



UNIVERSIDAD JOSÉ CARLOS MARIÁTEGUI

VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y
ARQUITECTURA**

CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL

TESIS

**INFLUENCIA DEL ÍNDICE DE PLASTICIDAD DEL
FILLER EN LA ESTABILIDAD Y FLUJO DE
MEZCLAS ASFÁLTICAS EN FRÍO
EN MOQUEGUA, 2019**

PRESENTADA POR

BACHILLER FABIÁN FARFÁN MAMANI COA

ASESOR:

ING. EMERSHON ESCOBEDO CABRERA

PARA OPTAR TÍTULO PROFESIONAL DE

INGENIERO CIVIL

MOQUEGUA - PERÚ

2019

CONTENIDO

	Pág.
Página de jurado.....	i
Dedicatoria.....	ii
Agradecimientos.....	iii
CONTENIDO.....	iv
CONTENIDO DE TABLAS.....	viii
CONTENIDO DE FIGURAS.....	xvii
CONTENIDO DE ECUACIONES.....	xxii
CONTENIDO DE APÉNDICES.....	xxiv
RESUMEN.....	xxv
ABSTRACT.....	xxvi
INTRODUCCIÓN.....	xxvii

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 Descripción de la realidad del problema.....	1
1.2 Definición del problema.....	2
1.2.1 Problema general.....	2
1.2.2 Problemas específicos.....	2
1.3 Objetivos de investigación.....	3
1.3.1 Objetivo general.....	3
1.3.2 Objetivos específicos.....	3

1.4	Justificación	3
1.4.1	Teórica	3
1.4.2	Social	4
1.5	Alcances y limitaciones	4
1.5.1	Alcances.....	4
1.5.2	Limitaciones	4
1.6	Variables	5
1.6.1	Operacionalización de variables.....	6
1.7	Hipótesis de la investigación	8
1.7.1	Hipótesis general	8
1.7.2	Hipótesis específicas.....	8

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1	Antecedentes de la investigación.....	9
2.2	Bases teóricas	11
2.2.1	Definición de mezcla asfáltica.....	11
2.2.2	Clasificación de las mezclas asfálticas	11
2.2.3	Características de las mezclas asfálticas.....	14
2.2.4	Propiedades de las mezclas asfálticas.....	15
2.2.5	Materiales pétreos.....	17
2.2.6	Relleno mineral o filler.....	20
2.2.7	Índice de plasticidad	21
2.2.8	Método Marshall para diseño de mezcla asfáltica.....	23
2.2.9	Estabilidad y flujo de mezclas asfálticas	24

2.3	Definición de términos	25
-----	------------------------------	----

CAPÍTULO III

MÉTODO

3.1	Tipo de investigación.....	28
3.2	Diseño de la investigación.....	28
3.3	Población y muestra.....	29
3.3.1	Población.	29
3.3.2	Muestra.	29
3.4	Descripción de instrumentos para recolección de datos.....	29
3.4.1	Búsqueda y recolección de la información.....	29
3.4.2	Experimentación.....	30

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

4.1	Presentación de resultados.....	32
4.1.1	Descripción de agregados y asfalto utilizados.....	32
4.1.2	Ensayos de laboratorio para control de calidad de los agregados	33
4.1.3	Dosificación de agregados y asfalto	86
4.1.4	Diseños de mezcla asfáltica aplicando el método Marshall.	106
4.2	Contrastación de hipótesis	152
4.2.1	Hipótesis general.	152
4.2.2	Hipótesis específicas.....	156
4.3	Discusión de resultados	160

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones.....	163
5.2 Recomendaciones	166
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	168
APÉNDICES.....	170
MATRIZ DE CONSISTENCIA	273
INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS.....	274

CONTENIDO DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Operacionalización de la variable (X)	6
Tabla 2. Operacionalización de la variable (Y)	7
Tabla 3. Requerimientos para los agregados gruesos	19
Tabla 4. Requerimientos para los agregados finos.....	20
Tabla 5. Requisitos para mezcla asfáltica diseñada con el método Marshall	25
Tabla 6. Límite líquido y plástico de arena cantera Anita II malla N° 40	35
Tabla 7. Límite líquido y plástico de arena cantera Anita II malla N° 200	35
Tabla 8. Límite líquido y plástico de arena para asfalto cantera El Chasqui Soy malla N° 40.....	36
Tabla 9. Límite líquido y plástico de arena para asfalto cantera El Chasqui Soy malla N° 200.....	36
Tabla 10. Límite líquido y plástico de arena cantera Las Congas malla N° 40....	37
Tabla 11. Límite líquido y plástico de arena cantera Las Congas malla N° 200..	37
Tabla 12. Análisis granulométrico de piedra chancada tamaño máximo 3/4"	39
Tabla 13. Análisis granulométrico de piedra chancada tamaño máximo 3/8"	40
Tabla 14. Análisis granulométrico de agregado fino (arena para asfalto)	42
Tabla 15. Análisis granulométrico del filler	44
Tabla 16. Contenido de humedad de la piedra chancada de 3/4"	46
Tabla 17. Contenido de humedad de la piedra chancada de 3/8"	46
Tabla 18. Contenido de humedad del agregado grueso	47
Tabla 19. Contenido de humedad del filler	48
Tabla 20. Peso unitario suelto de piedra chancada de 3/4"	49

Tabla 21. Peso unitario compactado de piedra chancada de 3/4"	50
Tabla 22. Peso unitario compactado de piedra chancada de 3/8"	50
Tabla 23. Peso unitario suelto de arena para asfalto	51
Tabla 24. Peso unitario suelto del filler	52
Tabla 25. Cantidades mínimas de muestra en ensayo de durabilidad a. grueso...	53
Tabla 26. Ensayo de durabilidad (al sulfato de magnesio) agregado grueso.....	53
Tabla 27. Cantidades mínimas de muestra en ensayo de durabilidad a. fino.....	55
Tabla 28. Ensayo de durabilidad (al sulfato de magnesio) agregado fino	56
Tabla 29. Gradación de las muestras de ensayo.....	57
Tabla 30. Número de esferas por gradación.....	58
Tabla 31. Desgaste del agregado grueso por abrasión	58
Tabla 32. Resultados de ensayo de partículas chatas	60
Tabla 33. Resultados de ensayo de partículas alargadas.....	62
Tabla 34. Resultados de porcentaje de agregado con una cara fracturada.....	63
Tabla 35. Resultados de porcentaje de agregado con dos caras fracturadas.....	65
Tabla 36. Resultados de ensayo de equivalente de arena.....	66
Tabla 37. Fracciones de tamaño individual para método "A"	68
Tabla 38. Resultado del ensayo de angularidad del agregado fino	68
Tabla 39. Resultados del ensayo de límite líquido (malla N° 200).....	72
Tabla 40. Resultados del ensayo de sales solubles en agregado fino.....	75
Tabla 41. Resultados del ensayo de peso específico y absorción del agregado grueso (piedra chancada 3/4")	78
Tabla 42. Resultados del ensayo de peso específico y absorción del agregado grueso (piedra chancada o gravilla de 3/8")	80

Tabla 43. Resultados del ensayo de peso específico y absorción de la arena.....	82
Tabla 44. Resultados del ensayo de peso específico y absorción del filler.....	84
Tabla 45. Resultados de ensayos requeridos para el agregado grueso.....	85
Tabla 46. Resultados de ensayos requeridos para el agregado fino.....	86
Tabla 47. Combinación de agregados, diseño de mezcla asfáltica con filler 6 % de índice de plasticidad.....	88
Tabla 48. Especificación ASTM D 3515 para mezclas densas, gradación D-4....	90
Tabla 49. Combinación de agregados, diseño de mezcla asfáltica con filler 3 % de índice de plasticidad.....	91
Tabla 50. Combinación de agregados, diseño de mezcla asfáltica con filler 12 % de Índice de plasticidad	93
Tabla 51. Resultados de la determinación del contenido mínimo de asfalto por el método del índice asfáltico	96
Tabla 52. Resumen de proporciones de agregados sin asfalto líquido	97
Tabla 53. Proporciones de agregados incluyendo asfalto líquido, diseño de mezcla con filler 3 % de índice de plasticidad	98
Tabla 54. Proporciones de agregados incluyendo asfalto líquido, diseño de mezcla con filler 6 % de índice de plasticidad	98
Tabla 55. Proporciones de agregados incluyendo asfalto líquido, diseño de mezcla con filler 12 % de índice de plasticidad	99
Tabla 56. Cantidad de agregados y asfalto líquido en peso para cada espécimen, diseño de mezcla con filler 3 % de índice de plasticidad	100
Tabla 57. Cantidad de agregados y asfalto líquido en peso para cada espécimen, diseño de mezcla con filler 6 % de índice de plasticidad	100

Tabla 58. Cantidad de agregados y asfalto líquido en peso para cada espécimen, diseño de mezcla con filler 12 % de índice de plasticidad	101
Tabla 59. Resultados del ensayo de límite líquido (malla N° 200), combinación de agregados para diseño de mezcla con filler 3 % de índice de plasticidad.....	102
Tabla 60. Resultados del ensayo de límite plástico (malla N° 200), combinación de agregados para diseño de mezcla con filler 3 % de índice de plasticidad.....	102
Tabla 61. Índice de plasticidad de combinación de agregados para diseño de mezcla con filler 3 % índice de plasticidad	103
Tabla 62. Resultados del ensayo de límite líquido (malla N° 200), combinación de agregados para diseño de mezcla con filler 6 % de índice de plasticidad.....	103
Tabla 63. Resultados del ensayo de límite plástico (malla N° 200), combinación de agregados para diseño de mezcla con filler 6 % de índice de plasticidad.....	104
Tabla 64. Índice de plasticidad de combinación de agregados para diseño de mezcla con filler 6 % índice de plasticidad	104
Tabla 65. Resultados del ensayo de límite líquido (malla N° 200), combinación de agregados para diseño de mezcla con filler 12 % de índice de plasticidad.....	104
Tabla 66. Resultados del ensayo de límite plástico (malla N° 200), combinación de agregados para diseño de mezcla con filler 12 % de índice de plasticidad.....	105

Tabla 67. Índice de plasticidad de combinación de agregados para diseño de mezcla con filler 12 % índice de plasticidad	105
Tabla 68. Relación y codificación de especímenes para diseño de mezcla con filler 3 % de índice de plasticidad	107
Tabla 69. Relación y codificación de especímenes para diseño de mezcla con filler 6 % de índice de plasticidad	108
Tabla 70. Relación y codificación de especímenes para diseño de mezcla con filler 12 % de índice de plasticidad	108
Tabla 71. Volumen de especímenes del diseño de mezcla con filler 3 % de índice de plasticidad	112
Tabla 72. Volumen de especímenes del diseño de mezcla con filler 6 % de índice de plasticidad	112
Tabla 73. Volumen de especímenes del diseño de mezcla con filler 12 % de índice de plasticidad	113
Tabla 74. Peso específico bulk de especímenes del diseño de mezcla con filler 3 % de índice de plasticidad	114
Tabla 75. Peso específico bulk de especímenes del diseño de mezcla con filler 6 % de índice de plasticidad	115
Tabla 76. Peso específico bulk de especímenes del diseño de mezcla con filler 12 % de índice de plasticidad	116
Tabla 77. Peso específico Rice de especímenes del diseño de mezcla con filler 3 % de índice de plasticidad	119
Tabla 78. Peso específico Rice de especímenes del diseño de mezcla con filler 6 % de índice de plasticidad	119

Tabla 79. Peso específico Rice de especímenes del diseño de mezcla con filler 12 % de índice de plasticidad	120
Tabla 80. Vacíos en la mezcla compactada (VTM) del diseño de mezcla con filler 3 % de índice de plasticidad	121
Tabla 81. Vacíos en la mezcla compactada (VTM) del diseño de mezcla con filler 6 % de índice de plasticidad	121
Tabla 82. Vacíos en la mezcla compactada (VTM) del diseño de mezcla con filler 12 % de índice de plasticidad	122
Tabla 83. Peso específico bulk del agregado total del diseño de mezcla con filler 3 % de índice de plasticidad	123
Tabla 84. Peso específico bulk del agregado total del diseño de mezcla con filler 6 % de índice de plasticidad	124
Tabla 85. Peso específico bulk del agregado total del diseño de mezcla con filler 12 % de índice de plasticidad	124
Tabla 86. Vacíos en el agregado mineral (VMA) del diseño de mezcla con filler 3 % de índice de plasticidad	125
Tabla 87. Vacíos en el agregado mineral (VMA) del diseño de mezcla con filler 6 % de índice de plasticidad	126
Tabla 88. Vacíos en el agregado mineral (VMA) del diseño de mezcla con filler 12 % de índice de plasticidad	126
Tabla 89. Vacíos llenos de asfalto (VFA) del diseño de mezcla con filler 3 % de índice de plasticidad.....	127
Tabla 90. Vacíos llenos de asfalto (VFA) del diseño de mezcla con filler 6 % de índice de plasticidad.....	128

Tabla 91. Vacíos llenos de asfalto (VFA) del diseño de mezcla con filler 12 % de índice de plasticidad.....	128
Tabla 92. Resultados de ensayo estabilidad Marshall de especímenes del diseño de mezcla con filler 3 % de índice de plasticidad.....	130
Tabla 93. Resultados de ensayo estabilidad Marshall de especímenes del diseño de mezcla con filler 6 % de índice de plasticidad.....	131
Tabla 94. Resultados de ensayo estabilidad Marshall de especímenes del diseño de mezcla con filler 12 % de índice de plasticidad.....	132
Tabla 95. Factores de estabilidad de correlación	133
Tabla 96. Estabilidades corregidas de especímenes del diseño de mezcla con filler 3 % de índice de plasticidad	134
Tabla 97. Estabilidades corregidas de especímenes del diseño de mezcla con filler 6 % de índice de plasticidad	135
Tabla 98. Estabilidades corregidas de especímenes del diseño de mezcla con filler 12 % de índice de plasticidad	135
Tabla 99. Resultados de flujo Marshall en especímenes del diseño de mezcla con filler 3 % de índice de plasticidad.....	136
Tabla 100. Resultados de flujo Marshall en especímenes del diseño de mezcla con filler 6 % de índice de plasticidad.....	136
Tabla 101. Resultados de flujo Marshall en especímenes del diseño de mezcla con filler 12 % de índice de plasticidad.....	137
Tabla 102. Promedios de resultados de especímenes del diseño de mezcla con filler 3 % de índice de plasticidad para gráficos Marshall	137

Tabla 103. Promedios de resultados de especímenes del diseño de mezcla con filler 6 % de índice de plasticidad para gráficos Marshall	140
Tabla 104. Promedios de resultados de especímenes del diseño de mezcla con filler 12 % de índice de plasticidad para gráficos Marshall	143
Tabla 105. Determinación de contenido óptimo de asfalto para diseño de mezcla con 3 % de índice de plasticidad en el filler	146
Tabla 106. Resultados finales para diseño de mezcla con 3 % de índice de plasticidad en el filler	146
Tabla 107. Determinación de contenido óptimo de asfalto para diseño de mezcla con 6 % de índice de plasticidad en el filler	147
Tabla 108. Resultados finales para diseño de mezcla con 6 % de índice de plasticidad en el filler	147
Tabla 109. Determinación de contenido óptimo de asfalto para diseño de mezcla con 12 % de índice de plasticidad en el filler	147
Tabla 110. Resultados finales para diseño de mezcla con 12 % de índice de plasticidad en el filler	148
Tabla 111. Comparativo de estabilidades secas vs estabilidades húmedas en diseño de mezcla con 3 % de índice de plasticidad en el filler	149
Tabla 112. Comparativo de estabilidades secas vs estabilidades húmedas en diseño de mezcla con 6 % de índice de plasticidad en el filler	149
Tabla 113. Comparativo de estabilidades secas vs estabilidades húmedas en diseño de mezcla con 12 % de índice de plasticidad en el filler	150
Tabla 114. Estadística descriptiva de hipótesis general para evaluar estabilidad en mezclas asfálticas.....	152

Tabla 115. Prueba de t de student para determinar si el índice de plasticidad del filler influye en la estabilidad de mezclas asfálticas en frío	153
Tabla 116. Estadística descriptiva de hipótesis general para evaluar flujo en mezclas asfáltica	154
Tabla 117. Prueba de t de student para determinar si el índice de plasticidad del filler influye en el flujo de mezclas asfálticas en frío.....	154
Tabla 118. Resultados de contenido óptimo de asfalto para diseño de mezcla con 3 % de índice de plasticidad en el fille	159
Tabla 119. Resultados de contenido óptimo de asfalto para diseño de mezcla con 6 % de índice de plasticidad en el filler	159
Tabla 120. Resultados de contenido óptimo de asfalto para diseño de mezcla con 12 % de índice de plasticidad en el filler	159

CONTENIDO DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Toma de muestras de agregados para ensayos cantera Anita II	34
Figura 2. Toma de muestras de agregados cantera Las Congas.....	37
Figura 3. Curva granulométrica del agregado grueso (piedra chancada de 3/4") .	39
Figura 4. Curva granulométrica del agregado grueso (piedra chancada o gravilla de 3/8")	41
Figura 5. Curva granulométrica del agregado fino (arena para asfalto)	42
Figura 6. Proceso de tamizado del agregado grueso (piedra chancada de 3/4") ...	43
Figura 7. Tamices para análisis granulométrico del agregado fino (arena para asfalto)	43
Figura 8. Curva granulométrica del filler.....	44
Figura 9. Muestras de agregado grueso y fino sumergidas con solución de sulfato de magnesio	56
Figura 10. Colocación de muestra de agregado grueso y esferas de acero en máquina Los Ángeles	59
Figura 11. Aspectos a considerar para calificar una partícula como chata o alargada.....	60
Figura 12. Clasificación de partículas chatas y alargadas (tamaños 1/2", 3/8")...	62
Figura 13. Muestras para ensayo de equivalente de arena	67
Figura 14. Equipos para ensayo de angularidad del agregado fino.....	69
Figura 15. Ensayo de límite líquido de agregado fino (pasante de malla N° 40) .	70
Figura 16. Resultado de intento de ensayo de límite plástico (pasante de malla N° 40).....	71

Figura 17. Gráfica de contenido de humedad del agregado fino (pasante de malla N° 200)	73
Figura 18. Intento de ensayo de límite plástico (pasante de malla N° 200).....	74
Figura 19. Procedimiento de ensayo de sales solubles	77
Figura 20. Procedimiento de ensayo de peso específico en agregado grueso.....	80
Figura 21. Extracción de burbujas de fiola para ensayo de peso específico en agregado fino.....	83
Figura 22. Pesado de fiola + filler + agua para ensayo de peso específico en agregado fino.....	85
Figura 23. Curva granulométrica de la combinación de agregados, diseño de mezcla asfáltica con 6 % de índice de plasticidad en el filler	89
Figura 24. Curva granulométrica de la combinación de agregados, diseño de mezcla asfáltica con 3 % de índice de plasticidad en el filler	92
Figura 25. Curva granulométrica de la combinación de agregados, diseño de mezcla asfáltica con 12 % de índice de plasticidad en el filler	94
Figura 26. Gráfica de contenido de humedad del ensayo de límite líquido (malla N° 200), combinación de agregados para diseño de mezcla con filler 3 % de índice de plasticidad.....	102
Figura 27. Gráfica de contenido de humedad del ensayo de límite líquido (malla N° 200), combinación de agregados para diseño de mezcla con filler 6 % de índice de plasticidad.....	103
Figura 28. Gráfica de contenido de humedad del ensayo de límite líquido (malla N° 200), combinación de agregados para diseño de mezcla con filler 12 % de índice de plasticidad.....	105

Figura 29. Pesado de agregados para fabricación de especímenes según porcentajes de asfalto	109
Figura 30. Preparación de mezcla y compactación con martillo Marshall	110
Figura 31. Extracción de especímenes y colocación en baño de maría por cuatro días	110
Figura 32. Medición de espesor o altura de especímenes	129
Figura 33. Prensa Marshall para medición de estabilidad y flujo de especímenes compactados	129
Figura 34. Densidad vs % asfalto en la mezcla (diseño con 3 % de índice de plasticidad en el filler).....	138
Figura 35. Vacíos VTM vs % asfalto en la mezcla (diseño con 3 % de índice de plasticidad en el filler).....	138
Figura 36. Vacíos VMA vs % asfalto en la mezcla (diseño con 3 % de índice de plasticidad en el filler).....	139
Figura 37. Vacíos VFA vs % asfalto en la mezcla (diseño con 3 % de índice de plasticidad en el filler).....	139
Figura 38. Estabilidad vs % asfalto en la mezcla (diseño con 3 % de índice de plasticidad en el filler).....	139
Figura 39. Flujo vs % asfalto en la mezcla (diseño con 3 % de índice de plasticidad en el filler).....	140
Figura 40. Densidad vs % asfalto en la mezcla (diseño con 6 % de índice de plasticidad en el filler).....	141
Figura 41. Vacíos VTM vs % asfalto en la mezcla (diseño con 6 % de índice de plasticidad en el filler)	141

Figura 42. Vacíos VMA vs % asfalto en la mezcla (diseño con 6 % de índice de plasticidad en el filler)	141
Figura 43. Vacíos VFA vs % asfalto en la mezcla (diseño con 6 % de índice de plasticidad en el filler)	142
Figura 44. Estabilidad vs % asfalto en la mezcla (diseño con 6 % de índice de plasticidad en el filler).....	142
Figura 45. Flujo vs % asfalto en la mezcla (diseño con 6 % de índice de plasticidad en el filler).....	142
Figura 46. Densidad vs % asfalto en la mezcla (diseño con 12 % de índice de plasticidad en el filler).....	143
Figura 47. Vacíos VTM vs % asfalto en la mezcla (diseño con 12 % de índice de plasticidad en el filler)	144
Figura 48. Vacíos VMA vs % asfalto en la mezcla (diseño con 12 % de índice de plasticidad en el filler)	144
Figura 49. Vacíos VFA vs % asfalto en la mezcla (diseño con 12 % de índice de plasticidad en el filler)	144
Figura 50. Estabilidad vs % asfalto en la mezcla (diseño con 12 % de índice de plasticidad en el filler).....	145
Figura 51. Flujo vs % asfalto en la mezcla (diseño con 12 % de índice de plasticidad en el filler).....	145
Figura 52. Comparativo de estabilidad seca vs estabilidad húmeda (diseño de mezcla con 3 % de índice de plasticidad en el filler)	150
Figura 53. Comparativo de estabilidad seca vs estabilidad húmeda (diseño de mezcla con 6 % de índice de plasticidad en el filler)	151

Figura 54. Comparativo de estabilidad seca vs estabilidad húmeda (diseño de mezcla con 12 % de índice de plasticidad en el filler)	151
Figura 55. Estabilidades por cada diseño de mezcla con distinto % de índice de plasticidad en el filler	155
Figura 56. Flujos por cada diseño de mezcla con distinto % de índice de plasticidad en el fillerr	156
Figura 57. Estabilidad vs % de índice de plasticidad en el filler de cada diseño de mezcla.....	156
Figura 58. Densidad vs % de índice de plasticidad en el filler de cada diseño de mezcla.....	157
Figura 59. Vacíos VTM vs % de índice de plasticidad en el filler de cada diseño de mezcla	157
Figura 60. Flujo vs % de índice de plasticidad en el filler de cada diseño de mezcla.....	158

CONTENIDO DE ECUACIONES

	Pág.
Ecuación 1. Índice de plasticidad.....	22
Ecuación 2. Contenido de humedad.....	45
Ecuación 3. Peso unitario suelto	48
Ecuación 4. Pérdidas por fracción en peso.....	54
Ecuación 5. Pérdidas por fracción en porcentaje	54
Ecuación 6. Pérdidas en el agregado.....	54
Ecuación 7. Porcentaje de desgaste en el agregado grueso.....	59
Ecuación 8. Porcentaje de chatas por fracción.....	61
Ecuación 9. Porcentaje de partículas chatas por tamiz	61
Ecuación 10. Porcentaje de partículas chatas en el agregado grueso.....	61
Ecuación 11. Porcentaje de cara fracturada	64
Ecuación 12. Porcentaje de partículas con una cara fracturada por tamiz	64
Ecuación 13. Porcentaje de partículas con una cara fracturada	64
Ecuación 14. Porcentaje de equivalente de arena	66
Ecuación 15. Porcentaje de angularidad del agregado fino	69
Ecuación 16. Peso del agua en límite líquido	72
Ecuación 17. Peso del suelo seco	72
Ecuación 18. Porcentaje de contenido de humedad.....	73
Ecuación 19. Peso de sal residual	76
Ecuación 20. Peso de agua evaporada.....	76
Ecuación 21. Porcentaje de sales solubles	76
Ecuación 22. Peso específico bulk en agregado grueso.....	78

Ecuación 23. Peso específico de piedra saturada superficialmente seca	79
Ecuación 24. Peso específico aparente o nominal del agregado grueso.....	79
Ecuación 25. Porcentaje de absorción del agregado grueso	79
Ecuación 26. Peso específico bulk del agregado fino	82
Ecuación 27. Peso específico de arena saturada superficialmente seca.....	82
Ecuación 28. Peso específico aparente o nominal del agregado fino	83
Ecuación 29. Porcentaje de absorción del agregado fino.....	83
Ecuación 30. Combinación de agregados	86
Ecuación 31. Método del índice asfáltico	94
Ecuación 32. Proporción final de agregados.....	97
Ecuación 33. Peso de agregado o asfalto para cada espécimen	99
Ecuación 34. Volúmen del espécimen compactado	111
Ecuación 35. Peso específico bulk del espécimen compactado.....	113
Ecuación 36. Peso específico Rice del espécimen compactado.....	117
Ecuación 37. Promedio entre peso bulk y aparente para la piedra de 3/4"	117
Ecuación 38. Promedio entre peso bulk y aparente para la piedra de 3/8"	117
Ecuación 39. Promedio entre peso bulk y aparente para la arena	118
Ecuación 40. Promedio entre peso bulk y aparente para el filler.....	118
Ecuación 41. Porcentaje de vacíos en la mezcla compactada	120
Ecuación 42. Peso específico bulk de la combinación de agregados.....	122
Ecuación 43. Porcentaje de vacíos en el agregado mineral	125
Ecuación 44. Porcentaje de vacíos llenos de asfalto	127
Ecuación 45. Estabilidad corregida.....	133
Ecuación 46. Porcentaje de estabilidad retenida	148

CONTENIDO DE APÉNDICES

	Pág.
Apéndice A. Resultados de ensayos de estabilidad y flujo en especímenes.....	170
Apéndice B. Certificados de ensayos de laboratorio	175
Apéndice C. Panel de fotografías.....	242
Apéndice D. Certificados de calibración de equipos de laboratorio.....	263

RESUMEN

En la presente investigación se elaboraron tres diseños de mezcla asfáltica, cada uno con incorporación de filler de 3 %, 6 % y 12 % de índice de plasticidad, haciendo uso de la metodología Marshall y en concordancia con el procedimiento indicado por el Instituto del Asfalto MS-14 para mezclas asfálticas en frío, se elaboraron 90 especímenes, 30 por cada diseño. Todos los especímenes fueron sometidos a los ensayos de estabilidad y flujo Marshall, cuyos resultados arrojaron valores más altos de estabilidad para el diseño de mezcla asfáltica con 3 % de índice de plasticidad en el filler en comparación con los diseños de mezcla de 6 y 12 %. El flujo determinado tuvo un comportamiento contrario al de la estabilidad, puesto que fue el diseño de mezcla con 12 % de índice de plasticidad en el filler el que tuvo valores más altos respecto a los demás. Como conclusión se demostró que el uso del filler (con % de índice de plasticidad controlados) influye de manera positiva en la producción de mezclas asfálticas en frío mejorando su estabilidad y flujo.

Palabras clave: Estabilidad, filler, flujo, índice de plasticidad, método Marshall, mezcla asfáltica en frío.

ABSTRACT

In the present investigation, three asphalt mix designs were prepared, each with the incorporation of a 3 %, 6 % and 12 % plasticity filler, making use of the Marshall methodology and in accordance with the procedure indicated by the Asphalt Institute MS-14 for cold asphalt mixtures, 90 specimens were made, 30 for each design. All specimens were subjected to Marshall stability and flow tests, whose results yielded higher stability values for the asphalt mix design with 3 % plasticity index in the filler compared to the 6 and 12 % mix designs. The determined flow had a behavior contrary to stability, since it was the mixture design with 12 % plasticity index in the filler that had higher values compared to the others. In conclusion, it was demonstrated that the use of the filler (with % plasticity index controlled) positively influences the production of cold asphalt mixtures, improving its stability and flow.

Keywords: Stability, filler, flow, plasticity index, Marshall method, cold asphalt mix.

INTRODUCCIÓN

Las vías constituyen el medio de comunicación por el cual los pueblos realizan diferentes actividades como traslado de mercancía, comercio, turismo, etc. El distrito Moquegua cuenta con vías asfaltadas, que muchas veces se deterioran antes del tiempo previsto, así como se originan diferentes fallas como ahuellamientos y ondulaciones debido al uso, deficiente calidad de los materiales que componen la mezcla asfáltica y factores climatológicos.

Con la aplicación de filler en la elaboración de los diseños de mezcla asfáltica en frío, se buscó mejorar su comportamiento mecánico tanto en la estabilidad como en el flujo, de esta manera cumplir con los parámetros exigidos por el Instituto del Asfalto MS-14.

En la presente investigación se efectuó un análisis del grado de influencia del índice de plasticidad del filler incorporado a la mezcla asfáltica en frío, considerando índices de plasticidad de 3 %, 6 % y 12 %, es decir, utilizando el método Marshall se elaboró un diseño de mezcla asfáltica por cada caso, se fabricaron un total de 90 especímenes, 30 por cada diseño, se siguió el procedimiento indicado en el Manual del Instituto del Asfalto MS-14 para mezclas asfálticas en frío. Es necesario indicar que la mitad de los especímenes fabricados por cada diseño fueron sumergidos en agua en baño de maría a 23 ± 2 °C por cuatro días con la finalidad de determinar su estabilidad retenida (daño por humedad). Para fabricar todos los especímenes se utilizó el asfalto líquido RC-250 de la empresa PetroPerú.

Se sometieron los especímenes a los ensayos de estabilidad y flujo Marshall, logrando identificar tendencias como que la estabilidad decrece conforme se aumenta el % de índice de plasticidad en el filler para cada diseño de mezcla, así como también que el flujo aumenta conforme se incrementa el % de índice de plasticidad en el filler para cada diseño de mezcla.

Adicionalmente se evaluó la propiedad de vacíos VTM de la mezcla asfáltica para los tres diseños, marcándose una tendencia de que a mayor % de índice de plasticidad menor % de vacíos VTM en la mezcla. Esta propiedad es muy importante en la durabilidad de la mezcla asfáltica, puesto que si el % de vacíos es muy alto (más del 5 % según lo estipulado en el Instituto del Asfalto MS-14) pueden aparecer conductos en la mezcla e ingresar agua que la deteriore y si es demasiada baja (menos del 3 %) puede producirse afloramiento o exudación. Los resultados de vacíos VTM de la presente investigación se encuentran dentro de los rangos permitidos (entre 3 y 5 % de vacíos VTM).

En nuestro país y más en nuestra ciudad de Moquegua existen pocas investigaciones y estudios acerca de las características que poseen los fillers (en sus diferentes tipos). Por lo que es necesario que se difunda el uso de filler en mezclas asfálticas en frío con % de índices de plasticidad de manera controlada, tanto a nivel local como nacional, puesto que como ya se demostró en la presente investigación, mejoran las propiedades de estabilidad y flujo en la mezcla asfáltica.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 Descripción de la realidad del problema

El distrito Moquegua cuenta con vías pavimentadas con mezcla asfáltica en caliente y en frío, en dichas vías se da un tráfico regular de vehículos de media y ligera carga (camiones de 10 toneladas, combis y autos), estas vías presentan deterioro así como fallas debido a los siguientes factores:

- No existen estudios o los hay pocos acerca de las características que presenta cada tipo de filler de las canteras de la zona, esto para adicionarlo en las mezclas asfálticas en frío (lo cual ayudaría a evitar y/o disminuir el deterioro), por lo cual no se conoce con exactitud los efectos en las propiedades de la mezcla asfáltica la incorporación de filler con diferentes índices de plasticidad.
- Omisión del uso de filler en los diseños de mezclas asfálticas en frío o en caliente, puesto que la incorporación del filler con el óptimo índice de plasticidad le brinda a la mezcla asfáltica mejoras en sus propiedades principalmente: flexibilidad y durabilidad, además de incrementar su resistencia a la deformación (estabilidad).

- A los factores antes indicados hay que sumarle los deterioros en las vías pavimentadas producto de la temporada de lluvias que se presentan en el distrito de Moquegua y zonas altas (generalmente se dan en los meses de enero, febrero y marzo).

1.2 Definición del problema

1.2.1 Problema general.

¿Cómo influirá el índice de plasticidad en la estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en frío en los que se incorporará filler en Moquegua, en el 2019?

1.2.2 Problemas específicos.

¿Cuál será el valor de estabilidad que presentará la mezcla asfáltica en frío con la incorporación de filler con índices de plasticidad de 3 %, 6 % y 12 % aplicando el método Marshall?

¿Cuál será el valor de flujo que presentará la mezcla asfáltica en frío con la incorporación de filler con índices de plasticidad de 3 %, 6 % y 12 % aplicando el método Marshall?

¿Cuál será el contenido óptimo de índice de plasticidad en el filler con el cual los valores de estabilidad y flujo cumplen lo establecido en el Manual del Instituto del Asfalto (MS-14) para mezclas asfálticas en frío?

1.3 Objetivos de investigación

1.3.1 Objetivo general.

Determinar el grado de influencia del índice de plasticidad en la estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en frío en los cuales se incorporará filler en Moquegua en el 2019.

1.3.2 Objetivos específicos.

Determinar el valor de estabilidad que presentará la mezcla asfáltica en frío en la que se incorporará filler con índices de plasticidad de 3 %, 6 % y 12 % aplicando el método Marshall.

Determinar el valor de flujo que presentará la mezcla asfáltica en frío en la que se incorporará filler con índices de plasticidad de 3 %, 6 % y 12 % aplicando el método Marshall.

Evaluar y determinar el contenido de índice de plasticidad óptimo en el filler con el cual los valores de estabilidad y flujo cumplen la norma vigente para mezclas asfálticas en frío.

1.4 Justificación

1.4.1 Teórica.

Con la presente investigación se busca aportar conocimientos acerca de diseños de mezcla asfáltica en frío con incorporación de filler, logrando conocer su influencia tanto favorable o desfavorable en las propiedades mecánicas y físicas de la mezcla asfáltica.

1.4.2 Social.

El tener resultados favorables en la investigación, conllevará principalmente a ayudar a extender la duración del pavimento, generando así un beneficio a la población que hace uso de las vías en la ciudad de Moquegua.

1.5 Alcances y limitaciones

1.5.1 Alcances.

La presente investigación tiene como alcance realizar estudios exploratorios a mezclas asfálticas en frío incorporando filler con distintos índices de plasticidad, a los cuales se realizarán ensayos de estabilidad y flujo acorde al Manual del Instituto del Asfalto (MS-14).

1.5.2 Limitaciones.

- a. Los agregados que se utilizaron para la presente investigación corresponden a la cantera Anita II (filler y agregado grueso) del sector Quebrada del Cementerio y la cantera Las Congas (arena para asfalto) del sector Las Congas, ambos de la provincia Mariscal Nieto en la región Moquegua, por lo cual esta investigación se limita en cuanto a las características de los agregados obtenidos de las canteras en mención. Para determinar las propiedades físicas y volumétricas de los agregados a emplear se tomará en cuenta lo indicado en el “Manual de ensayos de materiales” del Ministerio de Transportes y Comunicaciones.
- b. El uso e incorporación de filler (polvo mineral) con distintos índices de plasticidad en mezclas asfálticas en frío son poco comunes para el asfaltado de

las vías de la ciudad de Moquegua, por lo que no se cuenta con mucha información ni bibliografía similar al tema.

- c. Para la valoración del flujo y estabilidad de la mezcla asfáltica en la presente investigación se tomarán en consideración los parámetros establecidos en el Manual del Instituto del Asfalto (MS-14), el cual indica 75 golpes con el martillo Marshall (tráfico pesado).

1.6 Variables

Variable independiente: Índice de plasticidad del filler.

Variable dependiente: Estabilidad y flujo de mezcla asfáltica en frío.

1.6.1 Operacionalización de variables.

1.6.1.1 Operacionalización de variable independiente (x).

En la siguiente tabla 1 se descomponen las características de la variable independiente (x): Índice de plasticidad del filler, la cual forma parte de la investigación con el fin de poder brindar información ordenada y detallada:

Tabla 1

Operacionalización de la variable (X): Índice de plasticidad del filler

	Variable	Tipo de variable	Indicadores	Nivel de medición	Unidad de medida
Variable independiente (X) Índice de plasticidad del filler	Independiente	Cuantitativa continua	Índice de plasticidad de 3%	Intervalar o numérica	porcentaje
	Independiente	Cuantitativa continua	Índice de plasticidad de 6%	Intervalar o numérica	porcentaje
	Independiente	Cuantitativa continua	Índice de plasticidad de 12%	Intervalar o numérica	porcentaje

1.6.1.2 Operacionalización de variable dependiente (y).

En la siguiente tabla 2 se descomponen las características de la variable dependiente (y): Estabilidad y flujo de mezcla asfáltica en frío, la cual forma parte de la investigación con el fin de poder brindar información ordenada y detallada:

Tabla 2

Operacionalización de la variable (Y): Estabilidad y flujo de mezcla asfáltica en frío

Variable dependiente (Y) Estabilidad y flujo de mezcla asfáltica en frío	Variable	Tipo de variable	Indicadores	Nivel de medición	Unidad de medida
	Dependiente	Cuantitativa continua	Estabilidad mínima de mezcla asfáltica = 340,58 kg	Intervalar o numérica	kg
	Dependiente	Cuantitativa continua	Flujo mínimo de mezcla asfáltica = 2 mm	Intervalar o numérica	mm

1.7 Hipótesis de la investigación

1.7.1 Hipótesis general.

El índice de plasticidad del filler influirá en la estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en frío para las vías de Moquegua.

1.7.2 Hipótesis específicas.

El valor de la estabilidad en la mezcla asfáltica en frío será menor a medida que se aumente el porcentaje del índice de plasticidad del filler incorporado.

El valor del flujo en la mezcla asfáltica en frío será menor a medida que se aumente el porcentaje del índice de plasticidad del filler incorporado.

El contenido óptimo de índice de plasticidad en el filler será de 6 % con el cual los valores de estabilidad y flujo cumplen la norma vigente para mezclas asfálticas en frío.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes de la investigación

Realizada la búsqueda de bibliografía de diferentes tipos (libros e internet), se presentan a continuación algunos antecedentes de la presente investigación:

Valera (2018) desarrolló la tesis titulada “Evaluación del efecto de la cal hidratada y el polvo de ladrillo utilizado como relleno mineral en las propiedades de una mezcla asfáltica” en la ciudad de Chiclayo, cuyo objetivo principal fue evaluar el efecto que tienen la cal hidratada y el polvo de ladrillo al ser utilizados como relleno mineral en una mezcla asfáltica en caliente, realizando los cálculos para el diseño de mezcla a través del método de Marshall. En la investigación se realizaron ensayos a los agregados y cemento asfáltico, componentes de la mezcla para cumplir con los parámetros expuestos en la norma vigente, así como también se comprobó que el relleno mineral usado en diferentes proporciones sí tiene efecto sobre las propiedades de una mezcla asfáltica. Se utilizaron dos tipos de filler como la cal hidratada y el polvo de ladrillo, en diferentes porcentajes según lo indicado en la Norma EG-2013 para realizar un comparativo entre sus resultados. Se llegó a

la conclusión general: el polvo de ladrillo al ser utilizado como relleno mineral en una mezcla asfáltica si afecta sus propiedades, dando resultados positivos al aumentar su estabilidad.

Ordoñez (2016) desarrolló la tesis titulada “Comportamiento mecánico de mezclas asfálticas en caliente, empleando cal, en los aeropuertos del sur del Perú” en la ciudad de Juliaca, en el cual se tuvo como principal objetivo estudiar el comportamiento mecánico de mezclas asfálticas en caliente empleando cal en los aeropuertos del sur del Perú. En la investigación se utilizó la cal hidratada como filler para adicionarla a la mezcla asfáltica en caliente con el fin evaluar su comportamiento físico mecánico. Al culminar la investigación, se llegó a la conclusión de que el empleo de cal en las mezclas asfálticas en caliente presenta un buen comportamiento mecánico mejorando su resistencia y disminución en las deformaciones.

Valeriano y Catacora (2017) desarrollaron la tesis titulada “Comportamiento del diseño de mezcla asfáltica tibia, con adición de zeolita para la pavimentación de la ciudad de Juliaca” en la ciudad de Juliaca, cuyo objetivo principal fue analizar el comportamiento mecánico del diseño de mezcla asfáltica tibia con la adición de zeolita, usando la metodología Marshall. En la investigación se realizó un comparativo entre tres tipos de mezclas: el primero fue una mezcla asfáltica convencional a 140 °C, el segundo una mezcla asfáltica convencional a 100 °C y el tercero una mezcla asfáltica modificada con la adición de 2 % de zeolita natural a 100 °C. Culminada la investigación se llegó a la conclusión de que la mezcla asfáltica modificada con la adición de 2 % de zeolita natural a 100 °C incrementa en 22,18 % la estabilidad respecto a la mezcla asfáltica convencional a

100 °C, pero a la vez es ligeramente inferior a la estabilidad de la mezcla asfáltica convencional a 140 °C en un 2,47 %. También se determinó que la mezcla asfáltica modificada con la adición de 2 % de zeolita natural a 100 °C registra un mayor flujo en comparación al de la mezcla asfáltica convencional a 140 °C en un 3,05 %, y respecto a la mezcla asfáltica convencional a 100 °C registra un flujo menor en un 17,76 %.

2.2 Bases teóricas

2.2.1 Definición de mezcla asfáltica.

Céspedes (2002) afirma que “las mezclas bituminosas están constituidas por la unión más íntima posible de materiales inertes (grava, arena, limo y arcilla) con un material bituminoso (asfalto o alquitrán) que actúa como ligante” (p. 75).

Las mezclas asfálticas tienen una constitución aproximada del 90 % por agregados pétreos grueso y fino, un 5 % de filler (polvo mineral) y un 5 % de asfalto (ligante).

Las proporciones óptimas de asfalto y agregados pueden determinarse por medio de tres métodos de diseño: el método de Marshall, el método de Hveem y el método SUPERPAVE.

2.2.2 Clasificación de las mezclas asfálticas.

Se pueden clasificar a las mezclas asfálticas de distintas maneras y diversos parámetros tal y como se detalla a continuación:

2.2.2.1 Por fracción de agregado pétreo utilizado.

a. Masilla asfáltica.

Filler o también llamado polvo mineral con la inclusión de asfalto.

b. Mortero asfáltico.

Agregado fino con adición de masilla.

c. Concreto asfáltico.

Asfalto más agregado fino, agregado grueso y polvo mineral.

2.2.2.2 Por la temperatura de puesta en obra.

a. Mezcla asfáltica en caliente.

Céspedes (2002) afirma que “la combinación de áridos uniformemente mezclados y cubiertos con betún asfáltico. Para secar los áridos y lograr la suficiente fluidez del betún asfáltico se combinan en una instalación mezcladora central, en la cual todos los constituidos son calentados y mezclados” (p. 82).

Las mezclas asfálticas en caliente se definen como un concreto asfáltico que lo componen agregados finos y gruesos, filler y asfalto, dichos componentes son mezclados o preparados en una planta ubicada lejos del lugar de compactación, todo el procedimiento se da en caliente. La preparación de la mezcla se da a una temperatura aproximada de 150 °C colocada y compactada a una temperatura de 110 a 140 °C. Luego de la preparación, la mezcla se entrega a los vehículos transportadores, que luego la colocan en la pavimentadora para que ésta la deposite en el carril o vía con un espesor constante y uniforme, luego se pasa a la

compactación con rodillos vibratorios mientras se conserva la temperatura dentro de los parámetros de las especificaciones técnicas con las que se cuenta.

b. Mezclas asfálticas tibias.

Las mezclas tibias son aquellas que se preparan a temperaturas entre 100 °C y 135 °C, dependiendo de la metodología y producto utilizado.

c. Mezclas asfálticas en frío.

Céspedes (2002) afirma que “se denominan así las mezclas en las cuales se utiliza como material aglutinante asfaltos fluidificados, emulsiones asfálticas o alquitranes que se mezclan con agregados a temperatura ambiente y cuya distribución y apisonado se hace a temperatura ambiente” (p. 78).

La mezcla asfáltica en frío puede definirse como una mezcla de agregados, asfalto con o sin adición de filler, todo el proceso se realiza a temperatura ambiente.

Las mezclas asfálticas en frío “pueden clasificarse según la forma de producción” (Céspedes, 2002, p. 78):

- Mezclas “in situ” utilizando motoniveladora
- Mezclas “in situ” con mezclador giratorio
- Mezclas “in situ” en instalación móvil

2.2.2.3 Por la proporción de vacíos en la mezcla asfáltica.

a. Las mezclas densas.

Aquellas mezclas que contienen la proporción de vacíos no superiores al 5 %.

d. Mezclas semi-densas.

Aquellas mezclas que su proporción de vacíos está entre el 5 % y el 10 %.

e. Mezclas abiertas.

La proporción de vacíos está por encima del 12 %.

f. Mezclas porosas.

La proporción de vacíos es superior al 20 %.

2.2.2.4 Por el tamaño máximo del agregado pétreo.

Mezclas gruesas y finas

2.2.3 Características de las mezclas asfálticas.

Las principales características son:

2.2.3.1 Densidad de la mezcla.

Minaya, Ordóñez (2006) lo definen como “es la relación entre el peso de la mezcla por unidad de volumen” (p. 7).

2.2.3.2 Vacíos de aire o vacíos.

Minaya y Ordóñez (2006) afirman que “están conformados por el aire atrapado en la mezcla compactada. A menor porcentaje de vacíos de aire la mezcla será menos permeable” (p. 7).

Se puede deducir entonces que la densidad de la mezcla está en función del contenido de vacíos, mientras menor sea el porcentaje de vacíos mayor será su densidad, y viceversa.

2.2.3.3 Vacíos en el agregado mineral (VMA).

Minaya y Ordóñez (2006) afirman que “el diseño considera un porcentaje mínimo de VMA dependiendo del tamaño del agregado. Si el porcentaje del VMA son bajos la película de asfalto será delgada y la mezcla será susceptible a oxidación” (p. 7).

El VMA son los espacios de aire que existen entre las partículas de agregado en una mezcla compactada, incluyendo los espacios que están llenos de asfalto.

2.2.3.4 Contenido de asfalto.

Minaya y Ordóñez (2006) afirman que “es el porcentaje de asfalto que se incorpora en la mezcla. Parte del asfalto será absorbido por el agregado y el resto de asfalto formará una película que rodean las partículas” (p. 7).

Es necesario indicar además que el contenido óptimo de asfalto de la mezcla será de acuerdo a la granulometría y el porcentaje de absorción del material, es decir que las mezclas con alto porcentaje de filler necesitarán mayor porcentaje asfalto.

2.2.3.5 Vacíos llenos de asfalto (VFA).

Se definen como el porcentaje de vacíos intergranulares entre las partículas de agregado (VMA) que se encuentran llenos de asfalto.

2.2.4 Propiedades de las mezclas asfálticas.

Una mezcla asfáltica óptima y de calidad deberá poseer las siguientes propiedades:

2.2.4.1 Estabilidad.

Céspedes (2002) afirma que “se refiere a la resistencia al desplazamiento causado por cargas estáticas o en movimiento” (p. 77).

Puede definirse también como la capacidad de una mezcla asfáltica para resistir deformación y desplazamiento bajo las cargas aplicadas por el tránsito.

Las principales problemáticas y deformaciones que se presentan en una mezcla con estabilidad baja: ahuellamiento, corrimiento, exudación del asfalto.

2.2.4.2 Durabilidad.

Minaya y Ordóñez (2006) afirman que “se relaciona a la capacidad del agregado a la desintegración, a la capacidad del asfalto a reaccionar con el medio y a evitar que el asfalto se desprenda del agregado” (p. 9).

Es la capacidad para resistir los efectos dañinos causados por las cargas del tráfico y efectos climatológicos (agua, aire, temperaturas altas y/o bajas).

Para que una mezcla asfáltica tenga mayor durabilidad puede mejorarse de tres maneras:

- Utilizando un óptimo porcentaje o contenido de asfalto
- Utilizando una graduación densa
- Diseñar y compactar la mezcla para que sea lo más impermeable posible

2.2.4.3 Flexibilidad.

Céspedes (2002) afirma que “capacidad que tiene una mezcla bituminosa de flexarse repetidas veces sin rajarse” (p. 77).

Las mezclas asfálticas pueden cambiar de flexibilidad conforme a los cambios de temperatura, es decir, cuanto mayor es el calor mayor es su flexibilidad.

2.2.4.4 Resistencia a la Fatiga.

Minaya y Ordóñez (2006) afirman que “es la resistencia a esta flexión, esta característica está íntimamente relacionada al asfalto, asfaltos oxidados no son resistentes a la fatiga” (p. 10).

2.2.4.5 Resistencia al deslizamiento.

Céspedes (2002) afirma que “se refiere a la relación de las ruedas de los vehículos que circulan sobre la superficie constituida por la mezcla, que se llama coeficiente de deslizamiento” (p. 77).

La mezcla asfáltica que tenga menor resistencia al deslizamiento se deberá al exceso de asfalto, por ende, bajo coeficiente de deslizamiento.

2.2.5 Materiales pétreos.

2.2.5.1 Importancia del agregado en una mezcla asfáltica.

El asfalto y los agregados son de vital importancia en el diseño de una mezcla asfáltica puesto constituyen más del 90 % en peso, además que de la calidad de ellos depende la calidad de la mezcla asfáltica.

2.2.5.2 Definición de los agregados pétreos

Céspedes (2002) afirma que “llamados también áridos o inertes se emplean combinados con materiales bituminosos para la preparación de mezcla de utilización muy diversa” (p. 62).

Puede indicarse además que en las superficies bituminosas el agregado contribuye a su estabilidad mecánica soporta el tráfico y mismo transmite las cargas a las capas inferiores.

Los agregados típicos son la arena, la grava, material de relleno o filler, la escoria de alto horno. El comportamiento de un pavimento se ve altamente influenciado por la selección apropiada del agregado, interviene en su capacidad portante.

2.2.5.3 Categorías de los agregados.

- *Material grueso.*

Todo material retenido en el tamiz N° 8.

- *Material fino.*

Aquel material que pasa el tamiz N° 8 y es retenido en el tamiz N° 200.

- *Relleno mineral o filler.* Es el material que pasa el tamiz N° 200.

2.2.5.4 Tipos de agregados.

a. Agregados naturales.

Los que son utilizados en su forma natural.

b. Agregados de trituración.

Los que se obtienen a partir de la trituración de rocas de canteras.

c. Agregados artificiales.

Los que resultan de subproductos de procesos industriales, como algunas escorias o materiales que provienen de demoliciones que se puedan utilizar.

2.2.5.5 Normativa para los agregados en mezclas asfálticas.

El Manual de Carreteras – Especificaciones Técnicas Generales para Construcción – EG-2013, así como el Manual del Instituto del Asfalto establecen las

especificaciones técnicas para la fabricación de mezclas asfálticas y los requerimientos para los agregados gruesos y finos.

a. Agregados minerales gruesos.

Los agregados gruesos deberán cumplir con los requerimientos establecidos en la sección 423-01 del Manual de Carreteras – Especificaciones Técnicas Generales para Construcción – EG-2013.

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 % mín.	35 % mín.
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.

Fuente: MTC Manual de Carreteras EG-2013, 2013

b. Agregados minerales finos.

Los agregados finos deberán cumplir con los requerimientos establecidos en la sección 423-02 del Manual de Carreteras – Especificaciones Técnicas Generales para Construcción – EG-2013.

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	AASTHO TP 57	8 máx.	8 máx.
Índice de plasticidad (malla N° 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° 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.

Fuente: MTC Manual de Carreteras EG-2013, 2013

2.2.6 Relleno mineral o filler.

Los fillers son sustancias finamente divididas las cuales son insolubles en asfalto pero que pueden ser dispersadas en él como un medio de modificar sus propiedades mecánicas y consistencia. Su característica principal es que resulta del pasante de la malla N° 200.

2.2.6.1 Características del filler.

Las características del filler son:

a. Finura.

Disminuye los vacíos de la mezcla lo que a la postre evita un aumento en la cantidad de ligante asfáltico.

b. Acción estabilizante frente al agua.

Esta característica del filler es debido a que disminuye la porosidad del pavimento (parcialmente), no permitiendo el ingreso de agua al interior del mismo.

La acción estabilizante frente al agua depende además del tamaño y forma de las partículas, de la composición química de los rellenos minerales.

c. Procedencia del polvo mineral.

El polvo mineral podrá proceder de los agregados.

2.2.6.2 Tipos de filler.

De acuerdo al Manual de Carreteras Especificaciones Técnicas Generales para la Construcción EG -2013, se pueden utilizar como filler la cal hidratada, cemento portland, polvo de roca, polvo de escoria, ceniza fina o loes.

Los más usados son:

- Cal Hidratada

- Cemento Portland

2.2.7 Índice de plasticidad.

El índice de plasticidad de un suelo está definido como la diferencia entre su límite líquido y su límite plástico (Ministerio de Transportes y comunicaciones-Dirección General de Caminos y Carreteras, 2016).

Hay una relación entre la plasticidad de un suelo y su cohesión. La plasticidad es una propiedad exclusiva de los suelos finos (arcillas y limos). Los

suelos granulares, formados exclusivamente por elementos de granulometría gruesa (arena, gravilla, grava o cantos) son no plásticos (no presentan plasticidad).

Se denomina NP (no plástico) en el caso en el que el límite líquido o el límite plástico no puedan determinarse.

Así mismo, cuando el límite plástico resulte igual o mayor que el límite líquido, el índice de plasticidad se informará como NP (no plástico). En suelos no plásticos, no es posible determinar el índice de plasticidad.

El índice plástico de un suelo puede determinarse por la siguiente ecuación:

$$I.P. = L.L. - L.P. \dots\dots\dots[Ecuación 1]$$

Donde:

I.P. = Índice de plasticidad (%)

L.L. = Límite líquido (%)

L.P. = Límite plástico (%)

2.2.7.1 Límite líquido.

El límite líquido (L.L.) de un suelo se define como el contenido de humedad expresado en porcentaje del suelo secado en el horno, cuando éste se halla en el límite entre el estado plástico y el estado líquido.

El procedimiento estandarizado para determinar el límite líquido (ensayo) se realiza mediante la cuchara de Casagrande. En el cual se mide la humedad de un suelo en un surco que se cierra una distancia aproximada de 13 mm tras dejar caer la cuchara de Casagrande 25 veces desde una altura de 1 cm (calibrado). El surco se realiza con un acanalador normalizado y/o estandarizado.

Es necesario indicar que el ensayo se realiza con alrededor de 100 g de muestra pasante del tamiz N °40 de la serie ASTM y se mezcla con agua destilada.

2.2.7.2 Límite plástico.

Se define límite plástico (L.P.) de un suelo a la humedad más baja con la que pueden formarse barritas de unos 3,2 mm (1/8") de diámetro y 25-30 mm de longitud, haciéndolo rodar dicho suelo entre la palma de la mano y una superficie lisa (en la mayoría de ocasiones se utiliza vidrio esmerilado), sin que dichas barritas se desmoronen.

Cuando los pequeños elipsoides se cuartejan en trozos de aproximadamente 6 mm se puede concluir que se ha alcanzado la humedad del límite plástico.

Tal como se realizó en el ensayo del límite líquido, la muestra se toma del pasante del tamiz N °40 ASTM.

2.2.8 Método Marshall para diseño de mezcla asfáltica.

Minaya y Ordóñez (2006) afirman que “consiste en aplicar carga vertical a un espécimen cilíndrico en posición horizontal” (p. 7).

Método originalmente desarrollado por Bruce Marshall en los 1940s, mientras que trabajaba en el Departamento de Carreteras del Estado de Mississippi. El método se basa en el establecimiento del contenido óptimo de asfalto para un tipo de granulometría y cemento asfáltico en una mezcla asfáltica, considerando sus composiciones volumétricas y sus propiedades físico-mecánicas.

Los especímenes también deben cumplir requerimientos de estabilidad y flujo, propiedades relacionadas con la resistencia y flexibilidad que son determinados mediante una prueba mecánica rápida y simple.

2.2.8.1 *Requerimientos del método.*

Los requerimientos de las propiedades en el diseño Marshall se toman en cuenta los parámetros establecidos por el Instituto del Asfalto (MS-14) lo que tiene concordancia con los requerimientos de la norma “Especificaciones Técnicas Generales para Construcción EG-2013” en la sección 423.

2.2.9 Estabilidad y flujo de mezclas asfálticas

2.2.9.1 *Estabilidad.*

Minaya y Ordóñez (2006) afirman que “El ensayo de estabilidad Marshall no tiene buena correlación con el comportamiento de las mezclas SMA. Sin embargo, ayuda a evaluar la resistencia y calidad de mezclas densas” (p. 9).

2.2.9.2 *Flujo.*

Minaya y Ordóñez (2006) afirman que “es la deformación vertical total del espécimen sometido a la máxima carga, punto en el cual la carga empieza a decrecer. Un flujo mayor que 0,16 pulgadas puede indicar que la mezcla puede ser inestable bajo cargas de tráfico” (p. 9).

Las muestras de mezcla asfáltica materia de la presente investigación deberán cumplir con los requerimientos establecidos en el Manual del Instituto del Asfalto (MS-14) Mezclas asfálticas en frío detallados en la tabla 5.

Tabla 5

Requisitos para mezcla asfáltica con granulometría densa diseñada con el método Marshall

Propiedad a evaluar	Especificación	
	Máximo	Mínimo
Número de golpes de martillo		75
Porcentaje de vacíos en la mezcla compactada	5	3
Estabilidad a 25 °C (kN)		
Mezclas de mantenimiento		2,22
Mezclas de pavimentación		3,34
Flujo (0,25 mm)	16	8
% Estabilidad retenida		75 %

Fuente: Jiménez, Ulloa y Molina (2010).

Es necesario mencionar que la norma “Especificaciones Técnicas Generales para Construcción EG-2013” del Ministerio de Transportes y Comunicaciones no establece los parámetros mínimos para mezclas asfálticas en frío con asfalto líquido RC-250, por lo que en la presente investigación se optó por tomar como referencia los parámetros del Manual del Instituto del Asfalto (MS-14) Mezclas asfálticas en frío, indicados en la tabla 5.

2.3 Definición de términos

- *Influencia.*

Viene del verbo influir, el cual se refiere a los efectos o consecuencias que una cosa produce sobre otra, es decir para indicar su repercusión (favorable o desfavorable).

- *Mezcla asfáltica.*

Es una combinación de agregados pétreos, ligante asfáltico, relleno mineral y aditivos según sea el caso, de tal manera que estos componentes quedan cubiertos por una capa continua o película de ligante asfáltico. También es llamada mezcla bituminosa.

- *Estabilidad Marshall.*

La estabilidad Marshall de una mezcla asfáltica se determina mediante la prensa que tiene el mismo nombre, definida por la capacidad para soportar y resistir desplazamiento y deformación bajo las cargas de tráfico. Un pavimento estable es capaz de mantener su forma y lisura bajo cargas reiteradas y periódicas, un pavimento inestable puede desarrollar deformaciones en su nivel de rasante (ondulaciones) así como ahuellamientos y otras señas que indican cambios en la mezcla.

Valores muy altos de estabilidad producen un pavimento demasiado rígido y por ende, menos durable que lo deseado. El valor de la estabilidad de mezclas asfálticas obtenida con la prensa Marshall puede expresarse en unidades de KN, kg o lb.

- *Flujo Marshall.*

El flujo de una mezcla asfáltica es medido en centésimas de pulgada, representa la deformación de la probeta cilíndrica o pastilla de mezcla asfáltica.

Las mezclas que contienen valores bajos de fluencia y valores muy altos de estabilidad son consideradas demasiado frágiles y rígidas para un pavimento en

servicio. Aquellas que tienen valores altos de fluencia son consideradas demasiado plásticas y tienen tendencia a deformarse fácilmente bajo las cargas del tránsito.

- *Índice de plasticidad.*

Medida de la plasticidad de un suelo dado por el valor del intervalo de humedad en el que el suelo se comporta como un material plástico, numéricamente el índice de plasticidad es igual a la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico

En general, el índice de plasticidad depende sólo de la cantidad de arcilla existente e indica la finura del suelo y su capacidad para cambiar de configuración sin alterar su volumen.

- *Límite líquido.*

Es el contenido de agua en porcentaje (humedad) con el cual el suelo deja de ser líquido y se convierte en plástico.

- *Límite plástico.*

Es el contenido de agua en porcentaje (humedad) con el cual el suelo deja de ser plástico y se convierte en un sólido semi-plástico o semisólido o viceversa.

- *Filler.*

Céspedes (2002) afirma que “se considera “filler” solamente la parte que pasa el tamiz N° 200, el filler influye en el comportamiento de la mezcla no solo en su granulometría, sino también por su naturaleza” (p. 81).

El filler o polvo mineral sirve como relleno y que junto con el ligante asfáltico conforman el mástico.

CAPÍTULO III

MÉTODO

3.1 Tipo de investigación

Esta investigación es de tipo aplicada, puesto que su propósito es la aplicación de los conocimientos teóricos y prácticos, tal como lo indica el título “Influencia del índice de plasticidad del filler en la estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en frío en Moquegua, 2019”.

La línea de investigación en la cual se enmarca esta investigación es “Estudio de suelos, cimentaciones y pavimentos” del Programa Ingeniería Civil, Área de conocimiento: Ingeniería y tecnologías.

3.2 Diseño de la investigación

El diseño adoptado para esta investigación es experimental, porque se realizaron diversos ensayos de laboratorio a la mezcla asfáltica (acciones) con índices de plasticidad de 3 %, 6 % y 12 % en el filler, para luego contrastar y corroborar las hipótesis planteadas (medición de los efectos).

3.3 Población y muestra

3.3.1 Población.

La población para la presente investigación es la mezcla asfáltica en frío con asfalto RC-250 donde se incorporó filler con índices de plasticidad de 3 %, 6 % y 12 %.

3.3.2 Muestra.

La muestra para la presente investigación fueron 90 especímenes o briquetas de mezcla asfáltica en frío (tres diseños de mezcla cada uno con incorporación de filler de distinto índice de plasticidad), las mismas que tuvieron dimensiones de 101,6 mm (4") de diámetro y 63,5 mm (2 1/2") de altura, para todos los casos se utilizó asfalto RC-250. La cantidad de 90 especímenes de mezcla asfáltica se determinó de acuerdo a lo indicado en el "Manual de Ensayos de Materiales" - MTC E 504 Resistencia de mezclas bituminosas empleando el aparato Marshall, donde indica que se debe realizar como mínimo tres especímenes por cada incremento de ligante (el incremento variará cada 0,50 %), es decir, 30 especímenes por cada diseño de mezcla asfáltica que tendrá incorporado filler con índices de plasticidad de 3 %, 6 % y 12 %, la mitad de especímenes de cada diseño se sumergió en agua por cuatro días a 23 ± 2 °C.

3.4 Descripción de instrumentos para recolección de datos

Para el desarrollo de la presente investigación se utilizó la técnica de la observación, siguiendo los pasos detallados a continuación:

3.4.1 Búsqueda y recolección de la información.

La información obtenida en campo (muestras de los agregados finos y gruesos) permitió realizar los ensayos necesarios para determinar las características físicas y

de calidad de los agregados, todos ellos en cumplimiento de lo establecido en el Manual de Carreteras – Especificaciones Técnicas Generales para Construcción – EG-2013 y Manual del Instituto del Asfalto (MS-14).

Instrumentos para la actividad de extracción de muestras en campo:

- Materiales y herramientas de campo (lampa, sacos).
- Balde.
- Balanza tipo romana de 50 kg.
- Cámara fotográfica.
- Plumones de colores.

3.4.2 Experimentación.

En esta etapa la experimentación se realizó a las muestras extraídas de los agregados (fino y grueso) mediante ensayos de laboratorio tales como:

Para el agregado fino

- | | |
|--|-----------|
| - Equivalente de arena | MTC E 114 |
| - Angularidad del agregado fino | MTC E 222 |
| - Índice de plasticidad (malla N° 40) | MTC E 111 |
| - Durabilidad (al sulfato de magnesio) | MTC E 209 |
| - Índice de plasticidad (malla N° 200) | MTC E 111 |
| - Sales solubles totales | MTC E 219 |

- Absorción (peso específico) MTC E 205

Para el agregado grueso

- Durabilidad (al sulfato de magnesio) MTC E 209
- Abrasión Los Ángeles MTC E 207
- Partículas chatas y alargadas ASTM 4791
- Caras fracturadas MTC E 210
- Absorción (peso específico) MTC E 206

Conocidas las características físicas y de calidad de los agregados y filler, se procedió a elaborar los diseños de mezcla asfáltica con RC-250 incorporando filler con índices de plasticidad de 3 %, 6 % y 12 %, para luego elaborar los especímenes o probetas cilíndricas. Finalmente se sometieron los especímenes al aparato Marshall para determinar los valores de estabilidad y flujo.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

4.1 Presentación de resultados

Para obtener los resultados de la presente investigación se procedió de acuerdo al siguiente proceso: extracción de agregados de cantera, ensayos para determinar las propiedades físicas y de calidad de agregados, elaboración de diseños de mezclas asfálticas, fabricación de especímenes y posteriores ensayos de estabilidad y flujo.

4.1.1 Descripción de agregados y asfalto utilizados.

Los componentes utilizados para preparar la mezcla asfáltica fueron: agregados grueso (piedra chancada de 3/4" y 3/8"), agregado fino (arena para asfalto), filler de origen natural y asfalto líquido de curado rápido RC-250.

Los agregados que se utilizaron para los diseños de la presente investigación, fueron sometidos a los ensayos solicitados como requisito por la norma Manual de Carreteras Especificaciones Técnicas Generales EG – 2013 y el Manual del Instituto del Asfalto MS-14, a fin de garantizar el buen comportamiento de la mezcla asfáltica en el pavimento.

4.1.1.1 Agregado grueso (piedra chancada de 3/4" y 3/8").

El agregado grueso es proveniente de la cantera Anita II que se ubica en el sector quebrada del Cementerio distrito de Moquegua, provincia Mariscal Nieto, región Moquegua.

4.1.1.2 Agregado fino (arena para asfalto).

El agregado fino que finalmente fue utilizado es proveniente de la cantera Las Congas que se ubica en el kilómetro 1123 de la Panamericana Sur, en el distrito de Moquegua, provincia Mariscal Nieto, región Moquegua.

4.1.1.3 Filler (plástico).

El filler de origen natural que fue utilizado es proveniente de la cantera Anita II que se ubica en el sector quebrada del Cementerio distrito de Moquegua, provincia Mariscal Nieto, región Moquegua.

4.1.1.4 Material bituminoso o asfalto líquido.

El asfalto líquido utilizado para esta investigación fue RC-250 de la empresa PetroPerú.

4.1.2 Ensayos de laboratorio para control de calidad de los agregados

Se realizaron los ensayos de laboratorio para hallar las propiedades físicas así como la calidad de los agregados tanto gruesos, fino y filler. Los procedimientos para la ejecución de los ensayos se siguieron de acuerdo al Manual de Ensayos de Materiales del Ministerio de Transportes y Comunicaciones vigente.

4.1.2.1 Muestreo para materiales de construcción (ensayo MTC E 201).

El objetivo principal y más importante de este ensayo es que el ejecutor y/o personal que realiza el muestreo deberá tener la precaución en todo momento de obtener

muestras que permitan denotar la naturaleza y condiciones del material al cual representan.

Se extrajeron muestras en un primer momento del material grueso (piedra chancada de tamaño máximo nominal 3/4"), arena para asfalto y filler, todos de la cantera Anita II tal como se muestra en la figura 1:



Figura 1. Toma de muestras de agregado grueso y fino para ensayos, cantera Anita II

Se realizaron los ensayos de límites líquido y plástico (ensayo MTC E 110 y E 111) a la arena para asfalto muestreada con el fin de determinar el índice de plasticidad y cumplir con lo que exige la norma EG-2013 indicado en la tabla 4 de la presente, donde se solicita que el índice de plasticidad del agregado fino para vías por debajo de los 3 000 m.s.n.m. deberá ser NP (malla N° 40) y 4 % máximo (malla N° 200).

A esta primera arena para asfalto (proveniente de la cantera Anita II) se le realizaron los ensayos de límites líquido y plástico, arrojando los resultados de las tablas 6 y 7:

Tabla 6*Límite líquido y plástico de arena para asfalto, cantera Anita II, malla N° 40*

Cantera Anita II		
Arena para asfalto (malla N° 40)		
Límite líquido (L.L.)	%	32,51
Límite plástico (L.P.)	%	24,53
Índice de plasticidad I.P. = L.L.-L.P.	%	7,98

Tabla 7*Límite líquido y plástico de arena para asfalto, cantera Anita II, malla N° 200*

Cantera Anita II		
Arena para asfalto (malla N° 200)		
Límite líquido (L.L.)	%	53,77
Límite plástico (L.P.)	%	27,76
Índice de plasticidad I.P. = L.L.-L.P.	%	26,01

Como se aprecia en las tablas 6 y 7, la arena para asfalto no cumple con lo requerido por la norma EG-2013 en lo que respecta al índice de plasticidad, ante ello se optó por realizar el muestreo de arena para asfalto de la cantera El chasqui soy, ubicada en la quebrada Guaneros, distrito de Moquegua, provincia Mariscal Nieto, región Moquegua.

A esta segunda arena para asfalto se le realizaron los ensayos de límites líquido y plástico (Ensayo MTC E 110 y E 111) para determinar su índice de plasticidad, se le dio prioridad a este ensayo por ser el principal y punto crítico para la presente investigación, ante ello era necesario contar con una arena para asfalto N.P. (no plástico). Los resultados de los ensayos se muestran en las tablas 8 y 9:

Tabla 8*Límite líquido y plástico de arena para asfalto, cantera El Chasqui Soy, malla N° 40*

Cantera El Chasqui Soy		
Arena para asfalto (malla N° 40)		
Límite líquido (L.L.)	%	19,67
Límite plástico (L.P.)	%	NP
Índice de plasticidad I.P. = L.L.-L.P.	%	NP

Tabla 9*Límite líquido y plástico de arena para asfalto, cantera El Chasqui Soy, malla N° 200*

Cantera El Chasqui Soy		
Arena para asfalto (malla N° 200)		
Límite líquido (L.L.)	%	30,75
Límite plástico (L.P.)	%	24,43
Índice de plasticidad I.P. = L.L.-L.P.	%	6,31

En la tabla 8 (pasante de Malla N° 40) la arena para asfalto arroja como resultado N.P. (no plástico) en su índice de plasticidad, cumpliendo con uno de los requisitos solicitados por la Norma EG-2013. En la tabla 9 (pasante de Malla N° 200) la arena para asfalto tiene como índice de plasticidad 6,31 %, no cumpliendo con lo requerido por la norma EG-2013.

Al no obtener una arena para asfalto que satisfaga con lo solicitado por la Norma EG-2013, se tomó la decisión de muestrear un tercer agregado (arena para asfalto) de la cantera Las Congas ubicada en el kilómetro 1123 de la Panamericana Sur, distrito de Moquegua, provincia Mariscal Nieto, región Moquegua.



Figura 2. Toma de muestras de agregado fino (arena para asfalto), cantera Las Congas

Como primer paso, a este agregado se le realizaron los ensayos de límites líquido y plástico, obteniendo índices de plasticidad N.P. (no plástico), tal como lo reflejan los resultados de las tablas 10 y 11:

Tabla 10

Límite líquido y plástico de arena para asfalto, cantera Las Congas, malla N° 40

Cantera Las Congas		
Arena para asfalto (malla N° 40)		
Límite líquido (L.L.)	%	NP
Límite plástico (L.P.)	%	NP
Índice de plasticidad I.P. = L.L.-L.P.	%	NP

Tabla 11

Límite líquido y plástico de arena para asfalto, cantera Las Congas, malla N° 200

Cantera Las Congas		
Arena para asfalto (malla N° 200)		
Límite Líquido (L.L.)	%	32,57
Límite Plástico (L.P.)	%	NP
Índice de plasticidad I.P. = L.L.-L.P.	%	NP

De esta manera se obtuvieron todos los agregados necesarios para los diseños de mezcla asfáltica proyectados en la presente investigación.

4.1.2.2 Análisis granulométrico de agregados (ensayo MTC E 204).

Con todos los agregados ya en las instalaciones del laboratorio, se procedió a realizar los ensayos de análisis granulométrico para cada uno:

a. Agregado grueso (piedra chancada tamaño máximo 3/4").

- Equipos, herramientas y materiales.

Balanza con aproximación de 0,5 g y exactitud a 0,1 % del peso de la muestra, horno (capacidad 110 ± 5 °C), cucharón, lampa, brocha, tamices normados para ensayar agregado grueso.

- Procedimiento.

Se realizó en primer lugar el proceso del cuarteo, para luego obtener una muestra con peso=17 290,00 g. Se dejó secar el agregado grueso en el horno a una temperatura de 110 °C y luego a enfriar a una temperatura ambiente. Posterior a ello se inició con el proceso del tamizado vertiendo el agregado sobre los tamices previamente ordenados, luego del cual se agitaron los tamices, proceso repetitivo para toda la muestra. Al pasar toda la muestra por todos los tamices y anotar los pesos retenidos, se obtuvieron los resultados mostrados en la tabla 12 de este ensayo para el agregado grueso:

Tabla 12

Análisis granulométrico de agregado grueso (piedra chancada tamaño máximo 3/4")

Tamices ASTM		Piedra chancada 3/4"			
Pulgadas	mm	Peso retenido (g)	% Retenido	% Retenido acumulado	% Pasante
3"	76,20	0,00	0,00	0,00	100,00
2 1/2"	63,50	0,00	0,00	0,00	100,00
2"	50,80	0,00	0,00	0,00	100,00
1 1/2"	38,10	0,00	0,00	0,00	100,00
1"	25,40	0,00	0,00	0,00	100,00
3/4"	19,05	35,00	0,20	0,20	99,80
1/2"	12,70	11 200,00	64,78	64,98	35,02
3/8"	9,53	4695,00	27,15	92,13	7,87
1/4"	6,35	1310,00	7,58	99,71	0,29
Nº 4	4,76	35,00	0,20	99,91	0,09
Nº 8	2,36	15,00	0,09	100,00	0,00
Nº 16	1,18	0,000	0,00	100,00	0,00
Nº 50	0,30	0,000	0,00	100,00	0,00
Nº 100	0,15	0,000	0,00	100,00	0,00
Nº 200	0,08	0,000	0,00	100,00	0,00
Peso total (g)		17 290,00			

Determinado el porcentaje pasante, en la figura 3 se muestra la curva granulométrica para graficar estos resultados:

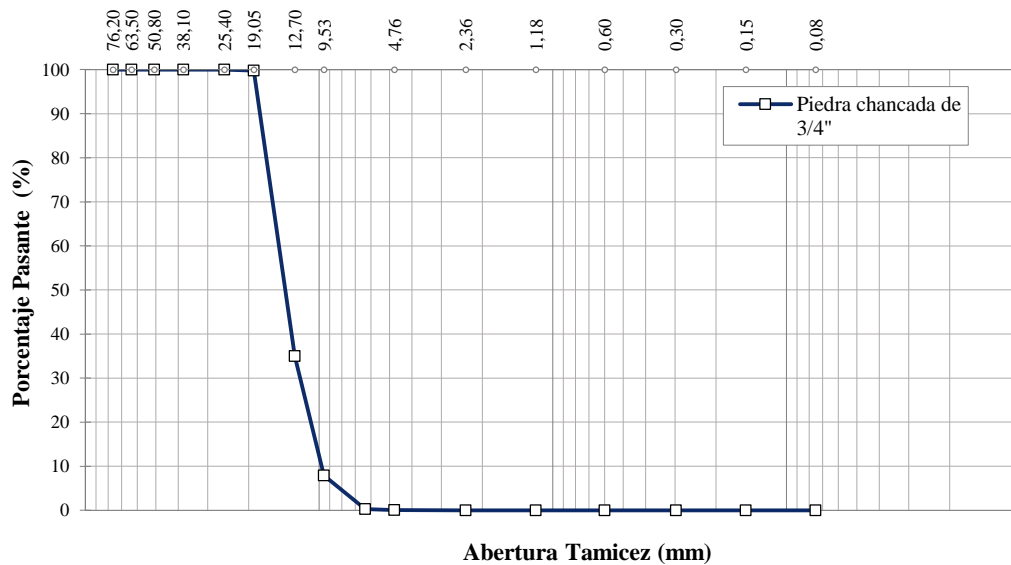


Figura 3. Curva granulométrica del agregado grueso (piedra chancada de 3/4")

b. Agregado grueso (piedra chancada o gravilla tamaño máximo 3/8").

- Equipos, herramientas y materiales.

Balanza con aproximación de 0,5 g y exactitud a 0,1 % del peso de la muestra, horno (capacidad 110 ± 5 °C), cucharón, lampa, brocha, tamices normados para ensayar agregado grueso y fino (hasta tamiz N° 100).

- Procedimiento.

Se siguió el proceso similar al del tamizado de la piedra chancada de 3/4" obteniéndose los siguientes resultados de la tabla 13:

Tabla 13

Análisis granulométrico de agregado grueso (piedra chancada o gravilla tamaño máximo 3/8")

Tamices ASTM		Piedra chancada de 3/8"			
Pulg.	mm	Peso Retenido (g)	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasante
3"	76,20	0,00	0,00	0,00	100,00
2 1/2"	63,50	0,00	0,00	0,00	100,00
2"	50,80	0,00	0,00	0,00	100,00
1 1/2"	38,10	0,00	0,00	0,00	100,00
1"	25,40	0,00	0,00	0,00	100,00
3/4"	19,05	0,00	0,00	0,00	100,00
1/2"	12,70	10,00	0,06	0,06	99,94
3/8"	9,53	135,00	0,83	0,89	99,11
1/4"	6,35	8495,00	52,41	53,30	46,70
N° 4	4,76	6165,00	38,03	91,33	8,67
N° 8	2,36	1305,00	8,05	99,38	0,62
N° 16	1,18	45,000	0,28	99,66	0,34
N° 30	0,60	15,000	0,09	99,75	0,25
N° 50	0,30	10,000	0,06	99,81	0,19
N° 100	0,15	30,000	0,19	100,00	0,00
N° 200	0,08	0,000	0,00	100,00	0,00
Peso total (g)		16 210,00			

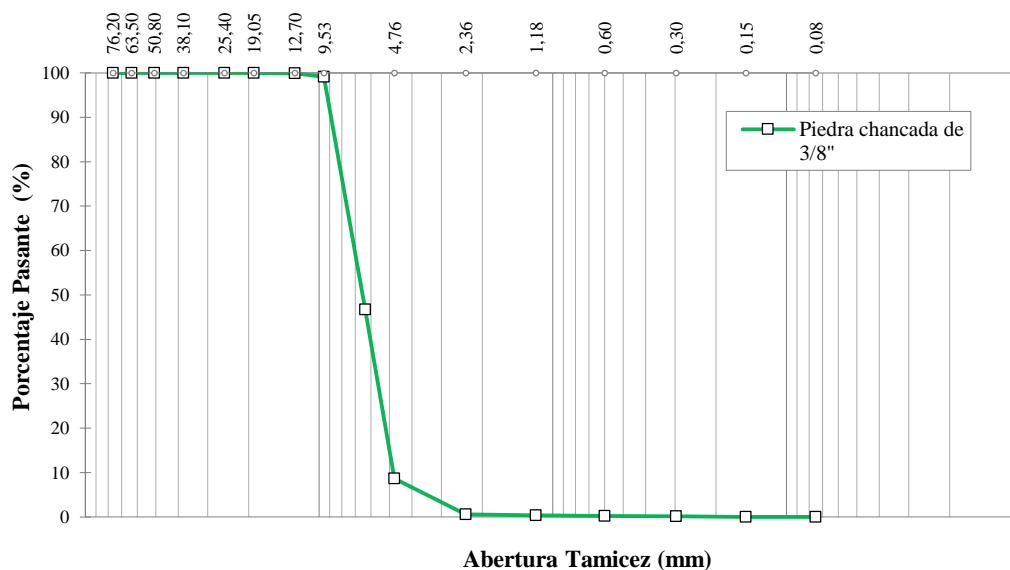


Figura 4. Curva granulométrica del agregado grueso (piedra chancada o gravilla de 3/8")

c. *Agregado fino (arena para asfalto).*

- *Equipos, herramientas y materiales.*

Balanza con aproximación de 0,1 g y exactitud a 0,1 % del peso de la muestra, horno (capacidad 110 ± 5 °C), cucharón, lampa, brocha, tamices normados para ensayar agregado fino.

- *Procedimiento.*

Luego del proceso del cuarteo se obtuvo una muestra con peso=1507,75 g. Se dejó secar el agregado fino en el horno a una temperatura de 110 °C y luego a enfriar a una temperatura ambiente. Con la muestra enfriada se prosiguió con el tamizado (manual) vertiendo el agregado sobre los tamices previamente ordenados (desde el de mayor a menor abertura), luego del cual se agitaron los tamices, proceso repetitivo para toda la muestra. Al pasar la muestra por todos los tamices y anotar los pesos retenidos, se consolidaron los resultados en la tabla 14:

Tabla 14

Análisis granulométrico de agregado fino (arena para asfalto)

Tamices ASTM		Arena para asfalto			
Pulg.	mm	Peso retenido (g)	% Retenido	% Retenido acumulado	% Pasante
3"	76,20	0,00	0,00	0,00	100,00
2 1/2"	63,50	0,00	0,00	0,00	100,00
2"	50,80	0,00	0,00	0,00	100,00
1 1/2"	38,10	0,00	0,00	0,00	100,00
1"	25,40	0,00	0,00	0,00	100,00
3/4"	19,05	0,00	0,00	0,00	100,00
1/2"	12,70	0,00	0,00	0,00	100,00
3/8"	9,525	0,00	0,00	0,00	100,00
Nº 4	4,760	66,59	4,23	4,23	95,77
Nº 8	2,360	321,50	20,42	24,65	75,35
Nº 16	1,180	305,12	19,38	44,03	55,97
Nº 30	0,600	224,31	14,25	58,28	41,72
Nº 50	0,297	264,81	16,82	75,10	24,90
Nº 100	0,149	227,80	14,47	89,57	10,43
Nº 200	0,075	97,62	6,20	95,77	4,23
Peso total seco (g)		1574,30			

Con el porcentaje pasante, en la figura 5 se muestra la curva granulométrica para graficar los resultados de la arena para asfalto:

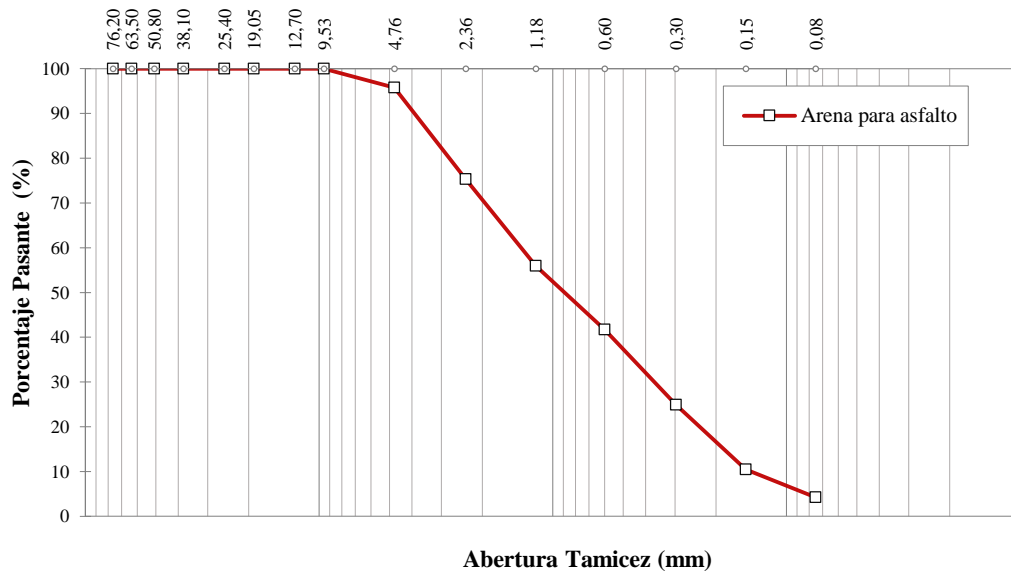


Figura 5. Curva granulométrica del agregado fino (arena para asfalto)



Figura 6. Proceso de tamizado del agregado grueso (piedra chancada de 3/4")



Figura 7. Tamices para análisis granulométrico del agregado fino (arena para asfalto)

d. Filler (plástico).

- Equipos, herramientas y materiales.

Balanza con aproximación de 0,1 g y exactitud a 0,1 % del peso de la muestra, horno (capacidad. 110 ± 5 °C), cucharón, lampa, brocha, tamices normados para ensayar agregado fino.

- *Procedimiento.*

Se siguió el proceso similar al del tamizado del agregado fino (arena para asfalto) obteniéndose los resultados de la tabla 15 para el filler de origen mineral:

Tabla 15

Análisis granulométrico del filler

Tamices ASTM		Filler			
Pulg.	mm	Peso retenido (g)	% Retenido	% Retenido acumulado	% Pasante
3"	76,20	0,00	0,00	0,00	100,00
2 1/2"	63,50	0,00	0,00	0,00	100,00
2"	50,80	0,00	0,00	0,00	100,00
1 1/2"	38,10	0,00	0,00	0,00	100,00
1"	25,40	0,00	0,00	0,00	100,00
3/4"	19,05	0,00	0,00	0,00	100,00
1/2"	12,70	0,00	0,00	0,00	100,00
3/8"	9,525	0,00	0,00	0,00	100,00
Nº 4	4,760	0,00	0,00	0,00	100,00
Nº 8	2,360	0,00	0,00	0,00	100,00
Nº 16	1,180	0,00	0,00	0,00	100,00
Nº 30	0,600	0,00	0,00	0,00	100,00
Nº 50	0,297	4,79	3,39	3,39	96,61
Nº 100	0,149	43,31	30,65	34,04	65,96
Nº 200	0,075	37,90	26,82	60,86	39,14
Peso total seco (g)		141,31			

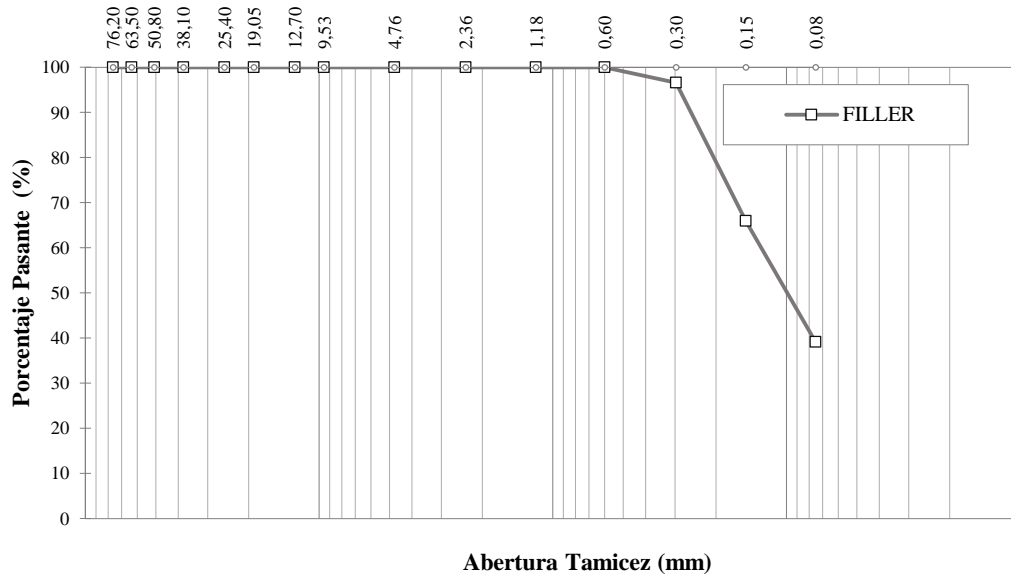


Figura 8. Curva granulométrica del filler

4.1.2.3 Determinación del contenido de humedad (ensayo MTC E 108).

a. Agregado grueso (piedra chancada tamaño máximo 3/4").

- Equipos, herramientas y materiales.

Balanza con aproximación de 0,1, horno (capacidad 110 ± 5 °C), recipiente o tarro (enumerado), guantes de cuero.

- Procedimiento.

Se inició el ensayo pesando primero el recipiente, luego se agregó la muestra en el recipiente (muestra húmeda) y se obtuvo un segundo peso, se llevó el recipiente conteniendo la muestra al horno y se dejó secar a una temperatura constante de 110 ± 5 °C. Una vez seca la muestra, se dejó enfriar a temperatura ambiente hasta que sea manipulable con las manos, luego del cual se obtuvo un tercer peso, recipiente más muestra seca (MTC E 108). Se aplicó la ecuación 2 para procesar los resultados obtenidos para el agregado grueso:

$$W = \frac{M_{cws} - M_{cs}}{M_{cs} - M_c} \times 100 \dots\dots\dots [Ecuación 2]$$

Donde:

W = Contenido de humedad (%)

M_{cws} = Peso del recipiente o tarro más el suelo húmedo (g)

M_{cs} = Peso del recipiente o tarro más el suelo seco (g)

M_c = Peso del recipiente o tarro (g)

En la tabla 16 se presentan los resultados del ensayo para el agregado grueso:

Tabla 16*Contenido de humedad de la piedra chancada de 3/4"*

Humedad natural	Piedra chancada de 3/4"
N° tarro	25
Peso suelo húmedo + tarro	358,18 g
Peso suelo seco + tarro	355,36 g
Peso tarro	37,30 g
Humedad	0,89 %

b. *Agregado grueso (piedra chancada o gravilla tamaño máximo 3/8").*

- *Equipos, herramientas y materiales.*

Balanza con aproximación de 0,1, horno (capacidad. 110 ± 5 °C), recipiente o tarro (enumerado), guantes de cuero.

- *Procedimiento.*

Se ejecutó el ensayo con el procedimiento similar a lo detallado para la piedra chancada de 3/4" (MTC E 108). Se obtuvieron los resultados que se detallan en la tabla 17:

Tabla 17*Contenido de humedad de la piedra chancada de 3/8"*

Humedad natural	Piedra chancada 3/8"
N° tarro	30
Peso suelo húmedo + tarro	329,40 g
Peso suelo seco + tarro	326,59 g
Peso tarro	36,09 g
Humedad	0,97 %

c. *Agregado fino (arena para asfalto).*

- *Equipos, herramientas y materiales.*

Balanza con aproximación de 0,1, horno (capacidad 110 ± 5 °C), recipiente o tarro (enumerado), guantes de cuero.

- *Procedimiento.*

Se ejecutó el ensayo con el procedimiento similar a lo detallado para el agregado grueso (MTC E 108). Se obtuvieron los resultados de la tabla 18:

Tabla 18

Contenido de humedad del agregado grueso

Humedad natural	Arena para asfalto
N° tarro	2
Peso suelo húmedo + tarro	390,80 g
Peso suelo seco + tarro	387,18 g
Peso tarro	44,15 g
Humedad	1,06 %

d. *Filler (plástico).*

- *Equipos, herramientas y materiales.*

Balanza con aproximación de 0,1, horno (capacidad 110 ± 5 °C), recipiente o tarro (enumerado), guantes de cuero.

- *Procedimiento.*

Se ejecutó el ensayo con el procedimiento similar a lo detallado para el agregado grueso (MTC E 108). Se obtuvieron los resultados de la tabla 19:

Tabla 19

Contenido de humedad del filler

Humedad natural	Filler
N° tarro	23
Peso suelo húmedo + tarro	170,83 g
Peso suelo seco + tarro	163,25 g
Peso tarro	40,76 g
Humedad	6,19 %

4.1.2.4 Peso unitario de los agregados (ensayo MTC E 203).

a. Agregado grueso (piedra chancada tamaño máximo 3/4").

- *Equipos, herramientas y materiales.*

Balanza con aproximación de 0,1, un recipiente o molde metálico con medidas conocidas y de preferencia con agarraderas, con borde superior pulido (para enrasar), una varilla cilíndrica de acero para compactación de diámetro 5/8" y de longitud aproximada de 600 mm (24") con un extremo semiesférico, un cucharón, una regla metálica.

- *Procedimiento para peso unitario suelto (condición seca).*

Conocido el volumen y peso del molde metálico, se vertió el agregado al molde con el cucharón hasta llenarlo cuidando que la descarga del mismo no se haga desde una altura mayor de 2" hasta que rebose el molde, luego se eliminó el material sobrante con una regla metálica. Se anotó el peso del molde más el peso de la muestra o material vertido. Al tener los datos se procesó la información aplicando la ecuación 3:

$$P_{us} = \frac{(P_{ma} - P_m)}{V_m} \dots \dots \dots [Ecuación 3]$$

Donde:

P_{us} = Peso unitario suelto (g)

P_{ma} = Peso del molde más el agregado o muestra (g)

P_m = Peso del molde (g)

V_m = Volumen del molde (m^3)

Tabla 20

Peso unitario suelto del agregado grueso (piedra chancada de 3/4")

Peso unitario de muestra	Muestra N° 1
	Condición: suelto
Peso muestra seca + molde	17 860,00 g
Peso de molde	5681,00 g
Volumen de molde	9260,00 cm^3
Peso unitario (g/cm^3)	1,32 g/cm^3
Peso unitario (kg/m^3)	1315,23 kg/m^3

- *Procedimiento para peso unitario compactado (condición seca).*

Del mismo modo como en el peso unitario suelto, ya conocido el volumen y peso del molde metálico, se vertió el agregado o muestra al molde con el cucharón hasta la tercera parte de su altura luego del cual se emparejó con los dedos, seguidamente se dieron 25 golpes con la varilla metálica (borde redondeado) cuidando de no golpear el molde en la parte inferior. Seguidamente se vertió la muestra en el molde hasta 2/3 partes de su altura, emparejando y aplicando los 25 golpes distribuidos uniformemente sobre esta segunda capa. Finalmente se vertió el agregado en el molde hasta llenarlo, luego del cual se apisonó como en las anteriores capas y se enrasó la superficie con la varilla, se anotó el peso del molde más la muestra y se procesaron los datos con la ecuación 3, se presentan los resultados en la tabla 21:

Tabla 21*Peso unitario compactado del agregado grueso (piedra chancada de 3/4")*

Peso unitario de muestra	Muestra N° 2
	Condición: compactado
Peso muestra seca + molde	19 510,00 g
Peso de molde	5681,00 g
Volumen de molde	9260,00 cm ³
Peso unitario (g/cm ³)	1,49 g/cm ³
Peso unitario (kg/m ³)	1493,41 kg/m ³

*b. Agregado grueso (piedra chancada o gravilla tamaño máximo 3/8").**- Equipos, herramientas y materiales.*

Balanza con aproximación de 0,1, un recipiente o molde metálico con medidas conocidas y de preferencia con agarraderas, con borde superior pulido (para enrasar), una varilla cilíndrica de acero para compactación de diámetro 5/8" y de longitud aproximada de 600 mm (24") con un extremo semiesférico, un cucharón, una regla metálica.

- Procedimiento.

Se ejecutó el ensayo con el procedimiento similar a lo detallado para la piedra chancada de 3/4" (MTC E 203), para la condición suelta. Se obtuvieron los resultados de la tabla 22:

Tabla 22*Peso unitario compactado del agregado grueso (piedra chancada de 3/8")*

Peso unitario de muestra	Muestra N° 1
	Condición: suelto
Peso muestra seca + molde	17 145,00 g
Peso de molde	5681,00 g
Volumen de molde	9260,00 cm ³
Peso unitario (g/cm ³)	1,24 g/cm ³
Peso unitario (kg/m ³)	1238,01 kg/m ³

c. *Agregado fino (arena para asfalto).*

- *Equipos, herramientas y materiales.*

Balanza con aproximación de 0,1, un recipiente o molde metálico con medidas conocidas y de preferencia con agarraderas, con borde superior pulido (para enrasar), una varilla cilíndrica de acero para compactación de diámetro 5/8" y de longitud aproximada de 600 mm (24") con un extremo semiesférico, un cucharón, una regla metálica.

- *Procedimiento para peso unitario suelto (condición seca).*

Con el volumen y peso del molde metálico conocidos, se ejecutó el procedimiento similar como se realizó para el agregado grueso. Con los datos se procesó la información aplicando la ecuación 3 y obteniendo los resultados de la tabla 23:

Tabla 23

Peso unitario suelto del agregado fino (arena para asfalto)

Peso unitario de muestra	Muestra N° 1
	Condición: suelto
Peso muestra seca + molde	19 635,00 g
Peso de molde	5681,00 g
Volumen de molde	9260,00 cm ³
Peso unitario (g/cm ³)	1,51 g/cm ³
Peso unitario (kg/m ³)	1506,91 kg/m ³

d. *Filler (plástico).*

- *Equipos, herramientas y materiales.*

Balanza con aproximación de 0,1, un recipiente o molde metálico con medidas conocidas y de preferencia con agarraderas, con borde superior pulido (para enrasar), una varilla cilíndrica de acero para compactación de diámetro 5/8" y de

longitud aproximada de 600 mm (24") con un extremo semiesférico, un cucharón, una regla metálica.

- *Procedimiento para peso unitario suelto (condición seca).*

Con el volumen y peso del molde metálico conocidos, se ejecutó el procedimiento similar como se realizó para el agregado fino y grueso. Con los datos se procesó la información aplicando la ecuación 3 y obteniendo los resultados de la tabla 24:

Tabla 24

Peso unitario suelto del filler

Peso unitario de muestra	Muestra N° 1
	Condición: suelto
Peso muestra seca + molde	11 240,00 g
Peso de molde	7725,00 g
Volumen de molde	3233,52 cm ³
Peso unitario (g/cm ³)	1,09 g/cm ³
Peso unitario (kg/m ³)	1087,05 kg/m ³

4.1.2.5 Durabilidad al sulfato de magnesio (ensayo MTC E 209).

a. Agregado grueso (piedra chancada tamaño máximo 3/4").

- *Equipos, herramientas y materiales.*

Balanza con aproximación de 1 g y capacidad no menor a 5000 g, recipientes con mallas metálicas que permitan sumergir las muestras de agregado en la solución y que impidan su salida, horno (capacidad 110 ± 5 °C), tamices normados (3/4", 1/2", 3/8", N° 4).

- *Procedimiento.*

Se prepararon las muestras del agregado grueso pesándolas de acuerdo a las cantidades descritas en la tabla 25 (cantidades mínimas):

Tabla 25*Cantidades mínimas de muestra para ensayo de durabilidad en agregado grueso*

Tamaño	Peso mínimo retenido (g)
3/4" a 1/2"	670 ± 10
1/2" a 3/8"	330 ± 5
3/8" a N°4	300 ± 5

Fuente: Manual de Ensayos de Materiales, 2016

Luego del pesado, las muestras se lavaron y secaron a una temperatura de 10 ± 5 °C para luego ser separadas de acuerdo a su tamaño colocándolas en cada recipiente. El siguiente paso fue sumergir las muestras en la solución de sulfato de sodio por un periodo de 16 a 18 horas, cuidando que el nivel de la solución sobrepase en 1/2" por encima de la muestra. La solución se preparó en una proporción de 1400 g de sal hidratada y 400 g de sal anhidra por un litro de agua destilada (recomendado). Durante el periodo de sumergido de muestras en la solución, se taparon los recipientes para evitar su contaminación. Luego se retiraron las muestras de la solución escurriéndolas por 15 minutos y se secaron a una temperatura de 110 ± 5 °C hasta obtener un peso constante, este procedimiento se consideró como un ciclo, para la presente investigación se realizaron en total cuatro ciclos que están registrados en la tabla 26:

Tabla 26*Ensayo de durabilidad (al sulfato de magnesio) agregado grueso*

(%)	Tamaño	Peso mínimo retenido (g)	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Pérdidas por fracción		Gradación original (%)	% pérdidas en el agregado
					(g)	(%)		
67	3/4" a 1/2"	670 ± 10	670,00	589,00	81,00	12,09	64,78	7,83
33	1/2" a 3/8"	330 ± 5	330,00	293,00	37,00	11,21	27,15	3,04
	3/8" a N°4	300 ± 5	300,00	243,00	57,00	19,00	0,20	0,04
Pérdida (%)								10,91

Nota: La gradación original fue extraída del % retenido del análisis granulométrico inicial

Para el cálculo de los datos antes detallados se utilizaron las ecuaciones 4, 5 y 6:

$$P_{pf} = P_i - P_f \dots\dots\dots [Ecuación 4]$$

Donde:

P_{pf} = Pérdidas por fracción (g)

P_i = Peso inicial del recipiente más la muestra (g)

P_f = Peso final del recipiente más la muestra luego de todos los ciclos (g)

$$P_p = (P_{pf} - P_i) \times 100 \dots\dots\dots [Ecuación 5]$$

Donde:

P_p = Pérdidas por fracción (%)

P_{pf} = Pérdidas por fracción (g)

P_i = Peso inicial del recipiente más la muestra (g)

$$P_{pa} = \frac{(P_p - G_o)}{100} \dots\dots\dots [Ecuación 6]$$

Donde:

P_{pa} = Pérdidas en el agregado (%)

P_p = Pérdidas por fracción (%)

G_o = Gradación original (%), extraída del % retenido del análisis granulométrico inicial.

b. Agregado fino (arena para asfalto).

- Equipos, herramientas y materiales.

Balanza con aproximación de 0,1 g y capacidad no menor a 500 g, recipientes con mallas metálicas que permitan sumergir las muestras de agregado en la solución y que impidan su salida, horno (cap. 110 ± 5 °C), tamices normados (3/8", N° 4, N°8, N° 16, N° 30, N° 50).

- Procedimiento.

De la misma manera que las muestras del agregado grueso, para el agregado fino se pesaron de acuerdo a las cantidades descritas en la tabla 27 (cantidades mínimas):

Tabla 27

Cantidades mínimas de muestra para ensayo de durabilidad en agregado fino

Tamaño	Peso mínimo retenido (g)
3/8" a N° 4	100
N° 4 a N° 8	100
N° 8 a N° 16	100
N° 16 a N° 30	100
N° 30 a N° 50	100

Fuente: Ministerio de Transportes y Comunicaciones, Dirección General de Caminos y Ferrocarriles, 2016.

Luego del pesado y separación de las muestras por tamaño, se siguió el mismo procedimiento descrito anteriormente para el agregado grueso (cuatro ciclos de lavado y secado al horno). A finalizar todos los ciclos se registraron los resultados en la tabla 28 aplicando las ecuaciones 4, 5 y 6:

Tabla 28

Ensayo de durabilidad (al sulfato de magnesio) agregado fino

Tamaño	Peso mínimo retenido (g)	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Pérdidas por fracción		Gradación original (%)	% pérdidas en el agregado
				(g)	(%)		
3/8" a N° 4	100	100,00	91,32	8,68	8,68	4,42	0,38
N° 4 a N° 8	100	100,00	90,97	9,03	9,03	21,32	1,93
N° 8 a N° 16	100	100,00	87,19	12,81	12,81	20,24	2,59
N° 16 a N° 30	100	100,00	87,78	12,22	12,22	14,88	1,82
N° 30 a N° 50	100	100,00	87,68	12,32	12,32	17,56	2,16
Pérdida (%)							8,88

Nota: La gradación original fue extraída del % retenido del análisis granulométrico inicial



Figura 9. Muestras de agregado grueso y fino sumergidas con solución de sulfato de magnesio

4.1.2.6 Abrasión Los Ángeles al desgaste de los agregados de tamaños menores

a 1 1/2" (ensayo MTC E 207).

a. Agregado grueso (piedra chancada tamaño máximo 3/4").

- Equipos, herramientas y materiales.

Balanza con aproximación de 1 g, horno (capacidad 110 ± 5 °C), máquina de desgaste Los Ángeles (deberá cumplir con las especificaciones técnicas indicadas

en el Ensayo MTC E 207), tamices normados (3/4", 1/2" y 3/8"), esferas de acero de 46,38 a 47,63 mm de diámetro y entre 390 a 445 g de masa.

- *Procedimiento.*

El peso de la muestra se determinó de acuerdo a la tabla 29:

Tabla 29

Gradación de las muestras de ensayo

Medida del tamiz (abertura cuadrada)		Masa de tamaño indicado (g)			
Que pasa	Retenido sobre	Gradación			
		A	B	C	D
37,5 mm (1 1/2")	25,0 mm (1")	1250±25			
25,0 mm (1")	19,0 mm (3/4")	1250±25			
19,0 mm (3/4")	12,5 mm (1/2")	1250±10	2500±10		
12,5 mm (1/2")	9,5 mm (3/8")	1250±10	2500±10		
9,5 mm (3/8")	6,3 mm (1/4")			2500±10	
6,3 mm (1/4")	4,75 mm (N° 4)			2500±10	
4,75 mm (N° 4)	2,36 mm (N° 8)				5000
Total		5000±10	5000±10	5000±10	5000±10

Fuente: Ministerio de Transportes y Comunicaciones, Dirección General de Caminos y Ferrocarriles, 2016

Para la muestra de la presente investigación se optó por la gradación B (Peso =5 000±10 g), se lavó y se secó a una temperatura de 110 ± 5 °C, luego del cual se ingresó la muestra a la máquina de Los Ángeles junto con las esferas de acero, la cantidad fue determinada de acuerdo a la tabla 30:

Tabla 30*Número de esferas por gradación*

Gradación	Número de esferas	Peso de la carga (g)
A	12	5000 ± 25
B	11	4584 ± 25
C	8	3330 ± 20
D	6	2500 ± 15

Fuente: Ministerio de Transportes y Comunicaciones, Dirección General de Caminos y Ferrocarriles, 2016

Nota: Para la presente investigación se optó por considerar 11 esferas (Gradación B)

Luego de ingresar la muestra junto con las esferas de acero, se encendió la máquina Los Ángeles para su rotación a una velocidad entre 30 rpm a 33 rpm por 500 revoluciones. Finalmente se extrajo la muestra y se tamizó por la malla N° 12, el peso retenido es considerado como peso final, se registraron los datos en la tabla 31 como resultado de la utilización de la ecuación 7:

Tabla 31*Desgaste del agregado grueso por abrasión*

Tamices (pulgadas)		Gradaciones			
Pasante	Retenido	A	B	C	D
1 1/2"	1"	1250			
1"	3/4"	1250			
3/4"	1/2"	1250	2500		
1/2"	3/8"	1250	2500		
3/8"	1/4"			2500	
1/4"	N° 4			2500	
N° 4	N° 8				5000
Peso inicial (g)		5000			
Peso final (g)		4300			
N° de esferas		12	11	8	6
Peso de esferas		4986	4571	3325	2493
Porcentaje desgaste (%)		14,00			

$$\% \text{Desg} = \frac{P_{\text{inicial}} - P_{\text{final}}}{P_{\text{final}}} \times 100 \dots\dots\dots [\text{Ecuación 7}]$$

Donde:

%Desg = Porcentaje de desgaste del agregado grueso (%)

P_{inicial} = Peso inicial (kg)

P_{final} = Peso final (kg)



Figura 10. Colocación de muestra de agregado grueso y esferas de acero en máquina Los Ángeles

4.1.2.7 Partículas chatas y alargadas en agregados (ensayo MTC E 223).

a. Agregado grueso (piedra chancada tamaño máximo 3/4").

- Equipos, herramientas y materiales.

Balanza con exactitud de 0,5 % del peso de la muestra, horno (capacidad 110 ± 5 °C), dispositivo calibrador proporcional (de acuerdo a las especificaciones técnicas descritas en el Ensayo MTC E 223), tamices normados (3/4", 1/2" y 3/8").

- *Procedimiento.*

La muestra previamente se lavó de impurezas y secada al horno a una temperatura de 110 ± 5 °C. Se tomó como muestra los siguientes pesos retenidos del agregado grueso: tamiz 1/2"=1000 g, tamiz 3/8"=300 g, tamiz 1/4"=300 g. Seguidamente en una mesa se comenzó a verificar cada piedra tomando en cuenta que una partícula pasa a considerarse chata cuando su espesor es menor que la abertura del brazo menor del dispositivo calibrador de ensayo. Así mismo una partícula pasa a ser considerada alargada cuando el ancho de la partícula es menor que la abertura del brazo menor del dispositivo calibrador de ensayo.

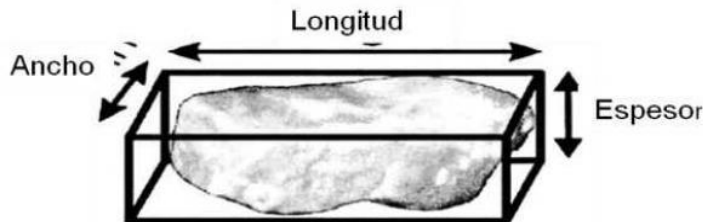


Figura 11. Aspectos a considerar para calificar una partícula como chata o alargada
Fuente: Manual de Ensayos de Materiales, 2016

Al culminar el ensayo con la verificación y clasificación de todas las partículas, se registraron los datos en la tabla 32:

Tabla 32

Resultados de ensayo de partículas chatas

Tamaño del agregado		Peso y/o cantidad de muestra		% Chatas por fracción	% Gradación original	% Chatas en el agregado
Pasante de tamiz	Retenido del tamiz	(g)	(g)			
3/4"	1/2"	1000	10	1,00	64,78	64,78
1/2"	3/8"	300	7	2,33	27,15	63,36
3/8"	1/4"	300	10	3,33	7,58	25,26
Total		1600,00			99,51	153,39
Porcentaje de chatas (%)						1,54

Nota: La gradación original fue extraída del % retenido del análisis granulométrico inicial del agregado grueso

Para el cálculo de los datos antes detallados se utilizaron las ecuaciones 8, 9 y 10:

$$\%Chf = \frac{Pch}{Preq} \times 100 \dots\dots\dots [Ecuación 8]$$

Donde:

$\%Chf$ = Porcentaje de chatas por fracción (%)

Pch = Peso de partículas chatas de la muestra (g)

$Preq$ = Peso requerido por cada tamiz (g)

$$\%Chpt = \%Chf \times \%Gag \dots\dots\dots [Ecuación 9]$$

Donde:

$\%Chpt$ = Porcentaje de partículas chatas por tamiz (%)

$\%Chf$ = Porcentaje de chatas por fracción (%)

$\%Gag$ = Porcentaje retenido por cada tamiz del análisis granulométrico inicial del agregado grueso (%)

$$\%Chag = \frac{\sum \%Chpt}{\sum Gag} \dots\dots\dots [Ecuación 10]$$

Donde:

$\%Chag$ = Porcentaje de partículas chatas en el agregado grueso (%)

$\sum \%Chpt$ = Sumatoria de porcentajes de partículas chatas por tamiz (%)

$\sum \%Gag$ = Sumatoria de porcentajes retenidos por cada tamiz del análisis granulométrico inicial del agregado grueso (%)

De manera similar para el cálculo de los datos del ensayo de partículas alargadas se utilizaron las ecuaciones 8, 9 y 10 antes descritos, obteniéndose los resultados mostrados en la tabla 33:

Tabla 33

Resultados de ensayo de partículas alargadas

Tamaño del agregado		Peso y/o cantidad de muestra		% Alargadas por fracción	% Gradación original	% Alargadas en el agregado
Pasante de tamiz	Retenido del tamiz	(g)	(g)			
3/4"	1/2"	1000	65	6,50	64,78	421,05
1/2"	3/8"	300	35	11,67	27,15	316,80
3/8"	1/4"	300	56	18,67	7,58	141,43
Total		1600,00			99,51	879,28
Porcentaje de alargadas (%)						8,84

Nota: La gradación original fue extraída del % retenido del análisis granulométrico inicial del agregado grueso

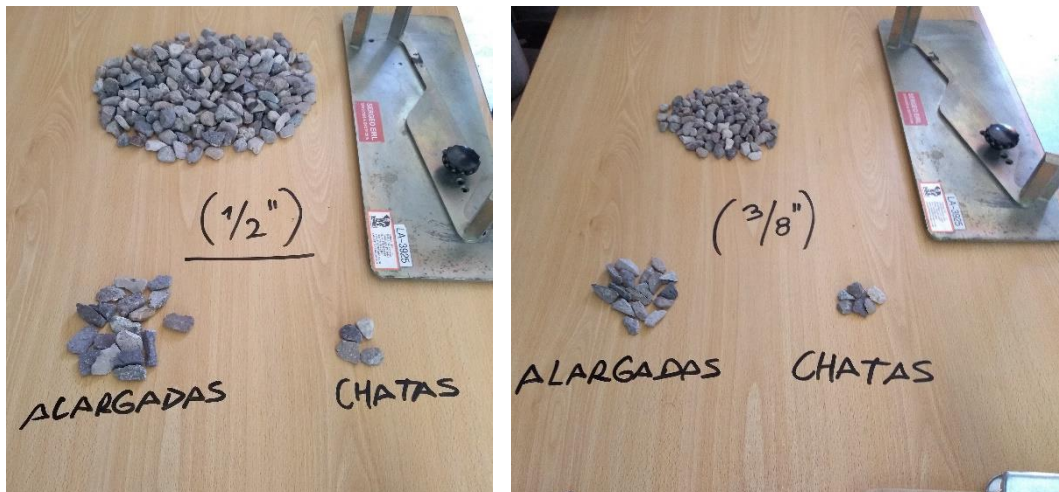


Figura 12. Clasificación de partículas chatas y alargadas (tamaños 1/2" y 3/8")

4.1.2.8 Método estándar para determinación del porcentaje de partículas fracturadas (ensayo MTC E 210).

a. Agregado grueso (piedra chancada tamaño máximo 3/4").

- Equipos, herramientas y materiales.

Balanza con exactitud de 0,5 % del peso de la muestra, horno (capacidad 110 ± 5 °C), espátula, tamices normados (3/4", 1/2" y 3/8").

- Procedimiento.

La muestra se lavó previamente de las impurezas y se secó al horno a una temperatura de 110 ± 5 °C. Se tomó como muestra los siguientes pesos retenidos del agregado grueso: tamiz 1/2"=1 200 g, tamiz 3/8"=300 g. A continuación sobre una mesa limpia se comenzó a verificar e inspeccionar si cada partícula alcanza el criterio de fractura, sosteniendo la partícula de tal manera que la cara fuera vista directamente, se tuvo en consideración que la cara constituya al menos 1/4 de la máxima sección transversal, esto para considerarla como cara fracturada. Con ayuda de la espátula se separaron todas las partículas con una cara fracturada y dos caras fracturadas, obteniendo los resultados de la tabla 34:

Tabla 34

Resultados de porcentaje de agregado con una cara fracturada

Tamaño del agregado		Peso de muestra mínima requerida		Peso de material c/cara fracturada (g)	Porcentaje de cara fracturada (%)	% Gradación original	% de una cara fracturada
Pasante de tamiz	Retenido del tamiz	(g)	(g)				
1"	3/4"	1500	1500,00	840,00	56,00	0,20	11,20
3/4"	1/2"	1200	1200,00	210,00	17,50	64,78	1133,60
1/2"	3/8"	300	300,00	0,00	0,00	27,15	0,00
Total				1050,00		92,13	1144,80
Porcentaje de agregado con una cara fracturada (%)							12,43

Nota: La gradación original fue extraída del % retenido del Análisis granulométrico inicial del agregado grueso

Para el cálculo de los datos antes detallados se utilizaron ecuaciones 11, 12 y 13:

$$\% 1cfr = \frac{P1cfr}{Preqf} \times 100 \dots\dots\dots [Ecuación 11]$$

Donde:

$\% 1cfr$ = Porcentaje de cara fracturada (%)

$P1cfr$ = Peso de partículas con una cara fracturada (g)

$Preqf$ = Peso requerido por cada tamiz para evaluación de fractura (g)

$$\% Chpt = \% Chf \times \% Gag \dots\dots\dots [Ecuación 12]$$

Donde:

$\% 1cfrt$ = Porcentaje de partículas con una cara fractura por tamiz (%)

$\% 1cfr$ = Porcentaje de cara fracturada (%)

$\% Gag$ = Porcentaje retenido por cada tamiz del análisis granulométrico inicial del agregado grueso (%)

$$\% Chag = \frac{\sum \% Chpt}{\sum Gag} \dots\dots\dots [Ecuación 13]$$

Donde:

$\% 1cfrag$ = Porcentaje de partículas con una cara fracturada del agregado grueso (%)

$\sum \% 1cfrt$ = Sumatoria de porcentajes de partículas con una cara fractura por tamiz (%)

$\sum \% Gag$ = Sumatoria de porcentajes retenidos por cada tamiz del análisis granulométrico inicial del agregado grueso (%)

Siguiendo un procedimiento similar que el anterior, para el cálculo de los datos del ensayo de partículas con dos caras fracturadas se utilizaron las ecuaciones 11, 12 y 13 antes descritos obteniéndose los resultados de la tabla 35:

Tabla 35

Resultados de porcentaje de agregado con dos caras fracturadas

Tamaño del agregado		Peso de muestra mínima requerida		Peso de material c/dos caras fracturada	Porcentaje de caras fracturadas	% Gradación original	% de dos caras fracturadas
Pasante de tamiz	Retenido del tamiz	(g)	(g)	(g)	(%)		
1"	3/4"	1500	1500,00	775,00	51,67	0,20	10,33
3/4"	1/2"	1200	1200,00	175,00	14,58	64,78	944,67
1/2"	3/8"	300	300,00	0,00	0,00	27,15	0,00
Total				950,00		92,13	955,00
Porcentaje de agregado con dos caras fracturadas (%)							10,37

Nota: La gradación original fue extraída del % retenido del Análisis granulométrico inicial del agregado grueso

4.1.2.9 Equivalente de arena (ensayo MTC E 114).

a. Agregado fino (arena par asfalto).

- *Equipos, herramientas y materiales.*

Balanza con exactitud de 0,5 % del peso de la muestra, horno (capacidad 110 ± 5 °C), tres cilindros graduados transparentes de plástico acrílico, tapón de jefe, tubo irrigador, tamiz N° 4, embudo de boca ancha, reloj, papel filtro, solución stock.

- *Procedimiento.*

Se tomó como muestra el pasante del tamiz N° 4 una cantidad de 125 g para tres ensayos (los cuales se promediaron al final).

Se vertió la solución de cloruro de calcio en el cilindro graduado hasta una altura de $4 \pm 0,1$ "', seguidamente se agregó la muestra al cilindro y se dejó reposar

por un periodo de 10 ± 1 min. Después de este periodo de saturación se prosiguió con el agitado (manual en este caso), realizando 90 ciclos en un tiempo de 30 s, luego del cual se procedió a irrigar la muestra hasta alcanzar la lectura de 15'' en el cilindro graduado, antes de ello se enjuagó sus paredes y con el irrigador se hizo un punzonamiento al material hasta el fondo del cilindro, con el fin de remover los finos y que entren en suspensión.

Se dejó en reposo un periodo de 20 min. \pm 15 segundos, al culminar se tomaron las lecturas del nivel de arcilla y arena de las tres muestras ensayadas las cuales se presentan en la tabla 36:

Tabla 36

Resultados de ensayo de equivalente de arena

Tiempos de ensayo	N° 1	N° 2	N° 3
Hora de entrada a saturación	04:53 p.m.	04:55 p.m.	04:57 p.m.
Hora de salida de saturación	05:03 p.m.	05:05 p.m.	05:07 p.m.
Hora de entrada a sedimentación	05:06 p.m.	05:08 p.m.	05:10 p.m.
Hora de salida de sedimentación	05:26 p.m.	05:28 p.m.	05:30 p.m.
Altura de fino (mm)	46,00	45,00	45,00
Altura de arena (mm)	35,00	35,00	35,00
Equivalente de arena (%)	76,09	77,78	77,78
Equivalente de arena (% redondeado)	77,00	78,00	78,00
Promedio (%)		77,67	

Para el cálculo y desarrollo de la tabla anterior, se utilizó la ecuación 14:

$$Ea = \frac{Har}{Hac} \times 100 \dots\dots\dots [Ecuación 14]$$

Donde:

Ea = Equivalente de arena (%)

Har = Lectura de arena

Hac = Lectura de arcilla



Figura 13. Muestras para ensayo de equivalente de arena

4.1.2.10 Angularidad del agregado fino (ensayo ASTM C1252).

a. Agregado fino (arena par asfalto).

Este ensayo se ejecutó mediante el método “A” de la norma ASTM C1252 (2006).

- Equipos, herramientas y materiales.

Balanza con precisión de 0,01 g, cilindro metálico con volumen conocido, embudo metálico, soporte y marco metálico, recipiente para mezclado, bandeja con tamaño mayor al soporte y marco metálico, espátula, tamices normados (N° 8, N° 16, N° 30, N° 50, N° 100).

- Procedimiento.

De la arena para asfalto a utilizar se tomó una muestra para tamizarla y pesarla de acuerdo a lo requerido en el método “A” que se detalla en la tabla 37:

Tabla 37*Fracciones de tamaño individual para método "A"*

Fracción de tamaño individual		
N° 8 a N° 16	44 g	± 0.2 g
N° 16 a N° 30	57 g	± 0.2 g
N° 30 a N° 50	72 g	± 0.2 g
N° 50 a N° 100	17 g	± 0.2 g
Total muestra	190 g	

Fuente: ASTM C1252, 2006

Con la muestra determinada (Peso total=190 g) se mezclaron todas las fracciones de los diferentes tamaños en el recipiente, hasta tener una mezcla homogénea, seguidamente se colocó el cilindro metálico al centro del soporte y con un dedo se bloqueó la salida del embudo a la vez que se dejaba caer toda la muestra sobre él, se retiró el dedo y se dejó caer libremente la muestra en el cilindro metálico, finalmente se enrasó el material sobrante con ayuda de la espátula y se dio golpes suaves para un ligero asentamiento de las partículas de la muestra. Se tomó apunte del peso del cilindro metálico más la muestra en la balanza, todos los datos se muestran en la tabla 38:

Tabla 38*Resultado del ensayo de angularidad del agregado fino*

N° de pruebas	Volumen del cilindro (ml)	Peso del agregado fino más el cilindro (g)	Peso específico del agregado fino (g/cm³)	Vacíos no compactados (%)
Prueba N° 1	1055,82	342,46	2,70	87,97
Prueba N° 2	1055,82	343,15	2,70	87,95
Prueba N° 3	1055,82	343,03	2,70	87,95
Promedio (%)				87,96

Para obtener los resultados antes detallados se utilizó la ecuación 15:

$$Aaf = \frac{Vc - \left(\frac{Pafc}{Peaf}\right)}{Vc} \times 100 \dots\dots\dots [Ecuación 15]$$

Donde:

Aaf = Angularidad del agregado fino (%)

Vc = Volumen del cilindro metálico (cm³)

Pafc = Peso del agregado fino más el peso del cilindro metálico (g)

Peaf = Peso específico bruto del agregado fino (g/cm³)



Figura 14. Equipos para ensayo de angularidad del agregado fino

4.1.2.11 Determinación de índice de plasticidad en agregado fino, malla N° 40

(ensayos MTC E 110 y E 111).

a. Determinación del límite líquido (ensayo MTC E 110).

- *Equipos, herramientas y materiales.*

Balanza con precisión de 0,01 g, horno (capacidad 110 ± 5 °C), aparato del límite líquido (cuchara Casagrande), agua destilada, vasija de porcelana para mezclado, espátula, acanalador normado, recipientes, calibrador, tamiz normado (N° 40).

- *Procedimiento.*

Se empezó tamizando una cantidad aproximada de un kg de arena para asfalto por la malla N° 40, del material pasante se extrajo una muestra de 200 g la cual se mezcló con agua destilada haciendo uso de la espátula para obtener una mezcla trabajable y homogénea, luego se colocó una porción de mezcla en la cuchara Casagrande, se hizo una división o ranura con el acanalador, pero al realizar los giros sólo se pudo contabilizar entre 8 y 10 golpes antes de que se cierre la ranura, se intentó hasta en tres oportunidades el ensayo antes descrito obteniendo resultados similares, ante la imposibilidad de registrar el límite líquido tal como lo indica la norma MTC E 110 se procedió a reportar al agregado fino como no plástico.



Figura 15. Ensayo de límite líquido del agregado fino (pasante de malla N° 40)

b. *Determinación del límite plástico e índice de plasticidad (ensayo MTC E 111).*

- *Equipos, herramientas y materiales.*

Balanza con precisión de 0,01 g, horno (capacidad 110 ± 5 °C), agua destilada, vasija de porcelana para mezclado, espátula, vidrio grueso esmerilado, recipientes, tamiz normado (N° 40).

- *Procedimiento.*

Como el límite líquido no se pudo determinar y por lo tanto se clasificó al agregado fino como no plástico, se intentó realizar el ensayo de límite plástico con la mezcla amasada, pero no se pudo formar los cilindros en el vidrio esmerilado como lo solicita el ensayo MTC E 111.



Figura 16. Resultado de intento de ensayo de límite plástico (pasante de malla N° 40)

4.1.2.12 Determinación de índice de plasticidad en agregado fino, malla N° 200 (ensayos MTC E 110 y E 111).

a. Determinación del límite líquido (ensayo MTC E 110).

- *Equipos, herramientas y materiales.*

Balanza con precisión de 0,01 g, horno (capacidad 110 ± 5 °C), aparato del límite líquido (cuchara Casagrande), agua destilada, vasija de porcelana para mezclado, espátula, acanalador normado, recipientes, calibrador, tamiz normado (N° 200).

- *Procedimiento.*

Una cantidad aproximada de dos kg de arena para asfalto se tamizó por la malla N° 200, del material pasante se extrajo una muestra de 200 g la cual se amasó con agua destilada y se ensayó en la cuchara Casagrande tal cual se hizo con la muestra del pasante de la Malla N° 40 descrito anteriormente. Al finalizar este ensayo se registraron los datos en la tabla 39:

Tabla 39

Resultados del ensayo de límite líquido (malla N° 200)

Ensayo de límite líquido				
Descripción de tara	#	256	257	251
N° de golpes	N°	18	26	35
Peso de tara	g	26,34	26,35	26,31
Peso de tara + suelo húmedo	g	37,94	38,09	38,15
Peso de tara + suelo seco	g	35,00	35,20	35,34
Peso de agua	g	2,94	2,89	2,81
Peso de suelo seco	g	8,66	8,85	9,03
Contenido de humedad	%	33,95	32,66	31,12

Para obtener los resultados antes detallados se utilizaron las ecuaciones 16, 17 y 18:

$$P_{agua} = P_{tsh} - P_{tss} \dots\dots\dots [Ecuación 16]$$

Donde:

P_{agua} = Peso del agua (g)

P_{tsh} = Peso de tara más el peso del suelo húmedo (g)

P_{tss} = Peso de tara más el peso del suelo seco (g)

$$P_{ss} = P_{tss} - P_{ta} \dots\dots\dots [Ecuación 17]$$

Donde:

Pss = Peso del suelo seco (g)

Ptss = Peso de tara más el peso del suelo seco (g)

Pta = Peso de tara (g)

$$H = \frac{P_{\text{agua}}}{P_{\text{ss}}} \times 100 \dots\dots\dots [\text{Ecuación 18}]$$

Donde:

H= Contenido de humedad (%)

Pagua = Peso del agua (g)

Pss = Peso del suelo seco (g)

Con los resultados de la tabla 39 se puede obtener la figura 17 de contenido de humedad del agregado fino (pasante de malla N° 200):

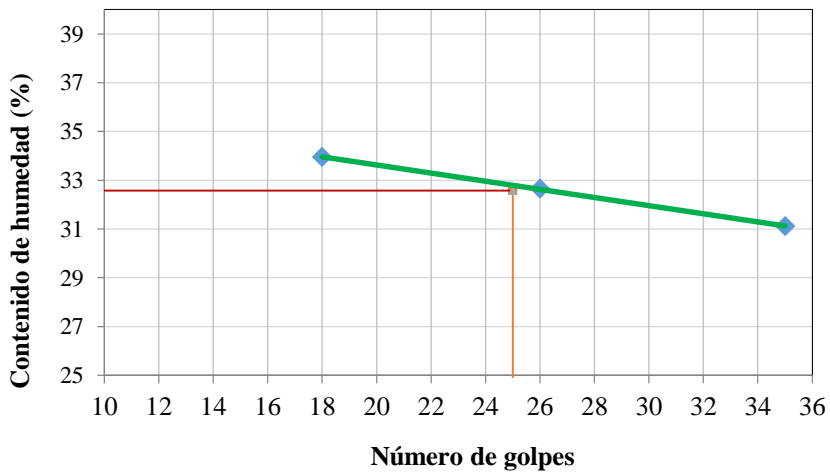


Figura 17. Gráfica de contenido de humedad del agregado fino (pasante de malla N° 200)

b. Determinación del límite plástico e índice de plasticidad (ensayo MTC E 111).

- Equipos, herramientas y materiales.

Balanza con precisión de 0,01 g, horno (capacidad 110 ± 5 °C), agua destilada, vasija de porcelana para mezclado, espátula, vidrio grueso esmerilado, recipientes, tamiz normado (N° 200).

- Procedimiento.

Para este ensayo se tomó parte de la muestra que se amasó en el ensayo de Límite plástico, pero al intentar formar los cilindros en el vidrio esmerilado conforme lo indica el ensayo MTC E 111, éste se desmoronaba y no tenía consistencia, no pudiendo formarse los cilindros y por ende se declaró a la arena para asfalto con un Índice de plasticidad NP (no plástico), tal como lo indica el ensayo MTC E 211 para estos casos.



Figura 18. Intento de ensayo de límite plástico (pasante de malla N° 200)

4.1.2.13 Sales solubles en agregados finos (ensayo MTC E 219).

a. *Agregado fino (arena para asfalto).*

- *Equipos, herramientas y materiales.*

Balanza con precisión de 0,01 g, horno (capacidad 110 ± 5 °C), tubo de ensayo, vaso de precipitado, papel de filtrado, agua destilada, tamiz normado (N° 10), pírex o crisol.

- *Procedimiento.*

Se tamizó material por la malla N° 10 del cual se tomó 100 g como muestra (pasante), luego se secó en el horno hasta obtener un peso constante. El siguiente paso fue mezclar la muestra con 300 ml de agua destilada que luego se agitó dejó sedimentar, posterior a ello se procedió con el filtrado vertiendo la solución en el vaso de precipitado. Paralelamente se secó y pesó el crisol, para luego verter en él 100 ml de la solución resultante del filtrado. A continuación se dejó secar el crisol con la solución en el horno a 110 ± 5 °C, finalmente se pesó el crisol con el residuo de sales. Los datos tomados en este ensayo se presentan en la tabla 40:

Tabla 40

Resultados del ensayo de sales solubles en agregado fino

Ensayo	N° 1
Crisol n°	2
Solución	100,00
Peso crisol + solución	169,21
Peso crisol + sal residual	69,31
Peso crisol	69,20
Peso sal residual	0,11
Peso agua evaporada	99,90
% Sales solubles	0,11

Para obtener los resultados de la tabla 40 se utilizaron las ecuaciones 19, 20 y 21:

$$P_{sr} = P_{csr} - P_{cri} \dots\dots\dots [Ecuación 19]$$

Donde:

P_{sr} = Peso de sal residual (g)

P_{csr} = Peso de crisol + sal residual (g)

P_{cri} = Peso de crisol (g)

$$P_{aev} = P_{csol} - P_{csr} \dots\dots\dots [Ecuación 20]$$

Donde:

P_{aev} = Peso de agua evaporada (g)

P_{csol} = Peso de crisol + solución (g)

P_{csr} = Peso de crisol + sal residual (g)

$$\%S_s = \frac{P_{csr}}{P_{aev}} \times 100 \dots\dots\dots [Ecuación 21]$$

Donde:

$\%S_s$ = Porcentaje de sales solubles (%)

P_{csr} = Peso de crisol + sal residual (g)

P_{aev} = Peso de agua evaporada (g)



Figura 19. Procedimiento de ensayo de sales solubles

4.1.2.14 Peso específico y absorción de agregados gruesos (ensayo MTC E 206, ASTM C127).

a. Agregado grueso (piedra chancada tamaño máximo 3/4").

- Equipos, herramientas y materiales.

Balanza con precisión de 0,5 y con capacidad de 5000 g, cesta o canastilla con malla de alambre para suspender sobre la balanza (abertura correspondiente al tamiz N° 6 o menor), depósito de agua (capacidad para sumergir la cesta), horno (capacidad 110 ± 5 °C), tamiz normado (N° 4).

- Procedimiento.

Con ayuda del tamiz N° 4 se obtuvo un material retenido del cual se pesó una muestra aproximada de 3000 g, seguidamente se lavó y se dejó sumergido en agua por 24 horas. Pasado este tiempo se sacó la muestra y con ayuda de una toalla se secó superficialmente (peso de la muestra superficialmente seca), a continuación se colocó la muestra en la cesta y se sumergió en el depósito con agua (peso sumergido

en agua), posterior a ello se secó la muestra a una temperatura constante de 110 °C, finalmente se dejó enfriar hasta ser manipulable con las manos y se obtuvo un peso secado al horno.

Concluido el procedimiento del ensayo, se consolidaron los datos tomados los cuales se presentan en la tabla 41:

Tabla 41

Resultados del ensayo de peso específico y absorción del agregado grueso (piedra chancada 3/4")

Símbolo	Peso específico norma ASTM C127	Piedra chancada 3/4"
		Muestra N° 1
A	Peso de piedra saturada sumergida en agua	1099,00 g
B	Peso al aire de piedra saturada y superficialmente seca	1821,00 g
C	Peso de piedra seca al horno	1769,00 g
	Peso específico bulk	2,45 g/cm ³
	Peso específico de piedra saturada superficialmente seca	2,52 g/cm ³
	Peso específico aparente o nominal	2,64 g/cm ³
Porcentaje de absorción		2,94 %

Para el desarrollo de la tabla anterior se utilizaron las ecuaciones 22, 23, 24 y 25:

$$PE_b = \frac{C}{B - A} \dots\dots\dots [Ecuación 22]$$

Donde:

PE_b = Peso específico bulk (g/cm³)

A = Peso de piedra seca al horno (g)

B = Peso al aire de piedra saturada y superficialmente seca (g)

C = Peso de piedra saturada sumergida en agua (g)

$$PE_{ss} = \frac{B}{B - A} \dots\dots\dots [Ecuación 23]$$

Donde:

PE_{ss} = Peso específico de piedra saturada superficialmente seca (g/cm³)

A = Peso de piedra seca al horno (g)

B = Peso al aire de piedra saturada y superficialmente seca (g)

$$PE_n = \frac{C}{C - A} \dots\dots\dots [Ecuación 24]$$

Donde:

PE_n = Peso específico aparente o nominal (g/cm³)

A = Peso de piedra seca al horno (g)

C = Peso de piedra saturada sumergida en agua (g)

$$\%Ag = \frac{(B - C)}{C} \times 100 \dots\dots\dots [Ecuación$$

25]

Donde:

%Ag = Porcentaje de absorción del agregado grueso (%)

A = Peso de piedra seca al horno (g)

C = Peso de piedra saturada sumergida en agua (g)

b. Agregado grueso (piedra chancada o gravilla de 3/8").

- Procedimiento.

Para este agregado se ejecutó el mismo procedimiento que se realizó para la piedra chancada de 3/4" antes descrita, con los datos recogidos y haciendo uso de las ecuaciones 22, 23, 24 y 25 se obtuvieron los resultados de la tabla 42:

Tabla 42

Resultados del ensayo de peso específico y absorción del agregado grueso (piedra chancada o gravilla de 3/8")

Símbolo	Peso específico norma ASTM C127	Piedra chancada 3/8" Muestra N° 1
A	Peso de piedra saturada sumergida en agua	787,00 g
B	Peso al aire de piedra saturada y superficialmente seca	1316,00 g
C	Peso de piedra seca al horno	1265,00 g
	Peso específico bulk	2,39 g/cm ³
	Peso específico de piedra saturada superficialmente seca	2,49 g/cm ³
	Peso específico aparente o nominal	2,65 g/cm ³
	Porcentaje de absorción	4,03 %



Figura 20. Procedimiento de ensayo de peso específico en agregado grueso

4.1.2.15 Peso específico y absorción de agregados finos (ensayo MTC E 205).

a. Agregado fino (arena para asfalto).

- Equipos, herramientas y materiales.

Balanza con precisión de 0,1 g, horno (capacidad 110 ± 5 °C), frasco volumétrico con capacidad de 500 cm³, molde cónico y metálico normado, varilla para apisonado normado (ambos según especificaciones técnicas del MTC E 205), recipientes, bandejas metálicas, equipo vibrador para extraer burbujas de aire.

- Procedimiento.

Se pesó aproximadamente 1000 g de la arena para asfalto (previamente cuarteado), luego del cual se la secó a temperatura constante de 110 °C, posterior a ello se le agregó agua y se le dejó reposando durante 24 horas. Pasado este tiempo se decantó el agua cuidando de no perder el material fino, se extendió el material en una bandeja al aire para su secado superficial, se removió el material para que tenga un secado uniforme. Con el material aparentemente seco se hizo la prueba del cono llenando el molde metálico con el material y luego golpeándolo 25 veces con la varilla, esta prueba se realizó en tres ocasiones y culminó cuando el cono se derrumbó al quitar el molde. Con el material apto (superficialmente seco) se pesó 500 g y se vertió en el frasco así como también se le agregó agua hasta alcanzar la marca de 500 cm³, seguidamente se le extrajo la burbujas de aire con el equipo vibrador mecánico. Luego se llenó el frasco hasta su capacidad calibrada a una temperatura de 23 ± 2 °C y se tomó nota del peso. Finalmente se removió el agregado del frasco y se llevó al horno para secarlo a una temperatura constante de 110 °C, con la muestra seca se registró su peso final y se consolidó en la tabla 43:

Tabla 43

Resultados del ensayo de peso específico y absorción del agregado fino

Símbolo	Peso específico norma ASTM C127	Arena para asfalto
		Muestra N° 1
A	Peso de arena saturada superficialmente seca	500,00 g
B	Peso de tarro + arena seca después del horno	490,16 g
C	Peso de fiola + agua al enrase	666,68 g
D	Peso de fiola + arena saturada superficialmente seca	975,07 g
	Peso específico bulk	2,56 g/cm ³
	Peso específico de arena saturada superficialmente seca	2,61 g/cm ³
	Peso específico seca aparente o nominal	2,70 g/cm ³
	Porcentaje de absorción	2,01 %

Para la obtención de los distintos pesos específicos del agregado fino se utilizaron las ecuaciones 26, 27, 28 y 29:

$$PE_{bf} = \frac{B}{A + C - D} \dots\dots\dots [Ecuación$$

26]

Donde:

PE_{bf} = Peso específico bulk del agregado fino (g/cm³)

A = Peso de arena saturada superficialmente seca (g)

B = Peso de tarro + arena seca después del horno (g)

C = Peso de fiola + agua al enrase (g)

D = Peso de fiola + arena saturada superficialmente seca (g)

$$PE_{ssf} = \frac{A}{A + C - D} \dots\dots\dots [Ecuación 27]$$

Donde:

PE_{ssf} = Peso específico de arena saturada superficialmente seca (g/cm³)

A = Peso de arena saturada superficialmente seca (g)

C = Peso de fiola + agua al enrase (g)

D = Peso de fiola + arena saturada superficialmente seca (g)

$$PEnf = \frac{B}{B + C - D} \dots\dots\dots [Ecuación 28]$$

Donde:

PEnf = Peso específico aparente o nominal (g/cm³)

B = Peso de tarro + arena seca después del horno (g)

C = Peso de fiola + agua al enrase (g)

D = Peso de fiola + arena saturada superficialmente seca (g)

$$\% Af = \frac{(A - B)}{B} \times 100 \dots\dots\dots [Ecuación$$

29]

Donde:

% Af = Porcentaje de absorción del agregado fino (%)

A = Peso de arena saturada superficialmente seca (g)

B = Peso de tarro + arena seca después del horno (g)



Figura 21. Extracción de burbujas de fiola para ensayo de peso específico en agregado fino

b. Filler.

- Equipos, herramientas y materiales.

Balanza con precisión de 0,1 g, horno (cap. 110 ± 5 °C), frasco volumétrico con capacidad de 500 cm³, molde cónico y metálico normado, varilla para apisonado normado (ambos según especificaciones técnicas del MTC E 205), recipientes, bandejas metálicas, equipo vibrador para extraer burbujas de aire.

- Procedimiento.

Para obtener los resultados de los distintos pesos específicos del filler, se ejecutaron los mismos procedimientos que se realizaron para la arena para asfalto anteriormente descrito, en la tabla 44 se presentan los resultados de los datos recogidos y procesados con las ecuaciones 26, 27, 28 y 29:

Tabla 44

Resultados del ensayo de peso específico y absorción del filler

Símbolo	Peso específico norma ASTM C128	Filler Muestra N° 1
A	Peso de muestra saturada superficialmente seca	300,01 g
B	Peso de tarro + muestra seca después del horno	289,57 g
C	Peso de fiola + agua al enrase	666,82 g
D	Peso de fiola + muestra saturada superficialmente seca	847,14 g
	Peso específico bulk	2,42 g/cm ³
	Peso específico de muestra saturada superficialmente seca	2,51 g/cm ³
	Peso específico seca aparente o nominal	2,65 g/cm ³
	Porcentaje de absorción	3,61 %



Figura 22. Pesado de fiola + filler + agua para ensayo de peso específico en agregado fino

4.1.2.16 Resultados de ensayos realizados al agregado grueso y fino.

En las tablas 45 y 46 se muestran los resultados de los ensayos requeridos tanto para el agregado grueso como para el agregado fino según la norma EG-2013:

Tabla 45

Resultados de ensayos requeridos para el agregado grueso

Descripción de Ensayos	Norma	Requerimiento	Resultados obtenidos
Durabilidad (al sulfato de magnesio)	MTC E 209	18 % máx.	10,91 %
Abrasión Los Ángeles	MTC E 207	40 % máx.	14,00 %
Partículas chatas y alargadas	ASTM 4791	10 % máx.	10,38 %
Caras fracturadas	MTC E 210	85/50	12/10
Absorción	MTC E 206	1,0 % máx.	2,94 %

Tabla 46*Resultados de ensayos requeridos para el agregado fino*

Descripción de Ensayos	Norma	Requerimiento altitud (msnm) ≤ 3000	Resultados obtenidos
Equivalente de arena	MTC E 114	60 %	77,67 %
Angularidad del agregado fino	MTC E 222	30 %	87,96 %
Índice de plasticidad (malla N° 40)	MTC E 111	NP	NP
Durabilidad (al sulfato de magnesio)	MTC E 209	-	8,88 %
Índice de plasticidad (malla N° 200)	MTC E 111	4 % máx.	NP
Sales solubles totales	MTC E 219	0,5 % máx.	0,11 %
Absorción	MTC E 205	0,5 % máx.	2,01 %

Es necesario aclarar que los agregados no satisfacen en algunos requerimientos que exige la norma EG-2013, lo cual tendría que ser reforzado y/o mejorado en una posible utilización para algún proyecto real, pero hay que tomar en cuenta que la presente investigación tiene como principal estudio y punto crítico los índices de plasticidad, éstos si se han cumplido según lo requerido.

4.1.3 Dosificación de agregados y asfalto

Para la obtención de la dosificación y posteriores diseños de mezcla asfáltica con diferentes porcentajes de filler con índices de plasticidad (3 %, 6 % y 12 %) se tuvo que realizar el siguiente procedimiento:

4.1.3.1 Combinación de agregados por el Método de dosificación por peso.

También es conocido como el método analítico o tanteo sucesivo, para cuyo trabajo se utiliza la ecuación 30:

$$P = Aa + Bb + Cc \dots Nn \dots \dots \dots \text{ [Ecuación 30]}$$

Donde:

P = Porcentaje de un material que pasa un tamiz dado resultante de la combinación de los agregados A, B, C,... N (%)

A, B, C,... N = Porcentaje de material que pasa un tamiz dado, para cada uno de los agregados empleados en la combinación (%)

a, b, c,..., n = Proporciones expresadas en forma decimal, utilizados en la combinación para cada uno de los agregados empleados y cuya sumatoria debe ser igual a 1,00 (número decimal)

Para la presente investigación se tuvo que realizar la combinación de los siguientes agregados: Piedra chancada de 3/4", piedra chancada de 3/8" (gravilla), arena para asfalto, filler de origen natural (plástico) y no plástico.

a. Combinación de agregados para el diseño de mezcla asfáltica con filler incorporado de 6 % de índice de plasticidad.

En la presente investigación se realizó una primera combinación de agregados para el diseño de mezcla asfáltica para un filler con 6 % de índice de plasticidad, a partir del cual se pudieron determinar los diseños para filler con 3 % y 12 % de índice de plasticidad, la combinación de agregados y su curva granulométrica se muestran en la tabla 47 y figura 23 respectivamente:

Tabla 47

Combinación de agregados, diseño de mezcla asfáltica con filler = 6 % de índice de plasticidad

Malla	Piedra chancada de 3/4"		Piedra chancada de 3/8"		Arena para asfalto		Filler (plástico)		Combinación de agregados	
	% Ret.	% Pasa	% Ret.	% Pasa	% Ret.	% Pasa	% Ret.	% Pasa	% Ret.	% Pasa
75,00	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00
63,00	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00
50,00	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00
38,10	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00
25,00	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00
19,00	0,20	99,80	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00	0,06	99,94
12,50	64,78	35,02	0,06	99,94	0,00	100,00	0,00	100,00	19,45	80,49
9,50	27,15	7,87	0,83	99,11	0,00	100,00	0,00	100,00	8,32	72,17
6,30	7,58	0,29	52,41	46,70	0,00	100,00	0,00	100,00	13,28	58,89
4,75	0,20	0,09	38,03	8,67	4,23	95,77	0,00	100,00	10,04	48,86
2,36	0,09	0,00	8,05	0,62	20,42	75,35	0,00	100,00	11,31	37,54
1,18	0,00	0,00	0,28	0,34	19,38	55,97	0,00	100,00	9,17	28,38
0,71	0,00	0,00	0,09	0,25	14,25	41,72	0,00	100,00	6,72	21,66
0,30	0,00	0,00	0,06	0,19	16,82	24,90	3,39	96,61	7,99	13,67
0,15	0,00	0,00	0,19	0,00	14,47	10,43	30,65	65,96	7,45	6,22
0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	6,20	4,23	26,82	39,14	3,45	2,77

Nota: Esta combinación de agregados tiene una composición de: 30 % piedra chancada 3/4" + 21 % piedra chancada 3/8" + 47 % arena para asfalto + 2 % filler (plástico)

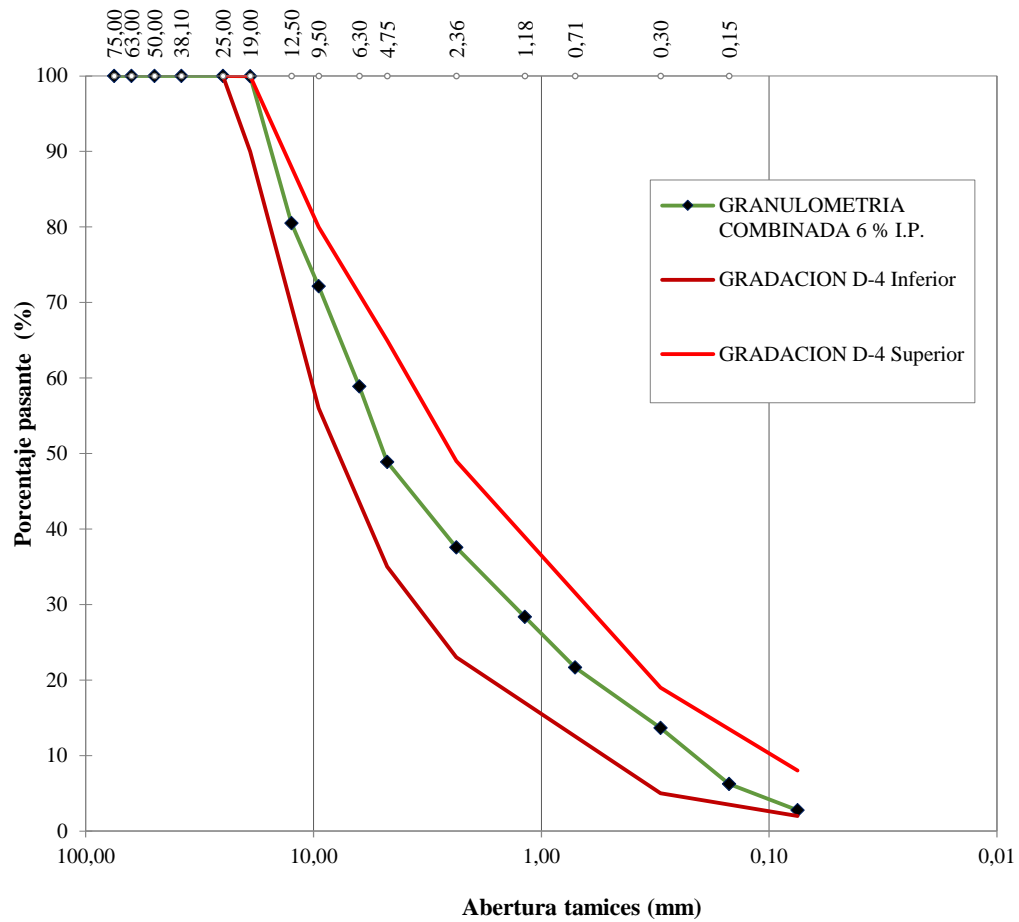


Figura 23. Curva granulométrica de la combinación de agregados, diseño de mezcla asfáltica con 6 % de índice de plasticidad en el filler

Para las curvas superior e inferior mostradas en la figura 23 se tuvo en consideración lo especificado en la Norma ASTM 3515 para mezclas densas, cuyos parámetros se muestran en la tabla 48:

Tabla 48

Especificación ASTM D 3515 para mezclas densas, gradación D-4

Malla (mm)	Gradación D-4	
	Inferior % pasante	Superior % pasante
25,000	100	100
19,000	90	100
9,500	56	80
4,750	35	65
2,360	23	49
0,300	5	19
0,075	2	8

Fuente: ASTM D 3515, 2001

b. Combinación de agregados para el diseño de mezcla asfáltica con filler incorporado de 3 % de índice de plasticidad.

De acuerdo al procedimiento antes detallado, para obtener las proporciones en la combinación de agregados y conseguir un diseño de mezcla asfáltica con filler incorporado de 3 % índice de plasticidad, se tuvo que disminuir el 50 % de filler (plástico) y reemplazar ese 50 % con filler NP de la mezcla asfáltica anterior la cual tenía filler con 6 % de plasticidad, dicho esto se obtuvo la siguiente combinación de agregados en la tabla 49 y su respectiva curva granulométrica en la figura 24:

Tabla 49

Combinación de agregados, diseño de mezcla asfáltica con filler = 3 % de índice de plasticidad

Malla	Piedra chancada de 3/4"		Piedra chancada de 3/8"		Arena para asfalto		Filler (plástico)		Combinación de agregados	
	% Ret.	% Pasa	% Ret.	% Pasa	% Ret.	% Pasa	% Ret.	% Pasa	% Ret.	% Pasa
75,00	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00
63,00	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00
50,00	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00
38,10	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00
25,00	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00
19,00	0,20	99,80	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00	0,06	99,94
12,50	64,78	35,02	0,06	99,94	0,00	100,00	0,00	100,00	19,45	80,49
9,50	27,15	7,87	0,83	99,11	0,00	100,00	0,00	100,00	8,32	72,17
6,30	7,58	0,29	52,41	46,70	0,00	100,00	0,00	100,00	13,28	58,89
4,75	0,20	0,09	38,03	8,67	4,23	95,77	0,00	100,00	10,04	48,86
2,36	0,09	0,00	8,05	0,62	20,42	75,35	0,00	100,00	11,31	37,54
1,18	0,00	0,00	0,28	0,34	19,38	55,97	0,00	100,00	9,17	28,38
0,71	0,00	0,00	0,09	0,25	14,25	41,72	0,00	100,00	6,72	21,66
0,30	0,00	0,00	0,06	0,19	16,82	24,90	3,39	96,61	7,99	13,67
0,15	0,00	0,00	0,19	0,00	14,47	10,43	30,65	65,96	7,45	6,22
0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	6,20	4,23	26,82	39,14	3,45	2,77

Nota: Esta combinación de agregados tiene una composición de: 30 % piedra chancada 3/4" + 21 % piedra chancada 3/8" + 47 % arena para asfalto + 2 % filler (1 % filler plástico y 1 % filler NP)

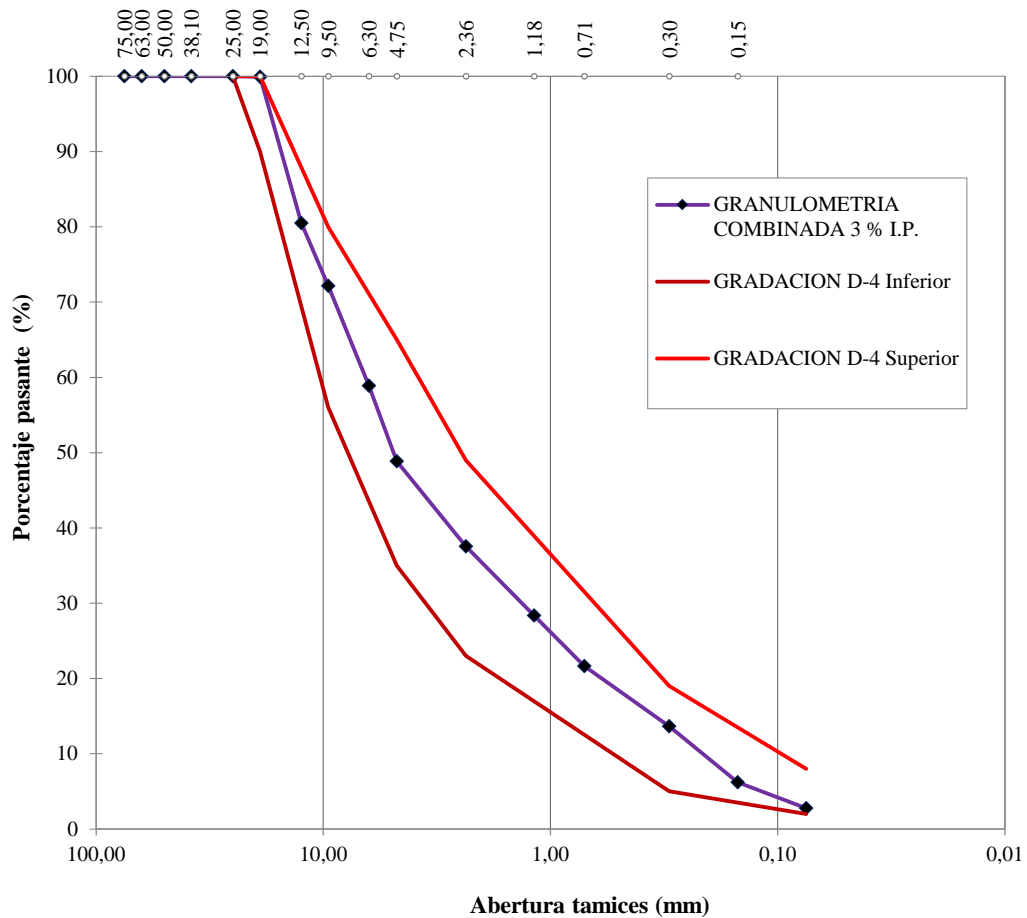


Figura 24. Curva granulométrica de la combinación de agregados, diseño de mezcla asfáltica con 3 % de índice de plasticidad en el filler

c. Combinación de agregados para el diseño de mezcla asfáltica con filler incorporado de 12 % de índice de plasticidad.

De manera similar que los procedimientos anteriores, para obtener un diseño de mezcla asfáltica con filler de 12 % de índice de plasticidad, se tuvo que duplicar la cantidad del filler plástico del diseño con 6 % de índice de plasticidad y disminuir esa misma cantidad en la arena para asfalto (la cual era NP), resultado de ello se obtuvo la siguiente combinación de agregados de la tabla 50 y curva granulométrica en la figura 25:

Tabla 50

Combinación de agregados, diseño de mezcla asfáltica con filler = 12 % de índice de plasticidad

Malla	Piedra chancada de 3/4"		Piedra chancada de 3/8"		Arena para asfalto		Filler (plástico)		Combinación de agregados	
	% Ret.	% Pasa	% Ret.	% Pasa	% Ret.	% Pasa	% Ret.	% Pasa	% Ret.	% Pasa
75,00	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00	-	100,00
63,00	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00
50,00	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00
38,10	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00
25,00	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00
19,00	0,20	99,80	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00	0,06	99,94
12,50	64,78	35,02	0,06	99,94	0,00	100,00	0,00	100,00	19,45	80,49
9,50	27,15	7,87	0,83	99,11	0,00	100,00	0,00	100,00	8,32	72,17
6,30	7,58	0,29	52,41	46,70	0,00	100,00	0,00	100,00	13,28	58,89
4,75	0,20	0,09	38,03	8,67	4,23	95,77	0,00	100,00	9,95	48,94
2,36	0,09	0,00	8,05	0,62	20,42	75,35	0,00	100,00	10,91	38,04
1,18	0,00	0,00	0,28	0,34	19,38	55,97	0,00	100,00	8,78	29,26
0,71	0,00	0,00	0,09	0,25	14,25	41,72	0,00	100,00	6,43	22,83
0,30	0,00	0,00	0,06	0,19	16,82	24,90	3,39	96,61	7,72	15,11
0,15	0,00	0,00	0,19	0,00	14,47	10,43	30,65	65,96	7,78	7,33
0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	6,20	4,23	26,82	39,14	3,86	3,47

Nota: Esta combinación de agregados tiene una composición de: 30 % piedra chancada 3/4" + 21 % piedra chancada 3/8" + 45 % arena para asfalto + 4 % filler (plástico)

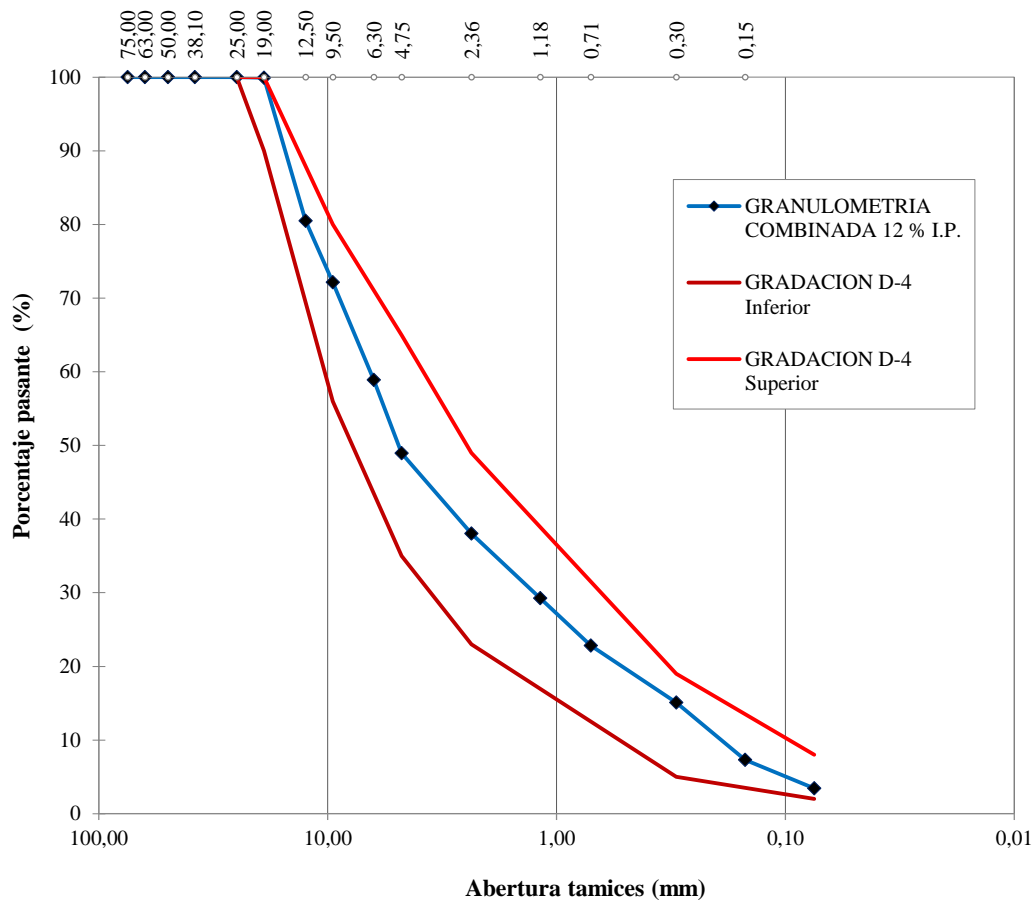


Figura 25. Curva granulométrica de la combinación de agregados, diseño de mezcla asfáltica con 12 % de índice de plasticidad en el filler

4.1.3.2 Determinación de la cantidad asfalto (aproximación por el método del índice asfáltico).

Para una primera aproximación de conocer el contenido mínimo de asfalto y obtener un punto de partida para elegir los porcentajes a aplicar en los diseños de mezcla asfáltica, se empleó la fórmula teórica del Índice asfáltico mostrada a través de la ecuación 31:

$$\% \text{Asfm} = n (0,41G + 2,05g + 15,38A + 53,30F) \dots\dots\dots [\text{Ecuación 31}]$$

Donde:

$\%As_{fm}$ = Porcentaje de asfalto mínimo en la mezcla (%)

n = Índice asfáltico según la absorción del material (valor numérico)

G = Porcentaje de material entre el tamiz 3/4" y el N° 4 (%)

g = Porcentaje de material entre el tamiz N° 4 y el N° 40 (%)

A = Porcentaje de material entre el tamiz N° 40 y el N° 200 (%)

F = Porcentaje de material que pasa el tamiz N° 200 (%)

Los índices asfálticos (I.A.) comúnmente utilizados son:

- I.A. = 0,005 para grava y arena o material redondeado de baja absorción
- I.A. = 0,006 para grava angulosa o redonda, triturada de baja absorción
- I.A. = 0,007 para grava angulosa o redondeada de alta absorción y roca triturada de mediana absorción
- I.A. = 0,008 para roca triturada de alta absorción
- Se considera absorción baja a la que es menor de 2 %, absorción mediana la que está comprendida entre 2 y 4 %, absorción alta a la mayor a 4 %.

Aplicando la ecuación 31 con los datos de la combinación de agregados de los diseños de mezcla asfáltica con filler de 3 %, 6 % y 12 % se obtienen los resultados de la tabla 51:

Tabla 51

Resultados de la determinación del contenido mínimo de asfalto por el método del índice asfáltico

Descripción de diseño		índice asfáltico “n”	G (%)	G (%)	A (%)	F (%)	%Asfm
Diseño	3 %=I.P.	0,008	51,14	27,20	18,89	2,77	4,119
Diseño	6 %=I.P.	0,008	51,14	27,20	18,89	2,77	4,119
Diseño	12 %=I.P.	0,008	51,06	26,12	19,36	3,47	4,456
Promedio (%)							4,231

Nota: Para el valor de los índices asfálticos se tomó en consideración la absorción máxima de la piedra chancada de 3/4” y 3/8” de la presente investigación

De los resultados mostrados en la tabla 51, se tomó como contenido de asfalto mínimo 4,3 % (inicial) y en cumplimiento del “Manual de Ensayos de Materiales” - MTC E 504 Resistencia de mezclas bituminosas empleando el aparato Marshall, donde indica que se debe realizar incrementos cada 0,50 % del ligante (en este caso RC-250), los contenidos de asfalto con los que se prepararon las mezclas asfálticas fueron: 4,3 %, 4,8 %, 5,3 %, 5,8 % y 6,3 %.

4.1.3.3 Dosificación de agregados y asfalto para mezclas asfálticas.

a. Proporciones de agregados sin incluir asfalto líquido.

De las combinaciones de agregados antes determinadas se obtuvieron las siguientes proporciones mostradas en la tabla 52, sin considerar el asfalto líquido:

Tabla 52

Resumen de proporciones de agregados sin asfalto líquido

Agregados	Proporción para diseño con filler de 3 % I.P. (%)	Proporción para diseño con filler de 6 % I.P. (%)	Proporción para diseño con filler de 12 % I.P. (%)
Piedra chancada 3/4"	30,00	30,00	30,00
Piedra chancada 3/8"	21,00	21,00	21,00
Arena para asfalto	47,00	47,00	45,00
Filler	2,00	2,00	4,00
Total	100,00	100,00	100,00

Nota: a) I.P. = Índice de plasticidad; b) El filler para el diseño con 3 % I.P. es: 1 % filler plástico + 1 % filler NP, para los dos diseños restantes el filler es plástico en toda su proporción

b. Proporciones de agregados incluyendo asfalto líquido.

Con el porcentaje de asfalto mínimo determinado (4,30 %), se usó la ecuación 32 para incluir el asfalto líquido en los tres diseños de mezcla asfáltica planteados y las proporciones de agregados finales para la preparación de especímenes:

$$\%Paf = \frac{(100 - \%Asfm) \times (\%Pagr)}{100} \dots\dots\dots [Ecuación 32]$$

Donde:

%Paf = Proporción final de agregados, incluido asfalto líquido (%)

%Asfm = Porcentaje de asfalto mínimo en la mezcla (%)

%Pagr = Proporción de agregado sin asfalto líquido (%)

Aplicando la ecuación 32 se obtuvo las proporciones de agregados incluyendo asfalto líquido para los tres diseños de mezcla, se detallan en las tablas 53, 54 y 55:

Tabla 53

Proporciones de agregados incluyendo asfalto líquido, diseño de mezcla con filler 3 % de índice de plasticidad

Agregados	Proporción para diseño con filler de 3 % I.P. (sin asfalto) (%)	Proporciones finales para diseño con filler de 3 % I.P. (%)				
		4,30	4,80	5,30	5,80	6,30
Asfalto RC-250						
Piedra Chancada 3/4"	30,00	28,71	28,56	28,41	28,26	28,11
Piedra Chancada 3/8"	21,00	20,10	19,99	19,89	19,78	19,68
Arena para asfalto	47,00	44,98	44,74	44,51	44,27	44,04
Filler	2,00	1,91	1,90	1,89	1,88	1,87
Total	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Nota: a) I.P. = Índice de plasticidad; b) Se puede observar que mientras el porcentaje de asfalto RC-250 aumenta, los porcentajes de los agregados se reducen

Tabla 54

Proporciones de agregados incluyendo asfalto líquido, diseño de mezcla con filler 6 % de índice de plasticidad

Agregados	Proporción para diseño con filler de 6 % I.P. (sin asfalto) (%)	Proporciones finales para diseño con filler de 6 % I.P. (%)				
		4,30	4,80	5,30	5,80	6,30
Asfalto RC-250						
Piedra Chancada 3/4"	30,00	28,71	28,56	28,41	28,26	28,11
Piedra Chancada 3/8"	21,00	20,10	19,99	19,89	19,78	19,68
Arena para asfalto	47,00	44,98	44,74	44,51	44,27	44,04
Filler	2,00	1,91	1,90	1,89	1,88	1,87
Total	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Nota: a) I.P. = Índice de plasticidad; b) Se puede observar que mientras el porcentaje de asfalto RC-250 aumenta, los porcentajes de los agregados se reducen

Tabla 55

Proporciones de agregados incluyendo asfalto líquido, diseño de mezcla con filler 12 % de índice de plasticidad

Agregados	Proporción para diseño con filler de 12 % I.P. (sin asfalto) (%)	Proporciones finales para diseño con filler de 12 % I.P. (%)				
		4,30	4,80	5,30	5,80	6,30
Asfalto RC-250		4,30	4,80	5,30	5,80	6,30
Piedra Chancada 3/4"	30,00	28,71	28,56	28,41	28,26	28,11
Piedra Chancada 3/8"	21,00	20,10	19,99	19,89	19,78	19,68
Arena para asfalto	45,00	43,07	42,84	42,62	42,39	42,17
Filler	4,00	3,83	3,81	3,79	3,77	3,75
Total	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Nota: a) I.P. = Índice de plasticidad; b) Se puede observar que mientras el porcentaje de asfalto RC-250 aumenta, los porcentajes de los agregados se reducen

c. Cantidad de agregados y asfalto líquido en peso para elaboración de especímenes.

Determinadas las proporciones de agregados y asfalto líquido para cada diseño de mezcla asfáltica, el siguiente paso fue convertir ese porcentaje en peso (g) para fabricar los especímenes de 1100 g cada uno, para calcular los pesos de cada agregado y asfalto se aplicó la ecuación 33:

$$\text{Pagaf} = \frac{(\% \text{Paf} \times \text{Pesp})}{100} \dots\dots\dots [\text{Ecuación 33}]$$

Donde:

Pagaf = Peso de agregado o asfalto para cada espécimen (g)

%Paf = Porcentajes de proporciones finales de agregados y asfalto líquido (%)

Pesp = Peso total de espécimen (para este caso fue 1100 g)

Los pesos de los agregados y asfalto líquido para cada diseño de mezcla asfáltica se muestran en las tablas 56, 57 y 58:

Tabla 56

Cantidad de agregados y asfalto líquido en peso para cada espécimen, diseño de mezcla con filler 3 % de índice de plasticidad

Peso total de espécimen	1100,00 g				
% Asfalto líquido	4,30	4,80	5,30	5,80	6,30
Componentes de mezcla	Peso parcial (g)	Peso parcial (g)	Peso parcial (g)	Peso parcial (g)	Peso parcial (g)
Piedra chancada de 3/4"	315,81	314,16	312,51	310,86	309,21
Piedra chancada de 3/8"	221,07	219,91	218,76	217,60	216,45
Arena para asfalto	494,77	492,18	489,60	487,01	484,43
Filler	21,05	20,94	20,83	20,72	20,61
Asfalto RC-250	47,30	52,80	58,30	63,80	69,30
Peso total (g)	1100,00	1100,00	1100,00	1100,00	1100,00

Nota: El filler en peso para el presente diseño de mezcla es: 50 % filler plástico + 50 % filler NP, para los dos diseños restantes el filler es plástico en toda su proporción

Tabla 57

Cantidad de agregados y asfalto líquido en peso para cada espécimen, diseño de mezcla con filler 6 % de índice de plasticidad

Peso total de espécimen	1100,00 g				
% Asfalto líquido	4,30	4,80	5,30	5,80	6,30
Componentes de mezcla	Peso parcial (g)	Peso parcial (g)	Peso parcial (g)	Peso parcial (g)	Peso parcial (g)
Piedra chancada de 3/4"	315,81	314,16	312,51	310,86	309,21
Piedra chancada de 3/8"	221,07	219,91	218,76	217,60	216,45
Arena para asfalto	494,77	492,18	489,60	487,01	484,43
Filler	21,05	20,94	20,83	20,72	20,61
Asfalto RC-250	47,30	52,80	58,30	63,80	69,30
Peso total (g)	1100,00	1100,00	1100,00	1100,00	1100,00

Nota: El filler en peso para el presente diseño de mezcla es plástico en su totalidad

Tabla 58

Cantidad de agregados y asfalto líquido en peso para cada espécimen, diseño de mezcla con filler 12 % de índice de plasticidad

Peso total de espécimen	1100,00 g				
% Asfalto líquido	4,30	4,80	5,30	5,80	6,30
Componentes de mezcla	Peso parcial (g)	Peso parcial (g)	Peso parcial (g)	Peso parcial (g)	Peso parcial (g)
Piedra chancada de 3/4"	315,81	314,16	312,51	310,86	309,21
Piedra chancada de 3/8"	221,07	219,91	218,76	217,60	216,45
Arena para asfalto	473,72	471,24	468,77	466,29	463,82
Filler	42,11	41,89	41,67	41,45	41,23
Asfalto RC-250	47,30	52,80	58,30	63,80	69,30
Peso total (g)	1100,00	1100,00	1100,00	1100,00	1100,00

Nota: El filler en peso para el presente diseño de mezcla es plástico en su totalidad

d. Límites de consistencia de mezcla de agregados.

Con los pesos de los agregados determinados para cada % de asfalto líquido por cada diseño de mezcla asfáltica, lo siguiente fue pesar cada agregado para preparar un espécimen como muestra, luego esta combinación de agregados en seco se tamizó en la malla N° 200 para conocer sus límites tanto líquido como plástico y determinar su índice de plasticidad, el procedimiento que se siguió fue el descrito en el Manual de Ensayos MTC E 110 y E 111. Los resultados de índice de plasticidad de cada combinación de agregados por diseño de mezcla se muestran en las tablas 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66 y 67:

Tabla 59

Resultados del ensayo de límite líquido (malla N° 200), combinación de agregados para diseño de mezcla con filler 3 % de índice de plasticidad

Datos del ensayo				
Descripción de tara	#	228	256	251
N° de golpes	N°	15	24	32
Peso de tara	g	26,39	26,49	26,33
Peso de tara + suelo húmedo	g	37,64	38,99	39,70
Peso de tara + suelo seco	g	34,95	36,14	36,75
Peso de agua	g	2,69	2,85	2,95
Peso de suelo seco	g	8,56	9,65	10,42
Contenido de humedad	%	31,43	29,53	28,31

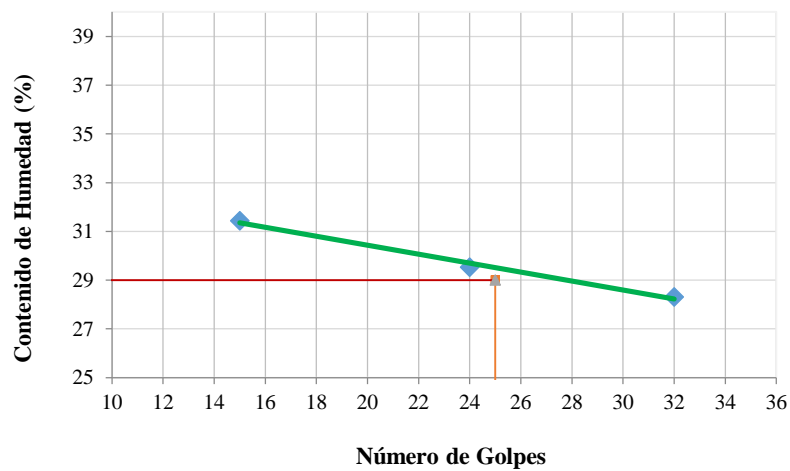


Figura 26. Gráfica de contenido de humedad del ensayo de límite líquido (malla N° 200), combinación de agregados para diseño de mezcla con filler 3 % de índice de plasticidad

Tabla 60

Resultados del ensayo de límite plástico (malla N° 200), combinación de agregados para diseño de mezcla con filler 3 % de índice de plasticidad

Datos del ensayo		
Descripción de tara	#	255 261
Peso de tara	g	13,05 12,59
Peso de tara + suelo húmedo	g	20,84 20,12
Peso de tara + suelo seco	g	19,22 18,58
Peso de agua	g	1,62 1,54
Peso de suelo seco	g	6,17 5,99
Contenido de humedad	%	26,26 25,71

Tabla 61

Índice de plasticidad de combinación de agregados para diseño de mezcla con filler 3 % índice de plasticidad

Límite líquido (%)	Límite plástico (%)	Índice de plasticidad (%)
29	26	3

Tabla 62

Resultados del ensayo de límite líquido (malla N° 200), combinación de agregados para diseño de mezcla con filler 6 % de índice de plasticidad

Datos del ensayo				
Descripción de tara	#	209	251	248
N° de golpes	N°	15	24	32
Peso de tara	g	25,08	26,31	23,98
Peso de tara + suelo húmedo	g	36,85	38,76	36,43
Peso de tara + suelo seco	g	33,72	35,56	33,33
Peso de agua	g	3,13	3,20	3,10
Peso de suelo seco	g	8,64	9,25	9,35
Contenido de humedad	%	36,23	34,59	33,16

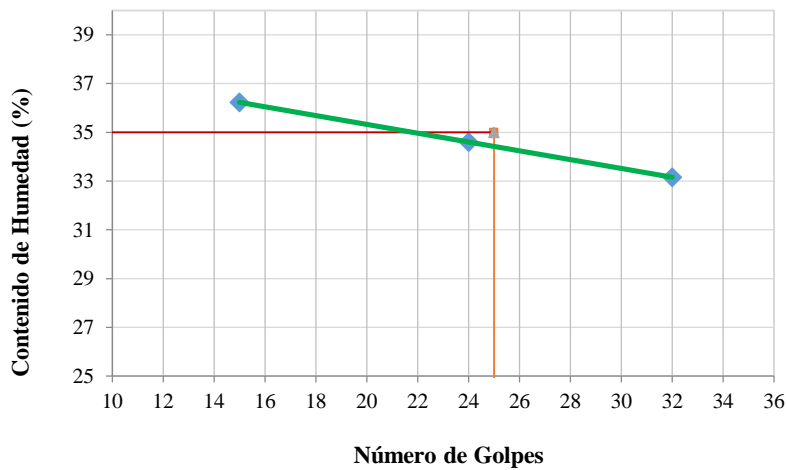


Figura 27. Gráfica de contenido de humedad del ensayo de límite líquido (malla N° 200), combinación de agregados para diseño de mezcla con filler 6 % de índice de plasticidad

Tabla 63

Resultados del ensayo de límite plástico (malla N° 200), combinación de agregados para diseño de mezcla con filler 6 % de índice de plasticidad

Datos del ensayo			
Descripción de tara	#	226	246
Peso de tara	g	12,98	12,69
Peso de tara + suelo húmedo	g	19,80	20,22
Peso de tara + suelo seco	g	18,29	18,53
Peso de agua	g	1,51	1,69
Peso de suelo seco	g	5,31	5,84
Contenido de humedad	%	28,44	28,94

Tabla 64

Índice de plasticidad de combinación de agregados para diseño de mezcla con filler 6 % índice de plasticidad

Límite líquido (%)	Límite plástico (%)	Índice de plasticidad (%)
35	29	6

Tabla 65

Resultados del ensayo de límite líquido (malla N° 200), combinación de agregados para diseño de mezcla con filler 12 % de índice de plasticidad

Datos del ensayo				
Descripción de tara	#	248	228	209
N° de golpes	N°	17	26	33
Peso de tara	g	23,96	26,38	25,06
Peso de tara + suelo húmedo	g	35,06	36,58	35,99
Peso de tara + suelo seco	g	31,59	33,44	32,67
Peso de agua	g	3,47	3,14	3,32
Peso de suelo seco	g	7,63	7,06	7,61
Contenido de humedad	%	45,48	44,48	43,63

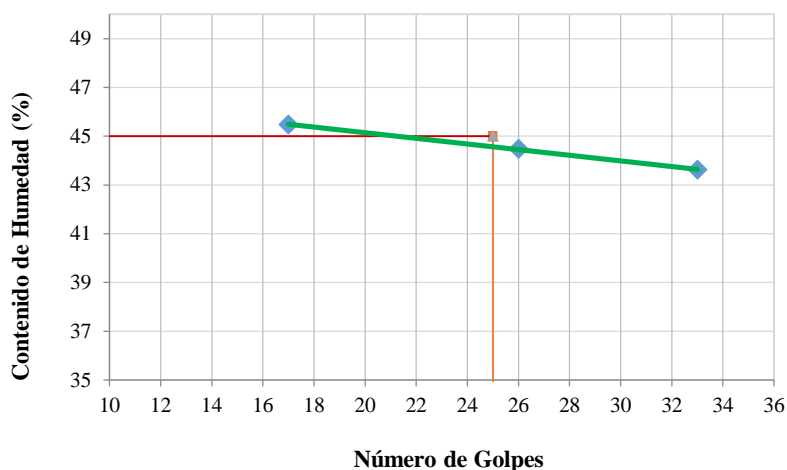


Figura 28. Gráfica de contenido de humedad del ensayo de límite líquido (malla N° 200), combinación de agregados para diseño de mezcla con filler 12 % de índice de plasticidad

Tabla 66

Resultados del ensayo de límite plástico (malla N° 200), combinación de agregados para diseño de mezcla con filler 12 % de índice de plasticidad

Datos del ensayo			
Descripción de tara	#	246	209
Peso de tara	g	12,69	14,16
Peso de tara + suelo húmedo	g	20,43	22,68
Peso de tara + suelo seco	g	18,51	20,60
Peso de agua	g	1,92	2,08
Peso de suelo seco	g	5,82	6,44
Contenido de humedad	%	32,99	32,30

Tabla 67

Índice de plasticidad de combinación de agregados para diseño de mezcla con filler 12 % índice de plasticidad

Límite líquido (%)	Límite plástico (%)	Índice de plasticidad (%)
45	33	12

4.1.4 Diseños de mezcla asfáltica aplicando el método Marshall.

Para la fabricación de especímenes y elaboración de un diseño de mezcla asfáltica en frío con asfalto RC-250 no existe un procedimiento detallado en el “Manual de Ensayos de Materiales” del Ministerio de Transportes y Comunicaciones, por lo que para la presente investigación se tuvo que recurrir al Manual del Instituto del Asfalto MS-14 “Manual de mezclas asfálticas en frío”, cuyo procedimiento tiene similitud al que se sigue para mezclas asfálticas en caliente en la normativa peruana “Ensayo MTC E 504 Resistencia de mezclas bituminosas empleando el aparato Marshall”, a excepción de la temperatura en el mezclado de especímenes.

4.1.4.1 Procedimiento para elaboración de especímenes por el método Marshall.

a. Equipos, herramientas y materiales.

- Molde ensamblado para especímenes (tipo hembra).
- Moldes cilíndricos para especímenes de 64 mm de altura y 102 mm de diámetro (tipo macho), placas de base y collarines de extensión.
- Extractor de especímenes tipo gata hidráulica.
- Martillo de compactación para manubrio y sostenimiento manual.
- Pedestal de compactación.
- Sostén de molde para espécimen.
- Hornos de capacidad de 110 ± 5 °C.
- Recipientes o cacerolas para mezclado.
- Cucharón de acero para mezclado.

- Balanza con aproximación al menos de 0,1 g.
- Punzón para chusear mezcla.
- Baño de maría (precisión de ± 1 °C).

b. Muestra.

En la presente investigación se fabricaron 90 especímenes, 30 por cada diseño de mezcla asfáltica en frío, los códigos de cada espécimen se listan en las tablas 68, 69 y 70:

Tabla 68

Relación y codificación de especímenes para diseño de mezcla con filler 3 % de índice de plasticidad

% Asfalto en la mezcla	Especimen al aire	Especimen sumergido en agua
4,30 %	M1-A	M1-S
4,30 %	M2-A	M2-S
4,30 %	M3-A	M3-S
4,80 %	M4-A	M4-S
4,80 %	M5-A	M5-S
4,80 %	M6-A	M6-S
5,30 %	M7-A	M7-S
5,30 %	M8-A	M8-S
5,30 %	M9-A	M9-S
5,80 %	M10-A	M10-S
5,80 %	M11-A	M11-S
5,80 %	M12-A	M12-S
6,30 %	M13-A	M13-S
6,30 %	M14-A	M14-S
6,30 %	M15-A	M15-S
Total especímenes (unidades)	15,00	15,00

Nota: Todos los especímenes fueron curados al aire durante 24 horas mínimo, mientras que los que tienen la sigla “S” al final de su código, fueron sumergidos en agua durante cuatro días a 23 ± 2 °C después del curado (24 horas)

Tabla 69

Relación y codificación de especímenes para diseño de mezcla con filler 6 % de índice de plasticidad

% Asfalto en la mezcla	Especímen al aire	Especímen sumergido en agua
4,30 %	M16-A	M16-S
4,30 %	M17-A	M17-S
4,30 %	M18-A	M18-S
4,80 %	M19-A	M19-S
4,80 %	M20-A	M20-S
4,80 %	M21-A	M21-S
5,30 %	M22-A	M22-S
5,30 %	M23-A	M23-S
5,30 %	M24-A	M24-S
5,80 %	M25-A	M25-S
5,80 %	M26-A	M26-S
5,80 %	M27-A	M27-S
6,30 %	M28-A	M28-S
6,30 %	M29-A	M29-S
6,30 %	M30-A	M30-S
Total especímenes (unidades)	15,00	15,00

Nota: Todos los especímenes fueron curados al aire durante 24 horas mínimo, mientras que los que tienen la sigla “S” al final de su código, fueron sumergidos en agua durante cuatro días a 23 ± 2 °C después del curado (24 horas)

Tabla 70

Relación y codificación de especímenes para diseño de mezcla con filler 12 % de índice de plasticidad

% Asfalto en la mezcla	Especímen al aire	Especímen sumergido en agua
4,30 %	M31-A	M31-S
4,30 %	M32-A	M32-S
4,30 %	M33-A	M33-S
4,80 %	M34-A	M34-S
4,80 %	M35-A	M35-S
4,80 %	M36-A	M36-S
5,30 %	M37-A	M37-S
5,30 %	M38-A	M38-S
5,30 %	M39-A	M39-S
5,80 %	M40-A	M40-S
5,80 %	M41-A	M41-S
5,80 %	M42-A	M42-S
6,30 %	M43-A	M43-S
6,30 %	M44-A	M44-S
6,30 %	M45-A	M45-S
Total especímenes (unidades)	15,00	15,00

Nota: Todos los especímenes fueron curados al aire durante 24 horas mínimo, mientras que los que tienen la sigla “S” al final de su código, fueron sumergidos en agua durante cuatro días a 23 ± 2 °C después del curado (24 horas)

c. Procedimiento.

El siguiente proceso se realizó para la fabricación de los 90 especímenes que forman parte de la muestra de esta investigación.

Se comenzó pesando la piedra chancada de 3/4", piedra chancada de 3/8", arena para asfalto y filler de acuerdo a los pesos indicados en las tablas 56, 57 y 58 por cada % de asfalto (4,3 %, 4,8 %, 5,3 %, 5,8 %, 6,3 %) para cada espécimen de 1100 g en un recipiente.



Figura 29. Pesado de agregados para fabricación de especímenes según porcentajes de asfalto

Posterior a ello, para cada briqueta o espécimen se vertieron en una cacerola los agregados y se formó una especie de cráter, luego se agregó el asfalto líquido RC-250 y utilizando el cucharón de acero se mezcló hasta cubrir las partículas de los agregados, todo esto a temperatura ambiente ($23 \pm 2^\circ\text{C}$). Seguidamente se colocó la mezcla en el molde metálico que previamente fue instalado, luego se procedió a aplicar 75 golpes con el martillo Marshall en cada lado del espécimen,

culminado esto se dejó secar y curar cada espécimen al aire por un tiempo de 24 horas mínimo.



Figura 30. Preparación de mezcla y compactación con martillo Marshall

Luego del secado, curado y extracción de muestras de los moldes, la mitad de los especímenes de cada diseño de mezcla, es decir 15 unidades, se sumergió en el baño de maría a una temperatura de $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$ por cuatro días, la otra mitad se sometió a los ensayos de peso específico, vacíos, estabilidad y flujo Marshall.



Figura 31. Extracción de especímenes y colocación en baño de maría por cuatro días

4.1.4.2 *Peso específico de especímenes compactados.*

Este ensayo fue realizado para todos los especímenes tanto como los secados al aire como los sumergidos en agua por cuatro días, se pesó cada espécimen primero dentro del agua y luego en su estado superficialmente seco (similar al ensayo de peso específico de agregados gruesos MTC E 206), se determinó en primer lugar el volumen de cada espécimen utilizando la ecuación 34:

$$V_e = \frac{P_{ea} - P_{es}}{\rho_w} \dots\dots\dots [Ecuación 34]$$

Donde:

V_e = Volumen del espécimen compactado (cm^3)

P_{ea} = Peso del espécimen al aire (g)

P_{es} = Peso del espécimen sumergido (g)

Así podemos obtener los resultados en las tablas 71, 72 y 73 para los tres diseños de mezcla tratados en la presente investigación:

Tabla 71

Volumen de especímenes del diseño de mezcla con filler 3 % de índice de plasticidad

Volúmenes/% Asfalto	Especímenes al aire			Especímenes sumergidos en agua		
4,30 %	M1-A	M2-A	M3-A	M1-S	M2-S	M3-S
Peso en el aire (g)	1095,00	1092,00	1090,00	1092,00	1090,00	1092,00
Peso en el agua (g)	608,00	606,00	602,00	618,00	616,00	618,00
Volumen (cm³)	487,00	486,00	488,00	474,00	474,00	474,00
4,80 %	M4-A	M5-A	M6-A	M4-S	M5-S	M6-S
Peso en el aire (g)	1092,00	1092,00	1100,00	1090,00	1100,00	1098,00
Peso en el agua (g)	607,00	603,00	611,00	618,00	627,00	621,00
Volumen (cm³)	485,00	489,00	489,00	472,00	473,00	477,00
5,30 %	M7-A	M8-A	M9-A	M7-S	M8-S	M9-S
Peso en el aire (g)	1095,00	1100,00	1096,00	1091,00	1093,00	1096,00
Peso en el agua (g)	610,00	613,00	611,00	614,00	617,00	618,00
Volumen (cm³)	485,00	487,00	485,00	477,00	476,00	478,00
5,80 %	M10-A	M11-A	M12-A	M10-S	M11-S	M12-S
Peso en el aire (g)	1099,00	1092,00	1096,00	1090,00	1086,00	1086,00
Peso en el agua (g)	608,00	605,00	607,00	615,00	609,00	610,00
Volumen (cm³)	491,00	487,00	489,00	475,00	477,00	476,00
6,30 %	M13-A	M14-A	M15-A	M13-S	M14-S	M15-S
Peso en el aire (g)	1091,00	1096,00	1092,00	1071,00	1087,00	1078,00
Peso en el agua (g)	607,00	606,00	609,00	602,00	608,00	600,00
Volumen (cm³)	484,00	490,00	483,00	469,00	479,00	478,00

Nota: Se muestra el volumen para cada espécimen y en cada variación de asfalto (4,3 %, 4,8 %, 5,3 %, 5,8 % y 6,3 %)

Tabla 72

Volumen de especímenes del diseño de mezcla con filler 6 % de índice de plasticidad

Volúmenes/% Asfalto	Especímenes al aire			Especímenes sumergidos en agua		
4,30 %	M16-A	M17-A	M18-A	M16-S	M17-S	M18-S
Peso en el aire (g)	1093,00	1099,00	1090,00	1094,00	1092,00	1099,00
Peso en el agua (g)	599,00	598,00	607,00	604,00	603,00	604,00
Volumen (cm³)	494,00	501,00	483,00	490,00	489,00	495,00
4,80 %	M19-A	M20-A	M21-A	M19-S	M20-S	M21-S
Peso en el aire (g)	1100,00	1100,00	1096,00	1099,00	1100,00	1098,00
Peso en el agua (g)	608,00	611,00	605,00	610,00	611,00	613,00
Volumen (cm³)	492,00	489,00	491,00	489,00	489,00	485,00
5,30 %	M22-A	M23-A	M24-A	M22-S	M23-S	M24-S
Peso en el aire (g)	1100,00	1096,00	1100,00	1100,00	1100,00	1096,00
Peso en el agua (g)	611,00	608,00	611,00	610,00	608,00	607,00
Volumen (cm³)	489,00	488,00	489,00	490,00	492,00	489,00
5,80 %	M25-A	M26-A	M27-A	M25-S	M26-S	M27-S
Peso en el aire (g)	1094,00	1090,00	1087,00	1096,00	1097,00	1085,00
Peso en el agua (g)	603,00	605,00	604,00	604,00	604,00	603,00
Volumen (cm³)	491,00	485,00	483,00	492,00	493,00	482,00
6,30 %	M28-A	M29-A	M30-A	M28-S	M29-S	M30-S
Peso en el aire (g)	1097,00	1099,00	1095,00	1087,00	1099,00	1100,00
Peso en el agua (g)	609,00	609,00	607,00	605,00	603,00	606,00
Volumen (cm³)	488,00	490,00	488,00	482,00	496,00	494,00

Tabla 73

Volumen de especímenes del diseño de mezcla con filler 12 % de índice de plasticidad

Volúmenes/% Asfalto	Especímenes al aire			Especímenes sumergidos en agua		
4,30 %	M31-A	M32-A	M33-A	M31-S	M32-S	M33-S
Peso en el aire (g)	1100,00	1100,00	1094,00	1100,00	1098,00	1100,00
Peso en el agua (g)	615,00	607,00	600,00	597,00	601,00	609,00
Volumen (cm³)	485,00	493,00	494,00	503,00	497,00	491,00
4,80 %	M34-A	M35-A	M36-A	M34-S	M35-S	M36-S
Peso en el aire (g)	1099,00	1098,00	1100,00	1100,00	1099,00	1100,00
Peso en el agua (g)	611,00	609,00	607,00	608,00	601,00	610,00
Volumen (cm³)	488,00	489,00	493,00	492,00	498,00	490,00
5,30 %	M37-A	M38-A	M39-A	M37-S	M38-S	M39-S
Peso en el aire (g)	1100,00	1100,00	1096,00	1100,00	1100,00	1100,00
Peso en el agua (g)	612,00	608,00	605,00	612,00	610,00	611,00
Volumen (cm³)	488,00	492,00	491,00	488,00	490,00	489,00
5,80 %	M40-A	M41-A	M42-A	M40-S	M41-S	M42-S
Peso en el aire (g)	1100,00	1094,00	1100,00	1093,00	1090,00	1091,00
Peso en el agua (g)	612,00	608,00	608,00	600,00	602,00	607,00
Volumen (cm³)	488,00	486,00	492,00	493,00	488,00	484,00
6,30 %	M43-A	M44-A	M45-A	M43-S	M44-S	M45-S
Peso en el aire (g)	1087,00	1093,00	1088,00	1085,00	1088,00	1087,00
Peso en el agua (g)	600,00	608,00	600,00	591,00	602,00	601,00
Volumen (cm³)	487,00	485,00	488,00	494,00	486,00	486,00

Nota: Se muestra el volumen para cada espécimen y en cada variación de asfalto (4,3 %, 4,8 %, 5,3 %, 5,8 % y 6,3 %)

Con los volúmenes obtenidos, el siguiente paso es calcular el peso específico bulk de cada espécimen, para tal caso se utilizó la ecuación 35 y los resultados se muestran en las tablas 74, 75 y 76:

$$\text{Pesb} = \frac{\text{Pea}}{\text{Ve}} \dots\dots\dots [\text{Ecuación 35}]$$

Donde:

Pesb = Peso específico bulk del espécimen compactado (g/cm³)

Pea = Peso del espécimen al aire (g)

Ve = Volumen del espécimen (cm³)

Tabla 74

Peso específico bulk de especímenes del diseño de mezcla con filler 3 % de índice de plasticidad

Pesos específicos bulk/% Asfalto	Especímenes al aire			Promedio	Especímenes sumergidos en agua			Promedio
	M1-A	M2-A	M3-A		M1-S	M2-S	M3-S	
4,30 %								
Peso en el aire (g)	1095,00	1092,00	1090,00		1092,00	1090,00	1092,00	
Volumen (cm ³)	487,00	486,00	488,00		474,00	474,00	474,00	
Peso específico bulk (g/cm³)	2,25	2,25	2,23	2,24	2,30	2,30	2,30	2,30
4,80 %								
Peso en el aire (g)	1092,00	1092,00	1100,00		1090,00	1100,00	1098,00	
Volumen (cm ³)	485,00	489,00	489,00		472,00	473,00	477,00	
Peso específico bulk (g/cm³)	2,25	2,23	2,25	2,24	2,31	2,33	2,30	2,31
5,30 %								
Peso en el aire (g)	1095,00	1100,00	1096,00		1091,00	1093,00	1096,00	
Volumen (cm ³)	485,00	487,00	485,00		477,00	476,00	478,00	
Peso específico bulk (g/cm³)	2,26	2,26	2,26	2,26	2,29	2,30	2,29	2,29
5,80 %								
Peso en el aire (g)	1099,00	1092,00	1096,00		1090,00	1086,00	1086,00	
Volumen (cm ³)	491,00	487,00	489,00		475,00	477,00	476,00	
Peso específico bulk (g/cm³)	2,24	2,24	2,24	2,24	2,29	2,28	2,28	2,28
6,30 %								
Peso en el aire (g)	1091,00	1096,00	1092,00		1071,00	1087,00	1078,00	
Volumen (cm ³)	484,00	490,00	483,00		469,00	479,00	478,00	
Peso específico bulk (g/cm³)	2,25	2,24	2,26	2,25	2,28	2,27	2,26	2,27

Nota: Se puede observar que el peso específico bulk fue determinado para cada espécimen y por cada variación de asfalto (4,3 %, 4,8 %, 5,3 %, 5,8 % y 6,3 %) y al final el promedio

Tabla 75

Peso específico bulk de especímenes del diseño de mezcla con filler 6 % de índice de plasticidad

Pesos específicos bulk/% Asfalto	Especímenes al aire			Promedio	Especímenes sumergidos en agua			Promedio
	M16-A	M17-A	M18-A		M16-S	M17-S	M18-S	
4,30 %								
Peso en el aire (g)	1093,00	1099,00	1090,00		1094,00	1092,00	1099,00	
Volumen (cm ³)	494,00	501,00	483,00		490,00	489,00	495,00	
Peso específico bulk (g/cm³)	2,21	2,19	2,26	2,22	2,23	2,23	2,22	2,23
4,80 %								
Peso en el aire (g)	1100,00	1100,00	1096,00		1099,00	1100,00	1098,00	
Volumen (cm ³)	492,00	489,00	491,00		489,00	489,00	485,00	
Peso específico bulk (g/cm³)	2,24	2,25	2,23	2,24	2,25	2,25	2,26	2,25
5,30 %								
Peso en el aire (g)	1100,00	1096,00	1100,00		1100,00	1100,00	1096,00	
Volumen (cm ³)	489,00	488,00	489,00		490,00	492,00	489,00	
Peso específico bulk (g/cm³)	2,25	2,25	2,25	2,25	2,24	2,24	2,24	2,24
5,80 %								
Peso en el aire (g)	1094,00	1090,00	1087,00		1096,00	1097,00	1085,00	
Volumen (cm ³)	491,00	485,00	483,00		492,00	493,00	482,00	
Peso específico bulk (g/cm³)	2,23	2,25	2,25	2,24	2,23	2,23	2,25	2,23
6,30 %								
Peso en el aire (g)	1097,00	1099,00	1095,00		1087,00	1099,00	1100,00	
Volumen (cm ³)	488,00	490,00	488,00		482,00	496,00	494,00	
Peso específico bulk (g/cm³)	2,25	2,24	2,24	2,24	2,26	2,22	2,23	2,23

Nota: Se puede observar que el peso específico bulk fue determinado para cada espécimen y por cada variación de asfalto (4,3 %, 4,8 %, 5,3 %, 5,8 % y 6,3 %) y al final el promedio

Tabla 76

Peso específico bulk de especímenes del diseño de mezcla con filler 12 % de índice de plasticidad

Pesos específicos bulk/% Asfalto	Especímenes al aire			Promedio	Especímenes sumergidos en agua			Promedio
4,30 %	M31-A	M32-A	M33-A		M31-S	M32-S	M33-S	
Peso en el aire (g)	1100,00	1100,00	1094,00		1100,00	1098,00	1100,00	
Volumen (cm ³)	485,00	493,00	494,00		503,00	497,00	491,00	
Peso específico bulk (g/cm³)	2,27	2,23	2,21	2,24	2,19	2,21	2,24	2,21
4,80 %	M34-A	M35-A	M36-A		M34-S	M35-S	M36-S	
Peso en el aire (g)	1099,00	1098,00	1100,00		1100,00	1099,00	1100,00	
Volumen (cm ³)	488,00	489,00	493,00		492,00	498,00	490,00	
Peso específico bulk (g/cm³)	2,25	2,25	2,23	2,24	2,24	2,21	2,24	2,23
5,30 %	M37-A	M38-A	M39-A		M37-S	M38-S	M39-S	
Peso en el aire (g)	1100,00	1100,00	1096,00		1100,00	1100,00	1100,00	
Volumen (cm ³)	488,00	492,00	491,00		488,00	490,00	489,00	
Peso específico bulk (g/cm³)	2,25	2,24	2,23	2,24	2,25	2,24	2,25	2,25
5,80 %	M40-A	M41-A	M42-A		M40-S	M41-S	M42-S	
Peso en el aire (g)	1100,00	1094,00	1100,00		1093,00	1090,00	1091,00	
Volumen (cm ³)	488,00	486,00	492,00		493,00	488,00	484,00	
Peso específico bulk (g/cm³)	2,25	2,25	2,24	2,25	2,22	2,23	2,25	2,23
6,30 %	M43-A	M44-A	M45-A		M43-S	M44-S	M45-S	
Peso en el aire (g)	1087,00	1093,00	1088,00		1085,00	1088,00	1087,00	
Volumen (cm ³)	487,00	485,00	488,00		494,00	486,00	486,00	
Peso específico bulk (g/cm³)	2,23	2,25	2,23	2,24	2,20	2,24	2,24	2,22

Nota: Se puede observar que el peso específico bulk fue determinado para cada espécimen y por cada variación de asfalto (4,3 %, 4,8 %, 5,3 %, 5,8 % y 6,3 %) y al final el promedio

4.1.4.3 *Peso específico Rice de especímenes.*

Para el cálculo del peso específico Rice se utilizó una relación matemática o promedio considerando los pesos específicos bulk y aparente de los agregados anteriormente determinados (con los ensayos MTC E 205 y 206), además se utilizó las proporciones finales para la mezcla (agregados y asfalto), aplicando la ecuación 36:

$$\text{Perice} = \frac{100}{\frac{\% \text{Paf}}{\text{PEna}} + \frac{\% \text{Paf}}{A} (\text{P.C.3/4"}) + \frac{\% \text{Paf}}{B} (\text{P.C.3/8"}) + \frac{\% \text{Paf}}{C} (\text{Arena}) + \frac{\% \text{Paf}}{D} (\text{Filler})}$$

[Ecuación 36]

Donde:

Perice = Peso específico Rice del espécimen compactado (g/cm³)

%Paf = Proporciones finales del asfalto y agregados en la mezcla (%), se utilizó resultados de las tablas 53, 54 y 55

PEna = Peso específico aparente o nominal del asfalto RC-250 (g/cm³)

$$A = \frac{\text{PEb} + \text{PEn}}{2} \dots\dots\dots \text{[Ecuación 37]}$$

A = Promedio o relación matemática para el agregado grueso (piedra chancada 3/4") (g/cm³)

PEb = Peso específico bulk del agregado grueso (piedra chancada de 3/4") (g/cm³)

PEn = Peso específico aparente o nominal del agregado grueso (piedra chancada de 3/4") (g/cm³)

$$B = \frac{\text{PEb} + \text{PEn}}{2} \dots\dots\dots \text{[Ecuación 38]}$$

B = Promedio o relación matemática para el agregado grueso (piedra chancada 3/8") (g/cm³)

PEb = Peso específico bulk del agregado grueso (piedra chancada 3/8") (g/cm³)

PE_n = Peso específico aparente o nominal del agregado grueso (piedra chancada 3/8") (g/cm³)

$$C = \frac{PE_{bf} + PE_{nf}}{2} \dots\dots\dots [Ecuación 39]$$

C = Promedio o relación matemática para el agregado fino (arena para asfalto) (g/cm³)

PE_{bf} = Peso específico bulk del agregado fino (arena para asfalto) (g/cm³)

PE_{nf} = Peso específico aparente o nominal del agregado fino (arena para asfalto) (g/cm³)

$$D = \frac{PE_{bf} + PE_{nf}}{2} \dots\dots\dots [Ecuación 40]$$

D = Promedio o relación matemática para el agregado fino (filler) (g/cm³)

PE_{bf} = Peso específico bulk del agregado fino (filler) (g/cm³)

PE_{nf} = Peso específico aparente o nominal del agregado fino (filler) (g/cm³)

Los resultados aplicando las ecuaciones 36, 37, 38, 39 y 40 se muestran en las tablas 77, 78 y 79:

Tabla 77

Peso específico Rice de especímenes del diseño de mezcla con filler 3 % de índice de plasticidad

% Asfalto/Pesos específicos Rice	Especímenes al aire			Especímenes sumergidos en agua		
	M1-A	M2-A	M3-A	M1-S	M2-S	M3-S
4,30 %						
Peso específico Rice (g/cm ³)	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41
4,80 %	M4-A	M5-A	M6-A	M4-S	M5-S	M6-S
Peso específico Rice (g/cm ³)	2,39	2,39	2,39	2,39	2,39	2,39
5,30 %	M7-A	M8-A	M9-A	M7-S	M8-S	M9-S
Peso específico Rice (g/cm ³)	2,37	2,37	2,37	2,37	2,37	2,37
5,80 %	M10-A	M11-A	M12-A	M10-S	M11-S	M12-S
Peso específico Rice (g/cm ³)	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35
6,30 %	M13-A	M14-A	M15-A	M13-S	M14-S	M15-S
Peso específico Rice (g/cm ³)	2,34	2,34	2,34	2,34	2,34	2,34

Nota: Se puede notar que el peso específico Rice ha sido determinado para cada espécimen y por cada variación de asfalto (4,3 %, 4,8 %, 5,3 %, 5,8 % y 6,3 %) y al final un promedio

Tabla 78

Peso específico Rice de especímenes del diseño de mezcla con filler 6 % de índice de plasticidad

% Asfalto/Pesos específicos Rice	Especímenes al aire			Especímenes sumergidos en agua		
	M16-A	M17-A	M18-A	M16-S	M17-S	M18-S
4,30 %						
Peso específico Rice (g/cm ³)	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41
4,80 %	M19-A	M20-A	M21-A	M19-S	M20-S	M21-S
Peso específico Rice (g/cm ³)	2,39	2,39	2,39	2,39	2,39	2,39
5,30 %	M22-A	M23-A	M24-A	M22-S	M23-S	M24-S
Peso específico Rice (g/cm ³)	2,37	2,37	2,37	2,37	2,37	2,37
5,80 %	M25-A	M26-A	M27-A	M25-S	M26-S	M27-S
Peso específico Rice (g/cm ³)	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35
6,30 %	M28-A	M29-A	M30-A	M28-S	M29-S	M30-S
Peso específico Rice (g/cm ³)	2,34	2,34	2,34	2,34	2,34	2,34

Nota: Se puede notar que el peso específico Rice ha sido determinado para cada espécimen y por cada variación de asfalto (4,3 %, 4,8 %, 5,3 %, 5,8 % y 6,3 %) y al final un promedio

Tabla 79

Peso específico Rice de especímenes del diseño de mezcla con filler 12 % de índice de plasticidad

% Asfalto/Pesos específicos Rice	Especímenes al aire			Especímenes sumergidos en agua		
	M31-A	M32-A	M33-A	M31-S	M32-S	M33-S
4,30 %						
Peso específico Rice (g/cm ³)	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41
4,80 %	M34-A	M35-A	M36-A	M34-S	M35-S	M36-S
Peso específico Rice (g/cm ³)	2,39	2,39	2,39	2,39	2,39	2,39
5,30 %	M37-A	M38-A	M39-A	M37-S	M38-S	M39-S
Peso específico Rice (g/cm ³)	2,37	2,37	2,37	2,37	2,37	2,37
5,80 %	M40-A	M41-A	M42-A	M40-S	M41-S	M42-S
Peso específico Rice (g/cm ³)	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35	2,35
6,30 %	M43-A	M44-A	M45-A	M43-S	M44-S	M45-S
Peso específico Rice (g/cm ³)	2,34	2,34	2,34	2,34	2,34	2,34

Nota: Se puede notar que el peso específico Rice ha sido determinado para cada espécimen y por cada variación de asfalto (4,3 %, 4,8 %, 5,3 %, 5,8 % y 6,3 %) y al final un promedio

4.1.4.4 Vacíos en el total de la mezcla de especímenes (VTM).

La finalidad de este análisis es determinar el porcentaje de vacíos en la mezcla compactada de cada espécimen (VTM), para cuyo procedimiento se aplicó la ecuación 41 a partir de los datos ya obtenidos de peso específico bulk y peso específico Rice:

$$VTM = \left(1 - \frac{Perice}{Pesb}\right) \times 100 \dots\dots\dots [Ecuación 41]$$

Donde:

VTM = Porcentaje de vacíos en la mezcla compactada (%)

Perice = Peso específico Rice del espécimen compactado (g/cm³)

Pesb = Peso específico Bulk del espécimen compactado (g/cm³)

Los resultados de los porcentajes de vacíos en la mezcla compactada de cada espécimen (VTM) se muestran en las tablas 80, 81 y 82:

Tabla 80

Vacíos en la mezcla compactada (VTM) del diseño de mezcla con filler 3 % de índice de plasticidad

% Asfalto/VTM	Especímenes al aire			Promedio	Especímenes sumergidos en agua			Promedio
	M1-A	M2-A	M3-A		M1-S	M2-S	M3-S	
4,30 %								
VTM (%)	6,64	6,71	7,26	6,87	4,34	4,52	4,34	4,40
4,80 %								
VTM (%)	5,80	6,57	5,89	6,09	3,38	2,70	3,70	3,26
5,30 %								
VTM (%)	4,83	4,79	4,74	4,79	3,59	3,21	3,35	3,38
5,80 %								
VTM (%)	4,94	4,77	4,81	4,84	2,54	3,31	3,11	2,99
6,30 %								
VTM (%)	3,56	4,30	3,27	3,71	2,30	2,91	3,51	2,90

Nota: Se puede que por cada variación de asfalto (4,3 %, 4,8 %, 5,3 %, 5,8 % y 6,3 %) se determinaron los VTM y un promedio final

Tabla 81

Vacíos en la mezcla compactada (VTM) del diseño de mezcla con filler 6 % de índice de plasticidad

% Asfalto/VTM	Especímenes al aire			Promedio	Especímenes sumergidos en agua			Promedio
	M16-A	M17-A	M18-A		M16-S	M17-S	M18-S	
4,30 %								
VTM (%)	8,13	8,92	6,30	7,78	7,30	7,28	7,82	7,46
4,80 %								
VTM (%)	6,46	5,89	6,61	6,32	5,97	5,89	5,28	5,72
5,30 %								
VTM (%)	5,18	5,33	5,18	5,23	5,37	5,75	5,52	5,55
5,80 %								
VTM (%)	5,37	4,55	4,42	4,78	5,39	5,50	4,40	5,10
6,30 %								
VTM (%)	3,82	4,04	4,00	3,95	3,51	5,20	4,73	4,48

Nota: Se puede que por cada variación de asfalto (4,3 %, 4,8 %, 5,3 %, 5,8 % y 6,3 %) se determinaron los VTM y un promedio final

Tabla 82

Vacíos en la mezcla compactada (VTM) del diseño de mezcla con filler 12 % de índice de plasticidad

% Asfalto/VTM	Especímenes al aire			Promedio	Especímenes sumergidos en agua			Promedio
	M31-A	M32-A	M33-A		M31-S	M32-S	M33-S	
4,30 %								
VTM (%)	5,77	7,30	7,99	7,02	9,14	8,21	6,92	8,09
4,80 %								
VTM (%)	5,72	6,00	6,59	6,10	6,40	7,61	6,02	6,68
5,30 %								
VTM (%)	4,92	5,70	5,85	5,49	4,92	5,31	5,12	5,12
5,80 %								
VTM (%)	4,21	4,34	4,99	4,51	5,79	5,08	4,21	5,03
6,30 %								
VTM (%)	4,44	3,52	4,55	4,17	5,97	4,16	4,25	4,79

Nota: Se puede que por cada variación de asfalto (4,3 %, 4,8 %, 5,3 %, 5,8 % y 6,3 %) se determinaron los VTM y un promedio final

4.1.4.5 Vacíos en el agregado mineral de especímenes (VMA).

Para obtener este porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VMA), en primer lugar se tuvo que determinar el peso específico bulk del agregado total o de la combinación de agregados, donde se utilizó los porcentajes de las proporciones finales para la mezcla (agregados) y sus pesos bulk individuales, se aplicó la ecuación 42 y los resultados se muestran en las tablas 83, 84 y 85:

$$P_{eb} = \frac{\%P_{af} (P.C.3/4") + \%P_{af} (P.C.3/8") + \%P_{af} (Arena) + \%P_{af} (Filler)}{\frac{\%P_{af}}{PE_b} (P.C.3/4") + \frac{\%P_{af}}{PE_b} (P.C.3/8") + \frac{\%P_{af}}{PE_b} (Arena) + \frac{\%P_{af}}{PE_b} (Filler)}$$

[Ecuación 42]

P_{eb} = Peso específico bulk del agregado total o de la combinación de agregados (g/cm³)

%Paf = Proporciones finales de los agregados (%), se utilizó resultados de las tablas 53, 54 y 55

PEb = Peso específico bulk del agregado grueso (piedra chancada de 3/4" y 3/8") (g/cm³)

PEbf = Peso específico bulk del agregado fino (arena y filler) (g/cm³)

Tabla 83

Peso específico bulk del agregado total del diseño de mezcla con filler 3 % de índice de plasticidad

% Asfalto/Pesos específicos bulk de agregado total	Especímenes al aire			Especímenes sumergidos en agua		
	M1-A	M2-A	M3-A	M1-S	M2-S	M3-S
4,30 %						
P. específico bulk de agregado total (g/cm ³)	2,49	2,49	2,49	2,49	2,49	2,49
4,80 %						
P. específico bulk de agregado total (g/cm ³)	2,49	2,49	2,49	2,49	2,49	2,49
5,30 %						
P. específico bulk de agregado total (g/cm ³)	2,49	2,49	2,49	2,49	2,49	2,49
5,80 %						
P. específico bulk de agregado total (g/cm ³)	2,49	2,49	2,49	2,49	2,49	2,49
6,30 %						
P. específico bulk de agregado total (g/cm ³)	2,49	2,49	2,49	2,49	2,49	2,49

Nota: El peso específico bulk se determinó para cada espécimen y por cada variación de asfalto (4,3 %, 4,8 %, 5,3 %, 5,8 % y 6,3 %)

Tabla 84

Peso específico bulk del agregado total del diseño de mezcla con filler 6 % de índice de plasticidad

% Asfalto/Pesos específicos bulk de agregado total	Especímenes al aire			Especímenes sumergidos en agua		
	4,30 %	M16-A	M17-A	M18-A	M16-S	M17-S
P. específico bulk de agregado total (g/cm ³)	2,49	2,49	2,49	2,49	2,49	2,49
4,80 %	M19-A	M20-A	M21-A	M19-S	M20-S	M21-S
P. específico bulk de agregado total (g/cm ³)	2,49	2,49	2,49	2,49	2,49	2,49
5,30 %	M22-A	M23-A	M24-A	M22-S	M23-S	M24-S
P. específico bulk de agregado total (g/cm ³)	2,49	2,49	2,49	2,49	2,49	2,49
5,80 %	M25-A	M26-A	M27-A	M25-S	M26-S	M27-S
P. específico bulk de agregado total (g/cm ³)	2,49	2,49	2,49	2,49	2,49	2,49
6,30 %	M28-A	M29-A	M30-A	M28-S	M29-S	M30-S
P. específico bulk de agregado total (g/cm ³)	2,49	2,49	2,49	2,49	2,49	2,49

Nota: El peso específico bulk se determinó para cada espécimen y por cada variación de asfalto (4,3 %, 4,8 %, 5,3 %, 5,8 % y 6,3 %)

Tabla 85

Peso específico bulk del agregado total del diseño de mezcla con filler 12 % de índice de plasticidad

% Asfalto/Pesos específicos bulk de agregado total	Especímenes al aire			Especímenes sumergidos en agua		
	4,30 %	M31-A	M32-A	M33-A	M31-S	M32-S
P. específico bulk de agregado total (g/cm ³)	2,48	2,48	2,48	2,48	2,48	2,48
4,80 %	M34-A	M35-A	M36-A	M34-S	M35-S	M36-S
P. específico bulk de agregado total (g/cm ³)	2,48	2,48	2,48	2,48	2,48	2,48
5,30 %	M37-A	M38-A	M39-A	M37-S	M38-S	M39-S
P. específico bulk de agregado total (g/cm ³)	2,48	2,48	2,48	2,48	2,48	2,48
5,80 %	M40-A	M41-A	M42-A	M40-S	M41-S	M42-S
P. específico bulk de agregado total (g/cm ³)	2,48	2,48	2,48	2,48	2,48	2,48
6,30 %	M43-A	M44-A	M45-A	M43-S	M44-S	M45-S
P. específico bulk de agregado total (g/cm ³)	2,48	2,48	2,48	2,48	2,48	2,48

Nota: El peso específico bulk se determinó para cada espécimen y por cada variación de asfalto (4,3 %, 4,8 %, 5,3 %, 5,8 % y 6,3 %)

Para hallar el porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VMA), se utilizó la ecuación 43:

$$VMA = 100 - \frac{Pesb * [\% Paf (P.C.3/4") + \% Paf (P.C.3/8") + \% Paf (Arena) + \% Paf (Filler)]}{Pebat}$$

[Ecuación 43]

Donde:

VMA = Porcentaje de vacíos en el agregado mineral (%)

% Paf = Proporciones finales de los agregados (%), se utilizó resultados de las tablas 53, 54 y 55

Pesb = Peso específico bulk del espécimen compactado (g/cm³)

Tabla 86

Vacíos en el agregado mineral (VMA) del diseño de mezcla con filler 3 % de índice de plasticidad

% Asfalto/VMA	Especímenes al aire			Promedio	Especímenes sumergidos en agua			Promedio
	M1-A	M2-A	M3-A		M1-S	M2-S	M3-S	
4,30 %								
VMA (%)	13,44	13,50	14,02	13,65	11,31	11,48	11,31	11,37
4,80 %	M4-A	M5-A	M6-A		M4-S	M5-S	M6-S	
VMA (%)	13,78	14,48	13,86	14,04	11,57	10,94	11,85	11,45
5,30 %	M7-A	M8-A	M9-A		M7-S	M8-S	M9-S	
VMA (%)	13,99	13,96	13,92	13,96	12,87	12,53	12,66	12,69
5,80 %	M10-A	M11-A	M12-A		M10-S	M11-S	M12-S	
VMA (%)	15,19	15,03	15,07	15,10	13,05	13,73	13,55	13,44
6,30 %	M13-A	M14-A	M15-A		M13-S	M14-S	M15-S	
VMA (%)	15,04	15,69	14,78	15,17	13,93	14,47	15,00	14,46

Nota: Puede observarse que por cada variación de asfalto (4,3 %, 4,8 %, 5,3 %, 5,8 % y 6,3 %) se determinaron los VMA y un promedio final

Tabla 87

Vacíos en el agregado mineral (VMA) del diseño de mezcla con filler 6 % de índice de plasticidad

% Asfalto/VMA	Especímenes al aire			Promedio	Especímenes sumergidos en agua			Promedio
	M16-A	M17-A	M18-A		M16-S	M17-S	M18-S	
4,30 %								
VMA (%)	14,83	15,55	13,13	14,50	14,05	14,03	14,53	14,21
4,80 %	M19-A	M20-A	M21-A		M19-S	M20-S	M21-S	
VMA (%)	14,38	13,86	14,52	14,25	13,93	13,86	13,30	13,70
5,30 %	M22-A	M23-A	M24-A		M22-S	M23-S	M24-S	
VMA (%)	14,31	14,45	14,31	14,35	14,48	14,83	14,62	14,65
5,80 %	M25-A	M26-A	M27-A		M25-S	M26-S	M27-S	
VMA (%)	15,57	14,84	14,72	15,04	15,59	15,68	14,70	15,32
6,30 %	M28-A	M29-A	M30-A		M28-S	M29-S	M30-S	
VMA (%)	15,27	15,46	15,43	15,39	15,00	16,49	16,07	15,85

Nota: Puede observarse que por cada variación de asfalto (4,3 %, 4,8 %, 5,3 %, 5,8 % y 6,3 %) se determinaron los VMA y un promedio final

Tabla 88

Vacíos en el agregado mineral (VMA) del diseño de mezcla con filler 12 % de índice de plasticidad

% Asfalto/VMA	Especímenes al aire			Promedio	Especímenes sumergidos en agua			Promedio
	M31-A	M32-A	M33-A		M31-S	M32-S	M33-S	
4,30 %								
VMA (%)	12,59	14,01	14,65	13,75	15,72	14,86	13,66	14,75
4,80 %	M34-A	M35-A	M36-A		M34-S	M35-S	M36-S	
VMA (%)	13,66	13,92	14,46	14,01	14,29	15,40	13,94	14,54
5,30 %	M37-A	M38-A	M39-A		M37-S	M38-S	M39-S	
VMA (%)	14,04	14,74	14,87	14,55	14,04	14,39	14,21	14,21
5,80 %	M40-A	M41-A	M42-A		M40-S	M41-S	M42-S	
VMA (%)	14,49	14,61	15,19	14,76	15,90	15,27	14,49	15,22
6,30 %	M43-A	M44-A	M45-A		M43-S	M44-S	M45-S	
VMA (%)	15,78	14,96	15,87	15,54	17,12	15,53	15,60	16,09

Nota: Puede observarse que por cada variación de asfalto (4,3 %, 4,8 %, 5,3 %, 5,8 % y 6,3 %) se determinaron los VMA y un promedio final

4.1.4.6 Vacíos llenos de asfalto en especímenes (VFA).

Este porcentaje se calculó en función de los resultados antes obtenidos de vacíos en la mezcla compactada (VTM) y vacíos en el agregado mineral (VMA) aplicando la ecuación 44:

$$VFA = \left(\frac{VMA - VTM}{VMA} \right) \times 100 \dots\dots\dots [Ecuación 44]$$

Donde:

VFA = Porcentaje de vacíos llenos de asfalto (%)

VMA = Porcentaje de vacíos en el agregado mineral (%)

VTM = Porcentaje de vacíos en la mezcla compactada (%)

Los resultados de vacíos llenos de asfalto en especímenes se muestran en las tablas siguientes 89, 90 y 91:

Tabla 89

Vacíos llenos de asfalto (VFA) del diseño de mezcla con filler 3 % de índice de plasticidad

% Asfalto/VFA	Especímenes al aire			Promedio	Especímenes sumergidos en agua			Promedio
	M1-A	M2-A	M3-A		M1-S	M2-S	M3-S	
4,30 % VFA (%)	M1-A 50,59	M2-A 50,34	M3-A 48,21	49,71	M1-S 61,60	M2-S 60,62	M3-S 61,60	61,27
4,80 % VFA (%)	M4-A 57,89	M5-A 54,62	M6-A 57,51	56,67	M4-S 70,73	M5-S 75,28	M6-S 68,81	71,61
5,30 % VFA (%)	M7-A 65,49	M8-A 65,70	M9-A 65,92	65,70	M7-S 72,14	M8-S 74,40	M9-S 73,55	73,36
5,80 % VFA (%)	M10-A 67,46	M11-A 68,27	M12-A 68,07	67,93	M10-S 80,50	M11-S 75,90	M12-S 77,08	77,83
6,30 % VFA (%)	M13-A 76,36	M14-A 72,60	M15-A 77,90	75,62	M13-S 83,52	M14-S 79,91	M15-S 76,61	80,01

Nota: Por cada variación de asfalto (4,3 %, 4,8 %, 5,3 %, 5,8 % y 6,3 %) se determinaron los porcentajes de VFA y un promedio final

Tabla 90

Vacíos llenos de asfalto (VFA) del diseño de mezcla con filler 6 % de índice de plasticidad

% Asfalto/VFA	Especímenes al aire			Promedio	Especímenes sumergidos en agua			Promedio
	M16-A	M17-A	M18-A		M16-S	M17-S	M18-S	
4,30 % VFA (%)	45,14	42,66	52,01	46,60	48,06	48,13	46,22	47,47
4,80 % VFA (%)	55,07	57,51	54,46	55,68	57,13	57,51	60,28	58,31
5,30 % VFA (%)	63,82	63,12	63,82	63,59	62,92	61,20	62,23	62,12
5,80 % VFA (%)	65,49	69,32	69,97	68,26	65,40	64,94	70,08	66,81
6,30 % VFA (%)	74,99	73,89	74,10	74,32	76,60	68,47	70,58	71,88

Nota: Por cada variación de asfalto (4,3 %, 4,8 %, 5,3 %, 5,8 % y 6,3 %) se determinaron los porcentajes de VFA y un promedio final

Tabla 91

Vacíos llenos de asfalto (VFA) del diseño de mezcla con filler 12 % de índice de plasticidad

% Asfalto/VFA	Especímenes al aire			Promedio	Especímenes sumergidos en agua			Promedio
	M31-A	M32-A	M33-A		M31-S	M32-S	M33-S	
4,30 % VFA (%)	54,19	47,91	45,47	49,19	41,85	44,74	49,34	45,31
4,80 % VFA (%)	58,12	56,89	54,41	56,47	55,18	50,54	56,80	54,17
5,30 % VFA (%)	64,93	61,35	60,68	62,32	64,93	63,09	63,99	64,00
5,80 % VFA (%)	70,94	70,28	67,14	69,46	63,61	66,72	70,95	67,09
6,30 % VFA (%)	71,84	76,48	71,33	73,22	65,13	73,22	72,79	70,38

Nota: Por cada variación de asfalto (4,3 %, 4,8 %, 5,3 %, 5,8 % y 6,3 %) se determinaron los porcentajes de VFA y un promedio final

4.1.4.7 Estabilidad y flujo Marshall de especímenes compactados.

Para el ensayo de estabilidad Marshall se tuvo que medir la altura o espesor de cada espécimen compactado. Luego se colocó cada espécimen en las mordazas (previamente limpiadas) y en forma escalonada se llevó uno a uno cada espécimen a la prensa Marshall (el cual tenía el dial de flujo instalado), donde se les aplicó la

carga a una velocidad de deformación de 50 mm/min (2 pulg/min) hasta que ocurrió la falla, es decir, cuando se alcanzó la máxima carga (estabilidad Marshall) expresada en kilogramos y a la par también se tomó nota de la deformación (flujo) expresada en centésima de pulgada.



Figura 32. Medición de espesor o altura de especímenes



Figura 33. Prensa Marshall para medición de estabilidad y flujo de especímenes compactados

Nota: Se aprecia el dial de flujo, asimismo el espécimen luego de los ensayos de estabilidad y flujo

Los resultados del ensayo de estabilidad Marshall (lecturas) para cada espécimen así como su altura se presentan en las tablas 92, 93 y 94:

Tabla 92

Resultados de ensayo estabilidad Marshall de especímenes del diseño de mezcla con filler 3 % de índice de plasticidad

% Asfalto/Estabilidad Marshall	Especímenes al aire			Especímenes sumergidos en agua		
	M1-A	M2-A	M3-A	M1-S	M2-S	M3-S
4,30 %						
Estabilidad (lectura) (kg)	258,10	458,10	857,30*	575,00	395,10	420,80
Altura de espécimen (cm)	6,11	6,10	6,23	6,15	6,02	6,10
Factor de corrección	1,07	1,07	1,03	1,05	1,09	1,07
4,80 %	M4-A	M5-A	M6-A	M4-S	M5-S	M6-S
Estabilidad (lectura) (kg)	289,60	433,30	670,70*	300,20	389,30	511,30
Altura de espécimen (cm)	6,05	6,01	6,20	6,01	6,25	5,95
Factor de corrección	1,08	1,10	1,04	1,10	1,03	1,12
5,30 %	M7-A	M8-A	M9-A	M7-S	M8-S	M9-S
Estabilidad (lectura) (kg)	398,40	538,10	408,50	356,20	385,20	539,20
Altura de espécimen (cm)	6,01	6,23	6,18	6,01	6,07	6,15
Factor de corrección	1,10	1,03	1,04	1,10	1,08	1,05
5,80 %	M10-A	M11-A	M12-A	M10-S	M11-S	M12-S
Estabilidad (lectura) (kg)	222,10	391,90	255,00	307,80	201,70	235,50
Altura de espécimen (cm)	6,24	6,21	6,20	6,12	6,18	6,05
Factor de corrección	1,03	1,04	1,04	1,06	1,04	1,08
6,30 %	M13-A	M14-A	M15-A	M13-S	M14-S	M15-S
Estabilidad (lectura) (kg)	75,30	225,20	267,90	63,30	218,50	204,40
Altura de espécimen (cm)	5,97	6,10	6,11	5,98	6,18	6,20
Factor de corrección	1,11	1,07	1,07	1,11	1,04	1,04

Nota: (*) Resultados descartados por estar demasiado alejados del promedio

Tabla 93

Resultados de ensayo estabilidad Marshall de especímenes del diseño de mezcla con filler 6 % de índice de plasticidad

% Asfalto/Estabilidad Marshall	Especímenes al aire			Especímenes sumergidos en agua		
4,30 %	M16-A	M17-A	M18-A	M16-S	M17-S	M18-S
Estabilidad (lectura) (kg)	779,60*	305,40	351,10	303,80	283,40	507,40
Altura de espécimen (cm)	6,19	6,15	6,08	6,25	6,10	6,26
Factor de corrección	1,04	1,05	1,07	1,03	1,07	1,02
4,80 %	M19-A	M20-A	M21-A	M19-S	M20-S	M21-S
Estabilidad (lectura) (kg)	371,50	303,50	329,20	298,10	572,10	307,60
Altura de espécimen (cm)	5,95	6,05	5,95	6,10	5,93	6,02
Factor de corrección	1,12	1,08	1,12	1,07	1,12	1,09
5,30 %	M22-A	M23-A	M24-A	M22-S	M23-S	M24-S
Estabilidad (lectura) (kg)	533,00	382,40	339,20	438,00	355,20	584,00
Altura de espécimen (cm)	6,12	6,14	6,16	5,90	6,02	6,11
Factor de corrección	1,06	1,06	1,05	1,13	1,09	1,07
5,80 %	M25-A	M26-A	M27-A	M25-S	M26-S	M27-S
Estabilidad (lectura) (kg)	250,20	338,40	220,10	229,20	380,70	209,50
Altura de espécimen (cm)	6,33	6,05	6,12	6,04	5,80	6,10
Factor de corrección	1,01	1,08	1,06	1,09	1,16	1,07
6,30 %	M28-A	M29-A	M30-A	M28-S	M29-S	M30-S
Estabilidad (lectura) (kg)	215,50	119,00	78,60	251,30	96,00	73,70
Altura de espécimen (cm)	5,95	6,05	6,00	6,17	6,11	5,83
Factor de corrección	1,12	1,08	1,10	1,05	1,07	1,15

Nota: () Resultados descartados por estar demasiado alejados del promedio*

Tabla 94

Resultados de ensayo estabilidad Marshall de especímenes del diseño de mezcla con filler 12 % de índice de plasticidad

% Asfalto/ Estabilidad Marshall	Especímenes al aire			Especímenes sumergidos en agua		
4,30 %	M31-A	M32-A	M33-A	M31-S	M32-S	M33-S
Estabilidad (lectura) (kg)	210,40	677,20*	309,70	205,30	221,10	506,40
Altura de espécimen (cm)	6,01	6,25	6,05	6,12	6,10	6,20
Factor de corrección	1,10	1,03	1,08	1,06	1,07	1,04
4,80 %	M34-A	M35-A	M36-A	M34-S	M35-S	M36-S
Estabilidad (lectura) (kg)	285,20	293,40	342,40	188,40	244,20	446,40
Altura de espécimen (cm)	6,01	6,03	6,15	6,10	6,14	6,15
Factor de corrección	1,10	1,09	1,05	1,07	1,06	1,05
5,30 %	M37-A	M38-A	M39-A	M37-S	M38-S	M39-S
Estabilidad (lectura) (kg)	293,20	407,40	293,60	262,50	351,10	270,40
Altura de espécimen (cm)	6,15	6,30	6,05	6,03	6,15	6,11
Factor de corrección	1,05	1,01	1,08	1,09	1,05	1,07
5,80 %	M40-A	M41-A	M42-A	M40-S	M41-S	M42-S
Estabilidad (lectura) (kg)	195,80	265,40	259,90	188,50	296,10	241,30
Altura de espécimen (cm)	6,01	6,13	6,10	6,05	6,24	6,27
Factor de corrección	1,10	1,06	1,07	1,08	1,03	1,02
6,30 %	M43-A	M44-A	M45-A	M43-S	M44-S	M45-S
Estabilidad (lectura) (kg)	85,40	96,30	86,70	71,20	120,50	75,10
Altura de espécimen (cm)	6,11	6,07	6,10	6,15	6,20	6,05
Factor de corrección	1,07	1,08	1,07	1,05	1,04	1,08

Nota: () Resultados descartados por estar demasiado alejados del promedio*

Los factores de corrección utilizados para cada espécimen fueron tomados de la tabla 95 en función de su altura (espesor), para mayor exactitud se interpolaron los factores propuestos:

Tabla 95*Factores de estabilidad de correlación*

Volumen del espécimen (cm ³)		Altura o espesor del espécimen		Factor de corrección
Mínimo	Máximo	mm	cm	
200	213	25,4	2,54	5,56
214	225	27	2,7	5
226	237	28,6	2,86	4,55
238	250	30,2	3,02	4,17
251	264	31,8	3,18	3,85
265	276	33,3	3,33	3,57
277	289	34,9	3,49	3,33
290	301	36,5	3,65	3,03
302	316	38,1	3,81	2,78
329	340	39,7	3,97	2,27
317	328	41,3	4,13	2,5
354	367	44,4	4,44	1,92
368	379	46	4,6	1,79
380	392	47,6	4,76	1,67
393	405	49,2	4,92	1,56
406	420	50,8	5,08	1,47
421	431	52,4	5,24	1,39
432	443	54	5,4	1,32
444	456	55,6	5,56	1,25
457	470	57,2	5,72	1,19
471	482	58,7	5,87	1,14
483	495	60,3	6,03	1,09
496	508	61,9	6,19	1,04
509	522	63,5	6,35	1
523	535	65,1	6,51	0,96
536	546	66,7	6,67	0,93
547	559	68,3	6,83	0,89
560	573	69,8	6,98	0,86
574	585	71,4	7,14	0,83
586	598	73	7,3	0,81
599	610	74,6	7,46	0,78
611	625	76,2	7,62	0,76

Fuente: Ministerio de Transportes y Comunicaciones, Dirección General de Caminos y Ferrocarriles, 2016

La estabilidad corregida resulta utilizando la ecuación 45:

$$Estc = Estm \times Fact \dots \dots \dots [Ecuación 45]$$

Donde:

Estc = Estabilidad corregida (kg)

Estm = Estabilidad Marshall medida en la prensa (kg)

Fact = Factor de corrección tomado de la tabla 95 (se interpoló para cada altura de espécimen)

Las estabilidades corregidas se muestran en las tablas 96, 97 y 98 por cada diseño de mezcla asfáltica:

Tabla 96

Estabilidades corregidas de especímenes del diseño de mezcla con filler 3 % de índice de plasticidad

% Asfalto/ Estabilidad corregida	Especímenes al aire			Promedio	Especímenes sumergidos en agua			Promedio
	M1-A	M2-A	M3-A		M1-S	M2-S	M3-S	
4,30 % Estabilidad corregida (kg)	M1-A	M2-A	M3-A		M1-S	M2-S	M3-S	
	276,17	490,17	883,02*	383,17	603,75	430,66	450,26	494,89
4,80 % Estabilidad corregida (kg)	M4-A	M5-A	M6-A		M4-S	M5-S	M6-S	
	312,77	476,63	697,53*	394,70	330,22	400,98	572,66	434,62
5,30 % Estabilidad corregida (kg)	M7-A	M8-A	M9-A		M7-S	M8-S	M9-S	
	438,24	554,24	424,84	472,44	391,82	416,02	566,16	458,00
5,80 % Estabilidad corregida (kg)	M10-A	M11-A	M12-A		M10-S	M11-S	M12-S	
	228,76	407,58	265,20	300,51	326,27	209,77	254,34	263,46
6,30 % Estabilidad corregida (kg)	M13-A	M14-A	M15-A		M13-S	M14-S	M15-S	
	83,58	240,96	286,65	203,73	70,26	227,24	212,58	170,03

Nota: () Resultados descartados por estar demasiado alejados del promedio*

Tabla 97*Estabilidades corregidas de especímenes del diseño de mezcla con filler 6 % de índice de plasticidad*

% Asfalto/ Estabilidad corregida	Especímenes al aire			Promedio	Especímenes sumergidos en agua			Promedio
4,30 %	M16-A	M17-A	M18-A		M16-S	M17-S	M18-S	
Estabilidad corregida (kg)	810,78*	320,67	375,68	348,17	312,91	303,24	517,55	377,90
4,80 %	M19-A	M20-A	M21-A		M19-S	M20-S	M21-S	
Estabilidad corregida (kg)	416,08	327,78	368,70	370,85	318,97	640,75	335,28	431,67
5,30 %	M22-A	M23-A	M24-A		M22-S	M23-S	M24-S	
Estabilidad corregida (kg)	564,98	405,34	356,16	442,16	494,94	387,17	624,88	502,33
5,80 %	M25-A	M26-A	M27-A		M25-S	M26-S	M27-S	
Estabilidad corregida (kg)	252,70	365,47	233,31	283,83	249,83	441,61	224,17	305,20
6,30 %	M28-A	M29-A	M30-A		M28-S	M29-S	M30-S	
Estabilidad corregida (kg)	241,36	128,52	86,46	152,11	263,87	102,72	84,76	150,45

Nota: () Resultados descartados por estar demasiado alejados del promedio***Tabla 98***Estabilidades corregidas de especímenes del diseño de mezcla con filler 12 % de índice de plasticidad*

% Asfalto/ Estabilidad corregida	Especímenes al aire			Promedio	Especímenes sumergidos en agua			Promedio
4,30 %	M31-A	M32-A	M33-A		M31-S	M32-S	M33-S	
Estabilidad corregida (kg)	231,44	697,52*	334,48	282,96	217,62	236,58	526,66	326,95
4,80 %	M34-A	M35-A	M36-A		M34-S	M35-S	M36-S	
Estabilidad corregida (kg)	313,72	319,81	359,52	331,02	201,59	258,85	468,72	309,72
5,30 %	M37-A	M38-A	M39-A		M37-S	M38-S	M39-S	
Estabilidad corregida (kg)	307,86	411,47	317,09	345,47	286,13	368,66	289,33	314,70
5,80 %	M40-A	M41-A	M42-A		M40-S	M41-S	M42-S	
Estabilidad corregida (kg)	215,38	281,32	278,09	258,27	203,58	304,98	246,13	251,56
6,30 %	M43-A	M44-A	M45-A		M43-S	M44-S	M45-S	
Estabilidad corregida (kg)	91,38	104,00	92,77	96,05	74,76	125,32	81,11	93,73

Nota: () Resultados descartados por estar demasiado alejados del promedio*

El flujo registrado al alcanzar la estabilidad máxima en cada espécimen se muestra en las tablas 99, 100 y 101:

Tabla 99

Resultados de flujo Marshall en especímenes del diseño de mezcla con filler 3 % de índice de plasticidad

% Asfalto/Flujo	Especímenes al aire			Promedio	Especímenes sumergidos en agua			Promedio
	M1-A	M2-A	M3-A		M1-S	M2-S	M3-S	
4,30 % Flujo (mm)	3,05	3,12	3,05	3,07	5,33	2,69	3,89	3,97
4,80 % Flujo (mm)	M4-A 3,12	M5-A 3,53	M6-A 3,10	3,25	M4-S 3,56	M5-S 3,81	M6-S 4,83	4,06
5,30 % Flujo (mm)	M7-A 3,71	M8-A 3,35	M9-A 2,92	3,33	M7-S 4,14	M8-S 4,22	M9-S 4,06	4,14
5,80 % Flujo (mm)	M10-A 4,17	M11-A 3,25	M12-A 3,18	3,53	M10-S 4,83	M11-S 4,70	M12-S 3,53	4,35
6,30 % Flujo (mm)	M13-A 3,23	M14-A 3,86	M15-A 3,76	3,62	M13-S 4,75	M14-S 4,78	M15-S 3,73	4,42

Tabla 100

Resultados de flujo Marshall en especímenes del diseño de mezcla con filler 6 % de índice de plasticidad

% Asfalto/Flujo	Especímenes al aire			Promedio	Especímenes sumergidos en agua			Promedio
	M16-A	M17-A	M18-A		M16-S	M17-S	M18-S	
4,30 % Flujo (mm)	3,61	3,33	2,77	3,23	3,56	3,56	2,79	3,30
4,80 % Flujo (mm)	M19-A 3,96	M20-A 5,13*	M21-A 2,72	3,34	M19-S 2,84	M20-S 7,19*	M21-S 3,86	3,35
5,30 % Flujo (mm)	M22-A 3,18	M23-A 3,73	M24-A 3,33	3,41	M22-S 4,90	M23-S 2,51	M24-S 3,68	3,70
5,80 % Flujo (mm)	M25-A 2,54	M26-A 3,89	M27-A 4,47	3,63	M25-S 3,07	M26-S 4,52	M27-S 3,40	3,67
6,30 % Flujo (mm)	M28-A 3,45	M29-A 4,55	M30-A 3,71	3,90	M28-S 3,18	M29-S 3,12	M30-S 4,90	3,73

Nota: () Resultados descartados por estar demasiado alejados del promedio*

Tabla 101

Resultados de flujo Marshall en especímenes del diseño de mezcla con filler 12 % de índice de plasticidad

% Asfalto/Flujo	Especímenes al aire			Promedio	Especímenes sumergidos en agua			Promedio
	M31-A	M32-A	M33-A		M31-S	M32-S	M33-S	
4,30 % Flujo (mm)	3,43	3,56	3,68	3,56	3,96	3,94	3,23	3,71
4,80 % Flujo (mm)	M34-A	M35-A	M36-A	3,84	M34-S	M35-S	M36-S	4,20
5,30 % Flujo (mm)	4,01	4,19	3,30	4,16	3,86	5,21	3,53	4,22
5,80 % Flujo (mm)	M37-A	M38-A	M39-A	4,40	M37-S	M38-S	M39-S	4,43
6,30 % Flujo (mm)	4,32	3,89	4,27	4,54	4,55	4,72	3,38	4,47
	M40-A	M41-A	M42-A		M40-S	M41-S	M42-S	
	4,72	4,85	3,63		4,88	4,72	3,68	
	M43-A	M44-A	M45-A		M43-S	M44-S	M45-S	
	4,67	4,50	4,45		3,81	4,83	4,78	

4.1.4.8 Gráficos de ensayo Marshall.

En las tablas 102, 103 y 104 se presentan los resúmenes con los promedios de los resultados obtenidos de cada espécimen y por cada % de asfalto: peso específico bulk (densidad), vacíos VTM, vacíos en el agregado mineral VMA, vacíos llenos con asfalto VFA, estabilidad y flujo, con los cuales se elaboraron los gráficos Marshall.

Tabla 102

Promedios de resultados de especímenes del diseño de mezcla con filler 3 % de índice de plasticidad para gráficos Marshall

Propiedades de mezcla asfáltica	Especímenes al aire					Especímenes sumergidos en agua				
	4,3 %	4,8 %	5,3 %	5,8 %	6,3 %	4,3 %	4,8 %	5,3 %	5,8 %	6,3 %
Densidad (g/cm ³)	2,24	2,24	2,26	2,24	2,25	2,30	2,31	2,29	2,28	2,27
Vacíos VTM (%)	6,87	6,09	4,79	4,84	3,71	4,40	3,26	3,38	2,99	2,90
VMA (%)	13,65	14,04	13,96	15,10	15,17	11,37	11,45	12,69	13,44	14,46
VFA (%)	49,71	56,67	65,70	67,93	75,62	61,27	71,61	73,36	77,83	80,01
Estabilidad (kg)	383,17	394,70	472,44	300,51	203,73	494,89	434,62	458,00	263,46	170,03
Flujo (mm)	3,07	3,25	3,33	3,53	3,62	3,97	4,06	4,14	4,35	4,42

Nota: Los especímenes sumergidos en agua no fueron graficados puesto que sirvieron para evaluar el daño por humedad en cada espécimen (estabilidad retenida)

En las figuras 34, 35, 36, 37, 38 y 39 se muestran los gráficos Marshall para el diseño de mezcla con filler 3 % de índice de plasticidad.

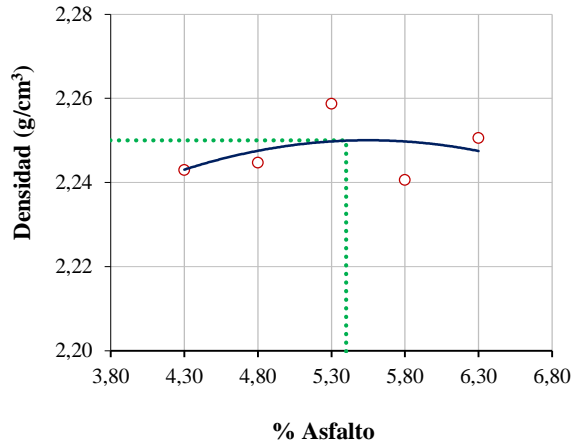


Figura 34. Densidad vs % asfalto en la mezcla (diseño con 3 % de índice de plasticidad en el filler)

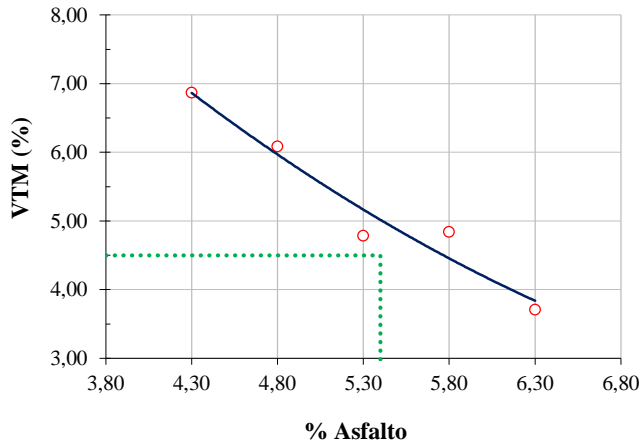


Figura 35. Vacíos VTM vs % asfalto en la mezcla (diseño con 3 % de índice de plasticidad en el filler)

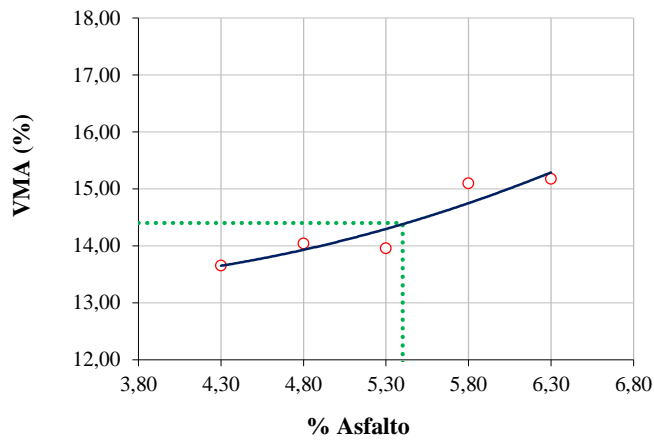


Figura 36. Vacíos VMA vs % asfalto en la mezcla (diseño con 3 % de índice de plasticidad en el filler)

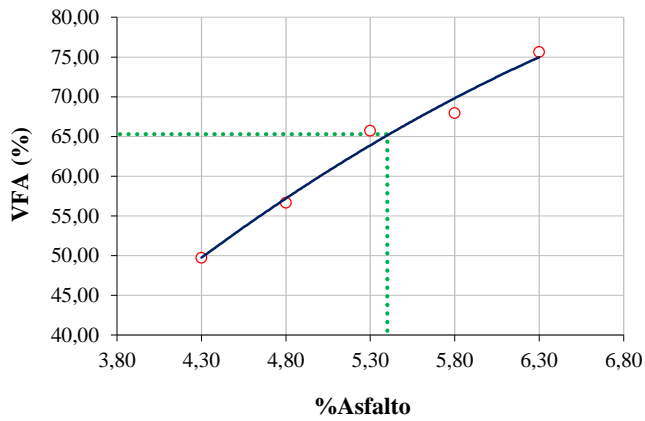


Figura 37. Vacíos VFA vs % asfalto en la mezcla (diseño con 3 % de índice de plasticidad en el filler)

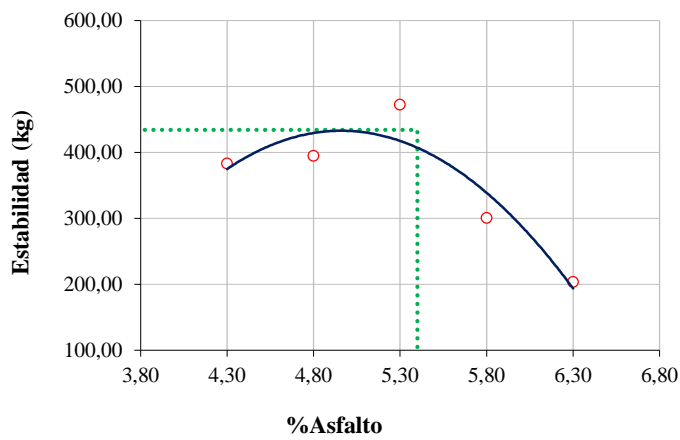


Figura 38. Estabilidad vs % asfalto en la mezcla (diseño con 3 % de índice de plasticidad en el filler)

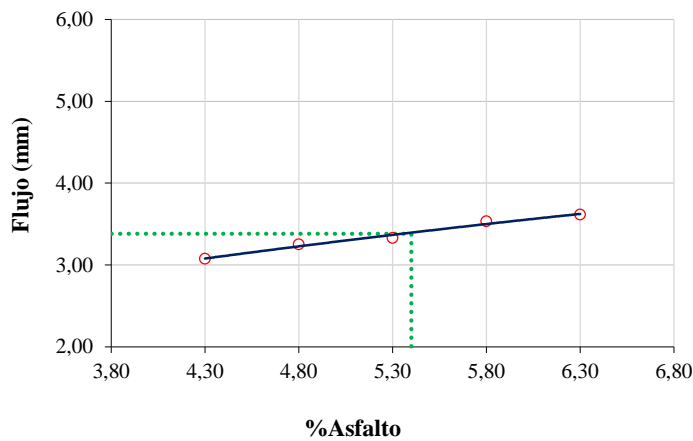


Figura 39. Flujo vs % asfalto en la mezcla (diseño con 3 % de índice de plasticidad en el filler)

Tabla 103

Promedios de resultados de especímenes del diseño de mezcla con filler 6 % de índice de plasticidad para gráficos Marshall

Propiedades de mezcla asfáltica	Especímenes al aire					Especímenes sumergidos en agua				
	4,3 %	4,8 %	5,3 %	5,8 %	6,3 %	4,3 %	4,8 %	5,3 %	5,8 %	6,3 %
Densidad (g/cm ³)	2,22	2,24	2,25	2,24	2,24	2,23	2,25	2,24	2,23	2,23
VTM (%)	7,78	6,32	5,23	4,78	3,95	7,46	5,72	5,55	5,10	4,48
VMA (%)	14,50	14,25	14,35	15,04	15,39	14,21	13,70	14,65	15,32	15,85
VFA (%)	46,60	55,68	63,59	68,26	74,32	47,47	58,31	62,12	66,81	71,88
Estabilidad (kg)	348,17	370,85	442,16	283,83	152,11	377,90	431,67	502,33	305,20	150,45
Flujo (mm)	3,23	3,34	3,41	3,63	3,90	3,30	3,35	3,70	3,67	3,73

Nota: Los especímenes sumergidos en agua no fueron graficados puesto que sirvieron para evaluar el daño por humedad en cada espécimen (estabilidad retenida)

En las figuras 40, 41, 42, 43, 44 y 45 se muestran los gráficos Marshall para el diseño de mezcla con filler 6 % de índice de plasticidad.

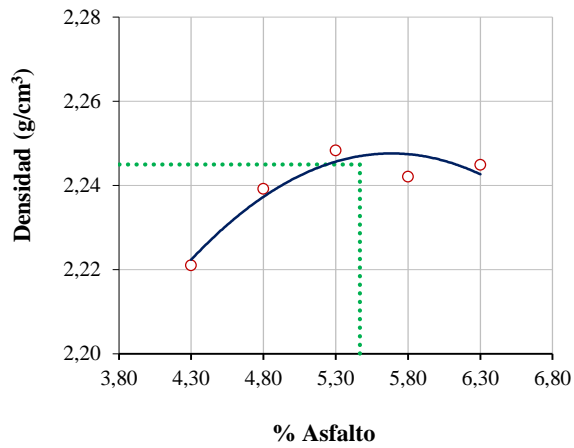


Figura 40. Densidad vs % asfalto en la mezcla (diseño con 6 % de índice de plasticidad en el filler)

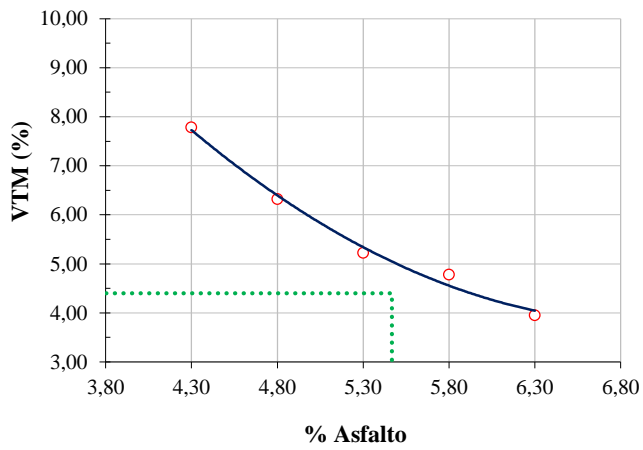


Figura 41. Vacíos VTM vs % asfalto en la mezcla (diseño con 6 % de índice de plasticidad en el filler)

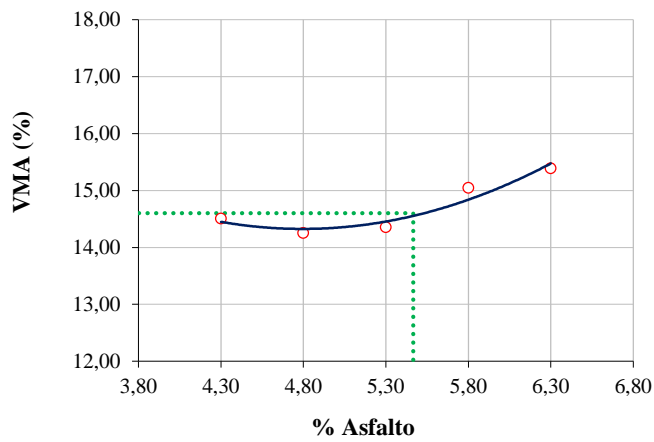


Figura 42. Vacíos VMA vs % asfalto en la mezcla (diseño con 6 % de índice de plasticidad en el filler)

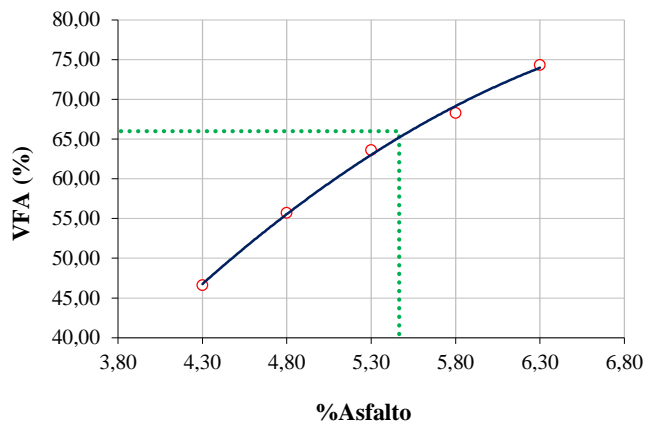


Figura 43. Vacíos VFA vs % asfalto en la mezcla (diseño con 6 % de índice de plasticidad en el filler)

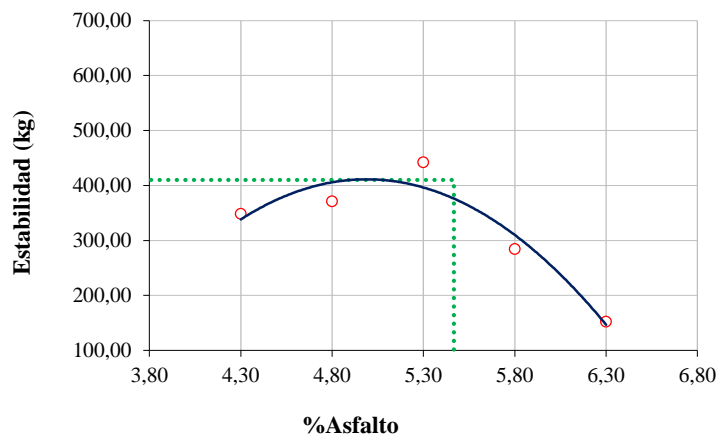


Figura 44. Estabilidad vs % asfalto en la mezcla (diseño con 6 % de índice de plasticidad en el filler)

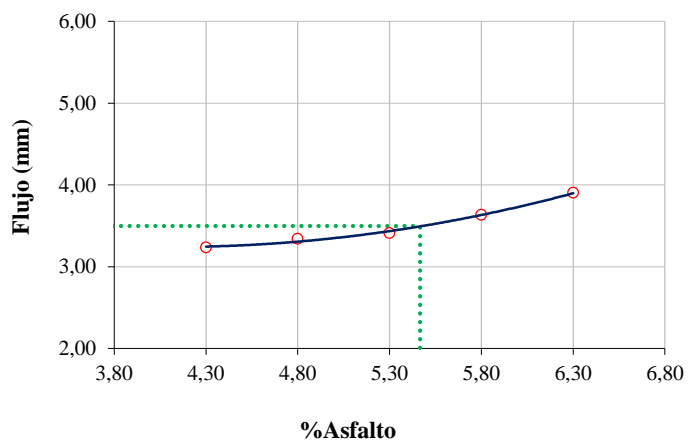


Figura 45. Flujo vs % asfalto en la mezcla (diseño con 6 % de índice de plasticidad en el filler)

Tabla 104

Promedios de resultados de especímenes del diseño de mezcla con filler 12 % de índice de plasticidad para gráficos Marshall

Propiedades de mezcla asfáltica	Especímenes al aire					Especímenes sumergidos en agua				
	4,3 %	4,8 %	5,3 %	5,8 %	6,3 %	4,3 %	4,8 %	5,3 %	5,8 %	6,3 %
Densidad (g/cm ³)	2,22	2,24	2,25	2,24	2,24	2,23	2,25	2,24	2,23	2,23
VTM (%)	7,78	6,32	5,23	4,78	3,95	7,46	5,72	5,55	5,10	4,48
VMA (%)	14,50	14,25	14,35	15,04	15,39	14,21	13,70	14,65	15,32	15,85
VFA (%)	46,60	55,68	63,59	68,26	74,32	47,47	58,31	62,12	66,81	71,88
Estabilidad (kg)	348,17	370,85	442,16	283,83	152,11	377,90	431,67	502,33	305,20	150,45
Flujo (mm)	3,23	3,34	3,41	3,63	3,90	3,30	3,35	3,70	3,67	3,73

Nota: Los especímenes sumergidos en agua no fueron graficados puesto que sirvieron para evaluar el daño por humedad en cada espécimen (estabilidad retenida)

En las figuras 46, 47, 48, 49, 50 y 51 se muestran los gráficos Marshall para el diseño de mezcla con filler 12 % de índice de plasticidad.

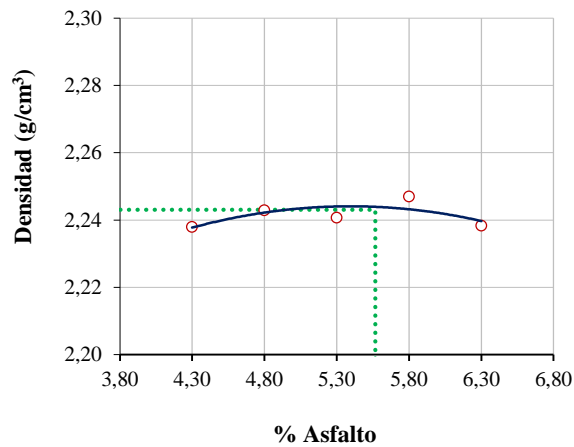


Figura 46. Densidad vs % asfalto en la mezcla (diseño con 12 % de índice de plasticidad en el filler)

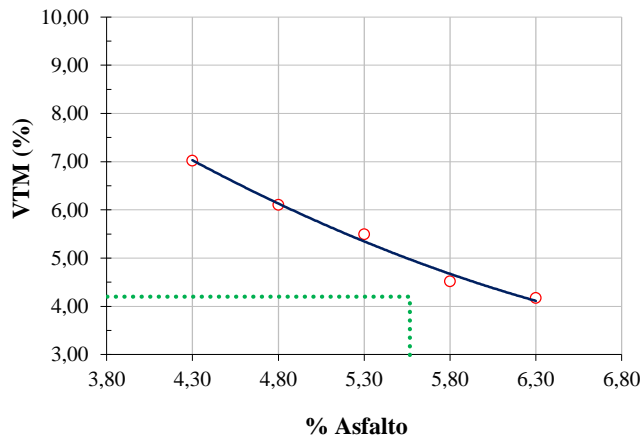


Figura 47. Vacíos VTM vs % asfalto en la mezcla (diseño con 12 % de índice de plasticidad en el filler)

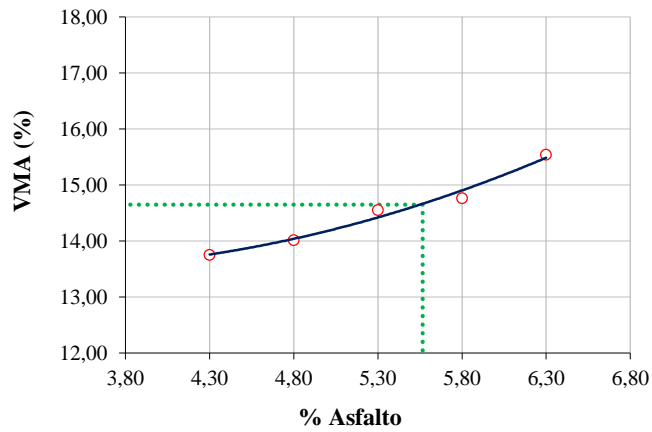


Figura 48. Vacíos VMA vs % asfalto en la mezcla (diseño con 12 % de índice de plasticidad en el filler)

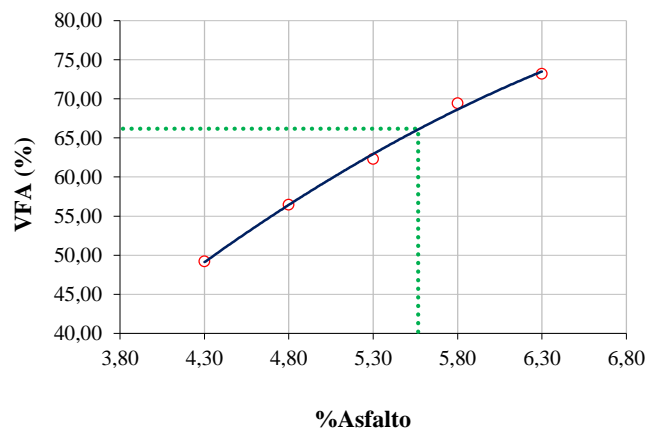


Figura 49. Vacíos VFA vs % asfalto en la mezcla (diseño con 12 % de índice de plasticidad en el filler)

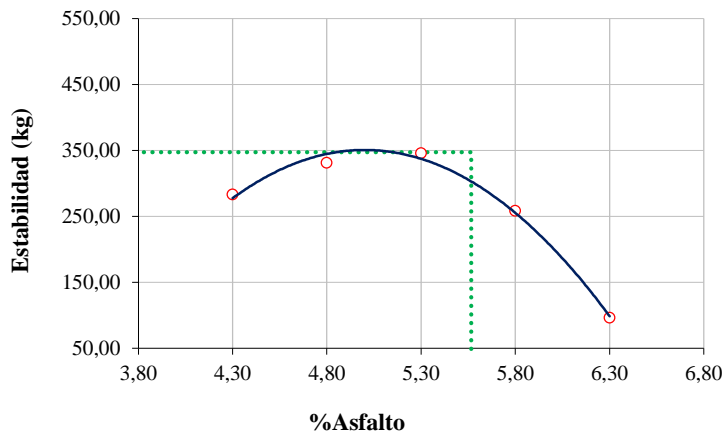


Figura 50. Estabilidad vs % asfalto en la mezcla (diseño con 12 % de índice de plasticidad en el filler)

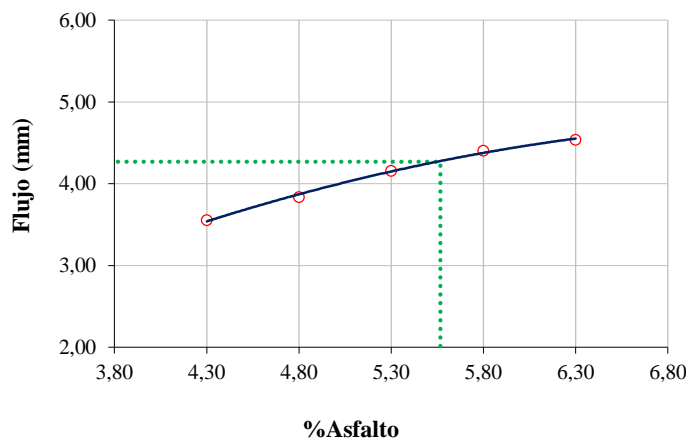


Figura 51. Flujo vs % asfalto en la mezcla (diseño con 12 % de índice de plasticidad en el filler)

4.1.4.9 Diseño de contenido óptimo de asfalto.

Para determinar el contenido óptimo de asfalto para cada diseño se aplicó el método del Instituto del Asfalto, el cual considera los máximos valores obtenidos de estabilidad Marshall, densidad y % de vacíos VTM (según los gráficos de cada diseño), de estos valores se obtiene un promedio, el cual se tomó como contenido

óptimo de asfalto, el resultado para el diseño de mezcla con 3 % de índice de plasticidad en el filler se detalla en la tabla 105.

Tabla 105

Determinación de contenido óptimo de asfalto para diseño de mezcla con 3 % de índice de plasticidad en el filler

Propiedad de mezcla	Valores máximos obtenidos	% Óptimos de asfalto
Máxima densidad en pico de la curva (g/cm ³)	2,25	5,40
Máxima vacíos VTM en pico de la curva (%)	4,50	5,80
Máxima estabilidad en pico de la curva (kg)	434,50	5,00
% Óptimo de Asfalto (promedio)		5,40

Nota: Los % óptimos de asfalto se determinaron con la intersección del valor máximo para cada propiedad de la mezcla

Con el % óptimo determinado (promedio) se interseca en las gráficas para las propiedades de vacíos VMA, vacíos VFA y flujo, obteniendo finalmente los resultados de la tabla 106 para este diseño de mezcla:

Tabla 106

Resultados finales para diseño de mezcla con 3 % de índice de plasticidad en el filler

Resultados finales de diseño de mezcla	
Contenido óptimo de asfalto (%)	5,40
Densidad (g/cm ³)	2,25
Vacíos VTM (%)	4,50
Vacíos VMA (%)	14,40
Vacíos VFA (%)	65,30
Estabilidad (kg)	434,50
Flujo (mm)	3,38

Para los diseños de mezcla restantes se siguió el mismo procedimiento obteniéndose los resultados en las tablas 107, 108, 109 y 110:

Tabla 107

Determinación de contenido óptimo de asfalto para diseño de mezcla con 6 % de índice de plasticidad en el filler

Propiedad de mezcla	Valores máximos obtenidos	% Óptimos de asfalto
Máxima densidad en pico de la curva (g/cm ³)	2,25	5,50
Máxima vacíos VTM en pico de la curva (%)	4,40	5,90
Máxima estabilidad en pico de la curva (kg)	410,20	5,00
% Óptimo de Asfalto (promedio)		5,47

Nota: Los % óptimos de asfalto se determinaron con la intersección del valor máximo para cada propiedad de la mezcla

Tabla 108

Resultados finales para diseño de mezcla con 6 % de índice de plasticidad en el filler

Resultados finales de diseño de mezcla	
Contenido óptimo de asfalto (%)	5,47
Densidad (g/cm ³)	2,25
Vacíos VTM (%)	4,40
Vacíos VMA (%)	14,60
Vacíos VFA (%)	65,30
Estabilidad (kg)	410,20
Flujo (mm)	3,50

Tabla 109

Determinación de contenido óptimo de asfalto para diseño de mezcla con 12 % de índice de plasticidad en el filler

Propiedad de mezcla	Valores máximos obtenidos	% Óptimos de asfalto
Máxima densidad en pico de la curva (g/cm ³)	2,24	5,50
Máxima vacíos VTM en pico de la curva (%)	4,20	6,20
Máxima estabilidad en pico de la curva (kg)	347,40	5,00
% Óptimo de Asfalto (promedio)		5,57

Nota: Los % óptimos de asfalto se determinaron con la intersección del valor máximo para cada propiedad de la mezcla

Tabla 110

Resultados finales para diseño de mezcla con 12 % de índice de plasticidad en el filler

Resultados finales de diseño de mezcla	
Contenido óptimo de asfalto (%)	5,57
Densidad (g/cm ³)	2,24
Vacíos VTM (%)	4,20
Vacíos VMA (%)	14,65
Vacíos VFA (%)	66,20
Estabilidad (kg)	347,40
Flujo (mm)	4,27

4.1.4.10 Estabilidad retenida en especímenes (daño por humedad).

Como adicional en la presente investigación se realizó la evaluación de la estabilidad retenida, la cual se obtiene comparando las estabilidades de los especímenes secados al aire vs los especímenes sumergidos en agua por cuatro días, para ello se aplicó la ecuación 46:

$$\%Eret = \left(\frac{Est.H.}{Est.S.} \right) \times 100 \dots\dots\dots [Ecuación 46]$$

Donde:

%Eret = Porcentaje de estabilidad retenida (%)

Est.S. = Estabilidad seca (especímenes al aire) (kg)

Est.H. = Estabilidad húmeda (especímenes sumergidos en agua) (kg)

Es necesario mencionar que el Manual del Instituto del Asfalto MS-14 indica que la estabilidad retenida debe ser mínimamente 75 %. Las tablas 111, 112 y 113 muestran los resultados de estabilidades retenidas por cada diseño de mezcla:

Tabla 111

Comparativo de estabilidades secas vs estabilidades húmedas en diseño de mezcla con 3 % de índice de plasticidad en el filler

% Asfalto/Estabilidades Marshall	Especímenes al aire vs especímenes sumergidos en agua					
4,30 %	M1-A	M1-S	M2-A	M2-S	M3-A	M3-S
Estabilidad seca (kg)	276,17		490,17		883,02	
Estabilidad húmeda (kg)		603,75		430,66		450,26
% Estabilidad retenida		218,62		87,86		50,99
4,80 %	M4-A	M4-S	M5-A	M5-S	M6-A	M6-S
Estabilidad seca (kg)	312,77		476,63		697,53	
Estabilidad húmeda (kg)		330,22		400,98		572,66
% Estabilidad retenida		105,58		84,13		82,10
5,30 %	M7-A	M7-S	M8-A	M8-S	M9-A	M9-S
Estabilidad seca (kg)	438,24		554,24		424,84	
Estabilidad húmeda (kg)		391,82		416,02		566,16
% Estabilidad retenida		89,41		75,06		133,26
5,80 %	M10-A	M10-S	M11-A	M11-S	M12-A	M12-S
Estabilidad seca (kg)	228,76		407,58		265,20	
Estabilidad húmeda (kg)		326,27		209,77		254,34
% Estabilidad retenida		142,62		51,47		95,90
6,30 %	M13-A	M13-S	M14-A	M14-S	M15-A	M15-S
Estabilidad seca (kg)	83,58		240,96		286,65	
Estabilidad húmeda (kg)		70,26		227,24		212,58
% Estabilidad retenida		84,06		94,30		74,16

Tabla 112

Comparativo de estabilidades secas vs estabilidades húmedas en diseño de mezcla con 6 % de índice de plasticidad en el filler

% Asfalto/Estabilidades Marshall	Especímenes al aire vs especímenes sumergidos en agua					
4,30 %	M16-A	M16-S	M17-A	M17-S	M18-A	M18-S
Estabilidad seca (kg)	810,78		320,67		375,68	
Estabilidad húmeda (kg)		312,91		303,24		517,55
% Estabilidad retenida		38,59		94,56		137,76
4,80 %	M19-A	M19-S	M20-A	M20-S	M21-A	M21-S
Estabilidad seca (kg)	416,08		327,78		368,70	
Estabilidad húmeda (kg)		318,97		640,75		335,28
% Estabilidad retenida		76,66		195,48		90,94
5,30 %	M22-A	M22-S	M23-A	M23-S	M24-A	M24-S
Estabilidad seca (kg)	564,98		405,34		356,16	
Estabilidad húmeda (kg)		494,94		387,17		624,88
% Estabilidad retenida		87,60		95,52		175,45
5,80 %	M25-A	M25-S	M26-A	M26-S	M27-A	M27-S
Estabilidad seca (kg)	252,70		365,47		233,31	
Estabilidad húmeda (kg)		249,83		441,61		224,17
% Estabilidad retenida		98,86		120,83		96,08
6,30 %	M28-A	M28-S	M29-A	M29-S	M30-A	M30-S
Estabilidad seca (kg)	241,36		128,52		86,46	
Estabilidad húmeda (kg)		263,87		102,72		84,76
% Estabilidad retenida		109,32		79,93		98,03

Tabla 113

Comparativo de estabilidades secas vs estabilidades húmedas en diseño de mezcla con 12 % de índice de plasticidad en el filler

% Asfalto/Estabilidades Marshall	Especímenes al aire vs especímenes sumergidos en agua					
	M31-A	M31-S	M32-A	M32-S	M33-A	M33-S
4,30 %						
Estabilidad seca (kg)	231,44		697,52		334,48	
Estabilidad húmeda (kg)		217,62		236,58		526,66
% Estabilidad retenida		94,03		33,92		157,46
4,80 %						
Estabilidad seca (kg)	313,72		319,81		359,52	
Estabilidad húmeda (kg)		201,59		258,85		468,72
% Estabilidad retenida		64,26		80,94		130,37
5,30 %						
Estabilidad seca (kg)	307,86		411,47		317,09	
Estabilidad húmeda (kg)		286,13		368,66		289,33
% Estabilidad retenida		92,94		89,59		91,25
5,80 %						
Estabilidad seca (kg)	215,38		281,32		278,09	
Estabilidad húmeda (kg)		203,58		304,98		246,13
% Estabilidad retenida		94,52		108,41		88,50
6,30 %						
Estabilidad seca (kg)	91,38		104,00		92,77	
Estabilidad húmeda (kg)		74,76		125,32		81,11
% Estabilidad retenida		81,81		120,50		87,43

Para un mejor entendimiento de los resultados antes mostrados sobre % de estabilidades retenidas, se presentan las figuras 52, 53 y 54 de los comparativos de estabilidad seca y húmeda:

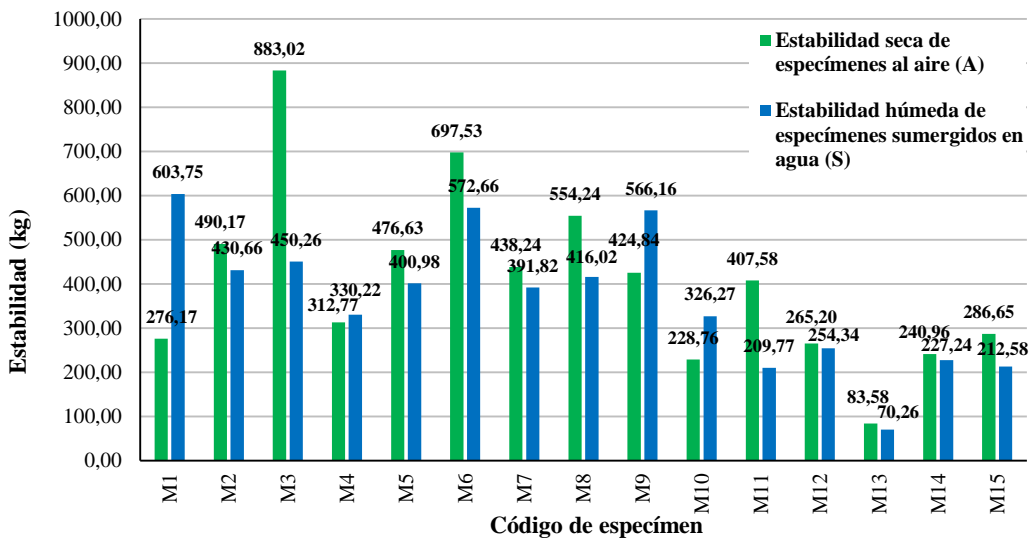


Figura 52. Comparativo de estabilidad seca vs estabilidad húmeda (diseño de mezcla con 3 % de índice de plasticidad en el filler)

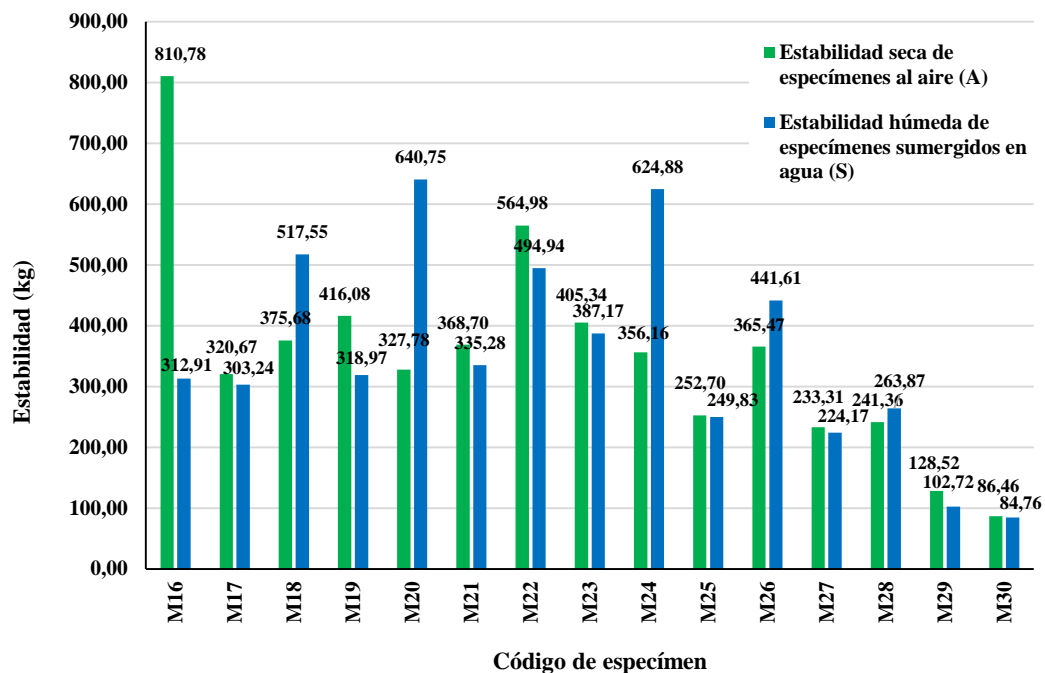


Figura 53. Comparativo de estabilidad seca vs estabilidad húmeda (diseño de mezcla con 6 % de índice de plasticidad en el filler)

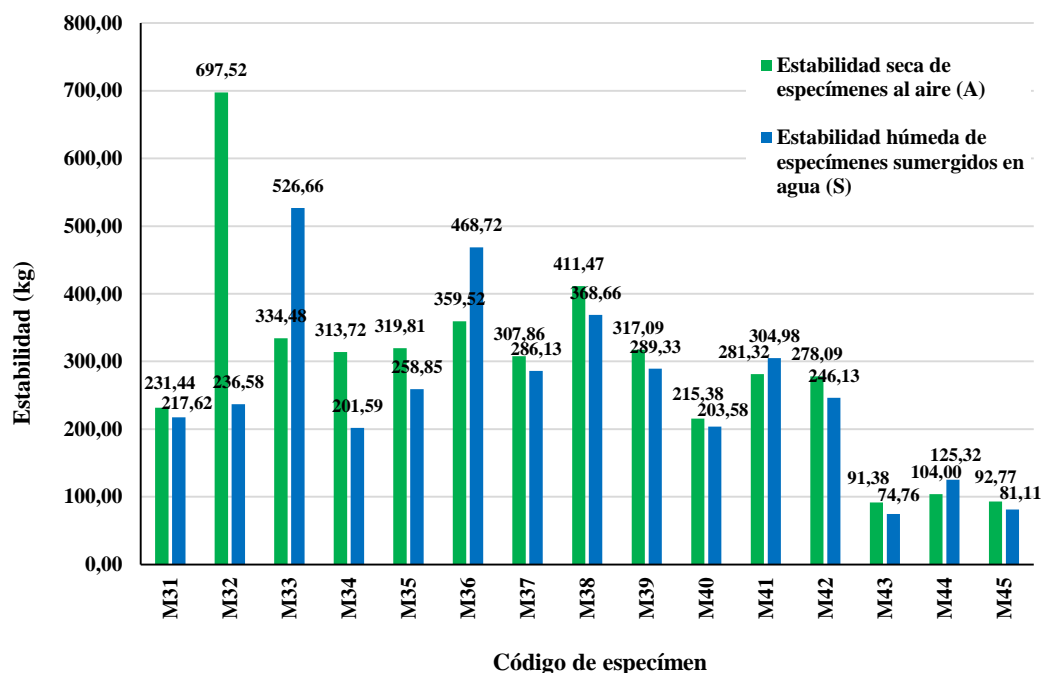


Figura 54. Comparativo de estabilidad seca vs estabilidad húmeda (diseño de mezcla con 12 % de índice de plasticidad en el filler)

4.2 Contrastación de hipótesis

4.2.1 Hipótesis general.

Es necesario precisar que para realizar la contrastación de hipótesis, discusión de resultados, conclusiones y recomendaciones se tomaron únicamente los resultados de los especímenes secados al aire, mas no de los sumergidos en agua puesto que estos últimos fueron solamente para determinar la estabilidad retenida (daño por humedad).

Planteamiento de la hipótesis estadística al 5 % de error para el caso de la estabilidad:

- *Hipótesis nula (H_0):* El índice de plasticidad del filler no influirá en la estabilidad de mezclas asfálticas en frío para las vías de Moquegua.
- *Hipótesis alterna:* El índice de plasticidad del filler influirá en la estabilidad de mezclas asfálticas en frío para las vías de Moquegua.

Regla para tomar una decisión:

- Si Sig. < 0,05 Se rechaza la hipótesis nula.
- Si Sig. \geq 0,05 No se rechaza la hipótesis nula.

Tabla 114

Estadística descriptiva de hipótesis general para evaluar estabilidad en mezclas asfálticas

Etiqueta	Diseño de Mezcla Asphalt	N	Media	Desviación estándar	Media de error estándar
Estabilidad	Diseño con 3 % IP en Filler	5	350,9100	102,3840	45,7875
por Diseño	Diseño con 6 % IP en Filler	5	319,4240	109,3115	48,8856

Tabla 115

Prueba de t de student para determinar si el índice de plasticidad del filler influye en la estabilidad de mezclas asfálticas en frío

		Prueba de Levene de calidad de varianzas	F	0,004	
			Sig	0,954	
			t	0,47	
			gl	8	
			Sig. (bilateral)	0,0059	
Categorías	Se asumen varianzas iguales	prueba t para la igualdad de medias	Diferencia de medias	31,4860	
			Diferencia de error estándar	66,9798	
			95 % de intervalo de confianza de la diferencia	Inferior	-122,9697
			Superior	185,9417	
	No se asumen varianzas iguales	prueba t para la igualdad de medias	t	0,47	
			gl	7,966	
			Sig. (bilateral)	0,0082	
			Diferencia de medias	31,4860	
		Diferencia de error estándar	66,9798		
		95 % de intervalo de confianza de la diferencia	Inferior	-123,0847	
		Superior	186,0567		

- *Interpretación y análisis*

Como el P valor es 0,0059 y a la vez es menor que 0,05 se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna, en conclusión, a un nivel de significancia de 0,05 el índice de plasticidad del filler influirá en la estabilidad de mezclas asfálticas en frío para las vías de Moquegua.

Planteamiento de la hipótesis estadística al 5 % de error para el caso del flujo:

- *Hipótesis nula (H₀):* El índice de plasticidad del filler no influirá en el flujo de mezclas asfálticas en frío para las vías de Moquegua.

- *Hipótesis alterna:* El índice de plasticidad del filler influirá en el flujo de mezclas asfálticas en frío para las vías de Moquegua.

Regla para tomar una decisión:

- Si Sig. < 0,05 Se rechaza la hipótesis nula.
- Si Sig. \geq 0,05 No se rechaza la hipótesis nula.

Tabla 116

Estadística descriptiva de hipótesis general para evaluar flujo en mezclas asfálticas

Etiqueta	Diseño de Mezcla Asphalt	N	Media	Desviación estándar	Media de error estándar
Flujo por	Diseño con 3 % IP en Filler	5	3,3600	0,2200	0,0984
Diseño	Diseño con 12 % IP en Filler	5	4,1000	0,4020	0,1798

Tabla 117

Prueba de t de student para determinar si el índice de plasticidad del filler influye en el flujo de mezclas asfálticas en frío

Categorías	Prueba de Levene de calidad de varianzas	F	2,433		
			Sig	0,157	
Se asumen varianzas iguales	prueba t para la igualdad de medias	t	-3,611		
		gl	8		
		Sig. (bilateral)	0,007		
		Diferencia de medias	-0,7400		
		Diferencia de error estándar	0,20494		
		95 % de intervalo de confianza de la diferencia	Inferior	-1,21259	
			Superior	-0,26741	
		t	-3,611		
		gl	6,199		
		Sig. (bilateral)	0,011		
No se asumen varianzas iguales	prueba t para la igualdad de medias	Diferencia de medias	-0,7400		
		Diferencia de error estándar	0,20494		
		95 % de intervalo de confianza de la diferencia	Inferior	-1,23759	
			Superior	-0,24241	

- Interpretación y análisis

Como el P valor es 0,007 y a la vez es menor que 0,05 se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna, en conclusión, a un nivel de significancia de 0,05 el índice de plasticidad del filler influirá en el flujo de mezclas asfálticas en frío para las vías de Moquegua.

Para reforzar los resultados obtenidos mediante el método del t student, se presenta la figura 55 donde se puede notar las tendencias de las estabilidades alcanzadas por cada diseño de mezcla:

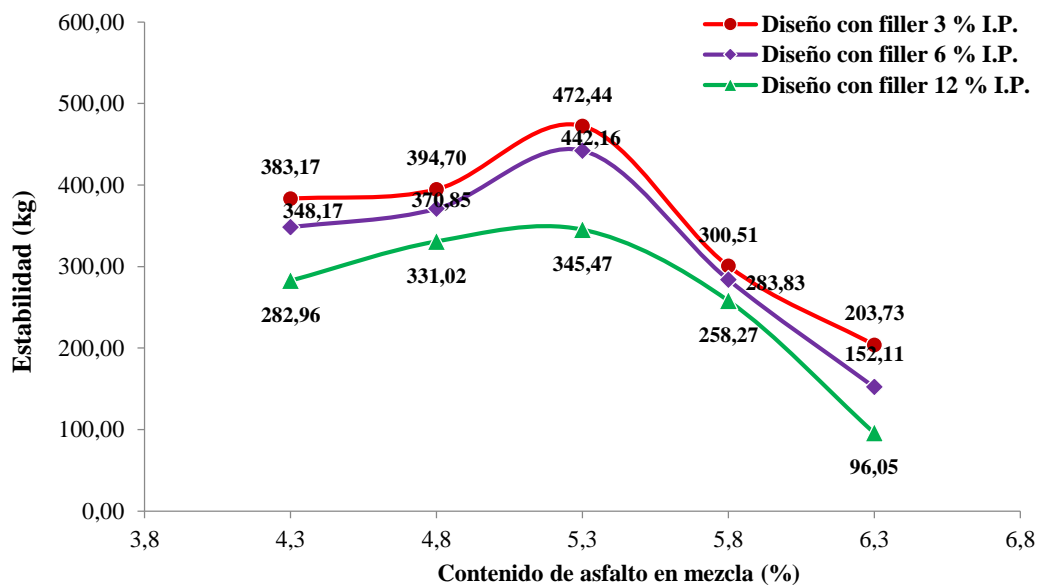


Figura 55. Estabilidades por cada diseño de mezcla con distinto % de índice de plasticidad en el filler

Nota: I.P. = Índice de plasticidad

De igual manera se presentan los resultados de flujo alcanzados por cada diseño de mezclas en la figura 56:

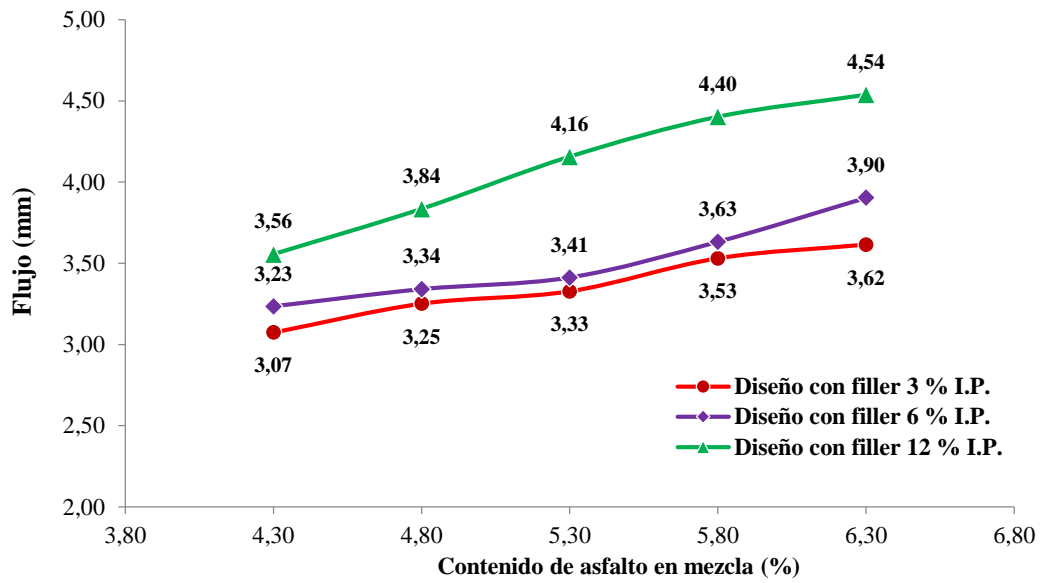


Figura 56. Flujos por cada diseño de mezcla con distinto % de índice de plasticidad en el filler

Nota: I.P. = Índice de plasticidad

4.2.2 Hipótesis específicas.

Para realizar la contrastación de la hipótesis específica 01 será necesario observar la figura 57:

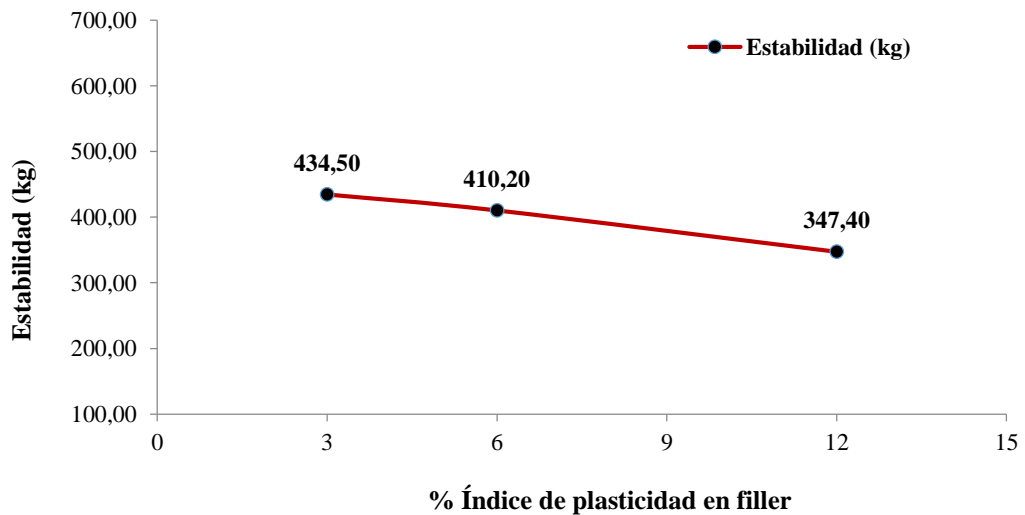


Figura 57. Estabilidad vs % de índice de plasticidad en el filler de cada diseño de mezcla

Nota: La estabilidad considerada para la Figura 52 fue tomada de los diseños óptimos de asfalto determinados

Contrastación de hipótesis específica 01: se observa en la figura 57 que la estabilidad decrece conforme se aumenta el % de índice de plasticidad en el filler para cada diseño de mezcla.

Así como se evaluó la estabilidad en esta hipótesis específica, es necesario evaluar también otras propiedades de la mezcla asfáltica relacionadas con la estabilidad, tales como la densidad y vacíos (VTM), cuyos comportamientos se muestran en las figuras 58 y 59:

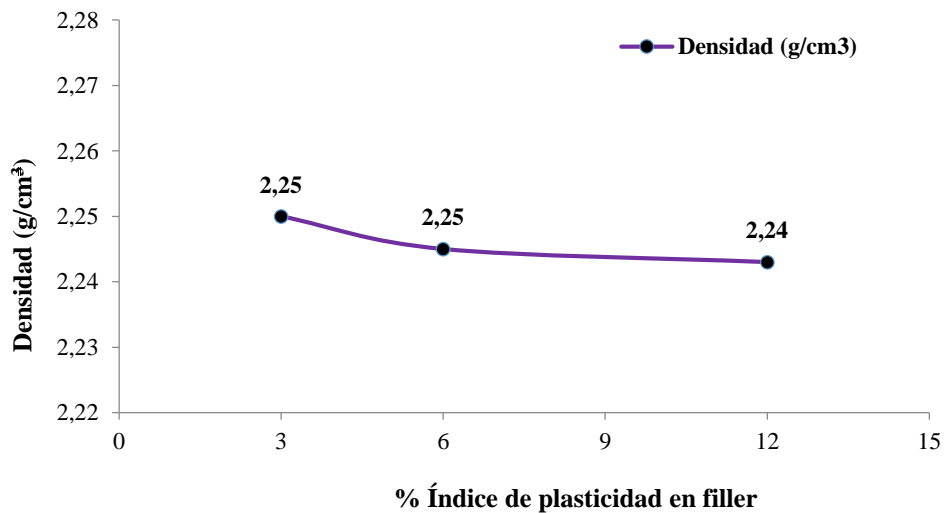


Figura 58. Densidad vs % de índice de plasticidad en el filler de cada diseño de mezcla

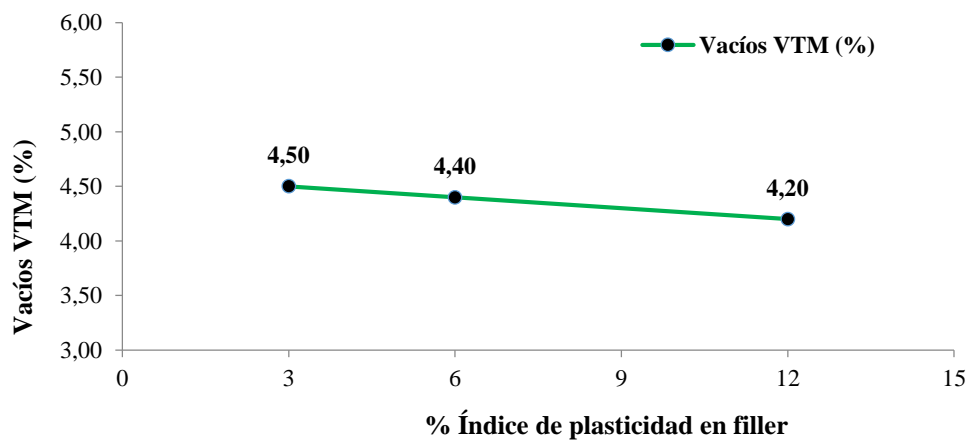


Figura 59. Vacíos VTM vs % de índice de plasticidad en el filler de cada diseño de mezcla

Para efectuar la contrastación de la hipótesis específica 02 será necesario observar la figura 60:

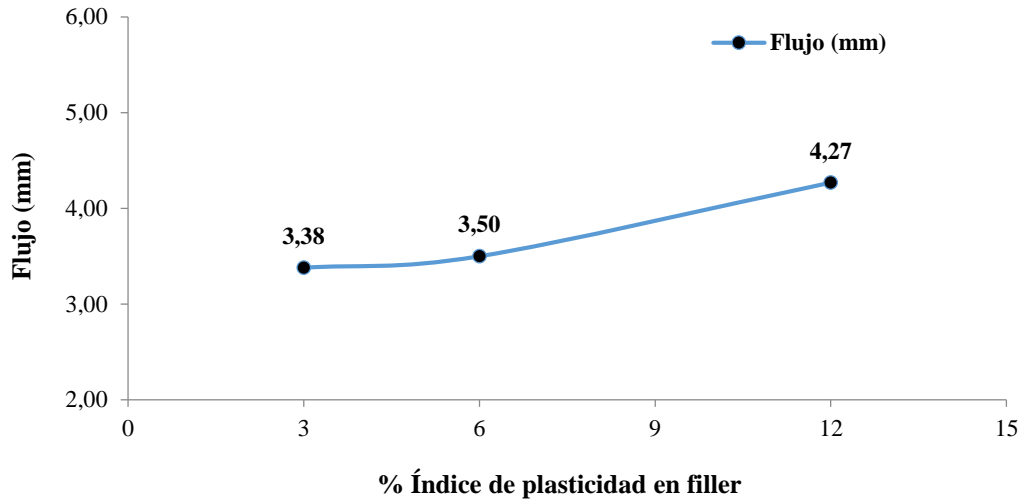


Figura 60. Flujo vs % de índice de plasticidad en el filler de cada diseño de mezcla

Nota: El flujo considerado para la Figura 60 fue tomado de los diseños óptimos de asfalto determinados

Contrastación de hipótesis específica 02: para el caso del flujo en la figura 60 se observa que aumenta conforme se incrementa el % de índice de plasticidad en el filler para cada diseño de mezcla, con esto se descarta lo planteado inicialmente en la hipótesis 02.

Para efectuar la contrastación de la hipótesis específica 03 será necesario observar las tablas 116, 117 y 118, donde se detallan los resultados por cada diseño de mezcla y su evaluación respecto a los parámetros respecto a lo requerido por el Instituto del Asfalto (MS-14) para mezclas asfálticas en frío:

Tabla 118

Resultados de contenido óptimo de asfalto para diseño de mezcla con 3 % de índice de plasticidad en el filler

Resultados finales de diseño con 3 % índice de plasticidad en el filler		Requerimiento según Instituto del Asfalto (MS-14)		Evaluación
		Mínimo	Máximo	
Contenido óptimo de asfalto (%)	5,40	-	-	
Densidad (g/cm ³)	2,25	-	-	
Vacíos VTM (%)	4,50	3,00	5,00	Cumple
VMA (%)	14,40	13,80	-	Cumple
VFA (%)	65,30	-	-	
Estabilidad (kg)	434,50	340,58	-	Cumple
Flujo (mm)	3,38	2,00	4,00	Cumple

Tabla 119

Resultados de contenido óptimo de asfalto para diseño de mezcla con 6 % de índice de plasticidad en el filler

Resultados finales de diseño con 6 % índice de plasticidad en el filler		Requerimiento según Instituto del Asfalto (MS-14)		Evaluación
		Mínimo	Máximo	
Contenido óptimo de asfalto (%)	5,47	-	-	-
Densidad (g/cm ³)	2,25	-	-	-
Vacíos VTM (%)	4,40	3,00	5,00	Cumple
VMA (%)	14,60	13,80	-	Cumple
VFA (%)	66,00	-	-	-
Estabilidad (kg)	410,20	340,58	-	Cumple
Flujo (mm)	3,50	2,00	4,00	Cumple

Tabla 120

Resultados de contenido óptimo de asfalto para diseño de mezcla con 12 % de índice de plasticidad en el filler

Resultados finales de diseño con 12 % índice de plasticidad en el filler		Requerimiento según Instituto del Asfalto (MS-14)		Evaluación
		Mínimo	Máximo	
Contenido óptimo de asfalto (%)	5,57	-	-	-
Densidad (g/cm ³)	2,24	-	-	-
Vacíos VTM (%)	4,20	3,00	5,00	Cumple
VMA (%)	14,65	-	-	Cumple
VFA (%)	66,20	-	-	-
Estabilidad (kg)	347,40	340,58	-	Cumple
Flujo (mm)	4,27	2,00	4,00	Revisar

Contrastación de hipótesis específica 03: en los diseños de mezcla con 3 % y 6 % de I.P. en el filler se cumple con los requisitos solicitados por el Instituto del Asfalto para mezclas asfálticas en frío (MS-14) en lo que respecta a la estabilidad y flujo, distinto el caso del diseño de mezcla con 12 % de I.P. en filler, el cual cumple el requisito de estabilidad mas no del flujo puesto que lo sobrepasa en un 6,75 % (sobre el máximo permitido).

4.3 Discusión de resultados

Para evaluar la influencia del índice de plasticidad del filler en mezclas asfálticas en la presente investigación se utilizó la metodología Marshall (para los diseños de mezcla y porcentajes óptimos de asfalto), luego se realizó un comparativo con los resultados para responder a los problemas inicialmente planteados, esto tiene que ser además confrontado con otras investigaciones de similares objetivos y realizadas por otros autores. Para la hipótesis general de esta investigación y conforme a los resultados obtenidos puede observarse que el porcentaje de índice de plasticidad del filler influye en la estabilidad de la mezcla asfáltica en frío, verificándose que el diseño de mezcla con 3 % de índice de plasticidad en el filler alcanza mayores valores de estabilidad respecto a los diseños de 6 y 12 % de índice de plasticidad en el filler, este resultado y tendencia es similar al obtenido en la investigación de Valera (2016) quien llegó a la conclusión de que el polvo de ladrillo al ser utilizado como relleno mineral (filler) en una mezcla asfáltica si afecta sus propiedades, dando resultados positivos al aumentar su estabilidad.

El flujo respecto a los resultados obtenidos muestra un comportamiento distinto al de la estabilidad, puesto que el diseño de mezcla con 12 % de índice de

plasticidad en el filler tiene mayor flujo registrado respecto a los diseños de 6 y 3 % de índice de plasticidad en el filler.

En el caso de la hipótesis específica 01, de acuerdo a lo mostrado en la figura 57 Estabilidad vs % de índice de plasticidad en el filler de cada diseño de mezcla, se marca una tendencia de que a mayor porcentaje de índice de plasticidad en el filler, menor será la estabilidad, esto fue también corroborado en otra investigación por Ordoñez (2016) quien concluye que las mezclas asfálticas en caliente empleando cal (como filler) presentan un buen comportamiento mecánico debido a que se observó el mejoramiento de la resistencia y disminución en las deformaciones, ambas propiedades relacionadas con la estabilidad.

Respecto a la hipótesis específica 02, conforme a los resultados registrados y mostrados en la figura 60 Flujo vs % de índice de plasticidad en el filler de cada diseño de mezcla, se observa que existe una tendencia de que el flujo aumenta conforme se aumenta el % de índice de plasticidad en el filler de mezclas asfálticas (la cual ayudó a descartar la hipótesis específica 02 inicialmente planteada), esta misma tendencia es hallada en la investigación de Valeriano y Catacora (2017), quienes determinaron que la mezcla asfáltica modificada con la adición de 2 % de zeolita natural (filler) a 100 °C registra un mayor flujo en comparación al de la mezcla asfáltica convencional a 140 °C, contrariamente al flujo obtenido respecto a la mezcla asfáltica convencional a 100 °C, que tiene un valor menor.

Para el caso de la hipótesis 03, de acuerdo a lo que se puede observar en las tablas 116, 117 y 118 Resultados de contenido óptimo de asfalto para diseño de mezcla con 3, 6 y 12 % índice de plasticidad en el filler, puede notarse que en los

diseños de mezcla asfáltica con 3 y 6 % de índice de plasticidad en el filler arrojan resultados de estabilidad y flujo que cumplen con la norma vigente (Instituto del Asfalto MS-14), cumpliéndose así lo planteado en la presente hipótesis.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

Primera. Se determinó que el % del índice de plasticidad en el filler influye en la estabilidad y el flujo de la mezcla asfáltica tal como se determinó para cada caso en las tablas 115 y 117 con la prueba de t student. De acuerdo a las figuras 55 y 56 en el caso de la estabilidad, ésta muestra un comportamiento donde el diseño de mezcla asfáltica con 3 % de índice de plasticidad en el filler alcanza valores mayores respecto al diseño de mezcla con 6 % de índice de plasticidad en un 6,85 % (en su estabilidad máxima) y en relación al diseño de mezcla con 12 % de índice de plasticidad es también superior en un 36,75 % (en su estabilidad máxima). En el caso del flujo ocurre lo contrario a la estabilidad, puesto que con el diseño de mezcla asfáltica con 3 % de índice de plasticidad en el filler se obtuvieron valores menores a los del diseño de mezcla con 6 % de índice de plasticidad en un 7,38 % (en su flujo máximo) y respecto al diseño de mezcla con 12 % de índice de plasticidad también se

consiguieron valores inferiores en un 20,34 % (en su flujo máximo). Para ambos casos se respetan las tendencias en mezclas asfálticas en frío conforme lo estipula el Manual del Instituto del Asfalto MS-14 (gráficos del comportamiento típico de la mezcla en frío).

Segunda. Se comprobó de acuerdo a lo mostrado en la figura 57 que el diseño de mezcla asfáltica con 3 % de índice de plasticidad en el filler tiene un valor de estabilidad superior al del diseño de mezcla con 6 % de índice de plasticidad en un 5,92 % y respecto al diseño de mezcla con 12 % de índice de plasticidad es superior en un 25,07 %. Por ello podemos concluir que se marca una tendencia de que a mayor % de índice de plasticidad en el filler, menor será el valor de la estabilidad. Es necesario recordar que una de los beneficios del filler es que incrementa la resistencia de la mezcla ante la deformación (relacionado con la estabilidad), debido a que aumenta la viscosidad del asfalto, es decir, mejora la combinación filler-asfalto o “mástico” que es participante importante en la resistencia de mezclas asfálticas.

Tercera. Se evaluó adicionalmente la propiedad de vacíos VTM de la mezcla asfáltica para los tres diseños según lo mostrado en la figura 59, donde se evidencia que la mezcla asfáltica con 3 % de índice de plasticidad en el filler tiene un valor superior al del diseño de mezcla con 6 % de índice de plasticidad en el filler en un 2,27 % y respecto al del diseño de mezcla con 12 % de índice de plasticidad en el filler es superior en un 7,14 %, marcándose una tendencia de que a mayor % de índice de plasticidad menor % de vacíos VTM en la mezcla. Esta propiedad es muy importante

en la durabilidad de la mezcla asfáltica, puesto que si el % de vacíos es muy alto (más del 5 % según lo estipulado en el Instituto del Asfalto MS-14) pueden aparecer conductos en la mezcla e ingresar agua que la deteriore y si es demasiada baja (menos del 3 %) puede producirse afloramiento o exudación. Los resultados de vacíos VTM de la presente investigación se encuentran dentro de los rangos permitidos (entre 3 y 5 % de vacíos VTM).

Cuarta. Se pudo observar en función de lo mostrado en la figura 60 que el diseño de mezcla asfáltica con 3 % de índice de plasticidad en el filler tiene un valor de flujo inferior al del diseño de mezcla con 6 % de índice de plasticidad en el filler en un 3,43 % asimismo respecto al diseño de mezcla con 12 % de índice de plasticidad en el filler es inferior en un 20,84 %, concluyéndose que existe una tendencia de que a mayor % de índice de plasticidad en el filler, mayor será el valor del flujo. También es necesario aclarar que el valor de flujo en una mezcla asfáltica no puede ser muy alto, puesto que la hace demasiada plástica y con tendencia a deformarse con facilidad.

Quinta. De acuerdo a los resultados detallados en la tabla 118, 119 y 120 donde se muestran los contenidos óptimos de asfalto, se concluye que el diseño de mezcla asfáltica con 3 % de índice de plasticidad en el filler cumple con los parámetros que solicita el Manual del Instituto del Asfalto MS-14 (mezclas asfálticas en frío) en lo que respecta a la estabilidad está por encima del mínimo en un 27,58 % y en el flujo sobre un 69,00 % del mínimo. El diseño de mezcla con 6 % de índice de plasticidad en el filler

para el caso de estabilidad también está por encima del mínimo en un 20,44 % y en el flujo en un 75,00 % sobre el mínimo. Distinto el caso del diseño de mezcla con 12 % de índice de plasticidad en el filler, el cual escasamente supera el mínimo de estabilidad en un 2,00 % y en lo que respecta al flujo está por encima del máximo permitido en un 13,50 %, haciéndola propensa a ser una mezcla demasiado plástica.

5.2 Recomendaciones

Primera. Se recomienda el uso de filler en la producción de mezclas asfálticas en frío, dado que como se demostró en la presente investigación que influyen de manera positiva tanto en la estabilidad como en el flujo, propiedades muy importantes en las mezclas asfálticas.

Segunda. Una recomendación de manera general también es que es necesario que se difunda el uso de filler en mezclas asfálticas en frío a nivel local y nacional, puesto que la falta de información fue una limitante en la presente investigación, por lo que se tuvo que indagar en fuentes internacionales (Manual del Instituto del Asfalto MS-14).

Tercera. Es necesario recomendar que el % del índice de plasticidad en el filler debe ser controlado, puesto que al ser demasiado alto (más del 12 %) reduce la estabilidad de la mezcla asfáltica y en consecuencia la hace susceptible a la deformación.

Cuarta. En el caso del flujo se hace necesario recomendar que si se sobrepasa el 12 % del índice de plasticidad en el filler, la mezcla asfáltica en frío supera el flujo máximo permitido y se hace demasiada plástica.

Quinta. Se recomienda que el % de vacíos VTM no debe descuidarse al momento de determinar el contenido óptimo de asfalto para cada diseño de mezcla, puesto que es tan importante como las propiedades de estabilidad y flujo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASTM C 136. (2014). *Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates*. West Conshohocken Pennsylvania, USA.
- ASTM D 242 (2001). *Standard Specification for Mineral Filler For Bituminous Paving Mixtures*. West Conshohocken Pennsylvania, USA.
- Céspedes, J. (2002). *Los pavimentos en las vías terrestres Calles, Carreteras y Aeropistas*. Cajamarca, Perú.
- Jiménez, M., Ulloa, A. y Molina, D. (2010). “*Implementación del diseño y procedimientos de ensayo de laboratorio para mezclas en frío para la reparación de baches en Costa Rica*”. Recuperado de <http://www.lanamme.ucr.ac.cr/sitio-nuevo/images/publicaciones/ui-05-09.pdf>.
- Minaya, S. y Ordóñez, A. (2006). *Diseño Moderno de Pavimentos Asfálticos*. Lima, Perú.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones, Dirección General de Caminos y Ferrocarriles. (2016). *Manual de Ensayos de Materiales*. Publicado en el diario oficial El Peruano el 03 de junio de 2016.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones, Dirección General de Caminos y Ferrocarriles. (2013). *Manual de carreteras-Especificaciones Técnicas Generales para Construcción – EG-2013*. Publicado en el diario oficial El Peruano el 07 de agosto de 2013.

- Ordoñez, A. (2016). “*Comportamiento Mecánico de Mezclas Asfálticas en Caliente, empleando Cal, en los Aeropuertos del Sur del Perú*” (tesis de pregrado). Universidad Andina Néstor Cáceres Velásquez, Juliaca, Perú. Recuperado de <http://repositorio.uancv.edu.pe/handle/UANCV/727>.
- Valera, F. (2018). “*Evaluación del efecto de la cal hidratada y el polvo de ladrillo utilizado como relleno mineral en las propiedades de una mezcla asfáltica*” (tesis de pregrado). Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo, Chiclayo, Perú. Recuperado de <http://tesis.usat.edu.pe/handle/usat/1288>.
- Valeriano, W. y Catacora, A. (2017). “*Comportamiento del diseño de mezcla asfáltica tibia, con adición de zeolita para la pavimentación de la ciudad de Juliaca*” (tesis de pregrado). Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú. Recuperado de <http://repositorio.unap.edu/handle/UNAP/4984>.