO

ENSAYO MARSHALL ASTM D – 6926 y 6927

Laboratorio Mecánica De Suelos Concretos Y Pavimentos

MATERIAL	: Mezcla Asfáltica Modificada-Tipo B – Tesis De Titulación	Hoja 5/9
TESISTA	: Bach. DANILO GUTARRA LARA.	
REVISADO POR	: ING. MILLER RODRIGUEZ	
FECHA DE ENSAYO	: 05/04/2018	FECHA DE EMISIÓN: 06/04/2018

TIPO DE MEZCLA: MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA CON FIBRAS ACRÍLICAS DE 12 mm – TIPO B.

DISEÑO:	Cemento Asfáltico (C.A.)	5.5%	1250 (gr)	Peso Por Briqueta	
	Piedra Triturada de 3/4" (35%)			1253.75	gramos
	Arena Gruesa Chancada (40%)	94.5%			
	Arena Gruesa Zarandeada (25%)				
Fibra Acrílica de 12 mm	0.30%	3.75 (gr)			

BRIQUETA		N°	5A	5B	5C	5D	5E	
1	PESO ESPECIFICO DE LA PIEDRA CHANCADA DE 3/4" - BULK		2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	
2	PESO ESPECIFICO DE LA ARENA GRUESA CHANCADA - BULK		2.63	2.63	2.63	2.63	2.63	
3	PESO ESPECIFICO DE LA ARENA NATURAL ZARANDEADA - BULK		2.62	2.62	2.62	2.62	2.62	
4	PESO ESPECIFICO APARENTE DE LA FIBRA		1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	
5	PESO ESPECIFICO APARENTE DEL CEMENTO ASFALTICO		1.018	1.018	1.018	1.018	1.018	
6	FIBRA ACRÍLICA EN PESO DE LA MEZCLA	%	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	
7	C.A. EN PESO DE LA MEZCLA	%	5.48	5.48	5.48	5.48	5.48	
8	ARENA GRUESA CHANCADA EN PESO DE LA MEZCLA	%	37.69	37.69	37.69	37.69	37.69	
9	ARENA NATURAL ZARANDEADA EN PESO DE LA MEZCLA	%	23.55	23.55	23.55	23.55	23.55	
10	PIEDRA CHANCADA DE 3/4" EN PESO DE LA MEZCLA	%	32.98	32.98	32.98	32.98	32.98	
11	TOTAL DE MEZCLA	%	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	
12	PESO ESPECIFICO TEÓRICO MÁXIMO		2.453	2.453	2.453	2.453	2.453	
13	PESO ESPECIFICO BULK DE LA COMBINACIÓN DE AGREGADOS		2.63	2.63	2.63	2.63	2.63	
14	PESO DE LA BRIQUETA AL AIRE	gr	1250.3	1246.4	1251.4	1250.9	1251.0	
15	PESO DE LA BRIQUETA EN EL AIRE (CONDICIÓN SSS)	gr	1252.0	1247.0	1255.0	1253.0	1254.0	
16	PESO DE LA BRIQUETA EN EL AGUA	gr	729.0	722.0	728.0	725.0	726.0	
17	Agua absorbida	%	0.3	0.1	0.7	0.4	0.6	
18	VOLUMEN DE LA BRIQUETA	c.c.	523	525	527	528	528	
19	PESO ESPECIFICO BULK DE LA BRIQUETA	gr/c.c.	2.391	2.374	2.375	2.369	2.369	
20	VACÍOS TOTALES EN LA MEZCLA(VTM)	%	2.52	3.22	3.17	3.42	3.42	
21	VACÍOS EN AGREGADO MINERAL (V.M.A.)	%	14.49	15.10	15.06	15.28	15.28	
22	ASFALTO ABSORBIDO POR EL AGREGADO TOTAL (VFA)	%	82.59	78.70	78.92	77.62	77.62	
23	ESTABILIDAD SIN CORREGIR	Lb	2680.0	2630.0	2610.0	2710.0	2700.0	
24	FACTOR DE ESTABILIDAD	K	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	
25	ESTABILIDAD CORREGIDA	Lb	2570	2520	2500	2600	2590	
26	ESTABILIDAD CORREGIDA - PROMEDIO	Lb	2560					
27	Peso Unitario	gr/c.c.	2.384	2.367	2.368	2.362	2.362	
28	Peso Unitario - Promedio	gr/c.c.	2.369					
29	FLUJO	mm	2.75	3	2.75	3.00	2.75	
30	FLUJO - PROMEDIO	mm	2.75					
31	VACÍOS TOTALES EN LA MEZCLA(VTM) - PROMEDIO	%	3.15					
32	VMA - PROMEDIO	%	15.04					
33	VFA - PROMEDIO	%	79.09					
34	coeficiente de variación para la estabilidad		1.72					
35	coeficiente de variación para el flujo		4.98					

LABORATORIO DE AGREGADOS, SUELOS, ASFALTO Y CONCRETO

ENSAYO MARSHALL ASTM D – 6926 y 6927

Laboratorio Mecánica De Suelos Concretos Y Pavimentos

MATERIAL	: Mezcla Asfáltica Modificada-Tipo B – Tesis De Titulación	Hoja 6/9
TESISTA	: Bach. DANILO GUTARRA LARA.	
REVISADO POR	: ING. MILLER RODRIGUEZ	
FECHA DE ENSAYO	: 05/04/2018	FECHA DE EMISIÓN: 06/04/2018

TIPO DE MEZCLA: MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA CON FIBRAS ACRÍLICAS DE 12 mm – TIPO B.

DISEÑO:		Cemento Asfáltico (C.A.)		5.5%		1250 (gr)	Peso Por Briqueta	
		Piedra Triturada de 3/4" (35%)		94.5%			1256.25 gramos	
		Arena Gruesa Chancada (40%)						
		Arena Gruesa Zarandeada (25%)						
		Fibra Acrílica de 12 mm		0.50%		6.25 (gr)		
BRIQUETA		N°	6A	6B	6C	6D	6E	
1	PESO ESPECIFICO DE LA PIEDRA CHANCADA DE 3/4" - BULK		2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	
2	PESO ESPECIFICO DE LA ARENA GRUESA CHANCADA - BULK		2.63	2.63	2.63	2.63	2.63	
3	PESO ESPECIFICO DE LA ARENA NATURAL ZARANDEADA - BULK		2.62	2.62	2.62	2.62	2.62	
4	PESO ESPECIFICO APARENTE DE LA FIBRA		1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	
5	PESO ESPECIFICO APARENTE DEL CEMENTO ASFALTICO		1.018	1.018	1.018	1.018	1.018	
6	FIBRA ACRÍLICA EN PESO DE LA MEZCLA	%	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	
7	C.A. EN PESO DE LA MEZCLA	%	5.47	5.47	5.47	5.47	5.47	
8	ARENA GRUESA CHANCADA EN PESO DE LA MEZCLA	%	37.61	37.61	37.61	37.61	37.61	
9	ARENA NATURAL ZARANDEADA EN PESO DE LA MEZCLA	%	23.51	23.51	23.51	23.51	23.51	
10	PIEDRA CHANCADA DE 3/4" EN PESO DE LA MEZCLA	%	32.91	32.91	32.91	32.91	32.91	
11	TOTAL DE MEZCLA	%	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	
12	PESO ESPECIFICO TEÓRICO MÁXIMO		2.448	2.448	2.448	2.448	2.448	
13	PESO ESPECIFICO BULK DE LA COMBINACIÓN DE AGREGADOS		2.63	2.63	2.63	2.63	2.63	
14	PESO DE LA BRIQUETA AL AIRE	gr	1255.4	1253.4	1255.4	1257.4	1259.0	
15	PESO DE LA BRIQUETA EN EL AIRE (CONDICIÓN SSS)	gr	1258.0	1256.0	1257.0	1259.0	1261.0	
16	PESO DE LA BRIQUETA EN EL AGUA	gr	731.0	727.0	728.0	726.0	731.0	
17	Agua absorbida	%	0.5	0.5	0.3	0.3	0.4	
18	VOLUMEN DE LA BRIQUETA	c.c.	527	529	529	533	530	
19	PESO ESPECIFICO BULK DE LA BRIQUETA	gr/c.c.	2.382	2.369	2.373	2.359	2.375	
20	VACÍOS TOTALES EN LA MEZCLA(VTM)	%	2.68	3.21	3.04	3.62	2.96	
21	VACÍOS EN AGREGADO MINERAL (V.M.A.)	%	14.98	15.44	15.30	15.80	15.23	
22	ASFALTO ABSORBIDO POR EL AGREGADO TOTAL (VFA)	%	82.13	79.23	80.10	77.11	80.54	
23	ESTABILIDAD SIN CORREGIR	Lb	2360.0	2380.0	2320.0	2290.0	2450.0	
24	FACTOR DE ESTABILIDAD	K	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	
25	ESTABILIDAD CORREGIDA	Lb	2270	2280	2230	2200	2350	
26	ESTABILIDAD CORREGIDA - PROMEDIO	Lb	2270					
27	Peso Unitario	gr/c.c.	2.375	2.362	2.366	2.352	2.368	
28	Peso Unitario - Promedio	gr/c.c.	2.365					
29	FLUJO	mm	2.75	2.75	2.75	2.75	3	
30	FLUJO - PROMEDIO	mm	2.75					
31	VACÍOS TOTALES EN LA MEZCLA(VTM) - PROMEDIO	%	3.10					
32	VMA - PROMEDIO	%	15.35					
33	VFA - PROMEDIO	%	79.82					
34	coeficiente de variación para la estabilidad		2.50					
35	coeficiente de variación para el flujo		4.07					

LABORATORIO DE AGREGADOS, SUELOS, ASFALTO Y CONCRETO

ENSAYO MARSHALL ASTM D – 6926 y 6927

Laboratorio Mecánica De Suelos Concretos Y Pavimentos		
MATERIAL	: Mezcla Asfáltica Modificada-Tipo B – Tesis De Titulación	Hoja 7/9
TESISTA	: Bach. DANILO GUTARRA LARA.	
REVISADO POR	: ING. MILLER RODRIGUEZ	
FECHA DE ENSAYO	: 05/04/2018	FECHA DE EMISIÓN: 06/04/2018

TIPO DE MEZCLA:	MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA CON FIBRAS ACRÍLICAS DE 12 mm – TIPO B.		
DISEÑO:	Cemento Asfáltico (C.A.)	5.5%	1250 (gr)
	Piedra Triturada de 3/4" (35%)	94.5%	
	Arena Gruesa Chancada (40%)		
	Arena Gruesa Zarandeada (25%)		
	Fibra Acrílica de 12 mm	0.70%	8.75 (gr)
Peso Por Briqueta			1258.75 gramos

BRIQUETA		N°	7A	7B	7C	7D	7E
1	PESO ESPECIFICO DE LA PIEDRA CHANCADA DE 3/4" - BULK		2.65	2.65	2.65	2.65	2.65
2	PESO ESPECIFICO DE LA ARENA GRUESA CHANCADA - BULK		2.63	2.63	2.63	2.63	2.63
3	PESO ESPECIFICO DE LA ARENA NATURAL ZARANDEADA - BULK		2.62	2.62	2.62	2.62	2.62
4	PESO ESPECIFICO APARENTE DE LA FIBRA		1.17	1.17	1.17	1.17	1.17
5	PESO ESPECIFICO APARENTE DEL CEMENTO ASFALTICO		1.018	1.018	1.018	1.018	1.018
6	FIBRA ACRÍLICA EN PESO DE LA MEZCLA	%	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70
7	C.A. EN PESO DE LA MEZCLA	%	5.46	5.46	5.46	5.46	5.46
8	ARENA GRUESA CHANCADA EN PESO DE LA MEZCLA	%	37.54	37.54	37.54	37.54	37.54
9	ARENA NATURAL ZARANDEADA EN PESO DE LA MEZCLA	%	23.46	23.46	23.46	23.46	23.46
10	PIEDRA CHANCADA DE 3/4" EN PESO DE LA MEZCLA	%	32.85	32.85	32.85	32.85	32.85
11	TOTAL DE MEZCLA	%	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
12	PESO ESPECIFICO TEÓRICO MÁXIMO		2.442	2.442	2.442	2.442	2.442
13	PESO ESPECIFICO BULK DE LA COMBINACIÓN DE AGREGADOS		2.63	2.63	2.63	2.63	2.63
14	PESO DE LA BRIQUETA AL AIRE	gr	1264.6	1261.3	1250.1	1263.6	1255.4
15	PESO DE LA BRIQUETA EN EL AIRE (CONDICIÓN SSS)	gr	1266.0	1264.0	1255.0	1265.0	1258.0
16	PESO DE LA BRIQUETA EN EL AGUA	gr	733.0	731.0	728.0	729.0	728.0
17	Agua absorbida	%	0.3	0.5	0.9	0.3	0.5
18	VOLUMEN DE LA BRIQUETA	c.c.	533	533	527	536	530
19	PESO ESPECIFICO BULK DE LA BRIQUETA	gr/c.c.	2.373	2.366	2.372	2.357	2.369
20	VACÍOS TOTALES EN LA MEZCLA(VTM)	%	2.83	3.12	2.88	3.49	3.00
21	VACÍOS EN AGREGADO MINERAL (V.M.A.)	%	15.47	15.72	15.51	16.04	15.61
22	ASFALTO ABSORBIDO POR EL AGREGADO TOTAL (VFA)	%	81.68	80.14	81.45	78.24	80.79
23	ESTABILIDAD SIN CORREGIR	Lb	2330.0	2200.0	2050.0	2360.0	2360.0
24	FACTOR DE ESTABILIDAD	K	0.96	0.96	0.96	0.93	0.96
25	ESTABILIDAD CORREGIDA	Lb	2240	2110	1970	2200	2270
26	ESTABILIDAD CORREGIDA - PROMEDIO	Lb	2160				
27	Peso Unitario	gr/c.c.	2.366	2.359	2.365	2.350	2.362
28	Peso Unitario - Promedio	gr/c.c.	2.360				
29	FLUJO	mm	3	3	2.75	2.75	2.75
30	FLUJO - PROMEDIO	mm	2.75				
31	VACÍOS TOTALES EN LA MEZCLA(VTM) - PROMEDIO	%	3.06				
32	VMA - PROMEDIO	%	15.67				
33	VFA - PROMEDIO	%	80.46				
34	coeficiente de variación para la estabilidad		5.61				
35	coeficiente de variación para el flujo		4.98				

LABORATORIO DE AGREGADOS, SUELOS, ASFALTO Y CONCRETO

ENSAYO MARSHALL ASTM D – 6926 y 6927

Laboratorio Mecánica De Suelos Concretos Y Pavimentos		
MATERIAL	: Mezcla Asfáltica Modificada-Tipo B – Tesis De Titulación	Hoja 8/9
TESISTA	: Bach. DANILO GUTARRA LARA.	
REVISADO POR	: ING. MILLER RODRIGUEZ	
FECHA DE ENSAYO	: 05/04/2018	FECHA DE EMISIÓN: 06/04/2018

TIPO DE MEZCLA:	MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA CON FIBRAS ACRÍLICAS DE 12 mm – TIPO B.		
DISEÑO:	Cemento Asfáltico (C.A.)	5.5%	1250 (gr)
	Piedra Triturada de 3/4" (35%)	94.5%	
	Arena Gruesa Chancada (40%)		
	Arena Gruesa Zarandeada (25%)		
	Fibra Acrílica de 12 mm	1.00%	12.50 (gr)
Peso Por Briqueta			1262.50 gramos

BRIQUETA		N°	8A	8B	8C	8D	8E
1	PESO ESPECIFICO DE LA PIEDRA CHANCADA DE 3/4" - BULK		2.65	2.65	2.65	2.65	2.65
2	PESO ESPECIFICO DE LA ARENA GRUESA CHANCADA - BULK		2.63	2.63	2.63	2.63	2.63
3	PESO ESPECIFICO DE LA ARENA NATURAL ZARANDEADA - BULK		2.62	2.62	2.62	2.62	2.62
4	PESO ESPECIFICO APARENTE DE LA FIBRA		1.17	1.17	1.17	1.17	1.17
5	PESO ESPECIFICO APARENTE DEL CEMENTO ASFALTICO		1.018	1.018	1.018	1.018	1.018
6	FIBRA ACRÍLICA EN PESO DE LA MEZCLA	%	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
7	C.A. EN PESO DE LA MEZCLA	%	5.45	5.45	5.45	5.45	5.45
8	ARENA GRUESA CHANCADA EN PESO DE LA MEZCLA	%	37.43	37.43	37.43	37.43	37.43
9	ARENA NATURAL ZARANDEADA EN PESO DE LA MEZCLA	%	23.39	23.39	23.39	23.39	23.39
10	PIEDRA CHANCADA DE 3/4" EN PESO DE LA MEZCLA	%	32.75	32.75	32.75	32.75	32.75
11	TOTAL DE MEZCLA	%	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
12	PESO ESPECIFICO TEÓRICO MÁXIMO		2.434	2.434	2.434	2.434	2.434
13	PESO ESPECIFICO BULK DE LA COMBINACIÓN DE AGREGADOS		2.63	2.63	2.63	2.63	2.63
14	PESO DE LA BRIQUETA AL AIRE	gr	1265.8	1265.9	1265.4	1260.0	1264.1
15	PESO DE LA BRIQUETA EN EL AIRE (CONDICIÓN SSS)	gr	1268.0	1269.0	1268.0	1266.0	1267.0
16	PESO DE LA BRIQUETA EN EL AGUA	gr	734.0	733.0	732.0	730.0	731.0
17	Agua absorbida	%	0.4	0.6	0.5	1.1	0.5
18	VOLUMEN DE LA BRIQUETA	c.c.	534	536	536	536	536
19	PESO ESPECIFICO BULK DE LA BRIQUETA	gr/c.c.	2.370	2.362	2.361	2.351	2.358
20	VACÍOS TOTALES EN LA MEZCLA(VTM)	%	2.64	2.97	3.01	3.42	3.14
21	VACÍOS EN AGREGADO MINERAL (V.M.A.)	%	15.83	16.11	16.15	16.50	16.25
22	ASFALTO ABSORBIDO POR EL AGREGADO TOTAL (VFA)	%	83.29	81.55	81.34	79.25	80.70
23	ESTABILIDAD SIN CORREGIR	Lb	2230.0	2360.0	2250.0	2450.0	2360.0
24	FACTOR DE ESTABILIDAD	K	0.96	0.93	0.93	0.93	0.93
25	ESTABILIDAD CORREGIDA	Lb	2140	2200	2090	2280	2200
26	ESTABILIDAD CORREGIDA - PROMEDIO	Lb	2180				
27	Peso Unitario	gr/c.c.	2.363	2.355	2.354	2.344	2.351
28	Peso Unitario - Promedio	gr/c.c.	2.353				
29	FLUJO	mm	2.75	2.5	2.5	2.25	2.5
30	FLUJO - PROMEDIO	mm	2.50				
31	VACÍOS TOTALES EN LA MEZCLA(VTM) - PROMEDIO	%	3.04				
32	VMA - PROMEDIO	%	16.17				
33	VFA - PROMEDIO	%	81.23				
34	coeficiente de variación para la estabilidad		3.28				
35	coeficiente de variación para el flujo		7.07				

LABORATORIO DE AGREGADOS, SUELOS, ASFALTO Y CONCRETO

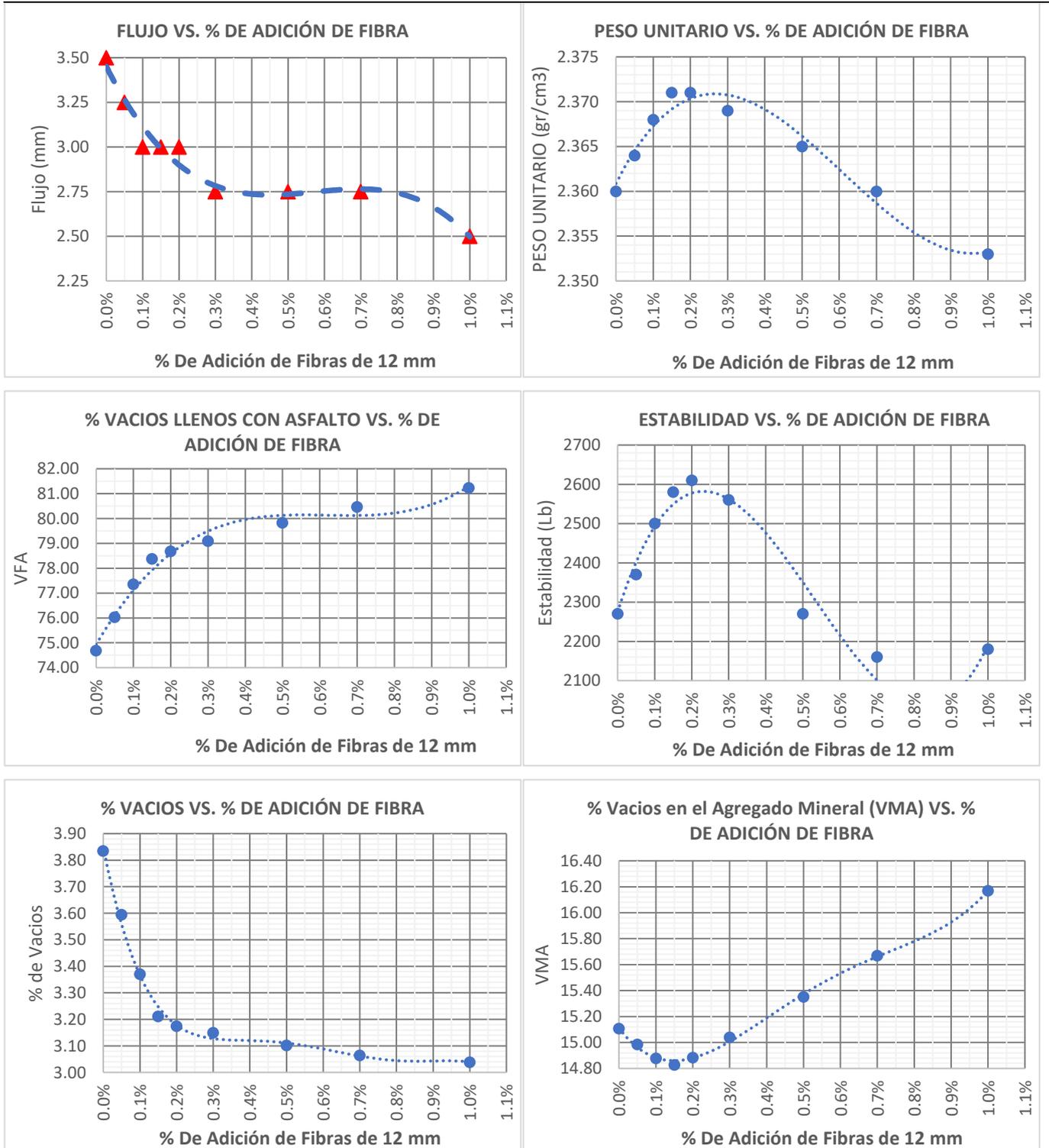
ENSAYO MARSHALL ASTM D – 6926 y 6927

Laboratorio Mecánica De Suelos Concretos Y Pavimentos

MATERIAL	: Mezcla Asfáltica Modificada-Tipo B – Tesis De Titulación	Hoja 9/9
TESISTA	: Bach. DANILO GUTARRA LARA.	
REVISADO POR	: ING. MILLER RODRIGUEZ	
FECHA DE ENSAYO	: 05/04/2018	FECHA DE EMISIÓN: 06/04/2018

TIPO DE MEZCLA: MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA CON FIBRAS ACRÍLICAS DE 12 mm – TIPO B.

RESUMEN DE RESULTADOS



**Anexo F:
Diseño de
mezcla asfáltica
modificada
TIPO C**

MÉTODO MARSHALL
FIBRA ACRÍLICA DE 8 mm

LABORATORIO DE AGREGADOS, SUELOS, ASFALTO Y CONCRETO

ENSAYO MARSHALL ASTM D – 6926 y 6927

Laboratorio Mecánica De Suelos Concretos Y Pavimentos

MATERIAL	: Mezcla Asfáltica Modificada-Tipo C – Tesis De Titulación	Hoja 1/9
TESISTA	: Bach. DANILO GUTARRA LARA.	
REVISADO POR	: ING. MILLER RODRIGUEZ	
FECHA DE ENSAYO	: 09/04/2018	FECHA DE EMISIÓN: 10/04/2018

TIPO DE MEZCLA: MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA CON FIBRAS ACRÍLICAS DE 8 mm – TIPO C.

DISEÑO:	Cemento Asfáltico (C.A.)	5.5%	1250 (gr)	Peso Por Briqueta	
	Piedra Triturada de 3/4" (35%)			1250.63	gramos
	Arena Gruesa Chancada (40%)	94.5%			
	Arena Gruesa Zarandeada (25%)				
Fibra Acrílica de 8 mm	0.05%	0.63 (gr)			

BRIQUETA		N°	1A	1B	1C	1D	1E
1	PESO ESPECIFICO DE LA PIEDRA CHANCADA DE 3/4" - BULK		2.65	2.65	2.65	2.65	2.65
2	PESO ESPECIFICO DE LA ARENA GRUESA CHANCADA - BULK		2.63	2.63	2.63	2.63	2.63
3	PESO ESPECIFICO DE LA ARENA NATURAL ZARANDEADA - BULK		2.62	2.62	2.62	2.62	2.62
4	PESO ESPECIFICO APARENTE DE LA FIBRA		1.17	1.17	1.17	1.17	1.17
5	PESO ESPECIFICO APARENTE DEL CEMENTO ASFALTICO		1.018	1.018	1.018	1.018	1.018
6	FIBRA ACRÍLICA EN PESO DE LA MEZCLA	%	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
7	C.A. EN PESO DE LA MEZCLA	%	5.50	5.50	5.50	5.50	5.50
8	ARENA GRUESA CHANCADA EN PESO DE LA MEZCLA	%	37.78	37.78	37.78	37.78	37.78
9	ARENA NATURAL ZARANDEADA EN PESO DE LA MEZCLA	%	23.61	23.61	23.61	23.61	23.61
10	PIEDRA CHANCADA DE 3/4" EN PESO DE LA MEZCLA	%	33.06	33.06	33.06	33.06	33.06
11	TOTAL DE MEZCLA	%	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
12	PESO ESPECIFICO TEÓRICO MÁXIMO		2.460	2.460	2.460	2.460	2.460
13	PESO ESPECIFICO BULK DE LA COMBINACIÓN DE AGREGADOS		2.63	2.63	2.63	2.63	2.63
14	PESO DE LA BRIQUETA AL AIRE	gr	1244.9	1237.9	1242.2	1243.3	1238.8
15	PESO DE LA BRIQUETA EN EL AIRE (CONDICIÓN SSS)	gr	1248.0	1241.0	1245.0	1247.0	1243.0
16	PESO DE LA BRIQUETA EN EL AGUA	gr	724.0	719.0	721.0	723.0	720.0
17	Agua absorbida	%	0.6	0.6	0.5	0.7	0.8
18	VOLUMEN DE LA BRIQUETA	c.c.	524	522	524	524	523
19	PESO ESPECIFICO BULK DE LA BRIQUETA	gr/c.c.	2.376	2.371	2.371	2.373	2.369
20	VACÍOS TOTALES EN LA MEZCLA(VTM)	%	3.40	3.60	3.60	3.52	3.68
21	VACÍOS EN AGREGADO MINERAL (V.M.A.)	%	14.81	14.99	14.99	14.92	15.06
22	ASFALTO ABSORBIDO POR EL AGREGADO TOTAL (VFA)	%	77.05	75.97	75.97	76.40	75.55
23	ESTABILIDAD SIN CORREGIR	Lb	2460.0	2390.0	2520.0	2530.0	2460.0
24	FACTOR DE ESTABILIDAD	K	0.96	1.00	0.96	0.96	0.96
25	ESTABILIDAD CORREGIDA	Lb	2360	2390	2420	2430	2360
26	ESTABILIDAD CORREGIDA - PROMEDIO	Lb	2390				
27	Peso Unitario	gr/c.c.	2.369	2.364	2.364	2.37	2.36
28	Peso Unitario - Promedio	gr/c.c.	2.365				
29	FLUJO	mm	3.25	3.5	3	3.25	3.25
30	FLUJO - PROMEDIO	mm	3.25				
31	VACÍOS TOTALES EN LA MEZCLA(VTM) - PROMEDIO	%	3.56				
32	VMA - PROMEDIO	%	14.96				
33	VFA - PROMEDIO	%	76.19				
34	coeficiente de variación para la estabilidad		1.37				
35	coeficiente de variación para el flujo		5.44				

LABORATORIO DE AGREGADOS, SUELOS, ASFALTO Y CONCRETO

ENSAYO MARSHALL ASTM D – 6926 y 6927

Laboratorio Mecánica De Suelos Concretos Y Pavimentos		
MATERIAL	: Mezcla Asfáltica Modificada-Tipo C – Tesis De Titulación	Hoja 2/9
TESISTA	: Bach. DANILO GUTARRA LARA.	
REVISADO POR	: ING. MILLER RODRIGUEZ	
FECHA DE ENSAYO	: 09/04/2018	FECHA DE EMISIÓN: 10/04/2018

TIPO DE MEZCLA: MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA CON FIBRAS ACRÍLICAS DE 8 mm – TIPO C.										
DISEÑO:		Cemento Asfáltico (C.A.)	5.5%	1250 (gr)			Peso Por Briqueta			
		Piedra Triturada de 3/4" (35%)	94.5%				1251.25		gramos	
		Arena Gruesa Chancada (40%)								
		Arena Gruesa Zarandeada (25%)								
		Fibra Acrílica de 8 mm	0.10%	1.25 (gr)						
BRIQUETA		N°	2A	2B	2C	2D	2E			
1	PESO ESPECIFICO DE LA PIEDRA CHANCADA DE 3/4" - BULK		2.65	2.65	2.65	2.65	2.65			
2	PESO ESPECIFICO DE LA ARENA GRUESA CHANCADA - BULK		2.63	2.63	2.63	2.63	2.63			
3	PESO ESPECIFICO DE LA ARENA NATURAL ZARANDEADA - BULK		2.62	2.62	2.62	2.62	2.62			
4	PESO ESPECIFICO APARENTE DE LA FIBRA		1.17	1.17	1.17	1.17	1.17			
5	PESO ESPECIFICO APARENTE DEL CEMENTO ASFALTICO		1.018	1.018	1.018	1.018	1.018			
6	FIBRA ACRÍLICA EN PESO DE LA MEZCLA	%	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10			
7	C.A. EN PESO DE LA MEZCLA	%	5.49	5.49	5.49	5.49	5.49			
8	ARENA GRUESA CHANCADA EN PESO DE LA MEZCLA	%	37.76	37.76	37.76	37.76	37.76			
9	ARENA NATURAL ZARANDEADA EN PESO DE LA MEZCLA	%	23.60	23.60	23.60	23.60	23.60			
10	PIEDRA CHANCADA DE 3/4" EN PESO DE LA MEZCLA	%	33.04	33.04	33.04	33.04	33.04			
11	TOTAL DE MEZCLA	%	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00			
12	PESO ESPECIFICO TEÓRICO MÁXIMO		2.458	2.458	2.458	2.458	2.458			
13	PESO ESPECIFICO BULK DE LA COMBINACIÓN DE AGREGADOS		2.63	2.63	2.63	2.63	2.63			
14	PESO DE LA BRIQUETA AL AIRE	gr	1243.6	1240.7	1241.8	1240.6	1244.5			
15	PESO DE LA BRIQUETA EN EL AIRE (CONDICIÓN SSS)	gr	1246.0	1243.0	1244.0	1243.0	1247.0			
16	PESO DE LA BRIQUETA EN EL AGUA	gr	724.0	720.0	722.0	720.0	724.0			
17	Agua absorbida	%	0.5	0.4	0.4	0.5	0.5			
18	VOLUMEN DE LA BRIQUETA	c.c.	522	523	522	523	523			
19	PESO ESPECIFICO BULK DE LA BRIQUETA	gr/c.c.	2.382	2.372	2.379	2.372	2.380			
20	VACÍOS TOTALES EN LA MEZCLA(VTM)	%	3.10	3.51	3.22	3.51	3.18			
21	VACÍOS EN AGREGADO MINERAL (V.M.A.)	%	14.64	15.00	14.75	15.00	14.71			
22	ASFALTO ABSORBIDO POR EL AGREGADO TOTAL (VFA)	%	78.81	76.61	78.14	76.61	78.36			
23	ESTABILIDAD SIN CORREGIR	Lb	2490.0	2540.0	2480.0	2630.0	2500.0			
24	FACTOR DE ESTABILIDAD	K	1.00	0.96	1.00	0.96	0.96			
25	ESTABILIDAD CORREGIDA	Lb	2490	2440	2480	2520	2400			
26	ESTABILIDAD CORREGIDA - PROMEDIO	Lb	2470							
27	Peso Unitario	gr/c.c.	2.375	2.365	2.372	2.365	2.373			
28	Peso Unitario - Promedio	gr/c.c.	2.370							
29	FLUJO	mm	3	2.75	3.25	3	3			
30	FLUJO - PROMEDIO	mm	3.00							
31	VACÍOS TOTALES EN LA MEZCLA(VTM) - PROMEDIO	%	3.31							
32	VMA - PROMEDIO	%	14.82							
33	VFA - PROMEDIO	%	77.71							
34	coeficiente de variación para la estabilidad		1.89							
35	coeficiente de variación para el flujo		5.89							

LABORATORIO DE AGREGADOS, SUELOS, ASFALTO Y CONCRETO

ENSAYO MARSHALL ASTM D – 6926 y 6927

Laboratorio Mecánica De Suelos Concretos Y Pavimentos

MATERIAL	: Mezcla Asfáltica Modificada-Tipo C – Tesis De Titulación	Hoja 3/9
TESISTA	: Bach. DANILO GUTARRA LARA.	
REVISADO POR	: ING. MILLER RODRIGUEZ	
FECHA DE ENSAYO	: 09/04/2018	FECHA DE EMISIÓN: 10/04/2018

TIPO DE MEZCLA: MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA CON FIBRAS ACRÍLICAS DE 8 mm – TIPO C.

DISEÑO:				Peso Por Briqueta
Cemento Asfáltico (C.A.)		5.5%	1250 (gr)	1251.88 gramos
Piedra Triturada de 3/4"	(35%)	94.5%		
Arena Gruesa Chancada	(40%)			
Arena Gruesa Zarandeada	(25%)			
Fibra Acrílica de	8 mm	0.15%	1.88 (gr)	

BRIQUETA		N°	3A	3B	3C	3D	3E	
1	PESO ESPECIFICO DE LA PIEDRA CHANCADA DE 3/4" - BULK		2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	
2	PESO ESPECIFICO DE LA ARENA GRUESA CHANCADA - BULK		2.63	2.63	2.63	2.63	2.63	
3	PESO ESPECIFICO DE LA ARENA NATURAL ZARANDEADA - BULK		2.62	2.62	2.62	2.62	2.62	
4	PESO ESPECIFICO APARENTE DE LA FIBRA		1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	
5	PESO ESPECIFICO APARENTE DEL CEMENTO ASFALTICO		1.018	1.018	1.018	1.018	1.018	
6	FIBRA ACRÍLICA EN PESO DE LA MEZCLA	%	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	
7	C.A. EN PESO DE LA MEZCLA	%	5.49	5.49	5.49	5.49	5.49	
8	ARENA GRUESA CHANCADA EN PESO DE LA MEZCLA	%	37.74	37.74	37.74	37.74	37.74	
9	ARENA NATURAL ZARANDEADA EN PESO DE LA MEZCLA	%	23.59	23.59	23.59	23.59	23.59	
10	PIEDRA CHANCADA DE 3/4" EN PESO DE LA MEZCLA	%	33.03	33.03	33.03	33.03	33.03	
11	TOTAL DE MEZCLA	%	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	
12	PESO ESPECIFICO TEÓRICO MÁXIMO		2.457	2.457	2.457	2.457	2.457	
13	PESO ESPECIFICO BULK DE LA COMBINACIÓN DE AGREGADOS		2.63	2.63	2.63	2.63	2.63	
14	PESO DE LA BRIQUETA AL AIRE	gr	1245.3	1248.2	1245.7	1247.4	1242.6	
15	PESO DE LA BRIQUETA EN EL AIRE (CONDICIÓN SSS)	gr	1248.0	1251.0	1248.0	1250.0	1245.0	
16	PESO DE LA BRIQUETA EN EL AGUA	gr	724.0	726.0	724.0	726.0	722.0	
17	Agua absorbida	%	0.5	0.5	0.4	0.5	0.5	
18	VOLUMEN DE LA BRIQUETA	c.c.	524	525	524	524	523	
19	PESO ESPECIFICO BULK DE LA BRIQUETA	gr/c.c.	2.377	2.378	2.377	2.381	2.376	
20	VACÍOS TOTALES EN LA MEZCLA(VTM)	%	3.25	3.21	3.25	3.09	3.29	
21	VACÍOS EN AGREGADO MINERAL (V.M.A.)	%	14.86	14.83	14.86	14.72	14.90	
22	ASFALTO ABSORBIDO POR EL AGREGADO TOTAL (VFA)	%	78.12	78.34	78.12	79.01	77.90	
23	ESTABILIDAD SIN CORREGIR	Lb	2650.0	2720.0	2580.0	2670.0	2610.0	
24	FACTOR DE ESTABILIDAD	K	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	
25	ESTABILIDAD CORREGIDA	Lb	2550	2610	2480	2560	2500	
26	ESTABILIDAD CORREGIDA - PROMEDIO	Lb	2540					
27	Peso Unitario	gr/c.c.	2.370	2.371	2.370	2.37	2.37	
28	Peso Unitario - Promedio	gr/c.c.	2.371					
29	FLUJO	mm	3	3.25	3.25	3.00	3.00	
30	FLUJO - PROMEDIO	mm	3					
31	VACÍOS TOTALES EN LA MEZCLA(VTM) - PROMEDIO	%	3.22					
32	VMA - PROMEDIO	%	14.83					
33	VFA - PROMEDIO	%	78.30					
34	coeficiente de variación para la estabilidad		2.03					
35	coeficiente de variación para el flujo		4.56					

LABORATORIO DE AGREGADOS, SUELOS, ASFALTO Y CONCRETO

ENSAYO MARSHALL ASTM D – 6926 y 6927

Laboratorio Mecánica De Suelos Concretos Y Pavimentos		
MATERIAL	: Mezcla Asfáltica Modificada-Tipo C – Tesis De Titulación	Hoja 4/9
TESISTA	: Bach. DANILO GUTARRA LARA.	
REVISADO POR	: ING. MILLER RODRIGUEZ	
FECHA DE ENSAYO	: 09/04/2018	FECHA DE EMISIÓN: 10/04/2018

TIPO DE MEZCLA:	MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA CON FIBRAS ACRÍLICAS DE 8 mm – TIPO C.		
DISEÑO:	Cemento Asfáltico (C.A.)	5.5%	1250 (gr)
	Piedra Triturada de 3/4" (35%)	94.5%	
	Arena Gruesa Chancada (40%)		
	Arena Gruesa Zarandeada (25%)		
	Fibra Acrílica de 8 mm	0.20%	2.50 (gr)
Peso Por Briqueta			1252.5 gramos

BRIQUETA		N°	4A	4B	4C	4D	4E
1	PESO ESPECIFICO DE LA PIEDRA CHANCADA DE 3/4" - BULK		2.65	2.65	2.65	2.65	2.65
2	PESO ESPECIFICO DE LA ARENA GRUESA CHANCADA - BULK		2.63	2.63	2.63	2.63	2.63
3	PESO ESPECIFICO DE LA ARENA NATURAL ZARANDEADA - BULK		2.62	2.62	2.62	2.62	2.62
4	PESO ESPECIFICO APARENTE DE LA FIBRA		1.17	1.17	1.17	1.17	1.17
5	PESO ESPECIFICO APARENTE DEL CEMENTO ASFALTICO		1.018	1.018	1.018	1.018	1.018
6	FIBRA ACRÍLICA EN PESO DE LA MEZCLA	%	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
7	C.A. EN PESO DE LA MEZCLA	%	5.49	5.49	5.49	5.49	5.49
8	ARENA GRUESA CHANCADA EN PESO DE LA MEZCLA	%	37.72	37.72	37.72	37.72	37.72
9	ARENA NATURAL ZARANDEADA EN PESO DE LA MEZCLA	%	23.58	23.58	23.58	23.58	23.58
10	PIEDRA CHANCADA DE 3/4" EN PESO DE LA MEZCLA	%	33.01	33.01	33.01	33.01	33.01
11	TOTAL DE MEZCLA	%	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
12	PESO ESPECIFICO TEÓRICO MÁXIMO		2.456	2.456	2.456	2.456	2.456
13	PESO ESPECIFICO BULK DE LA COMBINACIÓN DE AGREGADOS		2.63	2.63	2.63	2.63	2.63
14	PESO DE LA BRIQUETA AL AIRE	gr	1247.8	1247.0	1249.1	1247.8	1249.7
15	PESO DE LA BRIQUETA EN EL AIRE (CONDICIÓN SSS)	gr	1251.0	1250.0	1252.0	1251.0	1253.0
16	PESO DE LA BRIQUETA EN EL AGUA	gr	725.0	724.0	728.0	724.0	730.0
17	Agua absorbida	%	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
18	VOLUMEN DE LA BRIQUETA	c.c.	526	526	524	527	523
19	PESO ESPECIFICO BULK DE LA BRIQUETA	gr/c.c.	2.372	2.371	2.384	2.368	2.389
20	VACÍOS TOTALES EN LA MEZCLA(VTM)	%	3.40	3.44	2.91	3.57	2.71
21	VACÍOS EN AGREGADO MINERAL (V.M.A.)	%	15.08	15.12	14.65	15.23	14.48
22	ASFALTO ABSORBIDO POR EL AGREGADO TOTAL (VFA)	%	77.44	77.23	80.12	76.58	81.28
23	ESTABILIDAD SIN CORREGIR	Lb	2530.0	2650.0	2570.0	2610.0	2510.0
24	FACTOR DE ESTABILIDAD	K	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96
25	ESTABILIDAD CORREGIDA	Lb	2430	2550	2470	2500	2410
26	ESTABILIDAD CORREGIDA - PROMEDIO	Lb	2470				
27	Peso Unitario	gr/c.c.	2.365	2.364	2.377	2.361	2.382
28	Peso Unitario - Promedio	gr/c.c.	2.370				
29	FLUJO	mm	2.75	2.5	2.75	2.5	2.75
30	FLUJO - PROMEDIO	mm	2.75				
31	VACÍOS TOTALES EN LA MEZCLA(VTM) - PROMEDIO	%	3.21				
32	VMA - PROMEDIO	%	14.91				
33	VFA - PROMEDIO	%	78.53				
34	coeficiente de variación para la estabilidad		2.26				
35	coeficiente de variación para el flujo		4.98				

LABORATORIO DE AGREGADOS, SUELOS, ASFALTO Y CONCRETO

ENSAYO MARSHALL ASTM D – 6926 y 6927

Laboratorio Mecánica De Suelos Concretos Y Pavimentos

MATERIAL	: Mezcla Asfáltica Modificada-Tipo C – Tesis De Titulación	Hoja 5/9
TESISTA	: Bach. DANILO GUTARRA LARA.	
REVISADO POR	: ING. MILLER RODRIGUEZ	
FECHA DE ENSAYO	: 09/04/2018	FECHA DE EMISIÓN: 10/04/2018

TIPO DE MEZCLA: MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA CON FIBRAS ACRÍLICAS DE 8 mm – TIPO C.

DISEÑO:	Cemento Asfáltico (C.A.)	5.5%	1250 (gr)	Peso Por Briqueta	
	Piedra Triturada de 3/4" (35%)			1253.75	gramos
	Arena Gruesa Chancada (40%)	94.5%			
	Arena Gruesa Zarandeada (25%)				
Fibra Acrílica de 8 mm	0.30%	3.75 (gr)			

BRIQUETA		N°	5A	5B	5C	5D	5E
1	PESO ESPECIFICO DE LA PIEDRA CHANCADA DE 3/4" - BULK		2.65	2.65	2.65	2.65	2.65
2	PESO ESPECIFICO DE LA ARENA GRUESA CHANCADA - BULK		2.63	2.63	2.63	2.63	2.63
3	PESO ESPECIFICO DE LA ARENA NATURAL ZARANDEADA - BULK		2.62	2.62	2.62	2.62	2.62
4	PESO ESPECIFICO APARENTE DE LA FIBRA		1.17	1.17	1.17	1.17	1.17
5	PESO ESPECIFICO APARENTE DEL CEMENTO ASFALTICO		1.018	1.018	1.018	1.018	1.018
6	FIBRA ACRÍLICA EN PESO DE LA MEZCLA	%	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
7	C.A. EN PESO DE LA MEZCLA	%	5.48	5.48	5.48	5.48	5.48
8	ARENA GRUESA CHANCADA EN PESO DE LA MEZCLA	%	37.69	37.69	37.69	37.69	37.69
9	ARENA NATURAL ZARANDEADA EN PESO DE LA MEZCLA	%	23.55	23.55	23.55	23.55	23.55
10	PIEDRA CHANCADA DE 3/4" EN PESO DE LA MEZCLA	%	32.98	32.98	32.98	32.98	32.98
11	TOTAL DE MEZCLA	%	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
12	PESO ESPECIFICO TEÓRICO MÁXIMO		2.453	2.453	2.453	2.453	2.453
13	PESO ESPECIFICO BULK DE LA COMBINACIÓN DE AGREGADOS		2.63	2.63	2.63	2.63	2.63
14	PESO DE LA BRIQUETA AL AIRE	gr	1248.6	1249.7	1250.8	1250.6	1252.8
15	PESO DE LA BRIQUETA EN EL AIRE (CONDICIÓN SSS)	gr	1251.0	1252.0	1253.0	1253.0	1255.0
16	PESO DE LA BRIQUETA EN EL AGUA	gr	724.0	724.0	726.0	726.0	732.0
17	Agua absorbida	%	0.5	0.4	0.4	0.5	0.4
18	VOLUMEN DE LA BRIQUETA	c.c.	527	528	527	527	523
19	PESO ESPECIFICO BULK DE LA BRIQUETA	gr/c.c.	2.369	2.367	2.373	2.373	2.395
20	VACÍOS TOTALES EN LA MEZCLA(VTM)	%	3.42	3.50	3.26	3.26	2.36
21	VACÍOS EN AGREGADO MINERAL (V.M.A.)	%	15.28	15.35	15.13	15.13	14.35
22	ASFALTO ABSORBIDO POR EL AGREGADO TOTAL (VFA)	%	77.62	77.19	78.48	78.48	83.56
23	ESTABILIDAD SIN CORREGIR	Lb	2530.0	2550.0	2460.0	2590.0	2480.0
24	FACTOR DE ESTABILIDAD	K	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96
25	ESTABILIDAD CORREGIDA	Lb	2420	2450	2360	2490	2380
26	ESTABILIDAD CORREGIDA - PROMEDIO	Lb	2420				
27	Peso Unitario	gr/c.c.	2.362	2.360	2.366	2.37	2.39
28	Peso Unitario - Promedio	gr/c.c.	2.368				
29	FLUJO	mm	2.5	2.5	2.75	2.75	2.75
30	FLUJO - PROMEDIO	mm	2.75				
31	VACÍOS TOTALES EN LA MEZCLA(VTM) - PROMEDIO	%	3.16				
32	VMA - PROMEDIO	%	15.05				
33	VFA - PROMEDIO	%	79.07				
34	coeficiente de variación para la estabilidad		2.17				
35	coeficiente de variación para el flujo		4.98				

LABORATORIO DE AGREGADOS, SUELOS, ASFALTO Y CONCRETO

ENSAYO MARSHALL ASTM D – 6926 y 6927

Laboratorio Mecánica De Suelos Concretos Y Pavimentos		
MATERIAL	: Mezcla Asfáltica Modificada-Tipo C – Tesis De Titulación	Hoja 6/9
TESISTA	: Bach. DANILO GUTARRA LARA.	
REVISADO POR	: ING. MILLER RODRIGUEZ	
FECHA DE ENSAYO	: 09/04/2018	FECHA DE EMISIÓN: 10/04/2018

TIPO DE MEZCLA:	MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA CON FIBRAS ACRÍLICAS DE 8 mm – TIPO C.		
DISEÑO:	Cemento Asfáltico (C.A.)	5.5%	1250 (gr)
	Piedra Triturada de 3/4" (35%)	94.5%	
	Arena Gruesa Chancada (40%)		
	Arena Gruesa Zarandeada (25%)		
	Fibra Acrílica de 8 mm	0.50%	6.25 (gr)
Peso Por Briqueta			1256.25 gramos

BRIQUETA		N°	6A	6B	6C	6D	6E
1	PESO ESPECIFICO DE LA PIEDRA CHANCADA DE 3/4" - BULK		2.65	2.65	2.65	2.65	2.65
2	PESO ESPECIFICO DE LA ARENA GRUESA CHANCADA - BULK		2.63	2.63	2.63	2.63	2.63
3	PESO ESPECIFICO DE LA ARENA NATURAL ZARANDEADA - BULK		2.62	2.62	2.62	2.62	2.62
4	PESO ESPECIFICO APARENTE DE LA FIBRA		1.17	1.17	1.17	1.17	1.17
5	PESO ESPECIFICO APARENTE DEL CEMENTO ASFALTICO		1.018	1.018	1.018	1.018	1.018
6	FIBRA ACRÍLICA EN PESO DE LA MEZCLA	%	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
7	C.A. EN PESO DE LA MEZCLA	%	5.47	5.47	5.47	5.47	5.47
8	ARENA GRUESA CHANCADA EN PESO DE LA MEZCLA	%	37.61	37.61	37.61	37.61	37.61
9	ARENA NATURAL ZARANDEADA EN PESO DE LA MEZCLA	%	23.51	23.51	23.51	23.51	23.51
10	PIEDRA CHANCADA DE 3/4" EN PESO DE LA MEZCLA	%	32.91	32.91	32.91	32.91	32.91
11	TOTAL DE MEZCLA	%	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
12	PESO ESPECIFICO TEÓRICO MÁXIMO		2.448	2.448	2.448	2.448	2.448
13	PESO ESPECIFICO BULK DE LA COMBINACIÓN DE AGREGADOS		2.63	2.63	2.63	2.63	2.63
14	PESO DE LA BRIQUETA AL AIRE	gr	1252.5	1256.4	1255.4	1257.3	1254.5
15	PESO DE LA BRIQUETA EN EL AIRE (CONDICIÓN SSS)	gr	1255.0	1259.0	1258.0	1260.0	1257.0
16	PESO DE LA BRIQUETA EN EL AGUA	gr	727.0	730.0	727.0	731.0	727.0
17	Agua absorbida	%	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
18	VOLUMEN DE LA BRIQUETA	c.c.	528	529	531	529	530
19	PESO ESPECIFICO BULK DE LA BRIQUETA	gr/c.c.	2.372	2.375	2.364	2.377	2.367
20	VACÍOS TOTALES EN LA MEZCLA(VTM)	%	3.09	2.96	3.41	2.88	3.29
21	VACÍOS EN AGREGADO MINERAL (V.M.A.)	%	15.34	15.23	15.62	15.16	15.52
22	ASFALTO ABSORBIDO POR EL AGREGADO TOTAL (VFA)	%	79.88	80.54	78.16	80.99	78.80
23	ESTABILIDAD SIN CORREGIR	Lb	2440.0	2380.0	2480.0	2350.0	2370.0
24	FACTOR DE ESTABILIDAD	K	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96
25	ESTABILIDAD CORREGIDA	Lb	2350	2280	2380	2260	2280
26	ESTABILIDAD CORREGIDA - PROMEDIO	Lb	2310				
27	Peso Unitario	gr/c.c.	2.365	2.368	2.357	2.37	2.36
28	Peso Unitario - Promedio	gr/c.c.	2.364				
29	FLUJO	mm	3	2.5	2.75	2.75	2.75
30	FLUJO - PROMEDIO	mm	2.75				
31	VACÍOS TOTALES EN LA MEZCLA(VTM) - PROMEDIO	%	3.13				
32	VMA - PROMEDIO	%	15.37				
33	VFA - PROMEDIO	%	79.67				
34	coeficiente de variación para la estabilidad		2.25				
35	coeficiente de variación para el flujo		6.43				

LABORATORIO DE AGREGADOS, SUELOS, ASFALTO Y CONCRETO

ENSAYO MARSHALL ASTM D – 6926 y 6927

Laboratorio Mecánica De Suelos Concretos Y Pavimentos

MATERIAL	: Mezcla Asfáltica Modificada-Tipo C – Tesis De Titulación	Hoja 7/9
TESISTA	: Bach. DANILO GUTARRA LARA.	
REVISADO POR	: ING. MILLER RODRIGUEZ	
FECHA DE ENSAYO	: 09/04/2018	FECHA DE EMISIÓN: 10/04/2018

TIPO DE MEZCLA: MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA CON FIBRAS ACRÍLICAS DE 8 mm – TIPO C.

DISEÑO:	Cemento Asfáltico (C.A.)	5.5%	1250 (gr)	Peso Por Briqueta	
	Piedra Triturada de 3/4" (35%)			1258.75	gramos
	Arena Gruesa Chancada (40%)	94.5%			
	Arena Gruesa Zarandeada (25%)				
Fibra Acrílica de 8 mm	0.70%	8.75 (gr)			

BRIQUETA		N°	7A	7B	7C	7D	7E
1	PESO ESPECIFICO DE LA PIEDRA CHANCADA DE 3/4" - BULK		2.65	2.65	2.65	2.65	2.65
2	PESO ESPECIFICO DE LA ARENA GRUESA CHANCADA - BULK		2.63	2.63	2.63	2.63	2.63
3	PESO ESPECIFICO DE LA ARENA NATURAL ZARANDEADA - BULK		2.62	2.62	2.62	2.62	2.62
4	PESO ESPECIFICO APARENTE DE LA FIBRA		1.17	1.17	1.17	1.17	1.17
5	PESO ESPECIFICO APARENTE DEL CEMENTO ASFALTICO		1.018	1.018	1.018	1.018	1.018
6	FIBRA ACRÍLICA EN PESO DE LA MEZCLA	%	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70
7	C.A. EN PESO DE LA MEZCLA	%	5.46	5.46	5.46	5.46	5.46
8	ARENA GRUESA CHANCADA EN PESO DE LA MEZCLA	%	37.54	37.54	37.54	37.54	37.54
9	ARENA NATURAL ZARANDEADA EN PESO DE LA MEZCLA	%	23.46	23.46	23.46	23.46	23.46
10	PIEDRA CHANCADA DE 3/4" EN PESO DE LA MEZCLA	%	32.85	32.85	32.85	32.85	32.85
11	TOTAL DE MEZCLA	%	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
12	PESO ESPECIFICO TEÓRICO MÁXIMO		2.442	2.442	2.442	2.442	2.442
13	PESO ESPECIFICO BULK DE LA COMBINACIÓN DE AGREGADOS		2.63	2.63	2.63	2.63	2.63
14	PESO DE LA BRIQUETA AL AIRE	gr	1260.9	1259.8	1261.0	1261.2	1257.7
15	PESO DE LA BRIQUETA EN EL AIRE (CONDICIÓN SSS)	gr	1263.0	1262.0	1263.0	1262.0	1260.0
16	PESO DE LA BRIQUETA EN EL AGUA	gr	733.0	729.0	732.0	730.0	726.0
17	Agua absorbida	%	0.4	0.4	0.4	0.2	0.4
18	VOLUMEN DE LA BRIQUETA	c.c.	530	533	531	532	534
19	PESO ESPECIFICO BULK DE LA BRIQUETA	gr/c.c.	2.379	2.364	2.375	2.371	2.355
20	VACÍOS TOTALES EN LA MEZCLA(VTM)	%	2.59	3.20	2.75	2.92	3.57
21	VACÍOS EN AGREGADO MINERAL (V.M.A.)	%	15.26	15.79	15.40	15.54	16.11
22	ASFALTO ABSORBIDO POR EL AGREGADO TOTAL (VFA)	%	83.03	79.71	82.12	81.23	77.83
23	ESTABILIDAD SIN CORREGIR	Lb	2210.0	2250.0	2350.0	2420.0	2200.0
24	FACTOR DE ESTABILIDAD	K	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96
25	ESTABILIDAD CORREGIDA	Lb	2120	2160	2260	2320	2110
26	ESTABILIDAD CORREGIDA - PROMEDIO	Lb	2190				
27	Peso Unitario	gr/c.c.	2.372	2.357	2.368	2.36	2.35
28	Peso Unitario - Promedio	gr/c.c.	2.362				
29	FLUJO	mm	2.5	2.5	2.75	2.75	2.50
30	FLUJO - PROMEDIO	mm	2.5				
31	VACÍOS TOTALES EN LA MEZCLA(VTM) - PROMEDIO	%	3.01				
32	VMA - PROMEDIO	%	15.62				
33	VFA - PROMEDIO	%	80.79				
34	coeficiente de variación para la estabilidad		4.20				
35	coeficiente de variación para el flujo		5.48				

LABORATORIO DE AGREGADOS, SUELOS, ASFALTO Y CONCRETO

ENSAYO MARSHALL ASTM D – 6926 y 6927

Laboratorio Mecánica De Suelos Concretos Y Pavimentos		
MATERIAL	: Mezcla Asfáltica Modificada-Tipo C – Tesis De Titulación	Hoja 8/9
TESISTA	: Bach. DANILO GUTARRA LARA.	
REVISADO POR	: ING. MILLER RODRIGUEZ	
FECHA DE ENSAYO	: 09/04/2018	FECHA DE EMISIÓN: 10/04/2018

TIPO DE MEZCLA:	MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA CON FIBRAS ACRÍLICAS DE 8 mm – TIPO C.		
DISEÑO:	Cemento Asfáltico (C.A.)	5.5%	1250 (gr)
	Piedra Triturada de 3/4" (35%)	94.5%	
	Arena Gruesa Chancada (40%)		
	Arena Gruesa Zarandeada (25%)		
	Fibra Acrílica de 8 mm	1.00%	12.50 (gr)
Peso Por Briqueta			1262.50 gramos

BRIQUETA		N°	8A	8B	8C	8D	8E
1	PESO ESPECIFICO DE LA PIEDRA CHANCADA DE 3/4" - BULK		2.65	2.65	2.65	2.65	2.65
2	PESO ESPECIFICO DE LA ARENA GRUESA CHANCADA - BULK		2.63	2.63	2.63	2.63	2.63
3	PESO ESPECIFICO DE LA ARENA NATURAL ZARANDEADA - BULK		2.62	2.62	2.62	2.62	2.62
4	PESO ESPECIFICO APARENTE DE LA FIBRA		1.17	1.17	1.17	1.17	1.17
5	PESO ESPECIFICO APARENTE DEL CEMENTO ASFALTICO		1.018	1.018	1.018	1.018	1.018
6	FIBRA ACRÍLICA EN PESO DE LA MEZCLA	%	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
7	C.A. EN PESO DE LA MEZCLA	%	5.45	5.45	5.45	5.45	5.45
8	ARENA GRUESA CHANCADA EN PESO DE LA MEZCLA	%	37.43	37.43	37.43	37.43	37.43
9	ARENA NATURAL ZARANDEADA EN PESO DE LA MEZCLA	%	23.39	23.39	23.39	23.39	23.39
10	PIEDRA CHANCADA DE 3/4" EN PESO DE LA MEZCLA	%	32.75	32.75	32.75	32.75	32.75
11	TOTAL DE MEZCLA	%	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
12	PESO ESPECIFICO TEÓRICO MÁXIMO		2.434	2.434	2.434	2.434	2.434
13	PESO ESPECIFICO BULK DE LA COMBINACIÓN DE AGREGADOS		2.63	2.63	2.63	2.63	2.63
14	PESO DE LA BRIQUETA AL AIRE	gr	1264.5	1267.2	1265.3	1266.4	1263.6
15	PESO DE LA BRIQUETA EN EL AIRE (CONDICIÓN SSS)	gr	1267.0	1270.0	1268.0	1269.0	1267.0
16	PESO DE LA BRIQUETA EN EL AGUA	gr	731.0	736.0	733.0	735.0	726.0
17	Agua absorbida	%	0.5	0.5	0.5	0.5	0.6
18	VOLUMEN DE LA BRIQUETA	c.c.	536	534	535	534	541
19	PESO ESPECIFICO BULK DE LA BRIQUETA	gr/c.c.	2.359	2.373	2.365	2.372	2.336
20	VACÍOS TOTALES EN LA MEZCLA(VTM)	%	3.10	2.52	2.85	2.56	4.04
21	VACÍOS EN AGREGADO MINERAL (V.M.A.)	%	16.22	15.72	16.01	15.76	17.04
22	ASFALTO ABSORBIDO POR EL AGREGADO TOTAL (VFA)	%	80.91	83.97	82.20	83.74	76.28
23	ESTABILIDAD SIN CORREGIR	Lb	2310.0	2280.0	2230.0	2050.0	2260.0
24	FACTOR DE ESTABILIDAD	K	0.93	0.96	0.96	0.96	0.93
25	ESTABILIDAD CORREGIDA	Lb	2150	2190	2140	1970	2100
26	ESTABILIDAD CORREGIDA - PROMEDIO	Lb	2110				
27	Peso Unitario	gr/c.c.	2.352	2.366	2.358	2.365	2.329
28	Peso Unitario - Promedio	gr/c.c.	2.354				
29	FLUJO	mm	2.5	2.25	2.5	2.75	2.5
30	FLUJO - PROMEDIO	mm	2.50				
31	VACÍOS TOTALES EN LA MEZCLA(VTM) - PROMEDIO	%	3.01				
32	VMA - PROMEDIO	%	16.15				
33	VFA - PROMEDIO	%	81.42				
34	coeficiente de variación para la estabilidad		4.01				
35	coeficiente de variación para el flujo		7.07				

LABORATORIO DE AGREGADOS, SUELOS, ASFALTO Y CONCRETO

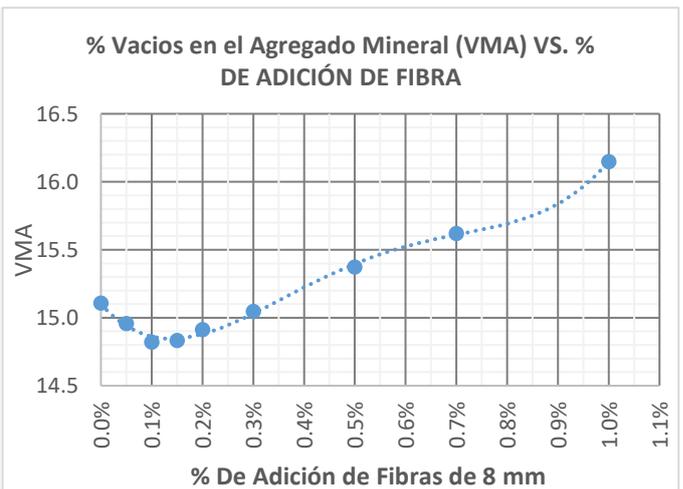
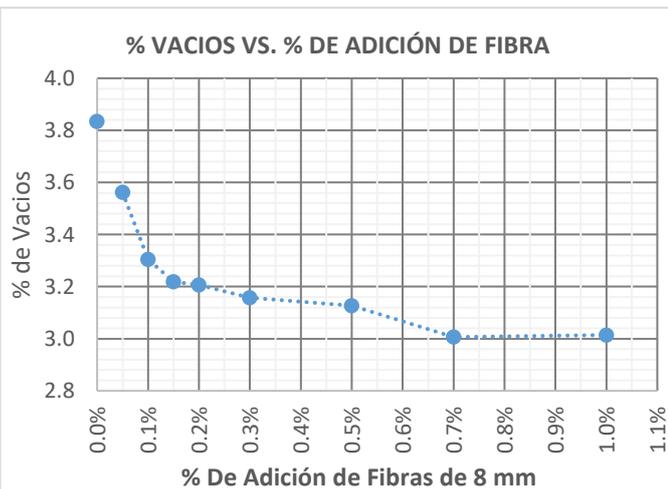
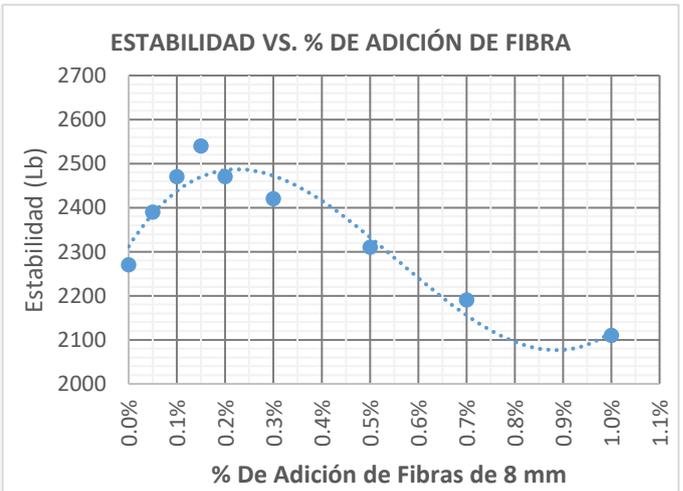
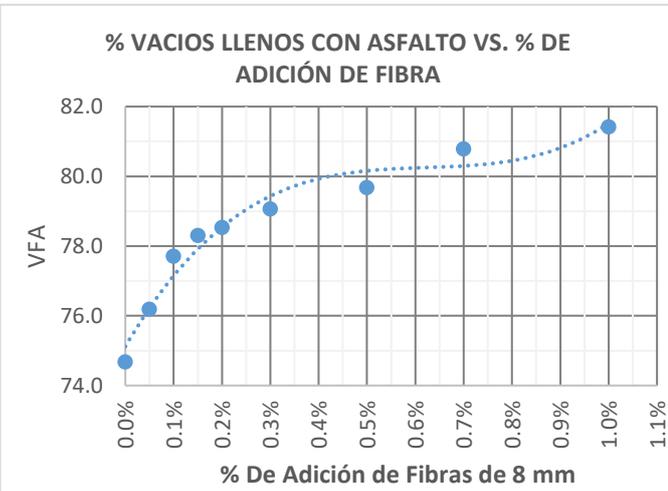
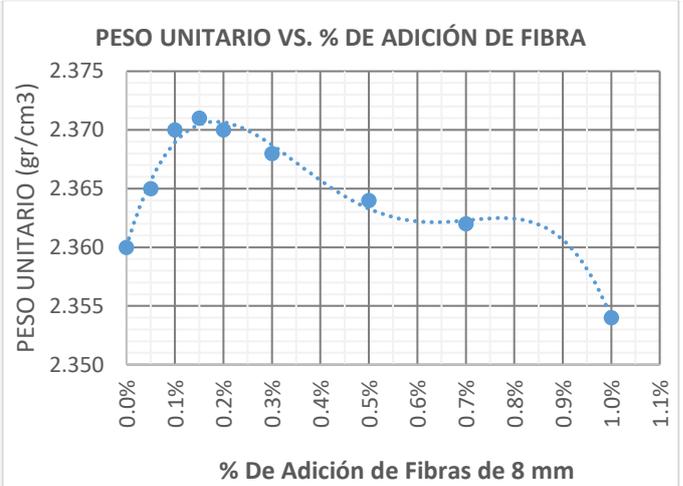
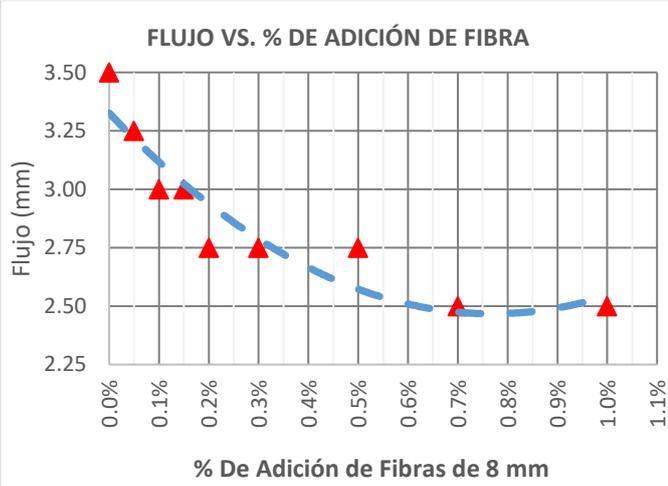
ENSAYO MARSHALL ASTM D – 6926 y 6927

Laboratorio Mecánica De Suelos Concretos Y Pavimentos

MATERIAL	: Mezcla Asfáltica Modificada-Tipo C – Tesis De Titulación	Hoja 9/9
TESISTA	: Bach. DANILO GUTARRA LARA.	
REVISADO POR	: ING. MILLER RODRIGUEZ	
FECHA DE ENSAYO	: 09/04/2018	FECHA DE EMISIÓN: 10/04/2018

TIPO DE MEZCLA: MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA CON FIBRAS ACRÍLICAS DE 8 mm – TIPO C.

RESUMEN DE RESULTADOS

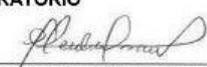


Anexo G: Cemento asfáltico



REPORTE DE ANÁLISIS DE CEMENTO ASFALTICO

LOTE No. 85/100-001-03-2018

REFINERÍA LA PAMPILLA Carretera a Ventanilla km 25 S/N Ventanilla, Lima – Perú	RECEPCIÓN DE LA MUESTRA 05/03/2018 10:35:27 a.m.	FECHA DE CERTIFICACIÓN 06/03/2018 08:43:28 p.m.
PRODUCTO Cemento Asfáltico 85/100	TANQUE 331A	DESTINO DEL PRODUCTO Operaciones de Despacho
PROCEDENCIA Almacenamiento.	VOLUMEN CERTIFICADO , m³ 2000	BUQUE TANQUE
PROPIEDADES	MÉTODOS	RESULTADOS
	ASTM/OTROS	
PENETRACIÓN		
Penetración a 25°C, 100 g, 5 s, 1/10 mm	D 5 / AASHTO T 49	87
DUCTILIDAD		
Ductilidad a 25°C, 5 cm/min, cm	D 113 / AASHTO T 51	>105
VOLATILIDAD		
Gravedad Específica a 15.6 °C/15.6°C	D 70 / AASHTO T 228	1.0175
Punto de Inflamación, °C	D 92 / AASHTO T 48	300.0
Gravedad API	D 70 / AASHTO T 228	7.6
FLUIDEZ		
Punto de Ablandamiento, °C	D 36	47.0
Viscosidad cinemática a 100 °C, cSt	D 445	2729
Viscosidad cinemática a 135 °C, cSt	D 2170 / AASHTO T 201	341
ENSAYO DE PELÍCULA FINA		
Pérdida por Calentamiento, %m	D 1754 / AASHTO T 179	0.17
Penetración retenida, 100g, 5s, 1/10 mm, % del original	D 5 / AASHTO T 49	57.5
Ductilidad del residuo a 25°C, 5 cm/min, cm	D 113 / AASHTO T 51	107.1
SOLUBILIDAD		
Solubilidad en tricloroetileno, % m	D 2042 / AASHTO T 44	99.50
OTROS		
Índice de Penetración	UNE 104-281 / 1-5	-0.6
Spot Test (Nafta-Xileno)	AASHTO T102	20% xileno, negativo
OBSERVACIONES:		
Producto cumple con las especificaciones ASTM D946, AASHTO M 20-70 y NTP 321.051.2014		
DISTRIBUCIÓN : Original : Operaciones de despacho Copia 1: Movimiento de Productos Copia 2: Laboratorio	FECHA DE EMISIÓN 06/032018	LABORATORIO  Cecilia Posadas Jhong Jefe de Laboratorio

PROHIBIDA SU REPRODUCCION PARCIAL

Anexo H:

Fibras acrílicas

DESCRIPCIÓN

Drymix RC4020 es una fibra acrílica de alta tenacidad, que ha sido diseñada especialmente para evitar la fisuración por retracción plástica y evitar el deterioro prematuro del concreto o mortero. Drymix RC4020, se distribuye de manera homogénea en la mezcla, asimismo, su sección transversal (en forma de hueso) le permite a la fibra tener un mejor anclaje mecánico con la pasta de cemento.

CAMPOS DE APLICACIÓN

- Losas de concreto (pavimentos, placas, techos)
- Paneles de fachada
- Mortero y concreto proyectado (shotcrete)
- Elementos prefabricados
- Revestimiento de canales de regadío y/o sistema
- Morteros de reparación e impermeabilización

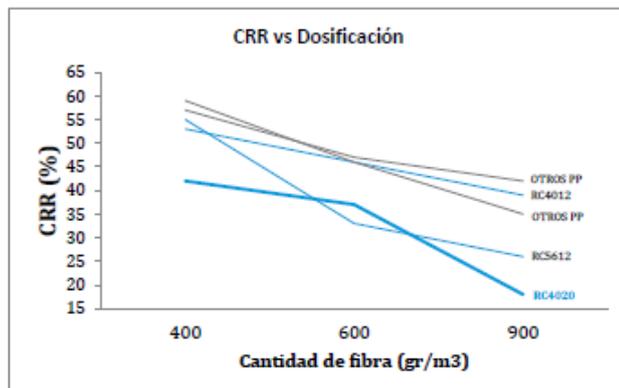
VENTAJAS

- Acción del tipo físico que no afecta la hidratación de las partículas de cemento
- Reduce la fisuración por retracción plástica e impide su propagación
- Aumenta la impermeabilidad
- Incrementa considerablemente los índices de tenacidad del concreto o mortero
- Mejora la resistencia al impacto y a la abrasión
- Resistente a los medios ácidos o alcalinos, radiación UV y bacterias
- Recomendado en producción de concretos/morteros para túneles ferroviarios o viales, reduciendo el efecto del spalling

DATOS TÉCNICOS

ASPECTO	Filamentos	RESISTENCIA A LA TRACCIÓN	468MPa/67KSI
COLOR	Blanco Brillante	LONGITUD DE CORTE	20, 12 y 8 mm
SECCIÓN TRANSVERSAL	Forma de Hueso	ESPESOR DE FIBRA	15 µm
RESISTENCIA AL ALCALIS	Buena	TRANSICIÓN VITREA	185 °C
DENSIDAD	1.17 gr/cm ³	PUNTO DE CARBONIZACIÓN	330 °C
ABSORCIÓN	< 2%	N° FIBRAS	125 K fibras/gr

CRR



CRR, índice que mide la ruptura; el grado en que la fibra elimina la fisuración del concreto. A menor índice mejor performance.

- RC4020 a 400 gr: CRR 42%
- RC4020 a 600 gr: CRR 37%
- RC4020 a 900 gr: CRR 18%

PÉRDIDA DE SLUMP (Pulgadas)

Productos @Dosificaciones	Minutos		
	0	30	60
RC4012 @600gr	2 ¼	2	1 ¾
Otros PP @600gr	3	2 ¼	2
Otros PP @600gr	2 ¾	2 ¼	2
RCS612 @600gr	3	2 ¼	2
RC4020 @600gr	2 ¾	2 ¼	2
RC4020 @400gr	3	2 ¼	2
RC4012 @400gr	3 ¼	3	2 ¾
RCS612 @400gr	3 ¼	2 ¾	2 ¾

PRESENTACIÓN Y MODO DE EMPLEO

- Caja x 8 bolsas hidrosolubles de 600 y 400 gr. de Drymix RC4020
- Fibra a granel en fardos de 220 Kg. aprox. y sacas de 110 Kg. aprox.
- Se emplea 1 (una) bolsa por cada 1 (un) m³ de concreto

PRECAUCIONES

Drymix RC4020 sustituye a la malla secundaria (de temperatura). La adición de Drymix RC4020 no evita las grietas derivadas de un mal dimensionamiento estructural, aunque ayuda a controlarlo. No evita las grietas producto de un deficiente curado.

INSTRUCCIONES DE SEGURIDAD

No es un producto peligroso ni tóxico, para mayor detalle ver MSDS del producto.

Drymix RC4020 cumple con las siguientes normas de estandarización internacional:

- ASTM C 94/C 94M Standar Specification for Ready-Mixed Concrete
- ASTM C 1116/C 1116M Standar Specification for Fiber-Reinforced Concrete
- ASTM C 1579 Standard Test Method for Evaluating Plastic Shrinkage Cracking of Restrained Fiber Reinforced Concrete (Using a Steel Form Insert)
- ACI 544.1R-96 Report on Fiber Reinforced Concrete

CERTIFICADO DE CALIDAD

PARTIDA: 7E001	4,1 dTex	20 mm Tipo 64	Brillante	Drymix
DIAMETRO PROMEDIO		μm		20.6
RESISTENCIA A LA TRACCION		MPa		446
ALARGAMIENTO A LA ROTURA		%		27.72
MODULO DE ELASTICIDAD		MPa		14,924
LONGITUD PROMEDIO		mm		21.94
HUMEDAD PROMEDIO		%		1.33

CERTIFICADO DE CALIDAD

PARTIDA: 7E001	4,1 dTex	12 mm Tipo 64	Brillante	Drymix
DIAMETRO PROMEDIO		μm		20.6
RESISTENCIA A LA TRACCION		MPa		446
ALARGAMIENTO A LA ROTURA		%		27.72
MODULO DE ELASTICIDAD		MPa		14,924
LONGITUD PROMEDIO		mm		13.84
HUMEDAD PROMEDIO		%		1.33

CERTIFICADO DE CALIDAD

PARTIDA: 7E001	4,1 dTex	8mm Tipo 64	Brillante	Drymix
DIAMETRO PROMEDIO		μm		20.6
RESISTENCIA A LA TRACCION		MPa		446
ALARGAMIENTO A LA ROTURA		%		27.72
MODULO DE ELASTICIDAD		MPa		14,924
LONGITUD PROMEDIO		mm		9.56
HUMEDAD PROMEDIO		%		1.31

NOTA: Los valores indicados son los promedios registrados durante la producción de la Partida.

Valores individuales pueden diferir de los indicados arriba, pero estarán siempre dentro de las especificaciones de Sudamericana de Fibras S.A.

Ing. Alessandro Coelho
Aseg. de Calidad

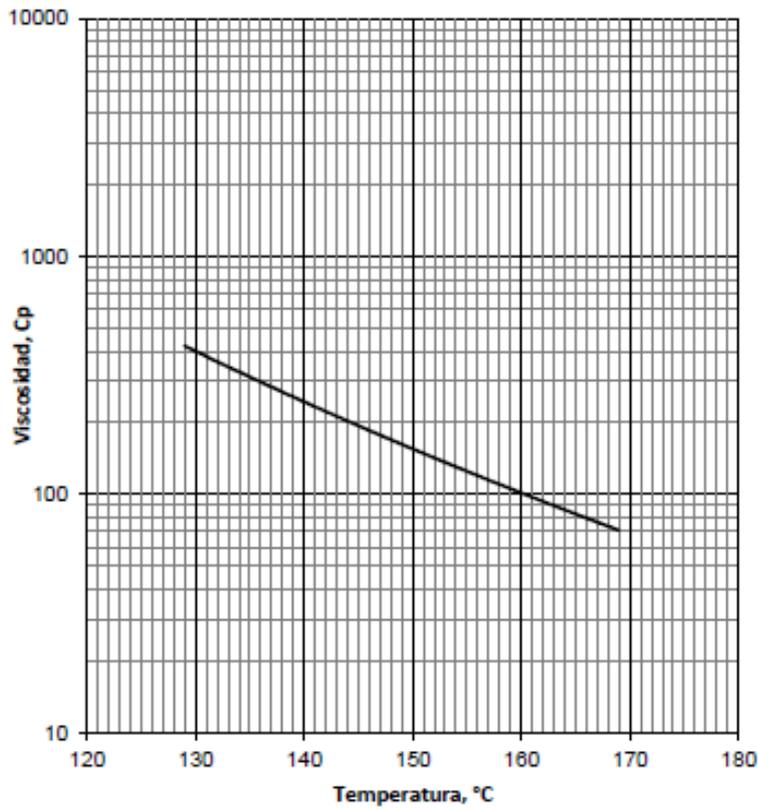
Anexo I: Reporte de viscosidades

GRAFICO DE TEMPERATURAS DE MEZCLA Y COMPACTACION

PRODUCTO: PEN 85/100

INFORME DE ENSAYO N° 079-2018

FECHA: 27/08/2018



RANGO DE TEMPERATURA DE MEZCLA

RANGO DE TEMPERATURA DE COMPACTACIÓN DE MEZCLA

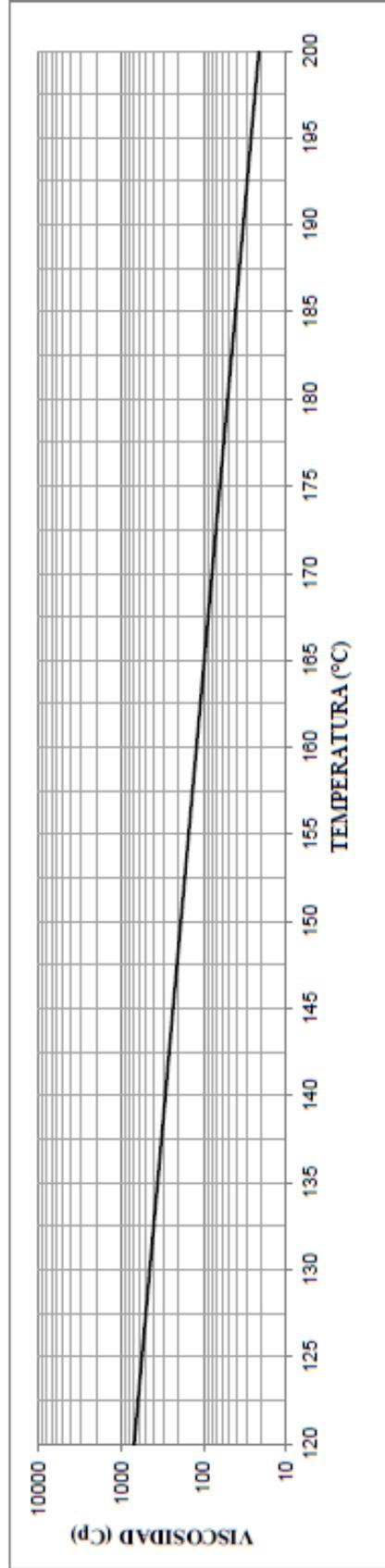
145.1	A	151.1
135.1	A	140.1

RANGO DE TEMPERATURA DE MEZCLA CON VISCOSIDADES ENTRE 150 A 190 cP

RANGO DE TEMPERATURA DE COMPACTACIÓN MEZCLA CON VISCOSIDADES ENTRE 250 A 310 cP

GRÁFICO DE TEMPERATURAS DE MEZCLA Y COMPACTACIÓN

PRODUCTO: ---- INFORME DE ENSAYO N° 080-2018- PEN 85/100 (0.15% Fibra Acríl. 20mm) FECHA: 27/08/2018



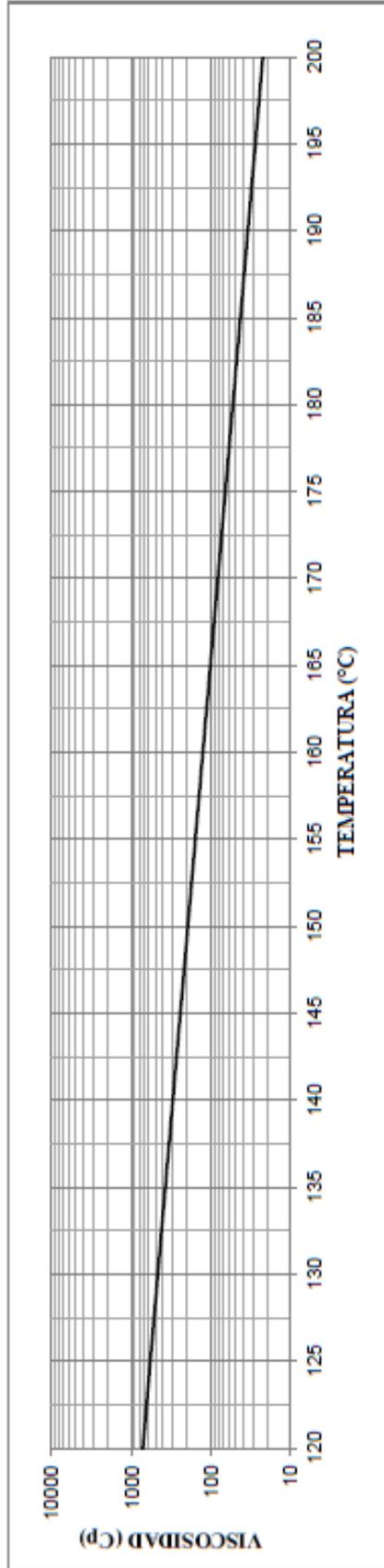
RANGO DE TEMPERATURA DE MEZCLA
RANGO DE TEMPERATURA DE COMPACTACIÓN DE MEZCLA

149.0	A	154.0
139.0	A	143.0

RANGO DE TEMPERATURA DE MEZCLA CON VISCOSIDADES ENTRE 150 A 180 cP
RANGO DE TEMPERATURA DE COMPACTACIÓN MEZCLA CON VISCOSIDADES ENTRE 250 A 310 cP

GRÁFICO DE TEMPERATURAS DE MEZCLA Y COMPACTACIÓN

PRODUCTO: ---- INFORME DE ENSAYO N° 081-2018- PEN 85/100 (0.20% Fibra Acril. 12mm) FECHA: 27/08/2018



RANGO DE TEMPERATURA DE MEZCLA

RANGO DE TEMPERATURA DE COMPACTACIÓN DE MEZCLA

149.3	A	154.5
139.3	A	143.5

RANGO DE TEMPERATURA DE MEZCLA CON VISCOSIDADES ENTRE 150 A 190 cP

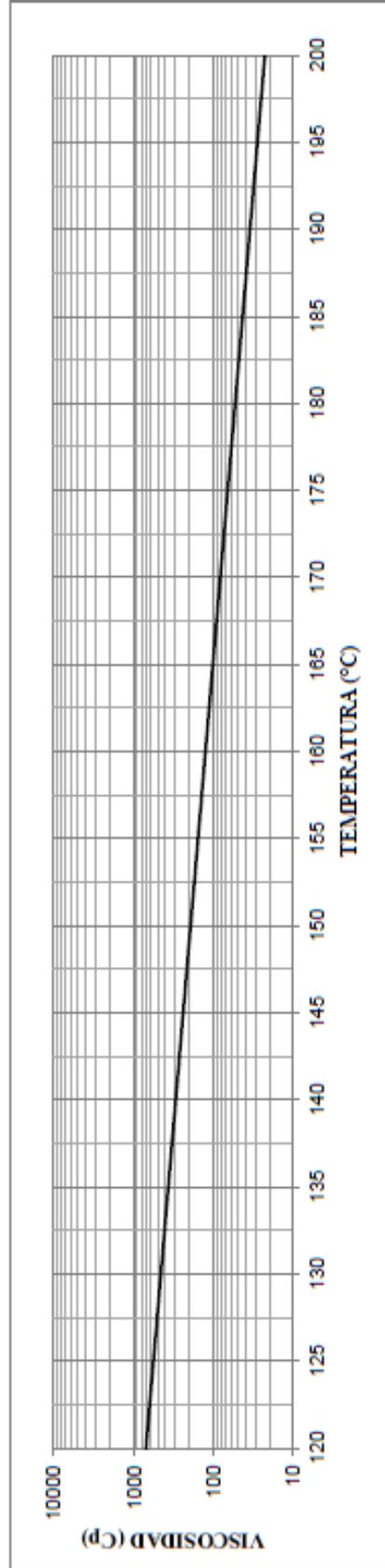
RANGO DE TEMPERATURA DE COMPACTACIÓN MEZCLA CON VISCOSIDADES ENTRE 250 A 310 cP

GRÁFICO DE TEMPERATURAS DE MEZCLA Y COMPACTACIÓN

PRODUCTO: ----

INFORME DE ENSAYO N° 082-2018- PEN 85/100 (0.15% Fibra Acríl. 8mm)

FECHA: 27/08/2018



RANGO DE TEMPERATURA DE MEZCLA

RANGO DE TEMPERATURA DE COMPACTACIÓN DE MEZCLA

148.9	A	154.2
138.9	A	143.2

RANGO DE TEMPERATURA DE MEZCLA CON VISCOSIDADES ENTRE 150 A 190 cP

RANGO DE TEMPERATURA DE COMPACTACIÓN MEZCLA CON VISCOSIDADES ENTRE 250 A 310 cP

**Anexo J:
Panel
fotográfico**



FOTO N° 1. REALIZACIÓN DEL ENSAYO DE ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO PARA LA ARENA CHANCADA (PREVIO CUARTEO SEGÚN NORMA MTC E 105).



FOTO N° 3. MEZCLADO Y CONTROL DE TEMPERATURA PARA C.A. AL 5.0% - PREDISEÑO MAC 2.



FOTO N° 2. DETERMINACIÓN DE PESOS PARA CADA FRACCIÓN LUEGO DEL CRIBADO- PIEDRA CHANCADA.



FOTO N° 4. CONTROL DE TEMPERATURA PARA COMPACTADO C.A. AL 4.5% - PREDISEÑO MAC 2.



FOTO N° 5. CHUSEADO DE BRIQUETAS ANTES DEL COMPACTADO-PREDISEÑO MAC 2.



FOTO N° 6. COMPACTADO DE ESPECÍMENES-PREDISEÑO MAC 2.



FOTO N° 7. ESPECÍMENES COMPACTADOS - PREDISEÑO MAC 2. (DETERMINACIÓN DE OPTIMO PORCENTAJE DE ASFALTO)



FOTO N° 8. MEDICIÓN DE ESPESORES CON CINTA MÉTRICA.



FOTO N° 9. GRAVEDAD ESPECIFICA BULK (PESO SECO) PARA ESPECÍMENES MAC 02 - PREDISEÑO.



FOTO N° 10. GRAVEDAD ESPECIFICA BULK (PESO SUMERGIDO) PARA ESPECÍMENES MAC 02 - PRE-DISEÑO.



FOTO N° 12. CONTROL DE TEMPERATURA PARA INMERSIÓN DE ESPECÍMENES EN BAÑO CON AGUA A 60°C.

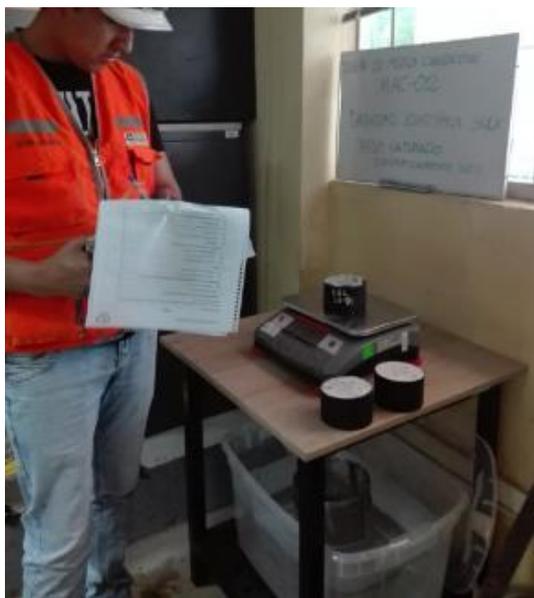


FOTO N° 11. GRAVEDAD ESPECIFICA BULK (PESO SSS) PARA ESPECÍMENES MAC 02 - PRE-DISEÑO.



FOTO N° 13. ESPECÍMENES CON ADICIÓN DE FIBRA ACRÍLICA DE 20mm.



FOTO N° 14. DISEÑO DE MEZCLA CONVENCIONAL MAC-02 AL 4.5%



FOTO N° 17. PESAJE DE FIBRAS DE 12mm.



FOTO N° 15. DISEÑO DE MEZCLA CONVENCIONAL MAC-02 AL 5.5%



FOTO N° 18. PESAJE DE FIBRAS DE 8mm.



FOTO N° 16. PREPARACIÓN DE AGREGADOS PARA VIGAS.



FOTO N° 19. PESAJE DE FIBRAS DE 20mm.



FOTO N° 20. MEZCLADO DE ASFALTO, AGREGADO Y FIBRAS.



FOTO N° 21. MEDICIÓN DE TEMPERATURA DE LA MEZCLA.



FOTO N° 22. AMASADO FINAL DE MEZCLA.



FOTO N° 23. CHUSEADO DE MEZCLA EN VIGA.



FOTO N° 24. COMPACTADO DE VIGA CON CARGA UNIFORMEMENTE DISTRIBUIDA, MEDIANTE UNA PLACA DE 10mm DE ESPESOR.



FOTO N° 25. VIGAS DE ASFALTO DESENCOFRADAS.



FOTO N° 26. ENSAYO DE RESISTENCIA A FLEXIÓN CON CARGAS EN LOS TERCIOS DE TRAMO CENTRAL.



FOTO N° 27. FLEXIÓN DE VIGA PATRÓN Y VALOR DE CARGA MÁXIMA APLICADA.



FOTO N° 28. FLEXIÓN DE VIGA CON ADICIÓN DE FIBRA DE 20 mm. Y CARGA MÁXIMA APLICADA.



FOTO N° 29. FLEXIÓN DE VIGA CON ADICIÓN DE FIBRA DE 8 mm. Y CARGA MÁXIMA APLICADA.



FOTO N° 30. FLEXIÓN DE VIGA CON ADICIÓN DE FIBRA DE 12mm. Y CARGA APLICADA.