



UNIVERSIDAD
DE PIURA

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Influencia de la cera orgánica (Apis Mellifera) en la
estabilidad y flujo de la mezcla asfáltica WMA para
climas fríos**

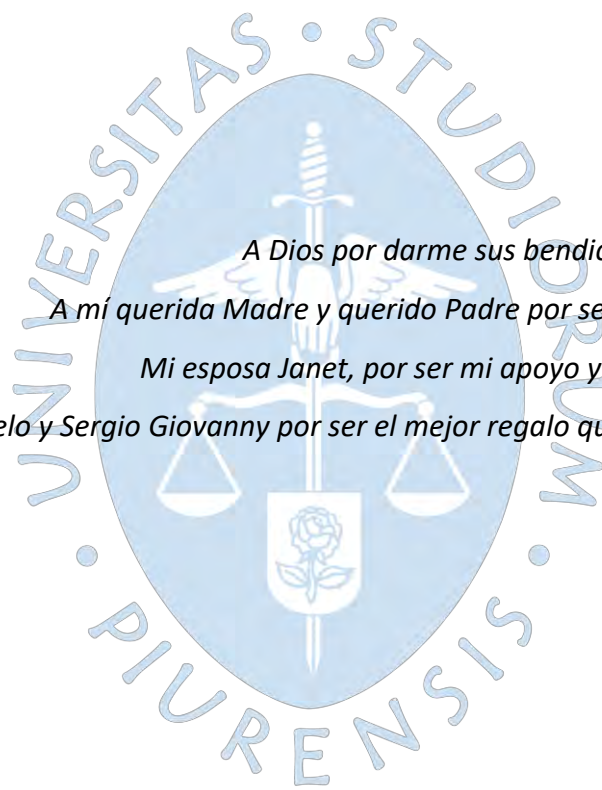
Tesis para optar el Grado de Máster en Ingeniería Civil
con mención en Ingeniería Vial

Víctor Peña Dueñas

**Asesor:
Dr. Hugo Gerardo Botasso**

Lima, agosto de 2021





A Dios por darme sus bendiciones e iluminar mi vida.

A mí querida Madre y querido Padre por ser siempre mi inspiración.

Mi esposa Janet, por ser mi apoyo y compañía incondicional.

Mis hijos: Víctor Ángel y Sergio Giovanni por ser el mejor regalo que Dios me ha concedido.



Resumen

El valle del Mantaro se encuentra unida por vías asfaltadas como la carretera central, carretera Imperial Pampas, carretera las vegas Tarma, Carretera Jauja – Tarma y otras de carácter departamental. La zona presenta un clima muy variado caluroso en el verano que llega hasta los 31 °C y en el invierno llegan temperaturas de hasta -10 °C y hasta heladas así mismo las lluvias precipitan durante todo el año hacen que estas vías sufran deterioro sumado a ello la utilización del asfalto convencional hace que constantemente presenten deterioros hasta llegar a la falla, sumado a ello las malas prácticas y la falta de control de calidad en la ejecución de las obras. Así mismo debido al mínimo apoyo en la investigación por parte de estado peruano en el mejoramiento de las propiedades, comportamiento reológico, así como en la búsqueda de nuevos aditivos locales que coadyuguen a la modificación de asfalto para el mejoramiento de las propiedades reológicas del asfalto a fin de lograr el mejor comportamiento de las mezclas asfálticas. Por ello, la investigación consistió en primer lugar en la obtención de las muestras de agregados y la cera orgánica para posteriormente realizar la experimentación directa a fin de obtener las propiedades físicas y continuar la experimentación con briquetas de control e incorporando la cera orgánica cuya metodología de investigación es científica de tipo aplicada, posteriormente realizar el análisis de datos mediante tabulación y gráficos, además de un diseño estadístico, realizado en la hoja de cálculo Microsoft Excel. Los resultados que se obtuvieron mezclas modificadas con diferentes contenidos de asfalto convencional PEN 85/100 y modificado SBS así como la modificación con cera orgánica a diferentes temperaturas de 100, 120 y 130 °C cuyo comportamiento se evaluó en función del comportamiento mecánico utilizando la método de diseño Marshall. Finalmente, Al realizar las mezclas asfálticas con la metodología Marshall utilizando cemento asfáltico PEN 85/100 convencional, con un contenido óptimo de 6% y con cemento asfáltico PEN 85/100 SBS modificado, cumple los requisitos normativos exigidos por la norma INVIAS INV 450-20 con un contenido óptimo de 5%, así también la mezcla con cemento asfáltico PEN 85/100 convencional se verifica que con un contenido del 1.5% de cera orgánica y una temperatura de fabricación de 130°C, cumple con los requisitos INV 450-20 y la mezcla asfáltica con un contenido óptimo de 5% de cemento asfáltico PEN 85/100 SBS modificado se verifica que con un contenido del

1% de cera orgánica a la temperatura de 120°C cumple con los requisitos para mezclas asfálticas, según norma INV 450-20.



Tabla de Contenido

Introducción	19
Capítulo I Situación Problemática	21
1.1. Formulación del Problema	33
1.2. Problemas Específicos	34
1.3. Justificación teórica	34
1.4. Objetivos	34
1.4.1. <i>Objetivo general</i>	34
1.4.2. <i>Objetivos específicos</i>	35
Capítulo 2 Marco Teórico	37
2.1. Antecedentes de investigación	37
2.2. Bases Teóricas	40
2.2.2. <i>Composición del asfalto</i>	41
2.2.3. <i>Propiedades del asfalto</i>	43
2.2.3.1. Peso específico: MTC E 318	43
2.2.3.2. Penetración: MTC E 304	43
2.2.3.3. Ductilidad: MTC E 306	43
2.2.3.4. Punto de ablandamiento: MTC E 307	43
2.2.3.5. Viscosidad (MTC E 308 Viscosidad del asfalto con el método del viscosímetro)	44
2.2.3.6. Durabilidad	45
2.2.3.7. Adhesión y cohesión	45
2.2.3.8. Susceptibilidad a la temperatura	46
2.2.3.9. Endurecimiento	46
2.2.4. <i>Clasificación de los Asfaltos</i>	46
2.2.4.1. Por su penetración o Cementos asfálticos	46
2.2.4.2. Según grado PG	49

2.2.4.3.	Asfaltos líquidos.....	52
2.2.4.4.	Asfalto de curado rápido	54
2.2.5.	<i>Asfalto modificado</i>	56
2.2.6.	<i>Modificadores del asfalto</i>	56
2.2.7.	<i>Mejoradores de adherencia</i>	57
2.2.8.	<i>Modificador polímeros</i>	58
2.2.9.	<i>Caucho de llantas</i>	62
2.2.10.	<i>Modificadores con ceras</i>	63
2.2.10.1.	Aditivos Orgánicos (Uso de ceras)	64
2.3.	Técnicas para modificar asfaltos.....	66
2.3.1.	<i>Mezcla por vía seca</i>	66
2.3.2.	<i>Mezcla por vía húmeda</i>	66
2.4.	Parámetros de los asfaltos y determinaciones adicionales	66
2.5.	Mezclas asfálticas en caliente.....	67
2.6.	Clasificación de las mezclas	67
2.6.1.	<i>Según la temperatura de fabricación</i>	67
2.6.1.1.	Mezclas asfálticas en frío (Cold Mixes –CMA).....	67
2.6.1.2.	Mezclas asfálticas semicalientes (Half-Warm Mix Asphalts –HWMA-)	67
2.6.1.3.	Mezclas asfálticas tibias (Warm Mix Asphalts -WMA-).....	68
2.6.1.4.	Mezclas asfálticas en caliente (Hot Mix Asphalt –HMA-).....	68
2.6.1.5.	Por la proporción de Vacíos en la mezcla asfáltica	68
2.6.1.6.	Por el Tamaño máximo del agregado pétreo.....	69
2.6.1.7.	Por la estructura del agregado pétreo.....	70
2.6.1.8.	Por la Granulometría	70
2.6.1.9.	Mezclas de alto módulo.....	70
2.6.1.10.	Por su composición y homogeneidad de los agregados	71
2.7.	Mezcla asfáltica tibia	71
2.7.1.	<i>Beneficios de utilizar mezclas tibias en la pavimentación</i>	72
2.7.2.	Desventajas	73
2.8.	Tecnologías para producir mezclas asfálticas tibias.....	74
2.8.1.	<i>Adición de agua en el asfalto</i>	74
2.8.2.	<i>Adición de polímeros orgánicos en el asfalto</i>	74
2.8.3.	<i>Adición de Tensoactivos en el asfalto</i>	74
2.8.4.	<i>Adición de arena húmeda a una mezcla de agregado grueso</i>	75

2.9.	Aditivos ceras orgánicas	75
2.9.1.	<i>Clasificación</i>	76
2.9.2.	<i>La cera de abejas</i>	77
2.10.	Agregados.....	77
2.10.1.	<i>Definición de agregado</i>	77
2.11.	Propiedades de los agregados que se utilizan en mezclas asfálticas	78
2.12.	Duración y tamaño máximo de la partícula	78
2.12.1.	<i>Gradación</i>	78
2.12.2.	<i>Tamaño de las partículas</i>	78
2.12.3.	<i>Tamaño máximo nominal de partícula</i>	78
2.12.4.	<i>Tamaño máximo de partícula</i>	79
2.12.5.	<i>Textura superficial</i>	79
2.12.6.	<i>Limpieza</i>	79
2.12.7.	<i>Capacidad de absorción</i>	79
2.12.8.	<i>Dureza</i>	79
2.12.9.	<i>Afinidad por el asfalto</i>	80
2.12.10.	<i>Forma de la partícula</i>	80
2.13.	Ensayos en agregados.....	80
2.13.1.	<i>Granulometría MTC E 204</i>	80
2.13.2.	<i>MTC E 205 gravedad específica y absorción de agregados finos</i>	82
2.13.3.	<i>MTC E 206 peso específico y absorción de agregados gruesos</i>	83
2.13.4.	<i>Resistencia al desgaste en la máquina de los ángeles MTC E 207</i>	84
2.13.5.	<i>Prueba de ensayo estándar para índice de durabilidad del agregado MTC E 214</i> 85	
2.13.6.	<i>Índice de aplanamiento y alargamiento MTC E 221</i>	86
2.13.7.	<i>Método de ensayo estándar para la determinación del porcentaje de partículas fracturadas en el agregado grueso MTC E 210</i>	87
2.13.8.	<i>Método de ensayo estándar para el valor equivalente de arena de suelos y agregado fino MTC E 114</i>	88
2.13.9.	<i>MTC E 111 determinación del límite plástico (L.P.) de los suelos e índice de plasticidad (I.P.) MTC E 111</i>	89
2.13.10.	<i>MTC E 209 durabilidad al sulfato de sodio y sulfato de magnesio</i>	89
2.14.	Diseño de la mezcla asfáltica	89
2.14.1.	<i>Procedimiento</i>	90
2.14.2.	<i>Determinación de temperaturas de mezcla y compactación</i>	91
2.14.3.	<i>Preparación de la Mezcla</i>	92

2.14.4.	<i>Compactación de los Especímenes</i>	92
2.14.5.	<i>Ensayo de Estabilidad y Flujo</i>	93
2.14.6.	<i>Estabilidad Marshall</i>	94
2.14.7.	<i>Densidad y Vacíos</i>	95
2.14.8.	<i>Análisis de VMA</i>	95
2.14.9.	<i>Gravedad específica</i>	95
2.14.10.	<i>Análisis de VFA</i>	96
2.14.11.	<i>Cálculos para el ensayo Marshall</i>	96
2.14.12.	<i>Corrección de los valores de estabilidad</i>	99
2.15.	Parámetros técnicos para diseño de concreto asfáltico en caliente.....	103
2.15.1.	<i>Gradación</i>	104
2.15.2.	<i>Gradación para mezcla superpave</i>	104
2.16.	Filler o polvo mineral.....	106
2.17.	Cemento asfáltico.....	106
2.18.	Requerimientos de producción	106
2.18.1.	<i>Tolerancias</i>	108
2.19.	Caracterización de las mezclas asfálticas por ensayo cántabro (método UCL).....	109
2.19.1.	<i>Cohesión/Poder aglomerante</i>	109
2.19.2.	<i>Susceptibilidad térmica</i>	110
2.19.3.	<i>Adhesividad</i>	110
2.19.4.	<i>Envejecimiento</i>	110
2.20.	Caracterización de la resistencia de mezclas asfálticas al daño inducido por humedad, test de lottman.....	111
2.20.1.	<i>Distribución teórica de tensiones</i>	113
2.20.2.	<i>Ecuaciones y observaciones</i>	113
2.20.3.	<i>Sensibilidad a la acción del agua - Método de Lottman</i>	115
2.21.	Hipótesis.....	117
2.21.1.	<i>Hipótesis General</i>	117
2.21.2.	<i>Hipótesis Específica</i>	117
2.22.	Identificación de variables.....	118
2.22.1.	<i>Variable independiente</i>	118
2.22.2.	<i>Variables dependientes</i>	118
Capítulo 3 Metodología		119
3.1.	Tipo de Investigación.....	119

3.2.	Diseño de la Investigación	119
3.3.	Unidad de Análisis	120
3.4.	Población de Estudio	120
3.5.	Tamaño de la Muestra.....	120
3.6.	Selección de la Muestra.....	120
3.7.	Técnicas de Recolección de Datos	120
3.8.	Recolección de Datos	121
3.9.	Registro de los resultados de los parámetros de las mezclas de acuerdo con los resultados de los ensayos de laboratorio	121
3.10.	Zona de muestreo de agregados (ASTM D-75)	122
3.11.	Caracterización de los agregados	123
3.11.1.	<i>Abrasión de agregado grueso (MTC E207)</i>	123
3.11.2.	<i>Partículas chatas y alargadas en agregado grueso (MTC E223)</i>	124
3.11.3.	<i>Equivalente de arena (MTC E114)</i>	125
3.11.4.	<i>Peso específico y absorción de agregado grueso (MTC E205)</i>	126
3.11.5.	<i>Peso específico y absorción de finos (ASTM D-128)</i>	127
3.11.6.	<i>Límites de consistencia (ASTM D-427)</i>	127
3.11.7.	<i>Ensayo adhesividad de los ligantes bituminosos a los áridos finos (procedimiento riedel-weber MTC E 220)</i>	128
3.11.8.	<i>Análisis granulométrico (ASTM C-117)</i>	129
3.12.	Análisis de resultados de los requerimientos de los agregados.....	130
3.13.	Resumen de ensayos de agregado fino	131
3.14.	Resumen de ensayos de agregado grueso.....	132
3.15.	Diseño Marshall mezcla asfáltica tibia.....	132
3.15.1.	<i>Mezcla de agregados</i>	132
3.16.	Estabilización Granulométrica	135
3.16.1.	<i>Tamaño Máximo Nominal, a utilizar en la estabilización granulométrica</i>	135
3.17.	Características de los materiales	135
3.17.1.	<i>Porcentaje teórico óptimo de asfalto para briquetas</i>	136
3.17.2.	<i>Gravedad específica bulk de agregados (Gsb)</i>	136
3.17.3.	<i>Gravedad específica aparente de agregados (Gsa)</i>	137
3.18.	Caracterización de las mezclas asfálticas.....	137
3.19.	Ensayos del método	141
3.19.1.	<i>Densidad bulk de las briquetas compactadas (ASTM D-2726) (Gmb)</i>	141
3.19.2.	<i>Gravedad específica teórica máxima (Gmm)</i>	142

Capítulo 4 Análisis de resultados	155
4.1 Diseño de mezcla marshal con cemento asfaltico PEN 85/100	155
4.1.1 <i>Características de la mezcla asfáltica modificada PEN 85/100 con cera orgánica a 100°C</i> 157	
4.1.2 <i>Características de la mezcla asfáltica modificada PEN 85/100 con Cera Orgánica a 120°C.</i> 159	
4.1.3 <i>Características de la mezcla asfáltica modificada PEN 85/100 con Cera Orgánica a 130°C.</i> 160	
4.2 Diseño de mezcla Asfáltica Marshall con cemento asfaltico PEN 85/100 SBS.	162
4.2.1 <i>Caracterización de mezcla Asfáltica Marshall con cemento asfaltico PEN 85/100 SBS.</i> 163	
4.2.2 <i>Características de la mezcla asfáltica modificada PEN 85/100 SBS con Cera Orgánica a 100°C</i> 165	
4.2.3 <i>Características de la mezcla asfáltica modificada PEN 85/100 SBS con Cera Orgánica a 120°C.</i> 166	
4.2.4 <i>Características de la mezcla asfáltica modificada PEN 85/100 SBS con Cera Orgánica a 130°C</i> 167	
4.3 Evaluación del ensayo de cántabro	169
4.4 Evaluación del ensayo susceptibilidad al agua mediante el test de lottman para mezcla Asfáltica PEN 85/100 con tres ciclos de congelamiento y deshielo.	172
Discusiones	187
Conclusiones	191
Recomendaciones	195
Referencias	197

Lista de Tablas

Tabla 1: Composición del asfalto.....	42
Tabla 2: Grado de Penetración PG 40-50 a 200-300.....	48
Tabla 3: Grado de penetración PG 70 - 64.....	50
Tabla 4: Grado de Penetración PG 42 64.....	51
Tabla 5: Especificaciones técnicas material bituminoso MC.....	53
Tabla 6: Especificaciones técnicas RC.....	55
Tabla 7: Clasificación de asfaltos modificados de uso vial.....	66
Tabla 8: Denominación de agregados minerales para mezclas asfálticas.....	69
Tabla 9: Porcentaje que pasa tamiz N° 8.....	69
Tabla 10: Cantidad mínima de muestra de agregado grueso.....	81
Tabla 11: Carga para ensayo de abrasión.....	84
Tabla 12: Masa mínima para ensayo de índice de durabilidad.....	86
Tabla 13: Factores de Estabilidad de Correlación.....	100
Tabla 14: Requerimiento para los agregados gruesos.....	103
Tabla 15: Requerimiento para los agregados fino.....	104
Tabla 16: Graduación MAC.....	104
Tabla 17: Graduación superpave para agregados de tamaño nominal máximo de 19 mm.....	105
Tabla 18: Graduación superpave para agregados de tamaño nominal máximo 25 mm.....	106
Tabla 19: Requisitos para mezcla de concreto bituminoso.....	107
Tabla 20: Requisito de adherencia.....	107
Tabla 21: Vacíos mínimos en el agregado mineral (VMA).....	108
Tabla 22: Mezcla asfáltica tipo superpave vacíos llenos con asfalto (VFA).....	108
Tabla 23: Variación permisible en % pesos agregados.....	108
Tabla 24: Resultado de ensayo abrasión de los ángeles.....	123
Tabla 25: Resultado de ensayo peso unitario agregado fino.....	126
Tabla 26: Gravedad específica en agregado grueso.....	127
Tabla 27: Granulometría de agregado fino.....	129
Tabla 28: Granulometría agregado grueso.....	130
Tabla 29: Requerimiento Agregado grueso.....	131
Tabla 30: Requerimiento Agregado Fino.....	132
Tabla 31: Combinación de agregados grueso y finos.....	132
Tabla 32: Granulometría agregado fino.....	133
Tabla 33: granulometría agregado grueso.....	133
Tabla 34: Especificación de gráfica de Fuller para un tamaño máximo nominal de 12,5 mm.....	134

Tabla 35: Resumen de los pesos específicos de los agregados.....	137
Tabla 36: Formula de mezclas Asfáltica Marshall.....	138
Tabla 37: Calculo ensayo Marshall.....	143
Tabla 38: Valores de parámetros volumétricos.....	155
Tabla 39: Parámetros volumétricos mezcla Marshall con asfalto Pen 85/100.....	158
Tabla 40: Mezcla Asfáltica modificada PEN 85/100 con cera orgánica.....	159
Tabla 41: Mezcla Asfáltica PEN 85/100 modificada con cera orgánica 130°C.....	160
Tabla 42: Resumen mezcla Asfáltica PE 85/100 fabricado a 100, 120 y 130 °C.....	161
Tabla 43: Diseño Marshall mezcla Asfáltica PEN 85/100 SBS.....	162
Tabla 44: Mezcla asfáltica con PEN 85/100 SBS.....	163
Tabla 45: Parametros mezcla Asfáltica PEN 85/100 SBS segunda modificación 100°C.....	165
Tabla 46: Parámetros mezcla Asfáltica PEN 85/100 SBS segunda modificación 120°C.....	166
Tabla 47: Parámetros mezcla Asfáltica PEN 85/100 SBS segunda modificación 130°C.....	167
Tabla 48: Resumen parámetros mezcla Asfáltica PEN 85/100 SBS segunda modificación con cera orgánica.....	168
Tabla 49: Resumen ensayo cántabro con asfalto PEN 85/100 SBS.....	169
Tabla 50: Cuadro comparativo ensayo cántabro con asfalto PEN 85/100 convencional y modificado.....	170
Tabla 51: Resistencia a la tracción, flujo y vacíos mezcla PEN 85/100.....	173
Tabla 52: Resumen test de lottman base y tres ciclos de congelamiento y descongelamiento.....	174
Tabla 53: porcentaje de perdida de la tracción mezcla Asfáltica PEN 85/100.....	175
Tabla 54: Resumen test lottman con ciclos de congelamiento y deshielo.....	176
Tabla 55: Porcentaje de reducción de la resistencia a la tracción.....	176
Tabla 56: Resumen mezcla Asfáltica PEN 85/100 con tres ciclos congelamiento y deshielo.....	177
Tabla 57: Porcentaje de reducción de resistencia a la tracción.....	177
Tabla 58: Resumen test lottman con tres ciclos de congelamiento y deshielo mezcla Asfáltica PEN 85/100 a 130°C.....	179
Tabla 59: Resumen reducción de resistencia a la tracción 130°C.....	179
Tabla 60: Resumen test lottman mezcla asfáltica PEN 85/100 SBS con tres ciclos de congelamiento y deshielo.....	180
Tabla 61: Porcentaje de reducción de resistencia a la tracción indirecta PEN 85/100 SBS.....	181
Tabla 62: Resumen test lottman con tres ciclos de congelamiento y deshielo PEN 85/100 SBS.....	182
Tabla 63: Porcentaje de reducción resistencia tracción PEN 85/100 SBS.....	182
Tabla 64: Resumen test lottman mezcla asfáltica PEN 85/100 SBS con tres ciclos de congelamiento y deshielo.....	184
Tabla 65: Porcentaje de reducción de resistencia a la tracción PEN 85/100 SBS120°C.....	184
Tabla 66: Resumen test lottman mezcla asfáltica PEN 85/100 SBS con tres ciclos de congelamiento y deshielo.....	185
Tabla 67: Porcentaje de reducción de resistencia a la tracción PEN 85/100 SBS130°C.....	185

Lista de Figuras

Figura 1: Piel de cocodrilo carretera centra Km 43+800.....	23
Figura 2: Desprendimiento por peladuras Carretera central Km 68+650.....	23
Figura 3: Peladuras y baches, carretera central Km 59+830.....	24
Figura 4: Ahuellamiento y peladura Carretera central Km 64+200	24
Figura 5: Peladura y corrimiento Carretera central Km 82+530	25
Figura 6: Baches peladuras carretera central Km 87+620	25
Figura 7: Baches y peladuras Carretera central KM 92+080.....	26
Figura 8: Fisuras, peladura y baches Carretera central Km 92+210.....	26
Figura 9: Piel de cocodrilo y ahuellamiento Carretera central Km 92+780.....	27
Figura 10: Ahuellamiento y fisuras carretera central Km 94+310	27
Figura 11: Peladuras y baches Carretera central Km 98+690	28
Figura 12: Rotura de bordes y peladuras Carretera central Km 115+630.....	28
Figura 13: Esgurrimiento, baches y peladuras Carretera central Km 119+200	29
Figura 14: Baches y peladuras Carretera central 132+730	29
Figura 15: Baches y fisuras en bloque Carretera central Km 137+100	30
Figura 16: Ahuellamiento, corrimiento y peladuras Carretera central Km 149+850	30
Figura 17: Fisuras transversales, corrimiento y peladuras Carretera central Km 160+800.....	31
Figura 18: Fisuras en bloque, fisura longitudinal Carretera Oroya Pasco Km 12+160	31
Figura 19: Piel de cocodrilo Carretera Oroya Pasco	32
Figura 20: Composición química del asfalto – Fuente: Repsol. (2013). Físicoquímica del asfalto, Madrid.....	40
Figura 21: Estructuras coloidal de un asfalto, se señalan sus constituyentes.....	41
Figura 22: Proceso destilación del petróleo	41
Figura 23: Estado del asfalto sólido temperatura < 25°C	42
Figura 24: Asfalto en estado líquido temperatura >60°C	42
Figura 25: Variación de la viscosidad con la temperatura	44
Figura 26: Acción de desenvuelta de agua	45
Figura 27: Influencia de la temperatura en el comportamiento del asfalto	46
Figura 28: Emulsión de Eva y pelets de SBS comercializados en Argentina.....	59
Figura 29: Comportamiento convencional e ideal del asfalto	60
Figura 30: Diagrama del ensayo de Wheel Tracking en mezclas Asfálticas	62
Figura 31: Resumen de los métodos para producir mezclas tibias.....	62
Figura 32: Clasificación de las ceras	63
Figura 33: Comportamiento de la viscosidad del asfalto en función de la temperatura	64

Figura 34: Clasificación de las mezclas asfálticas según la temperatura	68
Figura 35: Comparación de la descarga de mezclas asfálticas calientes y tibias	71
Figura 36: Mezcla caliente T 160°C, Mezcla tibia T 121°C	72
Figura 37: Efectos ambientales durante extendido de las mezclas asfálticas.....	72
Figura 38: Comparación Mezcla Asfáltica Mac versus MAT	74
Figura 39: Mejora del ángulo de contacto mediante empleo de tensoactivos.....	75
Figura 40: Clasificación de ceras.....	76
Figura 41: características de una cera de abeja amarilla.....	77
Figura 42: Tamaño de las partículas	78
Figura 43: Forma, textura y angularidad de las partículas de agregado	80
Figura 44: Columna de tamices	81
Figura 45: Granulometría	82
Figura 46: Ensayo Gravedad especifica finos.....	82
Figura 47: Ensayo absorción de agregados.....	83
Figura 48: Gravedad especifica en agregados	83
Figura 49: Equipo máquina de los ángeles	85
Figura 50: Ensayo de durabilidad de agregado.....	86
Figura 51: Ensayo de índice de alargamiento	87
Figura 52: Ensayo índice de aplanamiento	87
Figura 53: Ensayo porcentaje de partículas fracturadas.....	88
Figura 54: Ensayo equivalente de arena.....	88
Figura 55: Ensayo Durabilidad al sulfato de sodio	89
Figura 56: Muestra para preparar mezcla asfáltica	92
Figura 57: Compactación de mezcla.....	93
Figura 58: Medición de altura y diámetro	94
Figura 59: Equipo prensa de carga Marshall	95
Figura 60: Densidad Vs % de Cemento asfáltico.....	100
Figura 61: Estabilidad Vs % de cemento asfáltico.....	101
Figura 62: Flujo Vs % cemento asfáltico	101
Figura 63: % de vacíos con aire en la mezcla total Vs % cemento asfáltico	102
Figura 64: % de vacíos en los agregados minerales Vs % de cemento asfáltico	102
Figura 65: Curva granulométrica de agregados Superpave	105
Figura 66: Resultado de briquetas ensayo Cántabro	111
Figura 67: Configuración de la carga (a) y rotura del ensayo de tracción indirecta (b)	112
Figura 68: Curva carga-deformación resultante del ensayo de tracción indirecta	112
Figura 69: Distribución de tensiones teóricas sobre los planos diametral y vertical para el ensayo de tracción indirecta	113
Figura 70: Distribución de tensión en probeta sometida a una carga aplicada sobre placa de carga de apoyo curvo	115
Figura 71: Rotura de briqueta Marshall Test lottman	116
Figura 72: Briquetas de mezcla Asfáltica	116
Figura 73: Briquetas en ciclo de congelamiento.....	117
Figura 74: Ubicación de cantera de agregados.....	122
Figura 75: Ensayo de abrasión de los ángeles	123
Figura 76: Ensayo de partículas chatas y alargadas	124

Figura 77: Ensayo Índice de aplanamiento y alargamiento	124
Figura 78: Ensayo equivalente de arena.....	125
Figura 79: Ensayo de gravedad especifica en agregado grueso.....	126
Figura 80: Ensayo de limite liquido	127
Figura 81: Ensayo Riedel Weber.....	128
Figura 82: Ensayo Riedel Weber control de desprendimiento	128
Figura 83: Torre de tamices.....	129
Figura 84: Ensayo partículas chatas y alargadas.....	130
Figura 85: Ensayo pasante malla 200	131
Figura 86: Combinación de curva granulométrica gruesa y fina – Fuente: Laboratorio Centauro	134
Figura 87: Granulometría agregado fino y grueso PG	134
Figura 88: Fabricación mezcla Asfáltica.....	138
Figura 89: Incorporación proporción de asfalto	139
Figura 90: Fabricación de mezcla Asfáltica	139
Figura 91: Compactación de mezcla Asfáltica	140
Figura 92: Briquetas de mezcla Asfáltica	140
Figura 93: Briquetas para ensayo Cántabro	141
Figura 94: Gravedad especifica en briquetas	141
Figura 95: Ensayo gravedad especifica Bulk	142
Figura 96: Ensayo Rotura Marshall.....	142
Figura 97: Resultado Ensayo Marshall.....	143
Figura 98: Modificación del asfalto con cera orgánica	144
Figura 99: Cera orgánica.....	144
Figura 100: Doble modificación asfalto SBS	145
Figura 101: Ensayo Cántabro mezclas Asfáltica.....	145
Figura 102: Briquetas luego del ensayo Cántabro	146
Figura 103: Ensayo cántabro % asfalto 4% 120°C.....	146
Figura 104: Ensayo cántabro mezcla Asfáltica 4% a 130°C.....	147
Figura 105: Briquetas ensayadas cántabro.....	147
Figura 106: Ensayo cántabro briqueta 4% asfalto 130°C.....	148
Figura 107: Preparado mezcla asfáltica ciclo de congelamiento.....	148
Figura 108: Rotura Marshall.....	149
Figura 109: Briquetas	149
Figura 110: Test de Lottman.....	150
Figura 111: Falla test de Lottman.....	150
Figura 112: Procedimiento de ensayo test Lottman.....	151
Figura 113: Primer ciclo de deshielo	151
Figura 114:Ciclo de congelamiento briquetas	152
Figura 115: Briquetas congeladas.....	152
Figura 116: Control de briquetas congeladas.....	153
Figura 117: briqueta ensayada test Lottman.....	153
Figura 118: Briqueta ensayada test lottman	154
Figura 119:Relacion Asfalto – % Vacíos (izquierda) Relación Asfalto - %Vacíos (derecha)	156
Figura 120: Relación Asfalto - %Vacíos agregado mineral (izquierda) Relación Asfalto – Vacíos llenos de asfalto(derecha)	156

Figura 121:Relación Asfalto – Flujo (izquierda) Relación Asfalto – estabilidad (derecha)	156
Figura 122:Relacion resistencia – deformación (Izquierda); Relación Asfalto – Filler (derecha).....	157
Figura 123: Comportamiento Estabilidad. Flujo y vacíos PEN 85/100	157
Figura 124: Relación Flujo estabilidad con cera orgánica 100°C.....	158
Figura 125: Relación Estabilidad flujo y vacíos; mezcla Asfáltica PEN 85/100 120°C.....	159
Figura 126: Relación flujo estabilidad vacíos; mezcla Asfáltica con cera orgánica 130°	160
Figura 127:Vacíos PEN 85/100 a 100, 120 y 130°C	161
Figura 128: Estabilidad mezcla asfáltica PEN 85/100 a 100,120,130°C	161
Figura 129: Flujo mezcla Asfáltica PEN 85/100 a 100,120,130°C.....	162
Figura 130: Relación asfalto %vacíos (izquierda); Relación asfalto – densidad (derecha)	163
Figura 131:Relación asfalto filler (izquierda); Relación asfalto estabilidad (derecha)	163
Figura 132: Relación asfalto flujo (izquierda); Relación asfalto deformación (derecha).....	164
Figura 133:Relación asfalto - VAM (izquierda); Relación asfalto - %vacíos agregado mineral (derecha)	164
Figura 134:Relación flujo, estabilidad y vacíos PEN 85/100 SBS.....	164
Figura 135: Relación flujo, estabilidad y vacíos Mezcla Asfáltica PEN 85/100 SBS con cera orgánica a 100°C.....	165
Figura 136: Relación flujo, estabilidad y vacíos mezcla Asfáltica PEN 85/100 SBS con cera orgánica 120°C.....	166
Figura 137: Relación flujo, estabilidad, vacíos mezcla Asfáltica PEN 85/100 SBS con cera orgánica a 130°C.....	167
Figura 138:Cuadro comparativo vacíos mezcla PEN 85/100 SBS modificada con cera orgánica	168
Figura 139: Cuadro comparativo estabilidad mezcla PEN 85/100 SBS modificada con cera orgánica	169
Figura 140: Cuadro comparativo flujo mezcla PEN 85/100 SBS modificada con cera orgánica	169
Figura 141: Cuadro comparativo ensayo cántabro PEN 85/100 convencional y modificado	170
Figura 142: Ensayo cántabro por temperaturas.....	171
Figura 143: Porcentaje perdida ensayo cántabro.....	172
Figura 144: test de lottman mezcla PEN 85/100	173
Figura 145: Resumen test lottman por ciclo de congelamiento y deshielo	174
Figura 146: Resumen flujo test de lottman	174
Figura 147:Resumen resistencia a tracción mezcla Asfáltica PEN 85/100	175
Figura 148: Resumen flujo test lottman	176
Figura 149:Resumen Resistencia a la tracción 120°C	177
Figura 150: Resumen Flujo 120°C.....	177
Figura 151: Resumen resistencia a la tracción PEN 85/100 130°C	178
Figura 152: Resumen flujo PEN 85/100 a 130°C.....	179
Figura 153: Resumen resistencia a la tracción indirecta PEN 85/100.....	180
Figura 154:Resumen flujo test lottman PEN 85/100 SBS.....	180
Figura 155: porcentaje de Resistencia a la tracción 100°C.....	181
Figura 156: Resumen flujo 100°C	182
Figura 157: Resumen resistencia a la tracción 120°C	183
Figura 158: Resumen flujo test lottman 120°C.....	183
Figura 159: Resumen resistencia a la tracción 130°C	185
Figura 160: Resumen flujo test lottman 130°C.....	185

Introducción

El valle del Mantaro pertenece al Departamento de Junín, es una de las zonas principales para el abastecimiento del mercado de la capital del Perú, se encuentra unida por vías asfaltadas como la carretera central, carretera Imperial Pampas, carretera Las - vegas - Tarma, Carretera Jauja – Tarma y otras de carácter Nacional y Departamental.

La zona presenta un clima muy variado caluroso en el verano que llega hasta los 31 °C y en el invierno llegan temperaturas de hasta -10 °C con presencia de heladas así mismo las lluvias precipitan durante todo el año y hacen que estas vías sufran deterioro, sumado a ello la utilización del asfalto convencional hace que constantemente presenten deterioros hasta llegar a la falla, tal como sucede en muchas vías del valle del Mantaro.

La falta de una política nacional en la utilización de asfalto modificado por su incremento en su costo de inversión que bordea entre los 30 a 40% más que un convencional, por la errónea política de menor costo de inversión las carreteras presentan continuamente deterioros sumado a ello las malas prácticas y la falta de control de calidad en la ejecución de las obras.

Así mismo debido al mínimo apoyo en la investigación por parte de estado peruano en el mejoramiento de las propiedades, comportamiento reológico, así como en la búsqueda de nuevos aditivos locales que coadyugen a la modificación de asfalto para el mejoramiento de las propiedades reológicas del asfalto a fin de lograr el mejor comportamiento de las mezclas asfálticas.



Capítulo I Situación Problemática

El proceso de diseño del pavimento exige evitar patologías como la deformación permanente, rotura por fatiga, rotura por baja temperatura, daño por humedad, fisuras y la susceptibilidad térmica; antiguamente estas patologías se evitaban con cementos asfálticos convencionales, en la actualidad debido al incremento del tránsito y la presión de inflado de las llantas, sobrecargas de los camiones de gran tonelaje y la producción de nuevos asfaltos modificados, se requieren modificadores y aditivos que logren un pavimento con mejores propiedades, eviten dichas patologías y cumplan los requerimientos para el transporte.

Por ello la importancia de modificar los asfaltos a fin de obtener mejoras en la resistencia a la fatiga y mejor flexibilidad en bajas y altas temperaturas, reduciendo el riesgo de fisuras térmicas y aumentando la vida útil de la carpeta asfáltica; para la modificación de asfaltos se propone utilizar la tecnología de las mezclas asfálticas WMA (WAR MIX ASPHALT) cuyos beneficios evaluados desde el punto de vista técnico, se obtiene menor oxidación y se evita envejecimiento a corto plazo del asfalto, debido a las menores temperaturas de fabricación, riego y compactación, lo que implica un incremento en la resistencia a fatiga por carga, al agrietamiento por bajas temperaturas y por oxidación del tipo *Top-Down*.

Junín es una Región del Perú ubicado en la parte central sur del país, presenta una temperatura máximas de 31°C en épocas de verano, en los meses de Junio a Agosto llega hasta 10°C bajo cero en promedio esta situación se acrecienta en la provincia de Tarma, Yauli y Junín; esta zona presenta marcadas climatología de invierno donde se produce congelamiento y deshielo en la carpeta asfáltica de las carreteras, con excepción de la Oroya y Junín que presenta un clima frígido durante todo el año llegando a temperaturas de en promedio de -2 °C en promedio. (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú, 2018), estas vías

están sujetas a variación de temperaturas ya que en las noches se produce el congelamiento y durante el día deshielo.

Las patologías de las carreteras dentro de la Región Junín, podemos describir algunas de ellas como por ejemplo la carretera Pilcomayo - Chupaca presenta en todo el tramo daños críticos mostrándose muy ondulado e irregular con presencia de baches (Estudio de Factibilidad Mejoramiento y rehabilitación de la carretera Pilcomayo - Emp E-3S Chupaca 2015), otra vía que es la carretera Cañete - Lunahuana - DV Yauyos - Roncha - Chupaca - Huancayo presenta en sus tramos superficie de agrietamientos y piel de cocodrilo en un tercio de la calzada, fisuras y asentamientos, desgaste de la carpeta asfáltica, estado de deterioro avanzado debido a la fatiga, la mezcla asfáltica existente presenta fisuraciones y baches en un área total del 50% de la superficie del pavimento, agrietamiento transversales y longitudinales, formando bloques de severidad alta asentamientos (Perfil de proyecto Mejoramiento de la Carretera Cañete - Lunahuana - DV Yauyos - Roncha - Chupaca - Huancayo 2014), La Carretera vía de evitamiento de la ciudad de la Oroya, presenta ahuellamientos, fisuras localizadas, deformación permanente o ahuellamiento, fisuras moderadas longitudinales, leves desprendimiento de agregados, fisuras longitudinales y transversales en una longitud total de 36.81 km (Estudio de factibilidad Construcción de la vía de evitamiento Oroya) (Ministerio de Transporte y Comunicaciones. Provias Nacional, 2019).

En dichas carreteras se manifiesta en el pavimento problemas como fisuras, grietas, ahuellamientos y piel de cocodrilo, debido a los fenómenos atmosféricos en especial las precipitaciones pluviales sumado a ello los cambios de temperatura en el día y la noche así como la carga de los vehículos que transitan, los cuales provocan daño funcional y estructural en el pavimento, consecuentemente problemas en la economía de esta zona centro del Perú, dichos problemas se dan fundamentalmente en las mezclas asfálticas calientes.



Figura 1: Piel de cocodrilo carretera centra Km 43+800



Figura 2: Desprendimiento por peladuras Carretera central Km 68+650



Figura 3: Peladuras y baches, carretera central Km 59+830



Figura 4: Ahuellamiento y peladura Carretera central Km 64+200



Figura 5: Peladura y corrimiento Carretera central Km 82+530



Figura 6: Baches peladuras carretera central Km 87+620



Figura 7: Baches y peladuras Carretera central KM 92+080



Figura 8: Fisuras, peladura y baches Carretera central Km 92+210



Figura 9: Piel de cocodrilo y ahuellamiento Carretera central Km 92+780



Figura 10: Ahuellamiento y fisuras carretera central Km 94+310



Figura 11: Peladuras y baches Carretera central Km 98+690



Figura 12: Rotura de bordes y peladuras Carretera central Km 115+630



Figura 13: Esguerrimiento, baches y peladuras Carretera central Km 119+200



Figura 14: Baches y peladuras Carretera central 132+730



Figura 15: Baches y fisuras en bloque Carretera central Km 137+100



Figura 16: Ahuellamiento, corrimiento y peladuras Carretera central Km 149+850



Figura 17: Fisuras transversales, corrimiento y peladuras Carretera central Km 160+800



Figura 18: Fisuras en bloque, fisura longitudinal Carretera Oroya Pasco Km 12+160



Figura 19: Piel de cocodrilo Carretera Oroya Pasco

Por lo que visto todas las patologías de los pavimentos flexibles de la región Junín es importante investigar un tipo de asfalto que pueda tener un buen comportamiento que las actuales mezclas asfálticas de dichas carreteras teniendo como base la modificación del asfalto convencional PEN 85/100 y otro con polímero SBS para la zona del Valle del Mantaro; estos asfaltos serán modificados con cera orgánica de la zona, producto que existe en el valle del Mantaro y se produce en grandes cantidades; por ello la presente tesis pretende analizar el comportamiento de las mezclas asfálticas modificadas para el clima frígido del valle del Mantaro para ello se pretende efectuar una primera modificación al asfalto PEN 85/100 convencional y una segunda modificación al asfalto PEN 85/100 SBS en laboratorio por vía húmeda mediante la incorporación de la cera orgánica *Apis Mellifera* (miel de abeja) a fin de lograr una mezcla Warm Mix Asphalt (mezcla asfáltica tibia) que mejore las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica y reduzca la temperatura de mezclado y compactación, a fin de proponer una mezcla modificada y doble modificación con cera orgánica *Apis Mellifera* cuyo resultado se pretende proponer su uso para esta zona del valle del Mantaro.

1.1. Formulación del Problema

El problema de la presente tesis es el deterioro prematuro de los pavimentos con mezclas asfálticas convencionales en la zona del valle del Mantaro cuya altura es superior a 3000 m.s.n.m. con clima frígido debido a la utilización de mezclas asfáltica convencionales y/o modificado sometido a la variación extrema de temperaturas como el congelamiento (por su aumento del volumen del agua entre 9 y 10%) y deshielo, debido a la presencia del agua o vapor de agua al interior de la misma, (stripping) que ocasiona el desprendimiento del agregado pétreo del ligante asfáltico, disminuyendo la cohesión del ligante, generándose gradualmente pérdidas de resistencia, ahuellamientos, desprendimiento de agregados y fisuración, produciendo una pérdida de las propiedades estructurales y funcionales de la mezcla asfáltica en especial la fluencia o Resistencia de la mezcla, así como el alto consumo de energía para su fabricación y compactación contribuyendo al calentamiento global.

Para este tipo de zona por su clasificación se encuentra dentro de un tipo de clima frígido característico de la sierra, se extiende entre los 3 a 4 mil msnm, con precipitaciones anuales promedio de 700 mm, con temperaturas medias anuales de 12 °C, presenta veranos lluviosos e inviernos secos con fuertes heladas, para un buen comportamiento de la mezcla asfáltica en la zona climática en mención se debería utilizar un asfalto de tipo PEN 85/100, para un tráfico medio hasta pesado en climas fríos (Manual del asfalto – USA, 2014), sin embargo estas mezclas presentan fallas, por ello se desea conocer el comportamiento de la mezcla asfáltica convencional y la modificada, para luego modificar por vía húmeda con cera orgánica Apis Mellifera a fin de exponer los beneficios técnico económicos que presentaría su utilización frente a la mezcla convencional; por ello se planteó el problema:

¿Cuál es la influencia de la cera orgánica (Apis Mellifera) en la determinación de la estabilidad y flujo de una Mezcla Asfáltica Warm Mix Asphalt 85/100 en climas fríos del valle del Mantaro?

1.2. Problemas Específicos

¿Cuál es la influencia de la cera orgánica (*Apis Mellifera*) en la determinación de la Estabilidad de una Mezcla Asfáltica Warm Mix Asphalt 85/100 en climas fríos del valle del Mantaro?

¿Cuál es la influencia de la cera orgánica (*Apis Mellifera*) en la determinación del Flujo de una Mezcla Asfáltica Warm Mix Asphalt 85/100 en climas fríos del valle del Mantaro?

1.3. Justificación teórica

La justificación de la presente investigación se centra en determinar el comportamiento físico mecánico de la mezcla asfáltica convencional frente a la mezcla asfáltica modificada con polímero y doble modificación con cera orgánica *Apis Mellifera* a fin proponer una alternativa de solución a los constantes problemas de la carpeta asfáltica de las carreteras de la Región Junín entre ellas, Lima - Huancayo, Oroya - Cerro de Pasco, Huancayo - La Merced (ambos márgenes), carretera Huancayo - Pampas y la carretera Huancayo - Huancavelica, vías principales de primer orden, que al cabo de no menos de 5 años presentan severas fallas funcionales y estructurales en el pavimento manifestándose, en fisuras, grietas, peladuras, piel de cocodrilo, ahuellamientos entre otros, lo cual ocasiona mayores costos en los traslados de los productos y personas que se trasladan desde la zona centro del Perú hacia la capital y viceversa; generando problemas en las funciones principales de un pavimento seguridad, confort y economía.

1.4. Objetivos

1.4.1. *Objetivo general*

Analizar la influencia de la cera orgánica (*Apis Mellifera*) en la determinación de la estabilidad y flujo de una Mezcla Asfáltica Warm Mix Asphalt 85/100 en climas fríos del valle del Mantaro.

1.4.2. Objetivos específicos

Determinar la influencia de la cera orgánica (*Apis Mellifera*) en la determinación de la estabilidad de una Mezcla Asfáltica Warm Mix Asphalt 85/100 en climas fríos del valle del Mantaro.

Establecer la influencia de la cera orgánica (*Apis Mellifera*) en la determinación del flujo de una Mezcla Asfáltica Warm Mix Asphalt 85/100 en climas fríos del valle del Mantaro.





Capítulo 2 Marco Teórico

2.1. Antecedentes de investigación

Como antecedentes se detallan las siguientes tesis e investigaciones:

Rodríguez (2016) en su tesis, “Características volumétricas y capacidad de compactación de mezclas de caucho asfáltico con aditivos de asfalto de mezcla química orgánica”, concluye lo siguiente: Dado que el tipo de mezcla estudiada comprendía aproximadamente un 7% de vacío de aire, los procedimientos que no toman en consideración los vacíos de aire en el área periférica como parte del volumen de la muestra son más apropiados, en este sentido, de todos los resultados obtenidos basados en la densidad aparente serían los más apropiados. Con respecto a la opción de igualar las mezclas bituminosas con una diferencia de $\pm 1\%$ en el contenido de aire vacío, concluyendo que los cuatro aditivos se pueden usar con temperaturas de hasta 30°C más bajas que la mezcla de control.

Aponte y Beltrán (2013) en su tesis, Caracterización física y reológica de un ligante asfáltico 60-70 modificado para mezclas asfálticas tibias, presenta las siguientes conclusiones: Los aditivos CECABASE RT® y REDISSETM WMX, pueden reducir la temperatura de mezcla y compactación, y también proporcionar una buena solución, en comparación con la producción de asfalto de mezcla en caliente, reducir la contaminación ambiental que produce emisiones de gases.

Rojas Avellaneda et al. (2017) En su investigación “Evaluación de aditivos poliméricos sintetizados a partir de glicerol para la producción de mezclas asfálticas calientes en Colombia”, llegó a la siguiente conclusión: Debido al uso de diferentes técnicas de caracterización, no solo para el análisis del desempeño del asfalto, sino también para su propiedades químicas, propiedades térmicas y estructurales, se pueden obtener nuevos

conocimientos sobre la caracterización y evaluación del asfalto aditivado, con ello podemos predecir el comportamiento en el mezclado y la compactación, también señaló que luego de utilizar sintéticos y evaluar polímeros PG, PGE-AO y PGE-AE con un grado de modificación del 20% y 80% para modificar el asfalto 60/70, el desempeño reológico, mecánico, térmico, generan cambios significativos a una concentración de polímero de 0,1% p / p.

Feitosa (2015) plantea en su tesis *“Avaliação Do Uso de Diferentes Tipos de Cera de Carnaúba como Aditivos para Misturas Mornas”*, que la evaluación del rendimiento del ligando a bajas temperaturas, concluyó que los resultados de las pruebas empíricas muestran que, en presencia de cera, la permeabilidad disminuirá y el punto de reblandecimiento aumentará, por lo que el adhesivo tiene una mayor rigidez. el adhesivo modificado con cera tipo 4 al 5% (m / m) tiene una reducción significativa de 10 °C a la temperatura de procesamiento y por lo tanto tiene un impacto positivo en la reducción de emisiones y reducción del consumo de energía; los parámetros reológicos: el módulo complejo G^* y el ángulo de fase δ se analizan en función de la frecuencia y la temperatura, los resultados muestran que la cera tiene un efecto más significativo en el aumento de la rigidez (G^*) y la mejora de la elasticidad. (δ a baja temperatura (δ) alta frecuencia).

Puede depender del estado sólido de la cera, que se derretirá a temperaturas más altas. El grado de rendimiento del ligante puro es PG 64-22 y el grado de rendimiento del ligante modificado (5% CT4) es PG 70-28, mostrando un mayor potencial de aplicación a temperaturas más bajas que el ligante puro y mejor resistencia al agrietamiento térmico. La prueba de fluencia dinámica (MSCR) muestra que el uso de adhesivos modificados con CT4 al 5% es más probable que se use en carreteras con tráfico pesado (heavy-H). El ensayo mecánico de la mezcla (aglutinante-agregado) muestra que, en comparación con el aglomerante no modificado, el aglomerante modificado con 5% de CT4 debe tener una mayor resistencia a la deformación permanente durante la vida útil del recubrimiento. Los resultados de este estudio muestran que la cera de carnauba cumple con algunos requisitos básicos para su uso como aditivo en mezclas asfálticas calientes.

Garduño J. (2005) en su Tesis titulado *“Control de Calidad de Mezclas Asfálticas Modificadas mediante el Ensayo de Tensión Indirecta”*, menciona que *“las diferencias de los ensayos de Resistencia a tensión Indirecta a 5° C y 25° C, demostró que el comportamiento de*

la mezcla es más elástico a 5°C que, a 25° C, obteniendo diferencias de la Resistencia a Tracción Indirecta un poco superiores al 50%. los valores a 5°C se encuentran en el rango de entre 20 - 30 kg/cm² y a 25°c entre 5 - 10 kg/cm², para los resultados de laboratorio. También se observó que los valores del Resistencia a Tracción Indirecta obtenidos para estas mezclas, son bajos en comparación con los obtenidos por otros investigadores, lo que nos indica que esta mezcla no presenta buenas características de durabilidad y Resistencia a la fatiga.”

Valeriano y Catacora (2017) En su tesis "Comportamiento del Diseño de Mezcla Asfáltica Tibia", verifica que agregando zeolita para pavimentar carreteras en la ciudad de Juliaca, llegaron a la siguiente conclusión: Agregar 2% de zeolita natural clinoptilolita en el diseño como filler para una mezcla asfáltica tibia versus una mezcla asfáltica caliente a 140 ° C, resultan que propiedades mecánicas son parcialmente menores, y al mismo tiempo mejores que el diseño de mezcla asfáltica convencional a 100 ° C, la estabilidad de la mezcla tibia es menor que el de mezcla caliente a la temperatura de 140 ° C y en el caso del flujo en la mezcla tibia mayor que el de la mezcla caliente a 140 ° C y es más bajo que el la mezcla caliente a 100 ° C; así mismo en la prueba de resistencia a la compresión simple la mezcla tibia es más baja que la de la mezcla caliente a 140 ° C y es más alta que la resistencia a la compresión simple de la mezcla caliente a 100 ° C.

Estrada Escalante (2017) expuso la siguiente conclusión en su tesis "Investigación y Análisis de Desempeño de Mezcla Asfáltica Convencional PEN 85/100 plus y Mezcla Asfáltica Modificada y Polímero Tipo SBS PG 70-28": Demostró que el general se asume que “el uso de asfalto convencional en la mezcla se ve afectado por diferentes factores como volumen de tráfico, sobrecarga y factores climáticos y el uso de mezcla asfáltica modificada con polímero SBS nos brindará una mejor respuesta mecánica que la mezcla asfáltica tradicional y mejorará el desempeño de la capa de asfalto y aumentan la vida útil del pavimento ”; porque la mezcla de asfalto modificado con polímero SBS PG 70-28 demostró tener un mejor comportamiento mecánico y mucho mayor desempeño que la mezcla asfáltica convencional PEN 85/100 Plus.

2.2. Bases Teóricas

2.2.1. *Asfalto*

El asfalto es un material cementante de color café oscuro a negro proveniente de la destilación del petróleo y otros naturalmente, en el que los constituyentes predominantes son betunes (ASTM D8-02).

El asfalto presenta dos componentes principales los máltenos que lo compone el conjunto de Saturados, Aromáticos y Resinas que corresponden a componentes orgánicos de baja polaridad o la parte líquida y por otro lado están los asfáltenos que presentan características polares y corresponden a la fracción más pesada (sólida).

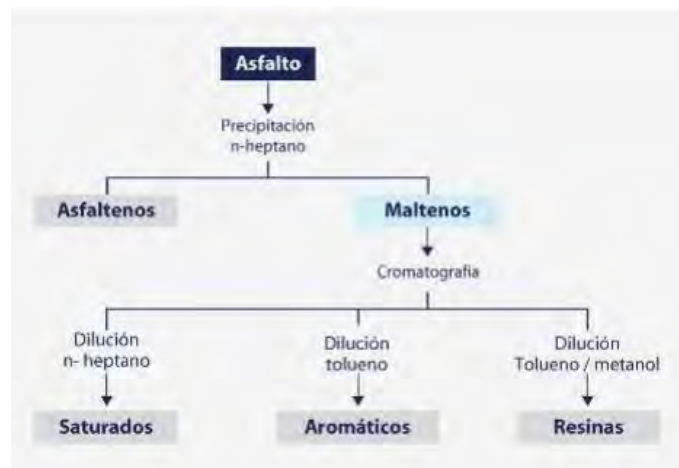


Figura 20: Composición química del asfalto – Fuente: Repsol. (2013). Físicoquímica del asfalto, Madrid.

El asfalto presenta una constitución básicamente de cuatro fracciones genéricas en total, que forman grupos de hidrocarburos con propiedades químicas similares denominada S. A. R. A. por sus iniciales: Saturados, Aromáticos, Resinas y Asfáltenos, conocidos como fraccionamiento, Afanasjeva y Puello (2009).

Los saturados constituyen los compuestos más ligeros y afectan negativamente la susceptibilidad térmica, por otro lado, la fracción aromática enriquece las propiedades físicas, las resinas en cambio mejoran su ductilidad y los asfáltenos contribuyen al incremento de la viscosidad tornándolos menos susceptibles a las variaciones de temperatura, Corbett (1969). Los asfaltos van aumentando gradualmente de masa molar, polaridad, desde los saturados a los asfáltenos, respectivamente.

Entre los factores que afectan los componentes del asfalto, se pueden citar a la génesis del crudo, proceso de refinación ya sea por destilación a presión atmosférica, destilación por vacío con o sin vapor y la refinación por solventes Magalhaes y Henrique (2004).

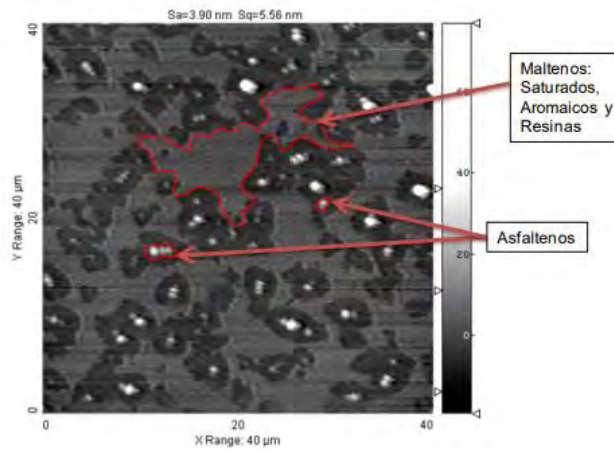


Figura 21: Estructuras coloidal de un asfalto, se señalan sus constituyentes
Fuente: Universidad Escuela de Ingeniería Medellín

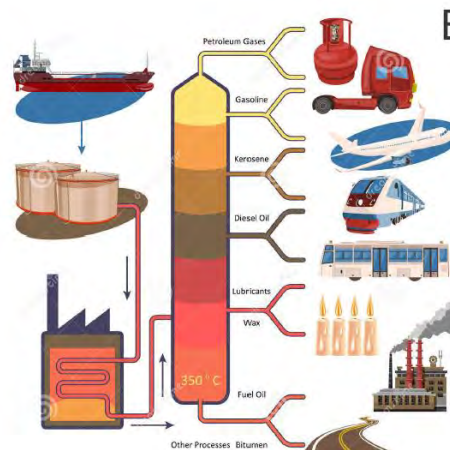


Figura 22: Proceso destilación del petróleo
Fuente: Ramcodes

2.2.2. Composición del asfalto

Los constituyentes principales del asfalto son:

Tabla 1: Composición del asfalto

ELEMENTO	COMPOSICIÓN (%)
Carbono	82-88
Hidrogeno	8-11
Azufre	0-6
Oxigeno	0-1,5
Nitrógeno	0-1

Fuente: Ramcodes

El asfalto a temperatura de 25 ° C presenta estado sólido frágil y a 60-70 °C comienza a derretirse, ver figura 23:



Figura 23: Estado del asfalto sólido temperatura < 25°C
Fuente: Incoasfaltos, 2016



Figura 24: Asfalto en estado líquido temperatura >60°C
Fuente: Incoasfaltos, 2016

2.2.3. **Propiedades del asfalto**

las propiedades físicas del asfalto son:

2.2.3.1. **Peso específico: MTC E 318**

Esta propiedad corresponde a la "relación entre el peso de un determinado volumen de asfalto a una temperatura de 25 ° C y el peso de un volumen igual de agua destilada a la misma temperatura", Manual de ensayos de materiales (2016).

2.2.3.2. **Penetración: MTC E 304**

Esta propiedad determina la consistencia del cemento asfáltico, se deja caer una aguja estándar con un diámetro de 1 mm y un peso de 100 gramos, penetrando el asfalto durante 5 segundos a una temperatura de 25 ° C, y luego se mide a 0.1 mm, Manual de ensayos de materiales (2016).

2.2.3.3. **Ductilidad: MTC E 306**

Esta característica incluye ensayar probetas de asfalto con forma similar a ocho y tamaños estandarizados, extendiéndose a una velocidad de 5 cm por minuto y una temperatura de $25 \pm 0,5$ ° C hasta el momento de corte del material, la distancia expresada en centímetros se considera la ductilidad del asfalto, Manual de ensayos de materiales (2016).

2.2.3.4. **Punto de ablandamiento: MTC E 307**

Esta característica determina la "consistencia" del cemento asfáltico, se considera punto de ablandamiento la temperatura a la que el cemento asfáltico colocado en el anillo se vuelve lo suficientemente blando como para permitir el paso de una esfera de un diámetro y peso determinados.

El índice de penetración también indica la sensibilidad térmica del asfalto porque da la pendiente al conectar dos puntos con distintas penetraciones a distintas temperaturas.

Un valor negativo del punto de ablandamiento significa que el asfalto es más sensible al calor, mientras que un valor positivo significa que el cambio de consistencia del asfalto relacionado con los cambios de temperatura es menor, Manual de ensayos de materiales (2016).

2.2.3.5. Viscosidad (MTC E 308 Viscosidad del asfalto con el método del viscosímetro)

La viscosidad aparente se define como la relación entre la tensión aplicada y la velocidad de corte específica de un fluido newtoniano o no newtoniano, se utilizan equipos llamados viscosímetros, viscosímetros capilares y viscosímetros rotacionales.

Las especificaciones técnicas del cemento bituminoso en función de su viscosidad se basan en el rango de viscosidad a 60 ° C, porque está cerca de la temperatura máxima de la superficie de la carretera pavimentada, la viscosidad mínima generalmente se especifica como 135 ° C, porque está cerca de la temperatura de mezcla y distribución de la mezcla.

La viscosidad aparente se realiza empleando el viscosímetro rotacional con cámara termostatazada, de tipo Brookfield Thermosel o similar, el ensayo esta normalizado según ASTM D-4402, Manual de ensayos de materiales (2016).

El uso de un viscosímetro puede obtener diferentes viscosidades a cualquier temperatura dentro del rango especificado, en este sentido, se puede obtener la curva viscosidad-temperatura, de modo que se puedan obtener datos importantes en las diferentes etapas del procesamiento del cemento asfáltico, como manipulación, bombeo, colisión con agregados, proceso de compactación en la vía, Lesage (1996).

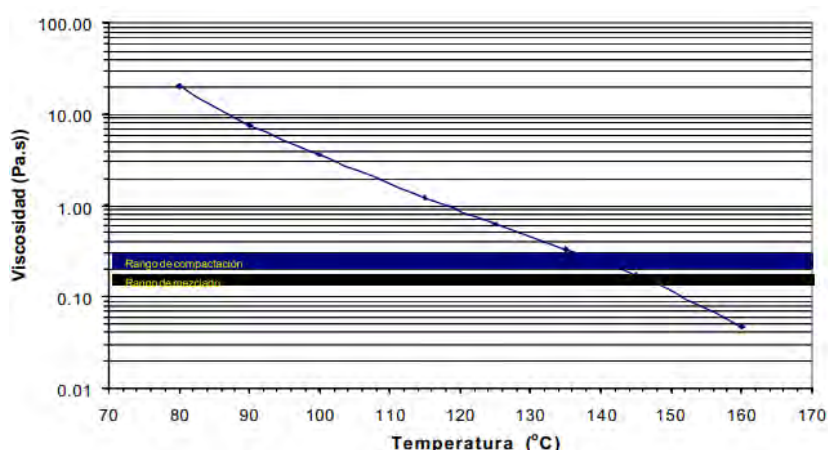


Figura 25: Variación de la viscosidad con la temperatura
Fuente: Instituto Mexicano del transporte

2.2.3.6. Durabilidad

Es una propiedad que indica hasta qué punto el “asfalto puede mantener sus características originales porque está constantemente expuesto a factores externos, lo que lleva a su degradación y envejecimiento”, Linares (2010).

En el mezclado, el asfalto se calienta produciéndose una película delgada, provocando que el asfalto se oxide y se endurece más severo reduciendo la durabilidad del asfalto, Brock (1999).

2.2.3.7. Adhesión y cohesión

La adhesión es la propiedad de adherirse a los agregados y la cohesión es la propiedad retener las partículas agregadas firmemente sobre el pavimento, Linares (2010).

Del mismo modo, el asfalto debe poder envolver completamente los agregados gruesos y finos, de modo que la mezcla asfáltica tenga cohesión y pueda resistir el desgaste del vehículo (ver Figura 26), lo que puede provocar fallas en la cohesión.

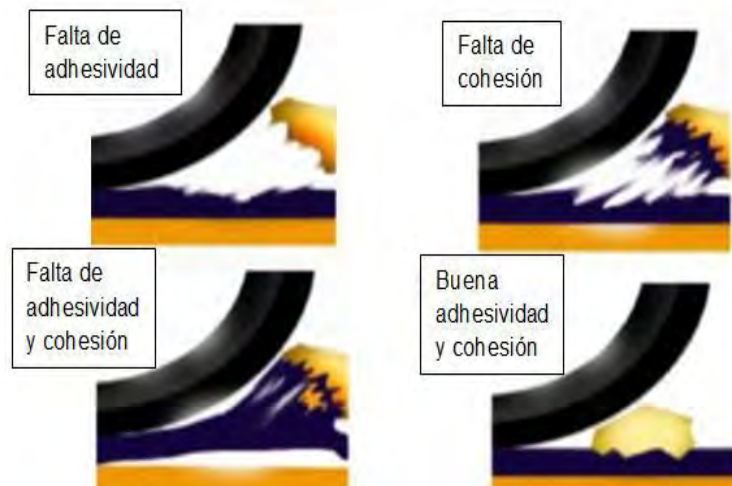


Figura 26: Acción de desenvuelta de agua
Fuente: Linares, (2010)

2.2.3.8. Susceptibilidad a la temperatura

El asfalto es termosensible al calor y sus propiedades se vuelven más suaves a medida que aumenta la temperatura y se endurecen o se vuelven pegajosas a medida que baja la temperatura, ver la Figura 27.

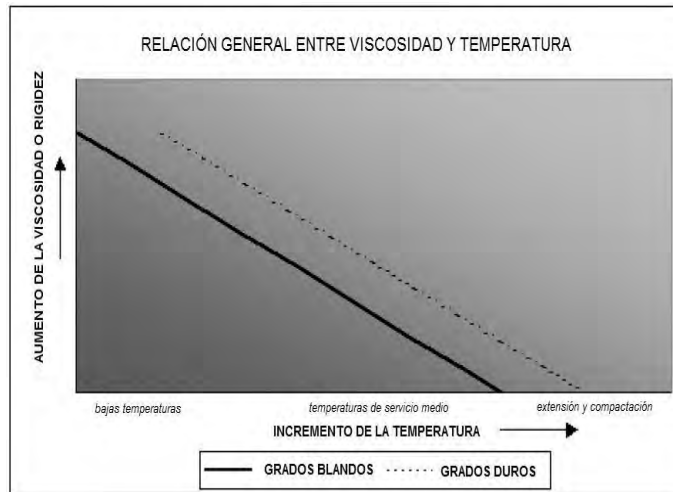


Figura 27: Influencia de la temperatura en el comportamiento del asfalto
Fuente: Linares, (2010)

2.2.3.9. Endurecimiento

Es el aumento de la rigidez de la superficie de la carretera provocado por el proceso de oxidación; es más probable que ocurra a altas temperaturas, cuando la película es muy fina, esta es la situación que ocurre durante el proceso de fabricación de la mezcla asfáltica; y continúa después de la construcción del pavimento asfáltico (Zúñiga, 2015).

2.2.4. Clasificación de los Asfaltos

2.2.4.1. Por su penetración o Cementos asfálticos

El cemento asfáltico se clasifica según su dureza o consistencia con las letras AC o CA (cemento asfáltico en los países anglosajones), y se identifica por su penetración y viscosidad, con un intervalo de penetración en unidades de décimas de milímetro / 10 y estas se clasifican en:

AC – 5

AC – 10

AC – 20

AC – 30

En nuestro país, Perú aún utiliza la clasificación de penetración a 25 ° C para brindar impermeabilidad, flexibilidad y durabilidad, y soportar diferentes climas, altitudes, temperaturas ambientales y condiciones de alto tránsito.

Los tipos de Cementos Asfálticos de Asfalto en Perú son:

Cemento Asfáltico (PEN 40/50) con penetración entre 40 y 50 décimas de milímetro.

Cemento Asfáltico (PEN 60/70) con penetración entre 60 y 70 décimas de milímetro.

Cemento Asfáltico (PEN 85/100) con penetración entre 85 y 100 décimas de milímetro.

Cemento Asfáltico (PEN 120/150) con penetración entre 120 y 150 décimas de milímetro.

Cemento Asfáltico (PEN 200/300) con penetración entre 200 y 300 décimas de milímetro.

Fuente: Adaptación (Deschamps y otros 2005).

Cuyos parámetros importantes presentamos a continuación:

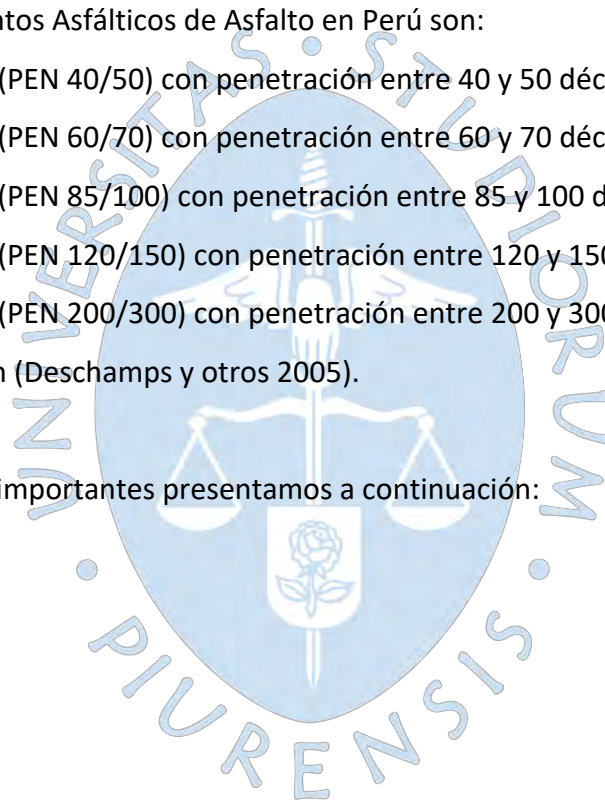


Tabla 2: Grado de Penetración PG 40-50 a 200-300

Tipo		Grado Penetración									
Grado	Ensayo	PEN 40-50		PEN 60-70		PEN 85-100		PEN 120-150		PEN 200-300	
		min	máx	min	máx	min	máx	min	máx	min	máx
Pruebas sobre el Material Bituminoso											
Penetración a 25°C, 100 g, 5 s, 0,1 mm	MTC E 304	40	50	60	70	85	100	120	150	200	300
Punto de Inflamación, °C	MTC E 312	232		232		232		218		177	
Ductilidad, 25°C, 5cm/min, cm	MTC E 306	100		100		100		100		100	
Solubilidad en Tricloro-etileno, %	MTC E 302	99,0		99,0		99,0		99,0		99,0	
Índice de Penetración (Susceptibilidad Térmica) ⁽¹⁾	MTC E 304	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1
Ensayo de la Mancha (Oliensies) ⁽²⁾											
Solvente Nafta – Estándar	AASHTO M 20	Negativo		Negativo		Negativo		Negativo		Negativo	
Solvente Nafta – Xileno, %Xileno		Negativo		Negativo		Negativo		Negativo		Negativo	
Solvente Heptano – Xileno, %Xileno		Negativo		Negativo		Negativo		Negativo		Negativo	
Pruebas sobre la Película Delgada a 163°C, 3,2 mm, 5 h											
Pérdida de masa, %	ASTM D 1754		0,8		0		1,0		1,3		1,5
Penetración retenida después del ensayo de película fina, %	MTC E 304	55+		52+		47		42+		37+	
Ductilidad del residuo a 25°C, 5 cm/min, cm ⁽³⁾	MTC E 306			50		75		100		100	

Fuente: EG2013 MTC

2.2.4.2. Según grado PG

En la década de 1980, Estados Unidos, con el fin de encontrar un mejor desempeño y durabilidad de las mezclas asfálticas, investigó y desarrolló un asfalto mejorado, al que llamaron Superpave (Pavimentos de Desempeño Superior), que no solo resolvió el problema de desempeño y durabilidad, sino también soporta temperaturas más elevadas, reduce el envejecimiento y mejora notablemente su reología (absorción y recuperación del adhesivo en condiciones de peso), la clasificación de estos está establecida de acuerdo a la temperatura máxima y mínima que soportan:

PG 46-22

PG 52-22

PG 58-22

PG 64-22

PG 70-22

PG 76-22

PG 82-22

PG 88-22

Cuyos parámetros importantes presentamos a continuación:



Tabla 3: Grado de penetración PG 70 - 64

	PG 70			PG 76			PG 58			PG 64											
	34	40	46	10	16	22	28	34	40	46	16	22	28	34	40	10	16	22	28	34	40
Temperatura de diseño máxima del pavimento promedio de 7 días, °C ^a	<46			<52						<58						<64					
Temperatura de diseño mínima del pavimento. °C ^a	>34	>40	>46	>10	>16	>22	>28	>34	>40	>46	>16	>22	>28	>34	>40	>10	>16	>22	>28	>34	>40
Asfalto Original																					
Punto de inflamación, T 48, °C, mínimo											230										
Viscosidad, T 316: ^b máximo 3 Pa·s, temp de prueba, °C											135										
Esfuerzo cortante dinámico, T 315 G*/senS, ^d mínimo 2.20 kpa temperatura de prueba @ 10 rad/s, °C	46			52						58						64					
Película delgada en horno rotativo (T 240)																					
Cambio de masa, ^e máximo, %											1.00										
Esfuerzo cortante dinámico, T 315: G*/senS, ^d mínimo 2.20 kpa temperatura de prueba @ 10 rad/s, °C	46			52						58						100					
Residuo en cámara de presión (R 28)																					
Temperatura de curado PAV, °C ^f	90			90						100						100					
Esfuerzo cortante dinámico G* senS, ^d máximo 5000 kpa temperatura de prueba @ 10 rad/s, °C	10	7	4	25	22	19	16	13	10	7	25	22	19	16	13	31	28	25	22	19	16
Resistencia al deslizamiento, T 313 : ^g S, máximo 300 MPa valor-m, mínimo 0,300 temp de prueba @ 60 s, °C	-24	-30	-36	0	-6	-12	-18	-24	-30	-36	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	-30
Tensión Directa, T 314: ^h Def unitaria de la falla, mínimo 1,0% temp de prueba @ 1.0 mm/min, °C	-24	-30	-36	0	-6	-12	-18	-24	-30	-36	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	-30

Fuente: EG2013 MTC

Tabla 4: Grado de Penetración PG 42 64

	PG 42			PG 52						PG 58					PG 64						
	34	40	46	10	16	22	28	34	40	46	16	22	28	34	40	10	16	22	28	34	40
Temperatura de diseño máxima del pavimento promedio de 7 días, °C ^a	<46			<52						<58					<64						
Temperatura de diseño mínima del pavimento. °C ^a	> 34	> 40	> 46	> 10	> 16	> 22	> 28	> 34	> 40	> 46	>-16	>-22	>-28	>-34	>-40	>-10	>-16	>-22	>-28	>-34	>-40
Asfalto Original																					
Punto de inflamación, T 48, °C, mínimo	230																				
Viscosidad, T 316: ^b máximo 3 Pa s, temp de prueba, °C	135																				
Esfuerzo cortante dinámico, T 315 G*/senS, ^d mínimo 2.20 kpa temperatura de prueba @ 10 rad/s, °C	46			52						58					64						
Película delgada en horno rotativo (T 240)																					
Cambio de masa, ^e máximo, %	1.00																				
Esfuerzo cortante dinámico, T 315: G*/senS, ^d mínimo 2.20 kpa temperatura de prueba @ 10 rad/s, °C	46			52						58					100						
Residuo en cámara de presión (R 28)																					
Temperatura de curado PAV, °C ^f	90			90						100					100						
Esfuerzo cortante dinámico G* senS, ^d máximo 5000 kpa temperatura de prueba @ 10 rad/s, °C	10	7	4	25	22	19	16	13	10	7	25	22	19	16	13	31	28	25	22	19	16
Resistencia al deslizamiento, T 313: g S, máximo 300 MPa valor-m, mínimo 0,300 temp de prueba @ 60 s, °C	-24	-30	-36	0	-6	-12	-18	-24	-30	-36	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	-30
Tensión Directa, T 314: ^g Def unitaria de la falla, mínimo 1,0% temp de prueba @ 1.0 mm/min, °C	-24	-30	-36	0	-6	-12	-18	-24	-30	-36	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	-30

Fuente: EG2013 MTC

2.2.4.3. Asfaltos líquidos

Los más utilizados son el curado medio (MC) y el curado rápido (RC), así como la emulsión asfáltica tradicional y la modificación de polímeros, que se utilizan principalmente para lechada de asfalto, riego por adherencia, tratamiento de superficies, micro pavimentos y estabilización de suelos superficiales. Necesitar, de acuerdo a (Asfalto Perú, 2019) y se clasifican en:

Asfalto de curado medio

Asfalto Líquido MC-30

Asfalto Líquido MC-70

Asfalto Líquido MC-250

Asfalto Líquido MC-800

Asfalto Líquido MC-3000



Tabla 5: Especificaciones técnicas material bituminoso MC

Tipo	Material Bituminoso Diluido									
	MC-30		MC-70		MC-250		MC-800		MC-3000	
	min	máx.	min	máx.	min	máx.	min	máx.	min	máx.
Pruebas sobre el Material Bituminoso										
-Viscosidad Cinemática a 60°C, cSt	30	6	7	1	2	5	8	1.60	3	6.00
-Punto de Inflamación, °C	-	0	-	0	-	0	-	0	-	0
-Ensayo de destilación										
-Destilado, porcentaje por volumen del total de										
-a 225 °C	-	2	-	2	-	1	-	-	-	-
-a 260 °C	40	7	2	6	1	5	-	3	-	1
-a 315 °C	75	9	6	9	6	8	4	8	1	7
Residuo del destilado a 360 °C, % en volumen por	50	-	5	-	6	-	7	-	8	-
Pruebas en el Residuo de Destilación:										
Viscosidad Absoluta a 60°C, Pa.s., (P) ^(*)	30 (300)	120 (1.20)	30 (300)	120 (1.20)	30 (300)	120 (1.20)	30 (300)	120 (1.20)	30 (300)	120 (1.20)
Ductilidad a (25°C), 5 cm/min, cm	100	-	1	-	1	-	1	-	1	-
Solubilidad en Tricloro – etileno, %	99,0	-	9	-	9	-	9	-	9	-
Ensayo de la Mancha (Oliensies) ^(**)										
Solvente Nafta – Estándar	Negativo		Negativo		Negativo		Negativo		Negativo	
Solvente Nafta – Xileno, % Xileno	Negativo		Negativo		Negativo		Negativo		Negativo	
Solvente Heptano – Xileno, % Xileno	Negativo		Negativo		Negativo		Negativo		Negativo	

Fuente: EG2013 MTC

2.2.4.4. Asfalto de curado rápido

Asfalto Líquido RC-70

Asfalto Líquido RC-250

Asfalto Líquido RC-800

Asfalto Líquido RC-3000



Tabla 6: Especificaciones técnicas RC

Tipo	Material Bituminoso Diluido							
	RC-70		RC-250		RC-800		RC-3000	
	min	máx.	min	máx.	min	máx.	min	máx.
Pruebas sobre el Material Bituminoso								
Viscosidad Cinemática a 60 °C , cSt.	70	140	250	500	800	1.600	3.000	6.000
Punto de Inflamación, °C	-	-	27	-	27	-	27	-
Contenido de Agua, %	-	0,2	-	0,2	-	0,2	-	0,2
Ensayo de destilación:								
Destilado, porcentaje por volumen del total de destilado a 360 °C								
-a 190°C	10	-	-	-	-	-	-	-
-a 225°C	50	-	35	-	15	-	-	-
-a 260°C	70	-	60	-	45	-	25	-
-a 315°C	85	-	80	-	75	-	70	-
Residuo del destilado a 360°C , % en volumen por diferencia	55	-	65	-	75	-	80	-
Pruebas en el Residuo de Destilación:								
Viscosidad absoluta a 60°C, Pa.s.(P) (*)	60 (600)	240 (2.400)	60 (600)	240 (2.400)	60 (600)	240 (2.400)	60 (600)	240 (2.400)
Ductilidad a 25°C, 5 cm/min, cm	100	-	100	-	100	-	100	-
Solubilidad en Tricloro-etileno, %	99,0	-	99,0	-	99,0	-	99,0	-
Ensayo de la Mancha (Oliensies) (**)								
Solvente Nafta-Estándar	Negativo		Negativo		Negativo		Negativo	
Solvente Nafta-Xileno, %Xileno	Negativo		Negativo		Negativo		Negativo	
Solvente Heptano-Xileno, % Xileno	Negativo		Negativo		Negativo		Negativo	

Fuente: EG2013 MTC

2.2.5. Asfalto modificado

El asfalto modificado es el producto de disolver o mezclar aditivos modificados de manera homogénea y estable (polímero o no polímero) y son estables con los cambios de tiempo y temperatura, se agregan al material asfáltico para realizar la modificación de sus propiedades incluyen: sensibilidad a la temperatura, rango plástico, cohesión, respuesta elástica, resistencia al agua y resistencia al envejecimiento, Suárez (2019).

Esta alternativa tiene un impacto significativo en el pavimento porque mejora la cohesión, adherencia y mayor vida útil, reduciendo los costos de mantenimiento de la vía (Pérez & López, 2012) ganando una mayor resistencia al agua y la mínima influencia al cambio climático, también se han mejorado las propiedades de elasticidad y viscosidad para obtener productos más resistentes a la deformación y fatiga, minimizando el impacto de tales ataques en el pavimento (Salinas, 2009).

2.2.6. Modificadores del asfalto

El modificador produce según, Maxil y Salinas (2013) actividad superficial iónica que aumenta la adhesión en la interfaz entre el agregado y el material asfáltico, mantiene la adhesión incluso en presencia de agua, también aumentan la resistencia de la mezcla asfáltica a la deformación y la tensión de tracción repetida, reduce el agrietamiento, así como la sensibilidad de la mezcla asfáltica a cambios de temperatura.

Si usamos un adhesivo más duro, algunas de estas propiedades se pueden mejorar, pero esto reducirá su flexibilidad a temperatura ambiente y hará que el adhesivo sea más frágil a bajas temperaturas, la mezcla de asfalto ideal debe tener las siguientes características:

- La rigidez o viscosidad es baja en condiciones normales de producción de fábrica y temperatura de trabajo.
- Tiene alta rigidez a altas temperaturas de servicio para reducir la formación de ahuellamientos.

- Tiene baja rigidez y buenas propiedades elásticas a bajas temperaturas de trabajo para reducir el riesgo de grietas por cambios de temperatura, Suárez (2019).

La mezcla de asfalto debe tener buenas características de adherencia en presencia de humedad para reducir el stripping, según, Figueroa y Reyes (2012), se puede definir el stripping como la “pérdida de adherencia entre la película asfáltica y la superficie del agregado en la mezcla asfáltica, debido a la acción del agua, resultando en pérdida de asfalto provocando pérdida de la funcionalidad de la mezcla”.

Como el asfalto es responsable del comportamiento viscoelástico de la mezcla asfáltica, sus características determinan muchos aspectos de su comportamiento en las vías.

Es muy importante controlar el proceso de modificación (adición), porque dicho proceso puede convertirse en un defecto y es difícil detectar deficiencias, las principales adiciones son:

- Mejoradores de adherencia.
- Filler o polvos calcáreos.
- Asfaltitas.
- Polímeros o copolímeros.
- Cauchos.
- Gomas. (Botasso, 2002):

2.2.7. Mejoradores de adherencia

Los mejoradores de adherencia no solo están relacionados con fenómenos relacionados con el equilibrio físico y químico de fases (agregados gruesos, agregados finos, aglutinantes, agua, filler), sino también relacionados con fenómenos relacionados con la cinética físico-química y juegan un papel importante en estos fenómenos debido a la acción mecánica del transporte y viscosidad del adhesivo, cuando el adhesivo es muy viscoso, el descubrimiento de la mezcla será mucho más lento; por esta razón, bajo esta consideración, es preferible utilizar un adhesivo más viscoso, entre ellos podemos

mencionar que el producto (surfactante) es un agente de superficie, que se agrega al asfalto para mejorar su interacción con los agregados; los surfactantes suelen ser compuestos estructuralmente polares - inorgánicos (principalmente) y propiedades orgánicas no polares, tiene la propiedad de reducir la tensión superficial del líquido en el que están contenidos.

2.2.8. **Modificador polímeros**

Los polímeros son sustancias de alto peso molecular compuestas por cientos de miles de pequeñas moléculas, formando así diversas formas de macromoléculas, cadenas en escalera, cadenas conectadas o fijadas térmicamente, que pueden ser no blandas cuando se calienta, cadena larga y cadena suelta, algunos modificadores de polímeros con buen efecto son los siguientes:

- Homopolímeros: Una sola unidad estructural (monómero).
- Copolímeros: Varias unidades estructurales distintas (EVA, SBS).
- Elastómeros: Cuando se estiran, superan el límite elástico y no volverán a su longitud original cuando se detenga el esfuerzo, tiene una deformación pseudoplástica casi sin elasticidad (Hermida, 2011).

Los principales polímeros que se incorporan a los asfaltos, fundamentalmente por su afinidad son:

Naturales: caucho natural, celulosa, glucosa, sacarosa, ceras y arcillas.

SBS:(estireno-butadieno-estireno) o caucho termoplástico. Este es el polímero más utilizado para modificar el asfalto porque tiene el mejor rendimiento durante la vida útil de la mezcla asfáltica.

EVA: etileno-acetato de vinilo.

SBR: caucho sintético con 25% de estireno y 75% de butadieno.

EPDM: (polipropileno atactico) muy flexible, resistente al calor y a los agentes químicos

EMA: etileno-acrilato de metilo

PE: polietileno

PP: Polipropileno

El EVA (etileno-acetato de vinilo) y SBS (estireno-butadieno-estireno) son los de más rápido crecimiento como aditivos modificados, principalmente SBS, la compatibilidad entre el asfalto y el polímero significa que los dos se pueden mezclar para formar un producto homogéneo donde se mejora el rendimiento con respecto al asfalto base y la mezcla se puede procesar sin tomar demasiadas precauciones excesivas. (Bottaso et al., 2002).

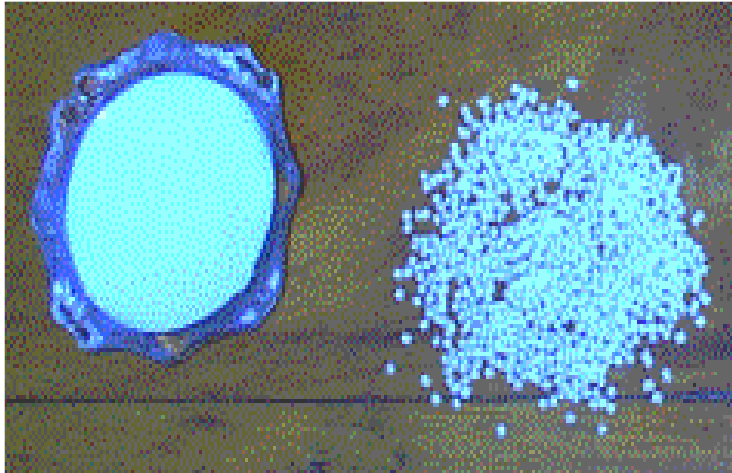


Figura 28: Emulsión de Eva y pelets de SBS comercializados en Argentina.
Origen Corea. Maraca Comercial Taypol
Fuente: Botasso, G. et al., 2002

El objetivo que se persigue con el asfalto modificado con polímeros es utilizar un adhesivo más viscoso a altas temperaturas para reducir la deformación permanente (ahuellamientos) de la mezcla que constituye la capa portante, aumentar la rigidez y, por otro lado, reducir el agrietamiento por calor a bajas temperaturas. y debido a la fatiga, aumentando su elasticidad, Brooker et al. (2002).

Finalmente, también puede hacer que el adhesivo tenga mejores propiedades de unión y mayor durabilidad, no es fácil encontrar estas propiedades, principalmente porque deben seleccionarse, Brooker et al. (2002).

- El tipo de ligante en función del clima y de la sollicitación
- El tipo de polímero que sea compatible con el ligante asfáltico
- El asfalto modificado debe ser compatible con los áridos utilizados
- Las proporciones tales que provean un esqueleto estructural resistente dado por los áridos adecuados y en una ajustada proporción con el ligante asfáltico seleccionado de

forma tal de obtener una mezcla resistente a las cargas pesadas, a la baja frecuencia, al intemperismo, generando condiciones de confort al usuario de la vía.

La selección adecuada del asfalto se convierte en un compromiso entre los dos extremos; la formación de ahuellamientos a alta temperatura y el agrietamiento por fragilidad térmica a baja temperatura, es decir, la mejora del comportamiento a alta temperatura tiene un impacto negativo en el comportamiento a baja temperatura. La adición de polímeros al cemento asfáltico ha sido identificada como la única tecnología que puede conciliarse en estos dos aspectos a dos temperaturas extremas, lo que se suma a los otros beneficios ya enumerados, Aldana (2014).

En la Figura 29, se puede esquematizar las variaciones de consistencia en función de las variaciones de temperatura, un asfalto convencional experimenta para una misma variación de temperatura un cambio en su viscosidad mayor al de un betún ideal al que tiende el comportamiento de un asfalto modificado, Garnica et al. (2004).

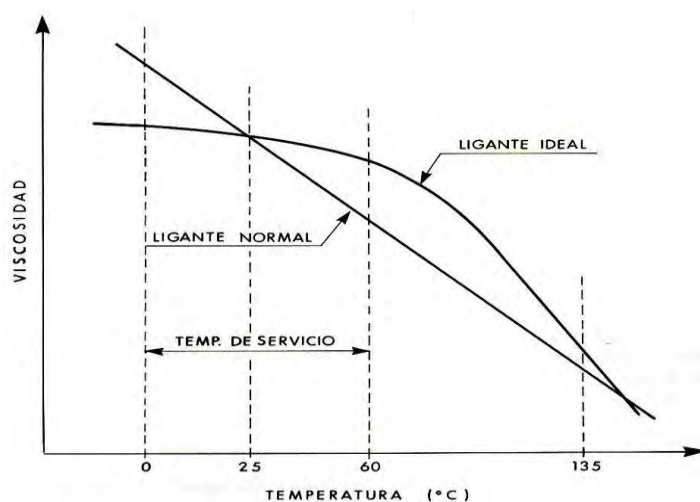


Figura 29: Comportamiento convencional e ideal del asfalto
Fuente: Garnica 2010

Ventajas de los asfaltos modificados en servicio, Kandhal et al. (1990) son las siguientes:

- Decrece la susceptibilidad térmica.
- Debido a la mayor viscosidad, menor fluidez y mayor elasticidad de la mezcla, se reducen las fugas de asfalto.

- Los polímeros de cadena larga brindan una mayor flexibilidad, debido a la mayor adherencia de los polímeros de cadena corta.
- Alta cohesión.
- Mejor procesabilidad y compactación.
- Los sellos de asfalto tienen mejor resistencia al agua, absorben mejor la tensión tangencial y evitan la propagación de grietas.
- Mayor resistencia al envejecimiento: Mantiene las características del adhesivo porque la parte más activa del asfalto está ocupada por el polímero.
- Las pruebas de mayor durabilidad y envejecimiento acelerado en laboratorio demuestran su excelente resistencia a los cambios de características.
- Prolongar la vida útil de la mezcla: reducir los trabajos de mantenimiento.
- El espesor de la película asfáltica sobre el agregado es mayor.
- Reducir los niveles de ruido: especialmente en mezclas abiertas.
- Incrementar el módulo de la mezcla.
- Sella mejor las grietas.
- Buenas condiciones de almacenamiento a temperaturas moderadas.

La modificación del asfalto con aditivos llamados polímeros es un proceso que se lleva a cabo a altas temperaturas entre 180 °C y 200 °C, para generar un esfuerzo cortante tan alto, el asfalto modificado con polímeros debe tener un bajo nivel de asfalto, deben tener suficiente aceite aromático para dispersar finamente el polímero a la temperatura de mezcla, Schimizza et al. (1994).

El polímero debe tener un cierto grado de compatibilidad con el asfalto para que se produzca la separación completa de fases, porque en este caso, el rendimiento del compuesto no mejorará; esta compatibilidad parcial se logra utilizando el aceite de malta en el betún para lubricar el polímero húmedo para lograrlo, Schimizza et al. (1994).

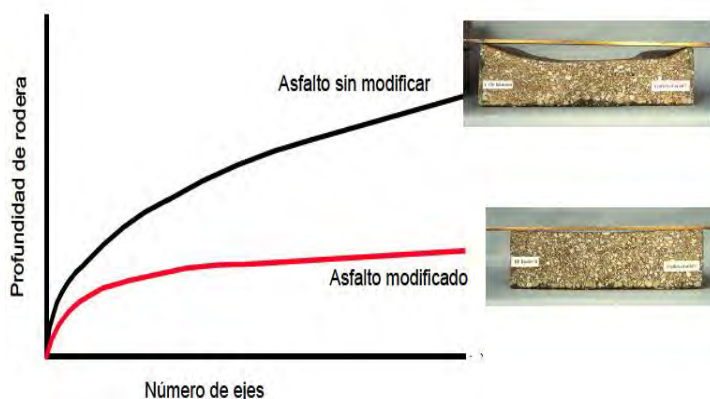


Figura 30: Diagrama del ensayo de Wheel Tracking en mezclas Asfálticas
Fuente: Ing. G. Bottaso

2.2.9. Caucho de llantas

El caucho después de triturar adecuadamente se adiciona en la mezcla de asfalto, el caucho se puede descomponer en el aglutinante de asfalto para darle características similares al asfalto modificado con polímeros y aplicarse directamente a la mezcla en un tamaño más grande, que actúa como un agregado porque es caucho, absorbe el ruido, por lo que la operación de la carretera causará menos contaminación a las comunidades aledañas, Macedo (2020).



Figura 31: Resumen de los métodos para producir mezclas tibias
Fuente: Labic, (2012)

2.2.10. Modificadores con ceras

Existen dos modificadores de asfalto; ceras derivadas del petróleo o parafinas sintéticas, así como ceras de ácidos grasos o ceras de origen natural con un punto de fusión superior a 60 °C, utilizadas como aditivos orgánicos y vienen estudiándose para mejorar las propiedades aglutinantes asfálticos.

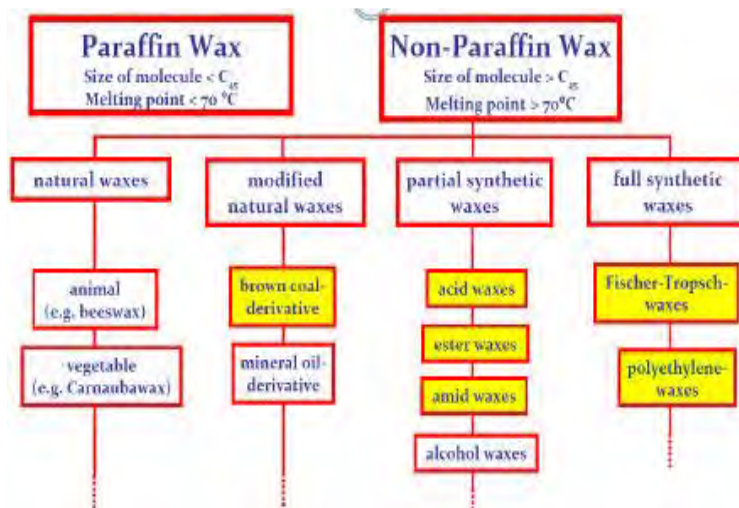


Figura 32: Clasificación de las ceras
Fuente: Iwanski 2012

Entre ellas se tienen según la naturaleza:

- Ceras Slack: Son productos disponibles comercialmente con un punto de congelación cercano a 41/42 ° C, están compuestas por un 90% de cadenas de n-alcanos con un número de carbonos que varía entre 19 y 36, el 10% restante son en su mayoría alcanos, esta cera es similar a la cera de parafina microcristalina que se encuentra en la mayoría de los asfaltos, consiste en alcanos normales con el menor contenido de isoparafinas y naftenos, tienden a cristalizar en placas o agujas, cuando se aíslan, tienen un punto de fusión por lo general entre 50 -70 ° C, cuando se añaden al asfalto el punto de fusión suele disminuir en unos 20 ° C, Gil Redondo et al. (2009).

- Fischer-Tropsch: “Son ceras sin parafina, 100% sintéticas, obtenidas a partir de gas natural y agua, son cadenas de hidrocarburos alifáticos (C40-C120), con un punto de fusión entre 90-114 °C”, Gil Redondo et al. (2009).
- Amidas de ácidos grasos: “Son ceras no parafínicas, parcialmente sintetizadas, con un punto de fusión cercano a los 130 °C, que contienen una cadena de hidrocarburos de 16 átomos de carbono unidos por grupos amida y un peso molecular de 578 g / mol, que es relativamente bajo en comparación con las ceras Fischer-Tropsch”, Gil Redondo et al. (2009).
- Ceras de polietileno: Son 100% sintéticas y tienen un punto de fusión entre 110 y 130 °C, esta cera de polietileno se utiliza como lubricante para plásticos y caucho, adhesivos termofusibles y revestimientos de papel, pero su aplicación como modificador del asfalto no está clara, Gil Redondo et al. (2009).

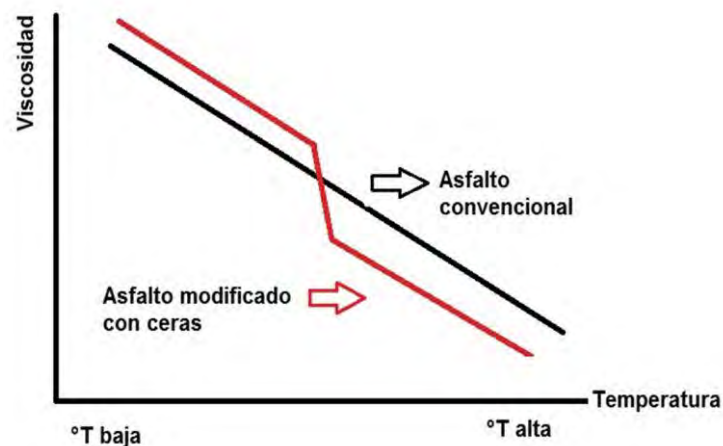


Figura 33: Comportamiento de la viscosidad del asfalto en función de la temperatura
Fuente: Javier Reyes Ortiz 2013

2.2.10.1. Aditivos Orgánicos (Uso de ceras)

Las principales acciones para el uso de ceras son:

- Como regulador de viscosidad y lubricidad.
- Al calentar sobre el punto de fusión la viscosidad del adhesivo disminuirá.

- Al enfriarse se solidifica en partículas microscópicas y uniformemente distribuidas, aumentando así la dureza del adhesivo.
- Agregue del 2% al 4% de la masa adhesiva total de cera.

Resultados:

- No es difícil de usar, no exige mayor inversión.
- La temperatura de mezcla es 130 - 140 ° C.
- Refrigeración limitada.
- Trabajabilidad en la mezcla.
- Mejora la resistencia a la formación de surcos.

Los aditivos orgánicos (ceras) modifican el ligante y se añaden cuando la temperatura de producción es superior a la temperatura de fusión de la cera utilizada, estos aditivos generalmente reducen la viscosidad del adhesivo (Asociación Europea de Pavimentos Asfálticos EAPA 2010); a medida que la mezcla se enfría, los aditivos solidifican en partículas de tamaño micro y se distribuyen uniformemente, aumentando la rigidez del adhesivo, logrando así un refuerzo de fibra similar al comportamiento de la mezcla.

En la cera orgánica Apis Mellifera cera de abeja doméstica productora de miel, cera natural no existe estudios como modificador de asfalto, la presente tesis pretende evaluar esta cera orgánica de la adición en ligantes asfálticos a diversa proporciones y temperaturas en el comportamiento de las mezclas tibia. el rendimiento del ligando asfáltico con la modificación en esta investigación deberá presentar las características exigidas por las normas técnicas vigentes, los resultados aquí generados pueden contribuir a la utilización de recursos renovables, favoreciendo el desarrollo de esa cultura en la región de Junín y de todo el país, abriendo así la posibilidad del uso de la cera de Apis Mellifera como modificar del ligante asfáltico.

2.3. Técnicas para modificar asfaltos

2.3.1. Mezcla por vía seca

A través de este método, los aditivos suelen estar en forma de partículas y reemplazan parte del agregado fino, antes de agregar el ligante, el agregado fino se mezcla con el agregado grueso, este representando del 1% al 7.5% de la masa total.

Este procedimiento requiere un balance, antes de agregar cemento asfáltico, se pesa la cantidad requerida de aditivo cuando el agregado alcanza la temperatura de producción, el mezclado en seco se usa generalmente para la medición del tamaño de partículas densas, abiertas o discontinuas.

2.3.2. Mezcla por vía húmeda

El aditivo es adicionado al ligante y mezclado a una determinada temperatura 110 a 140 °C con un rotor por un periodo de 30 minutos, una vez concluida esta operación se procederá a mezclar con los áridos a la temperatura prevista en el primer paso.

2.4. Parámetros de los asfaltos y determinaciones adicionales

Los parámetros de los asfaltos según la Normas INVIAS INV 450-10 es la siguiente:

Tabla 7: Clasificación de asfaltos modificados de uso vial

Característica	Norma Ensayo INV	Mezclas densas, semidensas y gruesas			Mezcla de alto módulo	
		Categoría de tránsito				
		NT1	NT2	NT3		
Compactación (golpes/cara)		50	75 (112)	75 (112)	75	
Estabilidad mínima (N)	E-748 (E-800) (Nota 1)	5 000	7 500 (16 875)	9 000 (20 250)	15 000	
Flujo(mm) (Nota 2)		2,0 – 4,0	2,0 – 4,0 (3,0 – 6,0)	2,0 – 3,5 (3,0 – 5,3)	2,0 – 3,0	
Relación Estabilidad / Flujo (kN/mm)		2,0 – 4,0	3,0 – 5,0 (4,5 – 7,5)	3,0 – 6,0 (4,5 – 9,0)	-	
Vacíos con aire (Va), % (Nota 3)	Rodadura	E-736	3,0 – 5,0	3,0 – 5,0	4,0 – 6,0	NA
	Intermedia	E-799	4,0 – 8,0	4,0 – 7,0	4,0 – 7,0	4,0 – 6,0
	Base		NA	5,0 – 8,0	5,0 – 8,0	4,0 – 6,0

Vacíos en los agregados minerales (VAM), % mínimo	T. Máx. 38 mm	E-799	13,0			-
	T. Máx. 25 mm		14,0			14,0
	T. Máx. 19 mm		15,0			-
	T. Máx. 10 mm		16,0			-
Vacíos llenos de asfalto (VFA), %	E-799	65 – 80	65 – 78	65 – 75	63 – 75	
Relación Llenante / Ligante efectivo, en peso	E-799	0,8 – 1,2			1,2 – 1,4	
Concentración de llenante, valor máximo	E-745	Valor crítico				
Evaluación de propiedades de empaquetamiento por el método Bailey	-	Reportar				
Espesor promedio de película de asfalto, mínimo μm	E-741	7,5				

Fuente: Invias INV 450-20

2.5. Mezclas asfálticas en caliente

Son del tipo más común de mezclas asfálticas, está compuesta por una combinación de asfalto, agregados y aditivos, todas las partículas de agregado está bien cubierta, su fabricación incluye calentar el adhesivo y los agregados, Padilla (2004).

2.6. Clasificación de las mezclas

2.6.1. Según la temperatura de fabricación

2.6.1.1. Mezclas asfálticas en frío (Cold Mixes –CMA)

Se fabrican a una temperatura entre 0 y 60 ° C, se utilizan las emulsiones bituminosas o bitumen rebajado, sus principales áreas de aplicación son la construcción y mantenimiento de carreteras de bajo y medio tráfico, son más propensas al envejecimiento, por lo que el bitumen se recomienda aplicar lechada para sellarlos, Gamboa (2012).

2.6.1.2. Mezclas asfálticas semicalientes (Half-Warm Mix Asphalts –HWMA-)

Son mezclas donde su temperatura de producción no supera en ningún momento el punto de ebullición del agua (100 ° C), que en la mayoría de los casos controla la humedad del agregado, Gamboa (2012).

2.6.1.3. Mezclas asfálticas tibias (Warm Mix Asphalts -WMA-)

Son mezclas producidas a temperaturas entre 100 ° C y 140 ° C, e involucra nuevas tecnologías y productos en su proceso de fabricación, permite aumentar la distancia de transporte de la mezcla, mejora la procesabilidad y compacidad, el uso de estas mezclas requiere más cuidado en el proceso de preparación, ya que la adición de productos a la mezcla puede ocasionar efectos negativos, Lopera (2011).

2.6.1.4. Mezclas asfálticas en caliente (Hot Mix Asphalt –HMA-)

Es una mezcla asfáltica con una temperatura de fabricación superior a 140 - 190 ° C, el cemento asfáltico debe calentarse a alta temperatura hasta que su viscosidad se reduzca al valor requerido, durante el proceso de fabricación, el agregado debe calentarse a una cierta temperatura similar a la del adhesivo para mantener la viscosidad, no debiendo superar los 10 ° C, Celis et al. (2008).

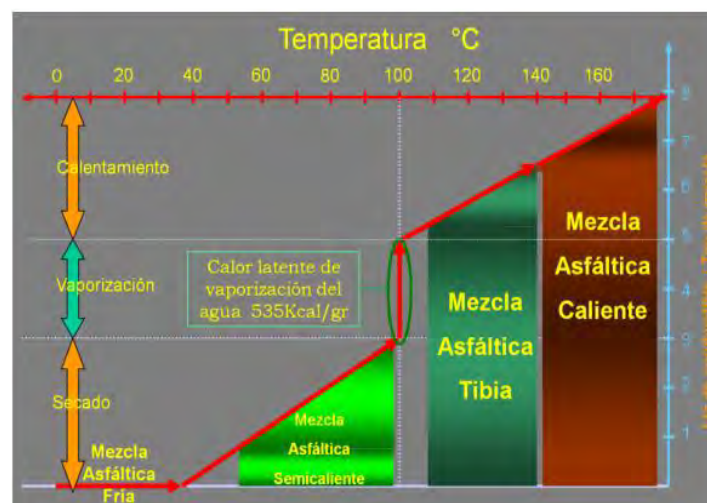


Figura 34: Clasificación de las mezclas asfálticas según la temperatura
Fuente: Lopera, 2011

2.6.1.5. Por la proporción de Vacíos en la mezcla asfáltica

Este parámetro es necesario para evitar que se produzca deformación plástica por transferencia de carga y cambios térmicos, se tienen los tipos:

- Mezcla cerrada o densa: la relación de vacíos no supera el 6%.
- Mezclas semicerradas o semi-compactas: Con vacíos entre el 6% y el 10%.

-Mezclas abiertas: Los vacíos supera el 12%.

-Mezcla porosa o drenante: Los vacíos es mayor al 20%.

Deschamps et al. (2005).

Tabla 8: Denominación de agregados minerales para mezclas asfálticas

TIPO DE GRADUACIÓN	% QUE PASA POR EL TAMIZ N°8	DENOMINACIÓN
Densa	35-50	MDC
Semidensa	28-42	MSC
Gruesas	20-35	MGC
Mezclas de alto módulo	>50	MAM

Fuente: Adaptación de (Invias, 2013)

Tabla 9: Porcentaje que pasa tamiz N° 8

Tipo de Graduación	Porcentaje que pasa tamiz N°8
Abierta	5 - 20
Gruesa	20 - 35
Semi Densa	28 - 42
Densa	35 - 50
Fina	> 50

Fuente: Laboratorio nacional de vialidad – Chile

2.6.1.6. Por el Tamaño máximo del agregado pétreo

2.6.1.6.1. Mezclas Gruesas

El tamaño máximo del agregado se encuentra por encima de los 10 mm.

(Padilla, 2004).

2.6.1.6.2. Mezclas Finas

Denominados micro aglomerados o morteros bituminosos, ya que básicamente son una mezcla de áridos finos que incluyen polvo mineral y ligantes bituminosos, se determina el tamaño máximo del árido pétreo (<10mm) para conseguir su espesor mínimo, se debe esparcir una mezcla de dos a tres veces el tamaño máximo (Padilla, 2004),

2.6.1.7. Por la estructura del agregado pétreo

2.6.1.7.1. Mezclas con Esqueleto mineral

Tienen un “esqueleto mineral resistente al desgaste y su componente de resistencia es significativo debido a la fricción interna del agregado”, Padilla (2004).

2.6.1.7.2. Mezclas sin Esqueleto mineral

“No tienen un esqueleto mineral resistente y la resistencia se debe íntegramente a la cohesión de la masilla”, Padilla (2004).

2.6.1.8. Por la Granulometría

2.6.1.8.1. Mezclas Continuas

“Posee una cantidad muy distribuida de diferentes tamaños de agregado pétreo en su huso granulométrico”, Padilla (2004).

2.6.1.8.2. Mezclas Discontinuas

“Posee una cantidad muy limitada de tamaños de agregado pétreo en el huso granulométrico”, Padilla (2004).

2.6.1.8.3. Mezcla Porosa o Drenante

Están hechos de asfalto modificado y su proporción varía del 4,5% al 5% de la masa de la grava, para el asfalto convencional, se utilizan en carreteras secundarias, carreteras de ciudades o capa base debajo del pavimento de concreto.

Se utiliza como mezcla caliente para tráfico de alta intensidad y una capa de rodadura de unos 4 cm de espesor para lograr una rápida evacuación del agua de lluvia que cae sobre la carretera a través de la penetración, Padilla (2004).

2.6.1.9. Mezclas de alto módulo

Su proceso de producción es muy caliente, la capa base están hechos de asfalto muy duro, a veces modificado, el contenido de asfalto es cercano al 6% de la masa del agregado y la proporción de polvo son muy altos entre el 8% y el 10%, son mezclas con un alto módulo de elasticidad alrededor de 13.000 Mpa a 20 °C posee una resistencia a la fatiga alta, presentan espesores de entre 8 y 15 cm, se utilizan para carreteras con tráfico de intensidad media o alta; Padilla (2004).

En comparación con la capa base de grava de cemento, su principal ventaja es que no se agrietará debido a la contracción o al igual que la mezcla tradicional de gran espesor, la ventaja es que la capacidad de absorber tensión es más fuerte y generalmente tiene mayor resistencia a la fatiga, (Padilla, 2004).

2.6.1.10. Por su composición y homogeneidad de los agregados

Por su composición de vacíos, temperatura de aplicación y fracción de agregado pétreo, Paris (2016).

- “Masilla Asfáltica: Polvo mineral más el ligante.
- Mortero Asfáltico: Agregado fino más masilla.
- Concreto Asfáltico: Agregado grueso más mortero.
- Macadam Asfáltico: Agregado grueso más ligante asfáltico”.

2.7. Mezcla asfáltica tibia

Son mezclas que permiten reducir la temperatura de producción y almacenamiento de la mezcla, pueden debido al uso de tecnología reducir la viscosidad de la mezcla y mejorar su trabajabilidad, se produce en el rango de 105 ° C a 140 ° C, para lograr estas reducciones de viscosidad, se utilizan ceras y tensioactivos, Quintana (2017).

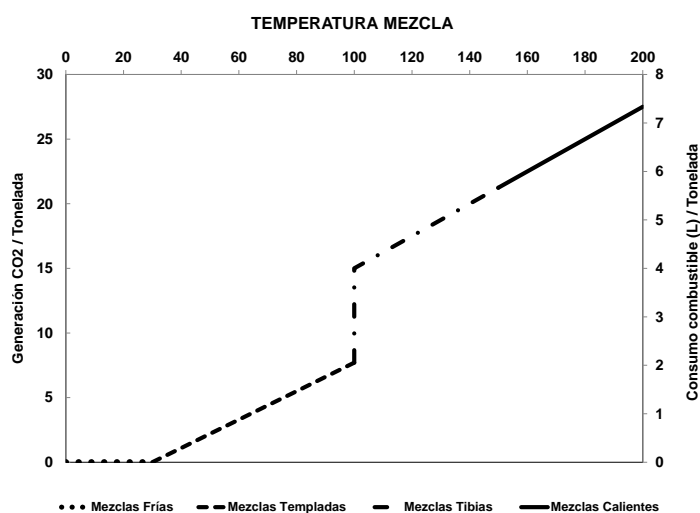


Figura 35: Comparación de la descarga de mezclas asfálticas calientes y tibias
Fuente: Javier Reyes Ortiz 2013



Figura 36: Mezcla caliente T 160°C, Mezcla tibia T 121°C
Fuente: Corrigan, 2012



Figura 37: Efectos ambientales durante extendido de las mezclas asfálticas
Fuente: Torres y Noreña, 2012

2.7.1. **Beneficios de utilizar mezclas tibias en la pavimentación**

- Se compacta fácilmente con menos esfuerzo y temperatura más baja para obtener un valor de densidad muy cercano a la densidad de diseño.
- Se obtiene el mejor porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica compactada para evitar la oxidación del asfalto.
- Capacidad para transportar mezclas asfálticas a grandes distancias desde el lugar de producción.
- Reducir la oxidación del asfalto durante las etapas de mezclado, pavimentación y compactación para mejorar la durabilidad del pavimento.

- Disminución en la emisión de volátiles, la reducción del costo energético y el envejecimiento del ligante asfáltico.
- En cuanto a la salud de los trabajadores, datos indican que ocurre una reducción significativa del riesgo en relación al potencial carcinogénico de la acción de los volátiles emitidos en los procedimientos de mecanizado y compactación de los ligandos asfálticos, Koenders et al. (2014).

2.7.2. Desventajas

En la investigación realizada, no se encontraron grandes problemas en la fabricación de WMA, la implementación de esta tecnología requiere inversiones en equipos, materiales y capacitación, que pueden ser compensadas con la reducción de costos de combustible.

A la fecha de esta tesis, no hay información ni datos a largo plazo para describir su desempeño, por el contrario, las investigaciones de laboratorio a corto plazo han arrojado resultados positivos, sin embargo, los estudios a más largo plazo son importantes para obtener una buena medida del desempeño esperado.

Se ha considerado para definir el tiempo de prueba de las mezclas asfálticas tres ciclos de congelación-descongelación, considerando la ley de Arrhenius $k = A e^{-E_a / RT}$, a mayor temperatura T_2 , una mayor proporción de moléculas tienen la energía cinética necesaria, y habrá colisiones más efectivas, la reacción la produce de hecho, para muchas reacciones, se ha encontrado que la velocidad se duplica cuando la temperatura aumenta en 10°C (aproximadamente); analizando entonces la temporada de lluvias en Huancayo dura 5,4 meses, del 22 de octubre al 5 de abril y la precipitación es de al menos 13 mm, la mayor parte de la lluvia se concentró en los 31 días, con una cantidad acumulada total promedio de 33 mm de acuerdo a (Weather Spark, s.a.), por tanto, se determina que la prueba se realice en 3 ciclos de 24 horas, de manera que cada ciclo de 24 horas obtendrá un total de 16 días de lluvia, pero en los tres ciclos, 48 días de lluvia, el cual puede ser considerado como el valor promedio de la zona altoandina de Junín; la prueba se puede acelerar aumentando la temperatura, pero se decidió mantener esta temperatura porque también está diseñada para evaluar la congelación.



Figura 38: Comparación Mezcla Asfáltica Mac versus MAT

Fuente: <http://www.worldhighways.com/categories/materials-production-supply/features/envinmental-ompact-drives-warm-mix-growth/>

2.8. Tecnologías para producir mezclas asfálticas tibias

2.8.1. Adición de agua en el asfalto

Esta tecnología reduce la viscosidad del asfalto a altas temperaturas debido a una pequeña cantidad de agua que forma el vapor en el asfalto, lo que genera una espuma controlada y reduce su viscosidad, (<https://es.scribd.com>)

2.8.2. Adición de polímeros orgánicos en el asfalto

Se basa la disminución de la viscosidad del asfalto a temperaturas entre 100° y 160°C por efecto de agregar polímero orgánico (Hidrocarburo Alifático), esta técnica se aplica muchísimo en el mundo, una de desventaja es que incrementa la viscosidad del asfalto a bajas temperaturas generando problemas de fisuración por fatiga, Urrego (2016).

2.8.3. Adición de Tensoactivos en el asfalto

La base teórica de esta tecnología es reducir la tensión interfacial entre el asfalto y el agregado, y reducir la temperatura de mezcla y compactación.

2.8.4. Adición de arena húmeda a una mezcla de agregado grueso

“Se basa en agregar arena húmeda a la mezcla asfáltica de agregado grueso que contiene exceso de bitumen a una temperatura de 120 a 150 ° C, reduciendo así la viscosidad del asfalto, cuando la arena húmeda está en contacto con la mezcla de agregado grueso, el agua se evapora, espuma y reduce la viscosidad del asfalto y promueve la compactación de la mezcla”, D’Angelo et al. (2008).

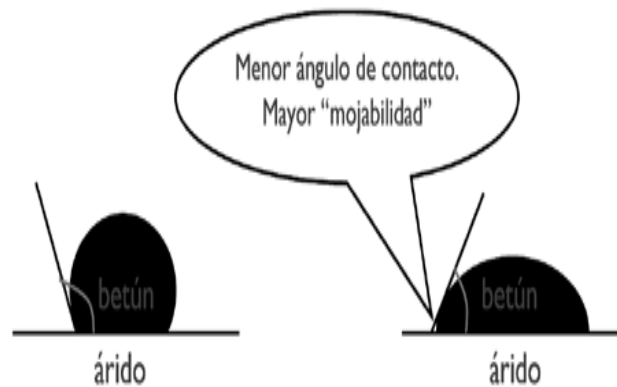


Figura 39: Mejora del ángulo de contacto mediante empleo de tensoactivos
Fuente: Santiago GIL REDONDO 2011

El proceso de aumentar la superficie específica del adhesivo formando espuma de asfalto, para la obtención de esta espuma se pueden añadir agua y aire comprimido, arena húmeda o aditivos tipo zeolita, D’Angelo et al. (2008).

2.9. Aditivos ceras orgánicas

Es un grupo de compuestos orgánicos sólidos a temperatura ambiente, es inflamable, aceitoso y tiene un brillo único, es insoluble en agua y soluble en solventes orgánicos; las ceras son termoplásticas, aunque no se consideran polímeros, provienen de animales, minerales, vegetales o sintéticos, su composición es variable, aunque suelen contener hidrocarburos libres o esterificados y alcoholes de alto peso molecular. (<https://ciqa.mx>)

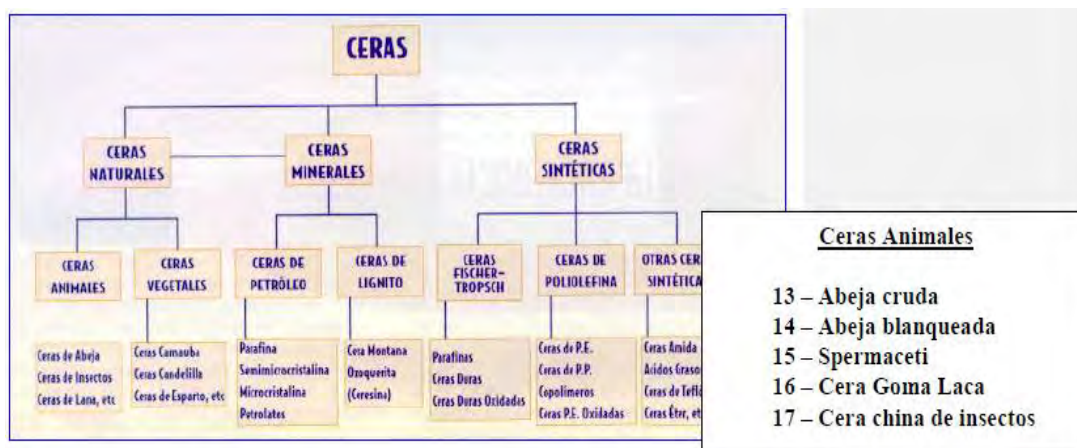


Figura 40: Clasificación de ceras

Fuente: Ceras y aplicaciones Herrera Muñoz

La cera natural o sintético tiene las siguientes propiedades:

- “A 20 ° C, deben ser amorfas a cristalinas finas, transparentes a opacas, blandas a duras y plásticas a quebradizas.
- Se funde sin descomponerse a temperaturas superiores a 40 ° C.
- Se pueden pulir con una ligera presión.
- Tienen una viscosidad baja a una temperatura ligeramente superior a su punto de fusión.
- La viscosidad disminuye gradualmente al aumentar la temperatura.
- Su consistencia y solubilidad dependen directamente de la temperatura.
- Por lo general, se producirá una llama similar al hollín cuando se quema después de encenderse.
- Pueden formar pastas o geles.
- Tienen baja conductividad térmica y conductividad eléctrica”, Herrera Muñoz (2018).

2.9.1. Clasificación

Su estructura química se define principalmente por la característica cadena de hidrocarburos, que es el bloque básico de casi todas las ceras, lo que le da a la cera hidrofobicidad, la longitud de la cadena de carbono puede variar entre C16-C18 de la cera grasa, en este caso, pasa a través de la cera de petróleo C20-C60, en el caso de cera de polietileno hasta miles de átomos de carbono, Herrera Muñoz (2018b).

2.9.2. *La cera de abejas*

Es la cera natural animal más antigua utilizada por el ser humano y más importante, producida por insectos, abejas; hay tres géneros importantes:

- Apis, Es el género de más alto orden social, que produce panales de cera.
- Melipona, Trigona y Tetranoma son abejas relativamente pequeñas y sin aguijón.
- Bombos, conocido como la abeja humilde. Herrera Muñoz (2018a).

Se cuentan con las siguientes especies:

- Apis dorsata, abeja gigante
- Apis índica, de tamaño medio
- Apis florea. Abeja diminuta
- Apis mellífica, abeja doméstica productora de miel, Herrera Muñoz, (2018a).

El panal adopta “un diseño hexagonal regular para aprovechar al máximo la superficie, por lo que en un panal natural hay 825 panales por decímetro cuadrado y se estima que las abejas producen 1 gramo en promedio, cada 8 gramos de cera”, Herrera Muñoz (2018a).

Punto de fusión ° C	61 – 65
Índice de acidez (mgKOH/g)	17 – 24
Índice de saponificación (mgKOH/g)	87 – 102
Índice de ésteres (mgKOH/g)	70 – 80
Índice de relación	3,3 – 4,3

Figura 41: características de una cera de abeja amarilla
Fuente: Real Farmacopea Española

2.10. *Agregados*

2.10.1. *Definición de agregado*

Son materiales granulares sólidos inertes utilizados en la capa de la carretera con un tamaño de partícula adecuado; utilizados para fabricar productos sintéticos resistentes,

mezclándolos ... o aglutinantes asfálticos, representando el 95% en peso y 85% en volumen, Quiroz (2019).

2.11. Propiedades de los agregados que se utilizan en mezclas asfálticas

Son las siguientes:

2.12. Duración y tamaño máximo de la partícula

2.12.1. Gradación

Viene hacer los diferentes tamaños del agregado que se encuentran dentro del margen de distribución en porcentajes de una serie de tamices, para cumplir los usos granulométricos.



Figura 42: Tamaño de las partículas
Fuente: Laboratorio Centauro Ingenieros

2.12.2. Tamaño de las partículas

Se designan en dos tipos según el tamaño máximo del agregado:

2.12.3. Tamaño máximo nominal de partícula

“Definido como el tamiz de mayor abertura que el primer tamiz que retiene más del 10% de las partículas de agregado, en una serie normal de tamices,” NTP 400.12 (2019).

2.12.4. Tamaño máximo de partícula

“Designado como el tamiz más grande que el tamaño máximo nominal de partícula, este es el tamiz más pequeño por el cual pasa el 100% de las partículas de agregado” NTP 400.12 (2019).

2.12.5. Textura superficial

La textura superficial proporciona un alto coeficiente de fricción superficial, lo que hace que el tráfico sea más seguro, además, es más probable que la película de asfalto se adhiera a superficies rugosas en lugar de superficies lisas, De La Cruz Bazán (2015).

2.12.6. Limpieza

Corresponde a la limitación de los tipos y cantidades de materiales (plantas, arcilla de pizarra, partículas blandas, bloques de arcilla, etc.) que no se requieren en los agregados, la limpieza de los agregados, se puede determinar mediante inspección visual, pero la malla de lavado puede medir con precisión el porcentaje de material no deseado menos de 0.075 mm (No. 200).

2.12.7. Capacidad de absorción

Es la capacidad del agregado para absorber agua o asfalto; si el agregado es muy absorbente, continuará absorbiendo betún después que la mezcla inicial, por lo tanto, el agregado poroso requiere más betún que el agregado menos poroso; para cuantificarla se realizan los ensayos de gravedad específica y absorción de agregados, Franco (2012).

2.12.8. Dureza

Es la resistencia de los áridos al desgaste y a la intemperie que estarán sometidos al proceso de producción, colocación, compactación y vida útil; se mide a partir del ensayo según la norma (MTC E207).

2.12.9. *Afinidad por el asfalto*

La afinidad entre el agregado y el asfalto es la tendencia a aceptar y retener una capa de asfalto, debe asegurar una fuerza para mantener el agregado y el asfalto combinados en las condiciones ambientales expuesta, Zúñiga (2015).

2.12.10. *Forma de la partícula*

Los requisitos de forma de las partículas de las mezclas asfálticas son diferentes, idealmente, “las partículas deberían tener una forma de paralelepípedo rectangular(cuboides) evitando las formas redondas, planas, delgadas y en forma de placa, ya que esta forma es muy fácil de agrietar en condiciones de carga de tráfico, la forma de las partículas afectará la trabajabilidad de la mezcla durante el proceso de pavimentación y la fuerza requerida para compactar la mezcla a la densidad requerida, también afectará la resistencia de la estructura de la mezcla durante su vida útil”, Rodríguez (2004).



Figura 43: Forma, textura y angularidad de las partículas de agregado
Fuente: Paramo J., Diseño de mezcla asfáltica en caliente en los siglos XXI, Argentina

2.13. Ensayos en agregados

2.13.1. *Granulometría MTC E 204*

Es la “medición de la gradación de los granos de una formación geológica, el método de la clasificación más sencillo y conocido es hacer pasar las partículas por una serie de mallas o tamices de distintas aberturas, que actúan como filtros de las partículas denominados columna de tamices”, Manual de ensayos de materiales (2016).



Figura 44: Columna de tamices
Fuente: Laboratorio Centauro

La cantidad de muestra de agregado grueso debe cumplir la tabla 10.

Tabla 10: Cantidad mínima de muestra de agregado grueso

Tamaño Máximo Nominal Abertura Cuadrada		Cantidad mínima de muestra de ensayo
mm	(pulg)	Kg
9,5	(3/8)	1
12,5	(1/2)	2
19,0	(3/4)	5
25,0	(1)	10
37,5	(1 ½)	15
50,0	(2)	20
63,0	(2 ½)	35
75,0	(3)	60
90,0	(3 ½)	100
100,0	(4)	150
125,0	(5)	300

Fuente: Manual de ensayos MTC (2016).



Figura 45: Granulometría
Fuente: Laboratorio Centauro Ingenieros

2.13.2. MTC E 205 gravedad específica y absorción de agregados finos

Esta prueba “determina el peso específico seco, el peso específico saturado con superficie seca, después de haber sido sumergido en agua durante 24 horas.

La gravedad específica aparente y la gravedad específica aparente se refieren a los materiales sólidos que componen las partículas, que no incluyen el espacio poroso en el que puede entrar el agua”, Manual de ensayos de materiales (2016).



Figura 46: Ensayo Gravedad especifica finos
Fuente: Laboratorio Centauro Ingenieros



Figura 47: Ensayo absorción de agregados
Fuente: Laboratorio Centauro Ingenieros

2.13.3. MTC E 206 peso específico y absorción de agregados gruesos

Esta “prueba mide el peso específico seco, el peso específico saturado con superficie seca, el peso específico aparente y la adsorción del agregado grueso; estos ensayos se basan en el agregado remojado durante 24 horas; luego la muestra se sumerge en agua y se pesa y se seca la muestra, efectuar el tercer pesaje, utilizando estos pesos se pueden calcular tres tipos de peso específico y absorción”, Manual de ensayos de materiales (2016).



Figura 48: Gravedad específica en agregados
Fuente: Laboratorio Centauro Ingenieros

2.13.4. Resistencia al desgaste en la máquina de los ángeles MTC E 207

“Esta prueba mide la degradación de agregados minerales menores a 37.5 mm (1½ pulgadas), la degradación es causada por desgaste, abrasión, impacto y aplastamiento durante la rotación en un tambor de acero que contiene un número específico de bolas de acero; a medida que el tambor gira la muestra y las bolas de acero son recogidas por una brida de acero hasta que se lanzan al otro lado del tambor produciendo un efecto de aplastamiento por impacto”, Manual de ensayos de materiales (2016).

La especificación será de acuerdo a la tabla 11:

Tabla 11: Carga para ensayo de abrasión

Gradación	Número de Esferas	Masa de la carga (g)
A	12	5 000 ± 25
B	11	4 584 ± 25
C	8	3 330 ± 20
D	6	2 500 ± 15

Fuente: Manual de ensayos de materiales (2016).



Figura 49: Equipo máquina de los ángeles
Fuente: Laboratorio Centauro Ingenieros

2.13.5. Prueba de ensayo estándar para índice de durabilidad del agregado MTC E 214

“La prueba calcula un valor que muestra la resistencia relativa del agregado para producir partículas finas nocivas (como arcilla); cuando se degrada por métodos mecánicos se determinan el índice de durabilidad, el índice de agregado y la durabilidad del agregado. La prueba específica da un valor empírico para la cantidad relativa, la finura y las características de los materiales arcillosos, que se pueden generar en el agregado cuando se somete a degradación mecánica”, Manual de ensayos de materiales (2016).



Figura 50: Ensayo de durabilidad de agregado
Fuente: <http://myerstest.com/>

La muestra debe tener una masa de $2550 \pm 0,25$ g, seca al aire, según tabla 12:

Tabla 12: Masa mínima para ensayo de índice de durabilidad

Tamaño del agregado	Peso seco al aire, g
19,0 a 12,5 mm ($\frac{3}{4}$ " a $\frac{1}{2}$ ")	1070 ± 10
12,5 a 9,5 mm ($\frac{1}{2}$ " a $\frac{3}{8}$ ")	570 ± 10
9,5 a 4,75 mm ($\frac{3}{8}$ " a N° 4)	910 ± 5
	2550 ± 25

Fuente: Manual de ensayos de materiales MTC 2016

2.13.6. Índice de aplanamiento y alargamiento MTC E 221

“Este método de prueba determina el índice de aplanamiento y alargamiento de los agregados, es aplicable a agregados de origen natural o artificial, incluidos los agregados livianos, o es aplicable a tamaños de partículas menores de 6,3 mm ($\frac{1}{4}$ de pulgada) o mayores de 63 mm ($2 \frac{1}{2}$ ”), el índice de aplanamiento de una pequeña parte del agregado se define como el porcentaje en peso de las partículas que lo forman, y su tamaño más pequeño (espesor) es menor a $\frac{3}{5}$ fracción del tamaño promedio”, Manual de ensayos de materiales (2016).



Figura 51: Ensayo de índice de alargamiento
Fuente: Laboratorio Centauro Ingenieros



Figura 52: Ensayo índice de aplanamiento
Fuente: Laboratorio Centauro Ingenieros

2.13.7. Método de ensayo estándar para la determinación del porcentaje de partículas fracturadas en el agregado grueso MTC E 210

Determina el porcentaje en cantidad de muestras de agregado grueso que contienen partículas fracturadas que cumplen con:

“Superficie de fractura, una superficie angular, rugosa o rota de agregado causada por trituración u otros métodos artificiales o naturales, para esta norma, solo cuando la superficie tiene las siguientes características, se considera que la superficie es "fracturada" el área proyectada de "superficie" es al menos un cuarto del área proyectada más grande de la partícula, y la superficie tiene un borde bien definido, que no incluye pequeñas picaduras o roturas”, Manual de ensayos de materiales (2016).



Figura 53: Ensayo porcentaje de partículas fracturadas
Fuente: Laboratorio Centauro Ingenieros

2.13.8. Método de ensayo estándar para el valor equivalente de arena de suelos y agregado fino MTC E 114

Esta prueba es de correlación in situ, cuyo propósito es mostrar la proporción relativa de suelo de arcilla o plástico fino con respecto al polvo en suelo granular y agregados finos que pasan el tamiz No. 4 (4,75 mm).



Figura 54: Ensayo equivalente de arena
Fuente: Laboratorio Centauro Ingenieros

2.13.9. MTC E 111 determinación del límite plástico (L.P.) de los suelos e índice de plasticidad (I.P.) MTC E 111

La prueba determina el límite plástico del suelo y el cálculo del índice plástico (IP), calculando la humedad más baja que puede formar una barra de aproximadamente 3,2 mm (1/8 de pulgada) (límite plástico LP) rodando dicho suelo entre la palma de la mano y una superficie lisa.

2.13.10. MTC E 209 durabilidad al sulfato de sodio y sulfato de magnesio

La prueba consiste en medir la desintegración de agregado grueso y agregado fino en una solución saturada de sulfato de sodio o sulfato de magnesio durante no menos de 16 horas o no más de 18 horas, Manual de ensayos de materiales (2016).



Figura 55: Ensayo Durabilidad al sulfato de sodio
Fuente: Laboratorio Centauro Ingenieros

2.14. Diseño de la mezcla asfáltica

El objetivo del método de diseño Marshall es encontrar la combinación adecuada de agregado mineral y cemento asfáltico, de manera que le brinde a la mezcla asfáltica final una serie de características físicas y de resistencia establecidas en los requisitos de calidad en el diseño del Mezcla, combina diferentes proporciones de agregado en 0.5% de cambio en el

contenido de aglutinante asfáltico, comenzando con un mínimo de 4% de contenido y alcanzando un máximo de 7%, se deben obtener tres muestras por cada relación de betún, esta debe cumplir con la norma ASTM-D 1559, Rondón y Reyes (2015), luego de realizar todos los diagramas propuestos en la metodología, y son:

Estabilidad vs. % de ligante

Fluencia vs. % de ligante

Vacíos vs. % de ligante

Vacíos del agregado mineral vs. % de ligante

Relación betún vacíos vs. % de ligante.

2.14.1. Procedimiento

El procedimiento consta de la caracterización de los agregados, filler y asfalto, determinando las propiedades físicas mecánicas de los agregados, para luego determinar el parámetro de:

Densidad Bulk: De acuerdo con las normas MTC E 205 y 206, la prueba determina la densidad aparente del agregado fino y agregado grueso, ya sea arena o grava, se coloca en un volumen conocido hasta que esté completamente lleno y no necesite ser compactado, luego péselo en la báscula, y luego repita los mismos pasos, pero esta vez llenamos el contenedor cada tercio y compactamos por vibración manual, finalmente, para obtener la densidad aparente, es suficiente dividir el peso del material por el volumen del recipiente, Manual de ensayos de materiales (2016), se calcula mediante la expresión:

$$G_{agr} = \frac{100}{\frac{P1}{G1} + \frac{P2}{G2} + \frac{P3}{G3} + \dots}$$

Donde:

P1, P2, P3 ... = Porcentaje en peso de cada una de las fracciones de material que intervienen en el total del agregado.

G1, G2, G3.... = Pesos específicos de los materiales a los que corresponden las fracciones anteriormente mencionadas.

Se proseguirá con la elaboración de las briquetas y rotura de la misma para ello se utilizará la normativa vigente del Manual de Ensayos de materiales 2016 del Ministerio de Transportes:

MTC E 504 Resistencia de mezclas bituminosas empleando el aparato Marshall.

MTC E 505 Porcentaje de vacíos de aire en mezclas asfálticas compactadas densas y abiertas.

MTC E 506 Gravedad específica aparente y peso unitario de mezclas asfálticas compactadas empleando especímenes parafinados.

MTC E 507 Espesor o altura de especímenes compactados de mezclas de pavimento asfáltico.

MTC E 508 Peso específico teórico máximo de mezclas asfálticas para pavimentos.

MTC E 511 Calculo del porcentaje de asfalto que absorbe el agregado en una mezcla de pavimentos asfáltico.

MTC E 514 Peso específico aparente y peso unitario de mezclas asfálticas compactadas empleando especímenes saturados con superficie seca.

Para la preparación del agregado, el agregado se seca hasta un peso constante en un horno entre 105 ° C y 110 ° C, después del secado, el agregado se tamiza en seco en las partes requeridas, se recomiendan los siguientes tamices:

25 a 19 mm (1 a ¾ pulg)

19 a 12,5 mm (¾ a ½ pulg)

12,5 a 9,5 mm (½ a 3/8 pulg)

9,5 a 4,75 mm (3/8 a N°4)

4,75 a 2,36 mm (N°4 a N°8)

2,36 mm (pasante la N°8)

2.14.2. Determinación de temperaturas de mezcla y compactación

El cemento asfáltico utilizado se calentará para producir una viscosidad de 0.17 ± 0.02 Pa. s y 0.28 ± 0.03 Pa. s para mezcla y compactación, respectivamente, estas viscosidades no son aptos para asfalto modificado, sin embargo, se recomienda utilizar la carta de viscosidad por tipo de asfalto.

2.14.3. Preparación de la Mezcla

Las muestras se pueden preparar a partir de un solo lote o de varios lotes, que contienen suficiente material para tres o cuatro muestras, determinando la cantidad de cada parte de agregado requerida para producir un lote que producirá una, dos, tres o cuatro muestras compactadas con una altura de 63.5 ± 2.5 mm y llévelo al horno, calentándolo a una temperatura más alta que la temperatura de producción, pero sin exceder el conjunto de mezcla para la mezcla de cemento y asfalto La temperatura excede 28°C , Canchis (2019).

Se coloca las bachadas en envases de metal cubiertos en el horno a temperatura de 8°C a 11°C sobre la temperatura de compactación establecida por un tiempo de mínimo de 1 h y máximo de 2 h, mezclamos a mano para asegurar uniformidad y cuartear.



Figura 56: Muestra para preparar mezcla asfáltica
Fuente: Laboratorio Centauro Ingenieros

2.14.4. Compactación de los Especímenes

“Limpiar a fondo las superficies del molde ensamblado y el martillo compactador, calentarlas en agua hirviendo en el horno o en una placa caliente a una temperatura de 90 a 150°C , y luego colocar un papel no absorbente cortado antes de agregar la mezcla, ponga la mezcla en el fondo del molde, use una espátula calentada para chusear alrededor de 15 veces y hacia adentro 10 veces, luego coloque un trozo de papel no absorbente para que encaje en la parte superior de la mezcla, coloque el anillo del molde en la base de compactación con sujetadores, use el martillo de compactación designado para realizar el



Figura 58: Medición de altura y diámetro
Fuente: Laboratorio Centauro Ingenieros

Aplicamos la carga a la briqueta a una velocidad de 50 mm/min, registrar la máxima carga indicada en la máquina de carga, anotar la deformación en el instante de la máxima.

2.14.6. Estabilidad Marshall

La estabilidad es su capacidad para resistir el desplazamiento y la deformación bajo cargas de tráfico, el valor de estabilidad de Marshall es una medida de la carga a la que la muestra se entrega o se destruye por completo, durante la prueba, cuando se aplica lentamente, las cabezas superior e inferior del dispositivo se acercan y la carga sobre el bloque de presión aumenta, después se obtiene la carga máxima, este es el valor de estabilidad de Marshall, Cabrera (2016).

2.14.10. **Análisis de VFA**

Los vacíos llenos de asfalto VFA es el porcentaje de vacíos entre las partículas de agregados rellenos de asfalto (VMA), este contiene asfalto y aire, se calcula restando los vacíos del VFA, dividiéndolo por VMA y expresa el valor final como porcentaje, Garnica Anguas et al. (2004).

2.14.11. **Cálculos para el ensayo Marshall**

Para cada porcentaje de betún se calcula el peso específico máximo teórico de la muestra, que corresponde al peso específico teóricamente obtenible si la muestra se puede comprimir hasta obtener una gran cantidad de betún y agregados sin vacíos y se realizan los cálculos de la siguiente manera:

$$G_{gr} = \frac{100}{\frac{\%agregados}{G_{gr}} + \frac{\%cementoasfáltico}{G_{asf}}}$$

Donde:

%agregados = 100 - % asfalto

G_{gr} = gravedad específica promedio de agregados

Se determina el volumen mediante la siguiente expresión:

$$\text{Volumen} = \text{Peso aire SSS} - \text{Peso agua SSS}$$

Donde:

Peso aire SSS = Peso de la muestra en aire en estado SSS

Peso agua SSS = Peso de la muestra en el agua en estado SSS

Se determina la densidad Bulk de cada una de las muestras de ensayo con la expresión:

$$Densidad_{bulk} = \frac{Peso_{aire\ seco}}{Peso_{aire\ SSS} - Peso_{agua\ SSS}}$$

Donde:

Peso aire seco = Peso en el aire de la muestra seca.

Peso aire SSS = Peso en aire de la muestra en estado SSS

Peso agua SSS = Peso en agua de la muestra en estado SSS

Se calcula el peso específico de la mezcla asfáltica suelta RICE, mediante la expresión:

$$G_{mm} = \frac{A}{A + D - E}$$

Donde:

A = peso de la muestra

D = peso del envase (matraz + agua)

E = peso del envase (matraz + agua+muestra)

Se calcula el porcentaje en volumen de los agregados, para cada porcentaje de cemento asfáltico utilizado, mediante la fórmula:

$$\%V_{agr} = \frac{G_{mb} * P_s}{G_{sb}}$$

Donde:

G_{mb} = Bulk promedio de las 3 briquetas

G_{sb} = gravedad específica bulk del agregado

P_s = % agregados = % total - % asfalto utilizado

Se determina el porcentaje total de vacíos con respecto al volumen total de la probeta mediante la expresión:

$$Pa = 100 * \frac{Gmm - Gmb}{Gmm}$$

Donde:

Gmm = Rice Gmb = Bulk promedio de las 3 briquetas

Se calcula el volumen de asfalto como porcentaje del volumen total de la probeta.

$$Va = 100 - \%Vagregados - Pa$$

Donde:

%Vagregados = % volumen de agregados

Pa = % total de vacíos con respecto al volumen total de la probeta

Se determina el porcentaje de vacíos en los agregados minerales en la mezcla compactada.

$$Vam = 100 - \%Vagr$$

Donde:

%Vagr = % volumen de agregados

Se determina el volumen efectivo de asfalto en la mezcla compactada con la expresión:

$$Vea = \frac{Va}{Vam} * 100$$

Donde:

Va = Volumen de asfalto

Vam = % vacíos en agregados minerales

Se determina el contenido de asfalto efectivo con respecto al peso de la mezcla.

$$Ae = \%asfalto - \frac{asfaltoabsorbidoagregados}{100} * \%agregados$$

Donde:

$$Pba = 100 * \frac{Gse - Gsb}{Gsb * Gse} * Gb$$

$$Gse = \frac{Pmm - Pb}{\frac{Pmm}{Gmm} - \frac{Pb}{Gb}}$$

Pmm = sumatoria de los porcentajes de mezcla (100%)

Pb = % de asfalto al que queremos calcular

Gmm = peso específico de la mezcla asfáltica rice

Gb = peso específico del asfalto (1,011)

Gse = gravedad específica efectiva del agregado

Gsb = gravedad específica bulk del agregado

Gb = peso específico del asfalto Pba = asfalto absorbido por el agregado

2.14.12. Corrección de los valores de estabilidad

Las alturas obtenidas para las briquetas que no cumplan con la altura de 2.5"

se corrige, utilizando la tabla 13:

Tabla 13: Factores de Estabilidad de Correlación

Volumen del espécimen, cm ^{3B}	Espesor del espécimen ^B		Razón de la Correlación	Volumen del espécimen, cm ^{3B}	Espesor del espécimen ^B		Razón de la Correlación
	mm	Pulg			mm	Pulg	
200 - 213	25,4	1,00 (1)	5,56	406 - 420	50,8	2,00 (2)	1,47
214 - 225	27	1,06 (1 1/16)	5	421 - 431	52,4	2,06 (2 1/16)	1,39
226 - 237	28,6	1,12 (1 1/8)	4,55	432 - 443	54	2,12 (2 1/8)	1,32
238 - 250	30,2	1,19 (1 3/16)	4,17	444 - 456	55,6	2,19 (2 3/16)	1,25
251 - 264	31,8	1,25 (1 1/4)	3,85	457 - 470	57,2	2,25 (2 1/4)	1,19
265 - 276	33,3	1,31 (1 5/16)	3,57	471 - 482	58,7	2,31 (2 5/16)	1,14
277 - 289	34,9	1,38 (1 3/8)	3,33	483 - 495	60,3	2,38 (2 3/8)	1,09
290 - 301	36,5	1,44 (1 7/16)	3,03	496 - 508	61,9	2,44 (2 7/16)	1,04
302 - 316	38,1	1,50 (1 1/2)	2,78	509 - 522	63,5	2,50 (2 1/2)	1
317 - 328	39,7	1,56 (1 9/16)	2,5	523 - 535	65,1	2,56 (2 9/16)	0,96
329 - 340	41,3	1,62 (1 5/8)	2,27	536 - 546	66,7	2,62 (2 5/8)	0,93
341 - 353	42,9	1,69 (1 11/16)	2,08	547 - 559	68,3	2,60 (2 11/16)	0,89
354 - 367	44,4	1,75 (1 3/4)	1,92	560 - 573	69,8	2,75 (2 3/4)	0,86
368 - 379	46	1,81 (1 13/16)	1,79	574 - 585	71,4	2,81 (2 13/16)	0,83
380 - 392	47,6	1,88 (1 7/8)	1,67	586 - 598	73	2,88 (2 7/8)	0,81
393 - 405	49,2	1,94 (1 15/16)	1,56	599 - 610	74,6	2,94 (2 15/16)	0,78
				611 - 626	76,2	3,00 (3)	0,76

Fuente: EG 2013 MTC

Se promedian los valores de estabilidad corregidos y se plotean los resultados estableciendo las relaciones siguientes:

Densidad Vs % de cemento asfáltico

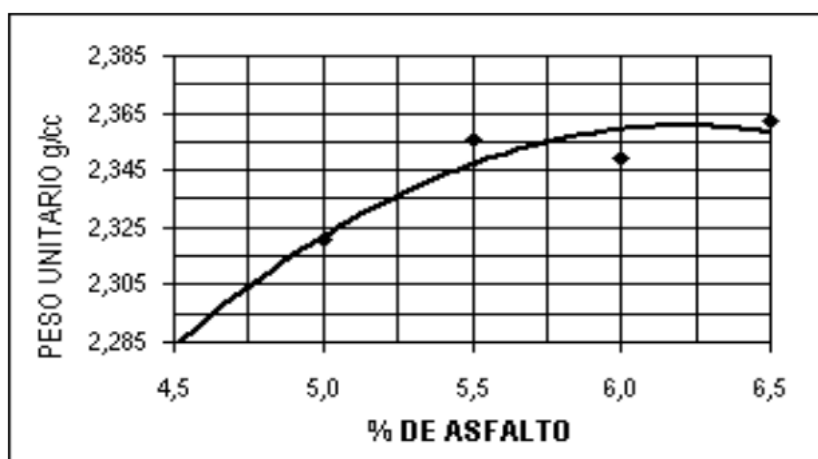


Figura 60: Densidad Vs % de Cemento asfáltico

Fuente: Inzamac

Estabilidad Vs % de cemento asfáltico

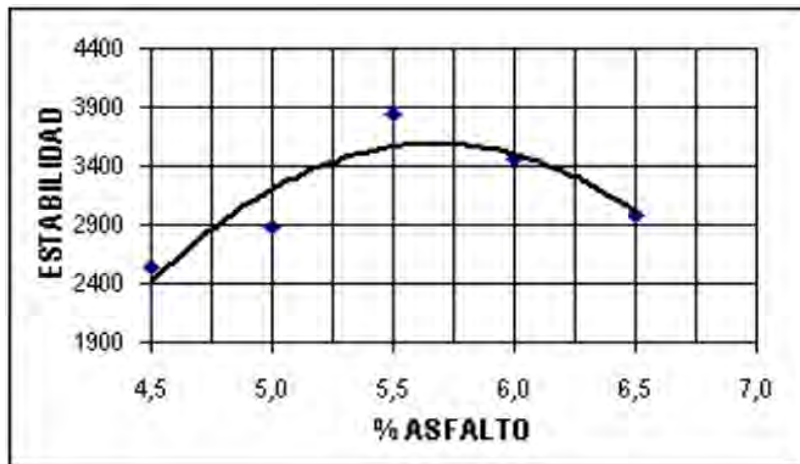


Figura 61: Estabilidad Vs % de cemento asfáltico

Fuente: Inzamac

Flujo Vs % cemento asfáltico

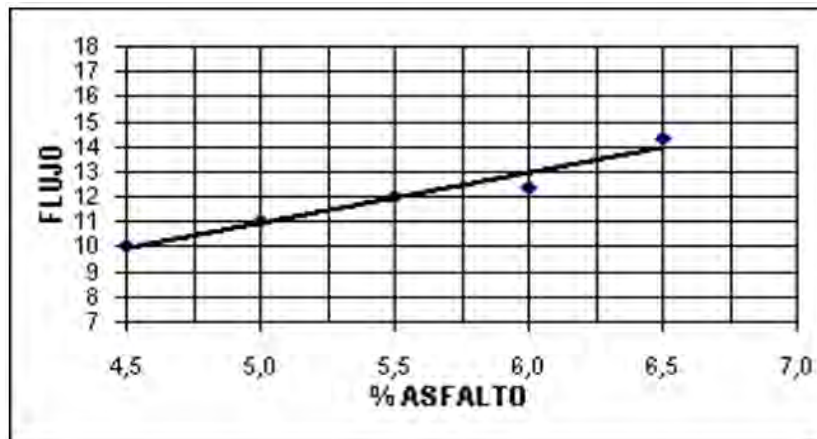


Figura 62: Flujo Vs % cemento asfáltico

Fuente: Inzamac

%de vacíos con aire en la mezcla total Vs % cemento asfáltico

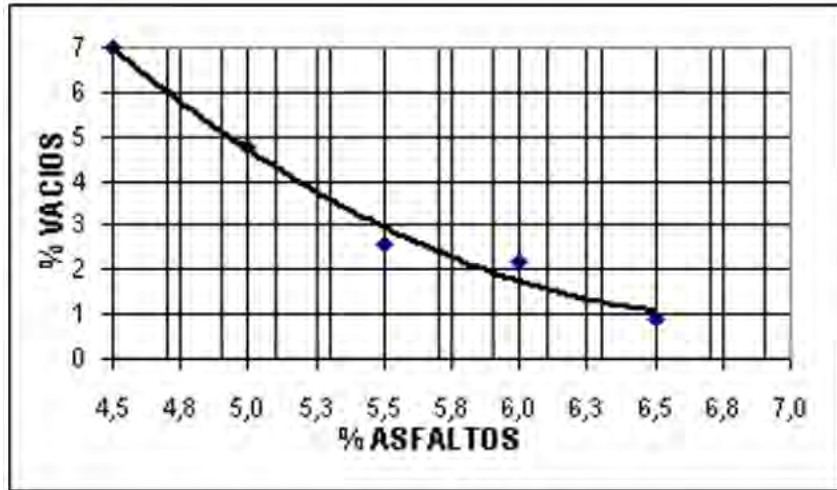


Figura 63: % de vacíos con aire en la mezcla total Vs % cemento asfáltico
Fuente: Inzamac

% de vacíos en los agregados minerales Vs % de cemento asfáltico

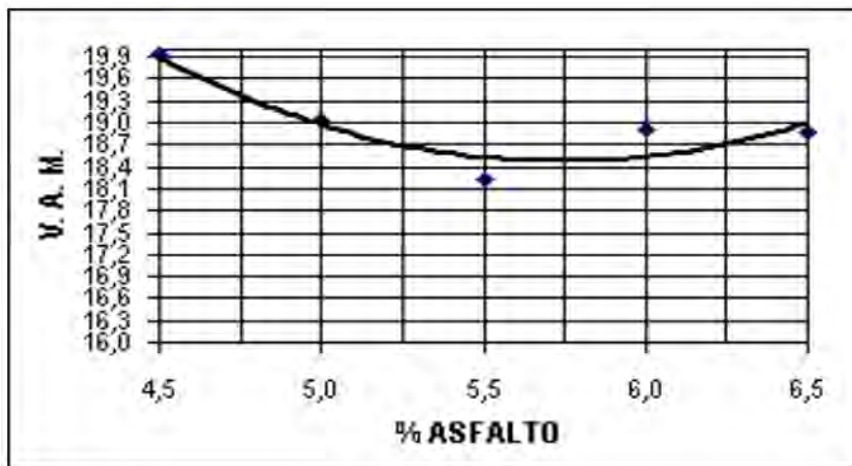


Figura 64: % de vacíos en los agregados minerales Vs % de cemento asfáltico
Fuente: Inzamac

2.15. Parámetros técnicos para diseño de concreto asfáltico en caliente

Los parámetros de diseño típicos considerados en el método Marshall se definen de acuerdo con el volumen de tráfico estimado durante la fase de operación de la vía, como se muestra en la tabla 19.

a. Agregados minerales gruesos, según tabla 14.

b. Agregados minerales finos según tabla 15.

Tabla 14: Requerimiento para los agregados gruesos

Ensayos	Norma	Requerimiento	
		Altitud (m.s.n.m.)	
		< 3.000	> 3.000
Durabilidad	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.
Arcilla en terrones y partículas	MTC E 212	0% máx.	0% máx.

Fuente: EG 2013 MTC

Tabla 15: Requerimiento para los agregados fino

Ensayos	Norma	Requerimiento	
		Altitud (m.s.n.m.)	
		< 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	MTC E 209	-	18% máx.
Índice de Durabilidad (1)	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: EG 2013 MTC

2.15.1. Gradación

Los agregados deberán cumplir la gradación de la tabla 16.

Tabla 16: Gradación MAC

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

Fuente: EG 2013 MTC

2.15.2. Gradación para mezcla superpave

Las tablas 17 y 18 especifican las características del tamaño máximo nominal de agregado 19 y 25 mm que debe cumplir la mezcla de agregado, la curva de tamaño de

partículas agregadas debe estar dentro del punto de control, principalmente fuera del área restringida, se recomienda que la curva pase por debajo del área restringida.

El tipo de asfalto utilizado en estas mezclas debe cumplir con la clasificación de Super Pave-SHRP, AASHTO (MP-320, MP-1); igualmente, la masa total debe regirse por las disposiciones del método SHRP.

Tabla 17: Graduación superpave para agregados de tamaño nominal máximo de 19 mm

Tamaño de tamiz mm	Puntos de Control		Línea de Máxima Densidad	Zona de Restricción		Formula de Mezcla	Tolerancia (**)
				Mínimo	Máximo		
25		100,0	100,0				
19,00		90,0	88,4				
12,50	100,0		73,2				
9,50			59,6				
4,75			49,5			*	(6)
2,36	49,0	23,0	34,6	34,6	34,6	*	(6)
1,18			25,3	22,3	28,3		
0,60			18,7	16,7	20,7	*	(4)
0,30			13,7	13,7	13,7	*	(3)
0,15			10,0				
0,075	8,0	2,0	7,3			*	(2)

Fuente: EG 2013

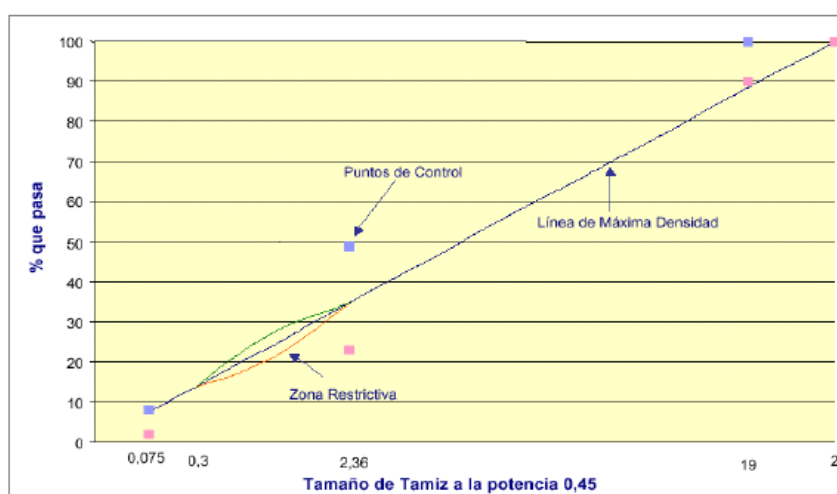


Figura 65: Curva granulométrica de agregados Superpave
Fuente: EG 2013 MTC

Tabla 18: Graduación superpave para agregados de tamaño nominal máximo 25 mm

Tamaño de tamiz mm	Puntos de Control		Línea de Máxima Densidad	Zona de Restricción		Formula de Mezcla	Tolerancia (**)
				Mínimo	Máximo		
37,5		100,0	100,0				
25,0	100,0	90,0	83,3				
19,00			73,6				
12,50			61,0				
9,50			53,9			*	(6)
4,75			39,5	39,5	39,5	*	(6)
2,36	45,0	19,0	28,8	26,8	30,8		
1,18			21,1	18,1	24,7	*	(4)
0,60			15,6	13,6	17,6	*	(3)
0,30			11,4	11,4	11,4		
0,15	7,0	1,0	8,3			*	(2)
0,075			6,1				

Fuente: EG 2013 MTC

2.16. Filler o polvo mineral

El filler o rellenos de origen mineral para su uso, como espesantes de asfalto o como mejoradores de la adherencia de agregado-asfalto pueden ser preferiblemente cal hidratada, cemento Portland, polvo de roca, polvo de escoria, ceniza fina que debe cumplir con las normas y materiales AASHTO M-303 o la norma ASTM D-242. (Miranda, 2014), con peso unitario aparente entre 0.5 y 0.8 g / cm³, y su coeficiente de emulsificación (NLT 180) debe ser menor a 0.6.

2.17. Cemento asfáltico

Debe cumplir con la EG2013 y los equivalentes al PG con la AASHTO M-320, según la Tabla 3, Tabla 4 y Tabla 5.

2.18. Requerimientos de producción

De acuerdo con el diseño del proyecto, las características de calidad de la mezcla asfáltica deben cumplir con los requisitos de la mezcla asfáltica de las Tablas 19 y 20.

Tabla 19: Requisitos para mezcla de concreto bituminoso

Parámetro de Diseño	Clases de Mezcla		
	A	B	C
Marshall MTC E 504			
1. Compactación, número de golpes por lado	75	50	35
2. Estabilidad (mínimo)	8,15 kN	5,44 kN	4,53 kN
3. Flujo 0,01" (0,25 mm)	8-14	8-16	3-5
4. Porcentaje de vacíos con aire (1) (MTC E 505)	3-5	3-5	3-5
5. Vacíos en el agregado mineral	<u>Ver Tabla 21</u>		
Inmersión – Compresión (MTC E 518)			
1. Resistencia a la compresión Mpa mín.	2,1	2,1	1,4
2. Resistencia retenida % (mín.)	75	75	75
Relación Polvo – Asfalto (2)	0.6-1,3	0,6-1,3	0,6-1,3
Relación Estabilidad/flujo (kg/cm) (3)	1.700-4.000		
Resistencia conservada en la prueba de tracción indirecta AASHTO T 283	80 Min.		

Fuente: EG 2013 MTC

Tabla 20: Requisito de adherencia

Ensayos	Norma	Requerimiento	
		< 3.000	> 3.000
Adherencia (Agregado grueso)	MTC E 517	+95	-
Adherencia (Agregado fino)	MTC E 220	4 min, **	-
Adherencia (mezcla)	MTC E 521	-	+95
Resistencia conservada en la prueba de tracción indirecta	AASHTO T 283	-	80 Mín.

Fuente: EG 2013 MTC

Tabla 21: Vacíos mínimos en el agregado mineral (VMA)

Tamiz	Vacíos mínimos en agregados mineral %	
	Marshall	Superpave
2,36 mm (N°8)	21	-
4,75 mm (N°4)	18	-
9,50 mm (3/8")	16	15
12,5 mm (1/2")	15	14
19,0 mm (3/4")	14	13
25,0 mm (1")	13	12
37,5 mm (1 1/2")	12	11
50,0 mm (2")	11,5	10,5

Fuente: EG 2013 MTC

Tabla 22: Mezcla asfáltica tipo superpave vacíos llenos con asfalto (VFA)

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

Fuente: EG 2013 MTC

2.18.1. Tolerancias

Las tolerancias recomendadas en las mezclas, para los agregados en las fórmulas de trabajo, son las mencionadas en la Tabla 23.

Tabla 23: Variación permisible en % pesos agregados

Parámetros de Control	Variación permisible en % en peso total de áridos
N°. 4 o mayor	±5%
N°. 8	±4%
N°. 30	±3%
N°. 200	±2%
Asfalto	±0,2%

Fuente: EG 2013 MTC

2.19. Caracterización de las mezclas asfálticas por ensayo cántabro (método UCL)

El método de Cántabro (UCL) de caracterización de mezclas asfálticas no considera su consistencia, composición y viscosidad, sino que considera aquellas características relacionadas con las propiedades del ligante que deben proporcionar el comportamiento adecuado para la mezcla interesando su cohesión (para mezclar) y su fluencia / fragilidad (sensibilidad térmica).

Las propiedades mecánicas del aglomerante asfáltico cambian con la temperatura y el tiempo de aplicación de la carga, cuando la carga se aplica durante mucho tiempo o a alta temperatura, el adhesivo puede fluir y la mezcla se deforma, cuando la carga se aplica a una a baja temperatura o por poco tiempo, el adhesivo se vuelve quebradizo y la mezcla pierde tenacidad, Bisso Fernandez (2016).

2.19.1. Cohesión/Poder aglomerante

La cohesión, su fuerza aglutinante, que hace que la mezcla sea resistente a los esfuerzos del tráfico, Jiménez (2017), la prueba de pérdida por desgaste de Cántabro consiste en introducir probetas Marshall en la máquina de ensayo de Los Ángeles y realizar pruebas de desgaste en las mismas sin ningún tipo de carga abrasiva, durante la prueba los agregados se desprenden por impacto y abrasión los áridos de la superficie de la briqueta, Jiménez (2017); después de determinar el número de revoluciones de 100, 200 o 300, la pérdida de peso de la muestra se expresa como un porcentaje, en comparación con el peso inicial:

$$P_c = \frac{P_i - P_f}{P_i} \cdot 100$$

Siendo:

P_c = Pérdidas al cántabro (%)

P_i, P_f = Peso inicial y final, en gramos

La prueba de Cántabro es una prueba experimental, y no puede determinar ningún parámetro básico de la mezcla, como ángulo de fricción, módulo, etc., pero sí indica

claramente la capacidad del aglomerante para mantener unido el agregado, cuando estas uniones son dúctiles y resilientes, cuando son débiles o no muy consistentes, la pérdida aumentará, y cada carga aplicada en cada rotación en la máquina ángeles causará deterioro, en el proceso parte de esto, la energía de degradación es absorbida por la deformación elástica del material, la otra parte se elimina en su deformación plástica y el resto es la energía que produce grietas o fracturas, las condiciones de ensayo de las probetas varían según las variables estudiadas: sensibilidad térmica, adherencia o envejecimiento.

2.19.2. Susceptibilidad térmica

En el caso de estudiar la sensibilidad al calor, almacenar la briqueta en el congelador, frigorífico o estufa durante el tiempo necesario para obtener la temperatura de ensayo: 60, 40, 25, 10, -10 y -30 ° C, la prueba se lleva a cabo en una máquina de los Ángeles, esta máquina debe estar ubicada en una habitación a 25 ° C, la duración de la prueba es de 8-9 minutos, los cambios de temperatura en cada punto de prueba son pequeños y similares, por lo que la mecánica el comportamiento del adhesivo se puede determinar continuamente cuando parece frágil o inconsistente.

2.19.3. Adhesividad

El procedimiento desarrollado se basa en determinar el aumento de la pérdida en el ensayo de Cántabro después de que la muestra haya estado sumergida en agua durante un período de tiempo de 24 horas a 60 ° C o 4 días a 49 ° C, es importante señalar que la granulometría de la mezcla estándar es abierta no hay polvo fino ni polvo mineral, la prueba realmente evalúa la adherencia del asfalto a las partículas de agregado utilizadas.

2.19.4. Envejecimiento

Se realiza directamente en la mezcla en forma de película, teniendo en cuenta la alta porosidad del tamaño de la granulometría utilizado y la ausencia de polvo fino y polvo mineral, la probeta se introduce a una temperatura de 80 °C. o 163 ° C y probado después de diferentes periodos permanentes.



Figura 66: Resultado de briquetas ensayo Cántabro
Fuente: Laboratorio Centauro Ingenieros

2.20. Caracterización de la resistencia de mezclas asfálticas al daño inducido por humedad, test de lottman

El ensayo de tracción indirecta evalúa el estado de tensión de la capa asfáltica o de las fibras bajo la zona de tracción, es un método práctico y sencillo para caracterizar la mezcla asfáltica o evaluar el daño causado por la tensión de tracción.

La prueba consiste en cargar una muestra cilíndrica, como se define en la prueba de Marshall, y aplicar cargas de compresión radiales a lo largo de dos generatrices opuestas, como se muestra en la Figura 67 (a), esta configuración de carga puede ser simple o repetitiva, produciendo una tensión de tracción relativamente uniforme en todo el diámetro del plano de carga vertical, este estiramiento agota la muestra y desencadena una ruptura en el plano de diámetro (Figura 67 (b)).

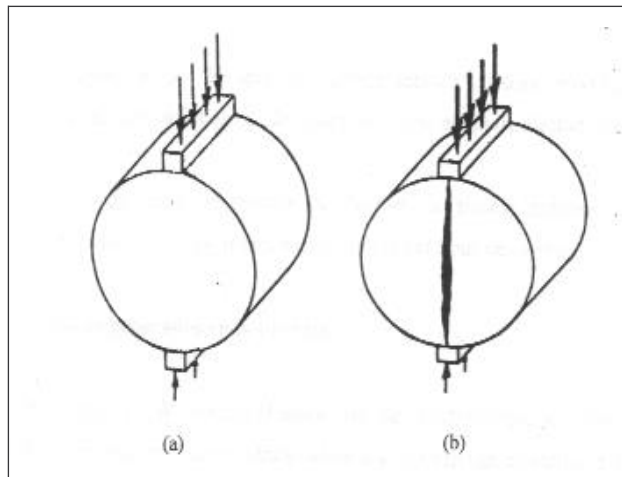


Figura 67: Configuración de la carga (a) y rotura del ensayo de tracción indirecta (b)
Fuente: Manual de transporte México

El parámetro medido es la carga de rotura de la muestra, figura 67 el desplazamiento vertical y la deformación horizontal del diámetro de la muestra se pueden determinar durante la prueba si se dispone del sistema de medición necesario, este procedimiento es adecuado tanto para la fabricación en laboratorio como para la recolección de muestras de la acera, Rubio (2005).



Figura 68: Curva carga-deformación resultante del ensayo de tracción indirecta
Fuente: Manual de transporte México

El Departamento de Carreteras de Texas promovió la investigación dirigida, obteniéndose los resultados favorables:

- La prueba es simple.
- Los tipos de muestras y equipos son los mismos que se utilizan para otras pruebas.

- El daño no se ve afectado por el estado de la superficie de la muestra.
- La falla comienza en un área donde la tensión de tracción es relativamente uniforme.
- En comparación con otros métodos, el coeficiente de variación de los resultados de la prueba es relativamente bajo, con una dispersión de menos del 15%.
- La prueba se puede utilizar bajo cargas estáticas y permite modificar la prensa para aplicar cargas dinámicas.

2.20.1. Distribución teórica de tensiones

La distribución teórica de la tensión a lo largo del eje horizontal y el eje vertical de la carga concentrada es como se muestra en la figura 69.

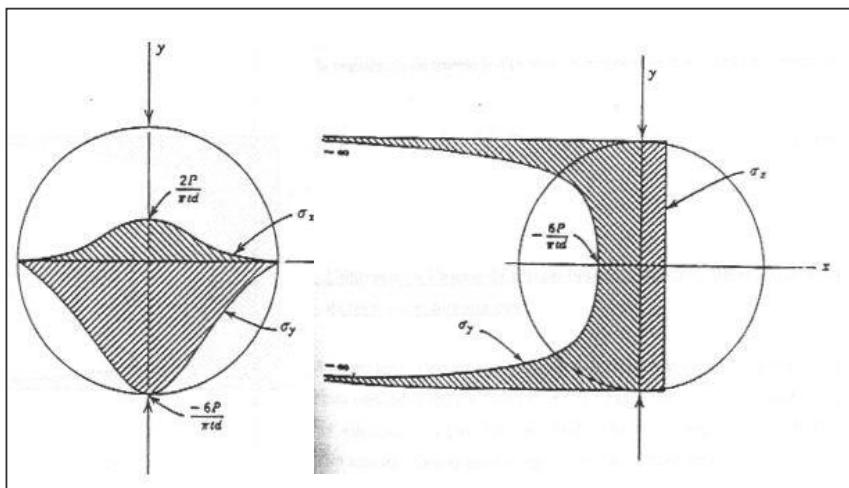


Figura 69: Distribución de tensiones teóricas sobre los planos diametral y vertical para el ensayo de tracción indirecta
Fuente: Yoder

2.20.2. Ecuaciones y observaciones

Tensión horizontal

$$\sigma_x = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot t \cdot d} \left[\frac{d^2 - 4 \cdot x^2}{d^2 + 4 \cdot x^2} \right]^2$$

Tensión vertical

$$\sigma_y = -\frac{2 \cdot P}{\pi \cdot t \cdot d} \left[\frac{4 \cdot d^2}{(d^2 + 4 \cdot x^2)} - 1 \right]$$

Tensiones tangenciales

En el plano diametral vertical, las ecuaciones de las tensiones están dadas:

$$\sigma_x = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot t \cdot d} = \text{constante}$$

$$\sigma_y = -\frac{2 \cdot P}{\pi \cdot t} \left[\frac{2}{d - 2 \cdot y} + \frac{2}{d + 2 \cdot y} - \frac{1}{d} \right]$$

$$\tau_{xy} = 0 \quad (3.6)$$

Donde:

P: carga total aplicada (N)

T: Altura de la probeta (mm \pm 0,1 mm)

D: Diámetro de la probeta (mm \pm 0,1 mm)

x, y: Coordenadas respecto al centro de la probeta

La ecuación descrita es la propuesta por M. Frocht para sólidos elásticos ideales, son especialmente para mezclas asfálticas, la falla inicial es causada por falla por tracción según la ecuación, la resistencia a la tracción S_t viene dada por:

$$S_t = \frac{2 \cdot P_{\max}}{\pi \cdot t \cdot d}$$

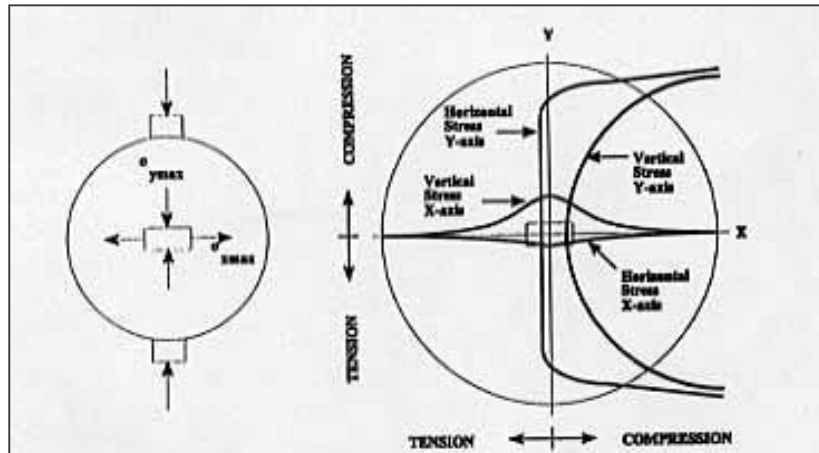


Figura 70: Distribución de tensión en probeta sometida a una carga aplicada sobre placa de carga de apoyo curvo

Fuente: Kennedy y Hudson, Read y Collop

2.20.3. Sensibilidad a la acción del agua - Método de Lottman

Los mecanismos sensibles a la humedad que dañan la superficie de la carretera incluyen:

- La presión de poro del agua en los vacíos de la mezcla, la diferencia térmica entre la expansión y la contracción debido a la formación de hielo, los ciclos de congelación – deshielo, el choque térmico o una combinación de estos factores.
- Debido a la acción del agua en la mezcla, el adhesivo se desprenderá a temperaturas medias o altas.
- Interacción con el vapor de agua en el mortero de relleno de asfalto y la interfaz de agregado más grande.
- La interacción de agua y minerales arcillosos en agregados finos.

Las mezclas dañadas por la humedad perderán cohesión y acortarán su vida útil, acelerando así el proceso de agrietamiento del pavimento. Lottman propuso en su método evaluar la influencia de la humedad mediante la realización de ensayos de tracción en muestras en diferentes condiciones, en un intento de reproducir las condiciones de uso de la vía.



Figura 71: Rotura de briqueta Marshall Test lottman
Fuente: Laboratorio Centauro Ingenieros



Figura 72: Briquetas de mezcla Asfáltica
Fuente: Laboratorio Centauro Ingenieros



Figura 73: Briquetas en ciclo de congelamiento
Fuente: Laboratorio Centauro Ingenieros

2.21. Hipótesis

2.21.1. Hipótesis General

La cera orgánica (Apis Mellifera) influye significativamente en la determinación de la Estabilidad y Flujo de una Mezcla Asfáltica Warm Mix Asphalt 85/100 en climas fríos del valle del Mantaro.

2.21.2. Hipótesis Específica

- La cera orgánica (Apis Mellifera) influye significativamente en la determinación de la Estabilidad de una Mezcla Asfáltica Warm Mix Asphalt 85/100 en climas fríos del valle del Mantaro.
- La cera orgánica (Apis Mellifera) influye significativamente en la determinación del Flujo de una Mezcla Asfáltica Warm Mix Asphalt 85/100 en climas fríos del valle del Mantaro.

2.22. Identificación de variables

2.22.1. Variable independiente

- Cera Orgánica Apis Mellifera.
- Asfalto PEN 85/100
- Asfalto PEN 85/100 SBS

2.22.2. Variables dependientes

- Estabilidad de la mezcla asfáltica Warm Mix Asphalt
- Flujo de la mezcla asfáltica Warm Mix Asphalt



Capítulo 3 Metodología

3.1. Tipo de Investigación

El tipo de investigación es experimental, para ello iniciamos con la caracterización del agregado (cantera de Pilcomayo) luego se procede a elaborar briquetas con asfalto PEN 85/100 en la cantidad de 266 por tipo de asfalto (133 para PEN 85/100 y 133 para SBS 85/100), las cuales fueron sometidos a diversos ensayos como Resistencia de Marshall, Ensayo de tracción indirecta y ensayo Cántabro; dichas muestras tanto de la mezcla asfáltica PEN 85/100 y SBS 85/100 sirven como grupo control; con dichas briquetas se procede a realizar el análisis matemático por el método de volumétrico de Marshall para la determinación del contenido óptimo de asfalto y las mejores propiedades para la mezcla asfáltica, dicha información servirá para efectuar la modificación de los asfaltos tanto convencional PEN 85/100 en una cantidad 361 briquetas así como con SBS 85/100 en 361 briquetas ambas con la cera orgánica APIS MELLIFERA para ello se varió la temperatura de producción en 100 °C, 120 °C y 130 °C y los porcentajes de cera orgánica en 0.5%, 1%, 2% y 4%, prosiguiéndose a realizar los ensayos de Marshall, tracción indirecta y cántabro.

3.2. Diseño de la Investigación

El diseño de investigación corresponde a cuasi experimental con postprueba y grupo control:

G ₁	X	O ₁
G ₂	-	O ₂

Donde:

G1: Grupo experimental que recibe estímulo (X), se le mide O1

G2: Grupo experimental que no recibe estímulo (-), se le mide O2

3.3. Unidad de Análisis

La unidad de análisis son las muestras de briquetas elaboradas con asfalto convencional PEN 85/100, asfalto PEN 85/100 SBS y las muestras elaboradas con asfalto modificado con cera orgánica PEN 85/100, así como las de doble modificación SBS 85/100 con cera orgánica APIS MELLIFERA.

3.4. Población de Estudio

Corresponde las 722 briquetas en total elaboradas con el asfalto convencional y asfalto modificado, así como la modificación del asfalto convencional y doble modificación con asfalto SBS 85/100 ambas con cera orgánica Apis Mellifera.

3.5. Tamaño de la Muestra

Para nuestra investigación son las 722 briquetas obtenidas con la mezcla asfáltica convencional y modificada.

3.6. Selección de la Muestra

La selección de la muestra se realizó en función del cumplimiento de las recomendaciones para la fabricación de las briquetas teniendo en cuenta su estado e integridad, la muestra será considerada como muestra censal.

3.7. Técnicas de Recolección de Datos

Se inició con el muestreo del agregado de la cantera Pilcomayo, continuándose con la ejecución de los ensayos para los agregados a fin de caracterizarlos física y mecánicamente, posteriormente se procede a realizar diseño de mezcla control se realizó con asfalto PEN 85/100 y modificado SBS 85/100 y la modificación con cera orgánica APIS MELLIFERA del asfalto PEN 85/100 y la segunda modificación del asfalto SBS 85/100 con la cera orgánica APIS

MELLIFERA y culminándose con la elaboración de las briquetas a fin de determinar sus características de comportamiento frente a cargas utilizando los ensayos de rotura Marshall, tracción indirecta y ensayo de cántabro.

3.8. Recolección de Datos

Para la presente tesis los pasos que a continuación detallamos:

Identificación de muestras seleccionadas. - Se identificaron de acuerdo con el tamaño máximo nominal y tamaño máximo por medio visual manual que se encontraron en la cantera denominado Pilcomayo.

Muestreo y transporte de materiales. - Se procedió a realizar el muestreo de los materiales de cantera de agregados fino y grueso con su identificación respectiva y se trasladó el material al laboratorio.

Ensayos de laboratorio. - Se realizaron los ensayos de laboratorio cumpliendo con la Normas Técnicas Peruanas, ASTM y el Manual de ensayos del Ministerio de Transportes.

3.9. Registro de los resultados de los parámetros de las mezclas de acuerdo con los resultados de los ensayos de laboratorio

Se realizó un registro de los resultados de los parámetros por cada una de las muestras control elaboradas con asfalto PEN 85/100 y SBS 85/100 tomándose los datos de diámetros, alturas, masa seca, masa sumergida, masa superficialmente seca y los resultados de la rotura mediante el equipo prensa Marshall, estabilidad y flujo; así mismo los resultados del ensayo de tracción indirecta por el ensayo Lottman obteniéndose los resultados de estabilidad y flujo a condiciones secas, así como al primer, segundo y tercer ciclo de congelamiento y deshielo, por otro lado también en los resultados del ensayo de cántabro la masa inicial y la masa final después de sometida al ensayo; de la misma manera se realizó para las muestras experimentales con la modificación del PEN 85/100 y SBS modificado con cera orgánica Apis Mellifera.

3.10. Zona de muestreo de agregados (ASTM D-75)

Para realizar el muestreo del agregado grueso y fino se inspecciono la cantera ubicada en el sector de Puente la Breña (Pilcomayo), en la figura 74 se presenta la ubicación del distrito de Pilcomayo, la misma que se encuentra en las siguientes coordenadas UTM: 473405.00 m E 8668114.00 m S.



Figura 74: Ubicación de cantera de agregados
Fuente: Google Heart-

El muestreo que se realizo fue el directo de las pilas, tomando la muestra en tres partes, divididas previamente la pila, superior, medio y bajo, se tomo como muestreo una masa de 600 kg, para el caso del agregado fino y de igual manera para el agregado grueso.

3.11. Caracterización de los agregados

3.11.1. Abrasión de agregado grueso (MTC E207)

Los resultados son:

Tabla 24: Resultado de ensayo abrasión de los ángeles

GRADACION		"B"
PASA	RETIENE	GRAMOS
3/4"	1/2"	2500
1/2"	3/8"	2500
		5000
500 revoluciones en 15 minutos		
Peso que pasa tamiz N° 12		923,5
DESGASTE		18,47%

Fuente: Laboratorio Centauro



Figura 75: Ensayo de abrasión de los ángeles

Fuente: Laboratorio Centauro Ingenieros

3.11.2. Partículas chatas y alargadas en agregado grueso (MTC E223)



Figura 76: Ensayo de partículas chatas y alargadas
Fuente: Laboratorio Centauro Ingenieros



Figura 77: Ensayo Índice de aplanamiento y alargamiento
Fuente: Laboratorio Centauro Ingenieros

3.11.3. Equivalente de arena (MTC E114)

Los resultados son:



Figura 78: Ensayo equivalente de arena
Fuente: Laboratorio Centauro Ingenieros

EQUIVALENTE DE ARENA

EQUIVALENTE DE ARENA : 47.39 %

$$\text{Equivalente de arena (EA)} = \frac{\text{lectura de arena}}{\text{lectura de arcilla}} \times 100$$

3.11.4. Peso específico y absorción de agregado grueso (MTC E205)



Figura 79: Ensayo de gravedad específica en agregado grueso
Fuente: Laboratorio Centauro Ingenieros

Resultados:

Tabla 25: Resultado de ensayo peso unitario agregado fino

CANTERA:	C-1, PILCOMAYO, AGREGADO FINO		
PESO UNITARIO DE SUELO			
I. PESO UNITARIO SUELTO			
PESO DE LA MUESTRA SUELTA + VASIJA (kg)	6.241	6.200	6.154
PESO DE LA VASIJA (kg)	1.637	1.637	1.637
PESO DE LA MUESTRA SUELTA (kg)	4.604	4.563	4.517
CONSTANTE	355	355	355
PESO APARENTE SUELTO (kg/m ³)	1634	1620	1604
PESO UNITARIO SUELTO	1619		
II. PESO UNITARIO COMPACTADO			
PESO DE LA MUESTRA COMPACTADA + VASIJA (kg)	6.527	6.504	6.546
PESO DE LA VASIJA (kg)	1.637	1.637	1.637
PESO DE LA MUESTRA COMPACTADA (kg)	4.890	4.867	4.909
CONSTANTE	355	355	355
PESO APARENTE COMPACTADO (kg/m ³)	1736	1728	1743
PESO UNITARIO COMPACTADO	1735		

Fuente: Laboratorio Centauro

3.11.5. Peso específico y absorción de finos (ASTM D-128)

Resultados:

Tabla 26: Gravedad específica en agregado grueso

CANTERA:	C-1, PILCOMAYO, AGREGADO FINO		
PESO UNITARIO DE SUELO			
I. PESO UNITARIO SUELTO			
PESO DE LA MUESTRA SUELTA + VASIJA (kg)	6.241	6.200	6.154
PESO DE LA VASIJA (kg)	1.637	1.637	1.637
PESO DE LA MUESTRA SUELTA (kg)	4.604	4.563	4.517
CONSTANTE	355	355	355
PESO APARENTE SUELTO (kg/m ³)	1634	1620	1604
PESO UNITARIO SUELTO	1619		
II. PESO UNITARIO COMPACTADO			
PESO DE LA MUESTRA COMPACTADA + VASIJA (kg)	6.527	6.504	6.546
PESO DE LA VASIJA (kg)	1.637	1.637	1.637
PESO DE LA MUESTRA COMPACTADA (kg)	4.890	4.867	4.909
CONSTANTE	355	355	355
PESO APARENTE COMPACTADO (kg/m ³)	1736	1728	1743
PESO UNITARIO COMPACTADO	1735		

Fuente: Laboratorio Centauro

3.11.6. Límites de consistencia (ASTM D-427)



Figura 80: Ensayo de limite liquido

Fuente: Laboratorio Centauro Ingenieros

3.11.7. Ensayo adhesividad de los ligantes bituminosos a los áridos finos (procedimiento riedel-weber MTC E 220)



Figura 81: Ensayo Riedel Weber
Fuente: Laboratorio Centauro Ingenieros



Figura 82: Ensayo Riedel Weber control de desprendimiento
Fuente: Laboratorio Centauro Ingenieros

3.11.8. Análisis granulométrico (ASTM C-117)



Figura 83: Torre de tamices

Fuente: Laboratorio Centauro Ingenieros

Resultados:

Los resultados del análisis granulométrico de agregados son:

Tabla 27: Granulometría de agregado fino

TAMIZ	ABERTURA (mm)	CANTERA ARENA GRUESA CANTERA PILCOMAYO			
		PESO RETENIDO	ACUMULADO	PARCIAL PASANTE	% PASANTE
(1")	25.00	0	0	798.61	100.0%
(3/4)	19.00	0	0	798.61	100.0%
(1/2)	12.50	0	0	798.61	100.0%
(3/8)	9.50	0	0	798.61	100.0%
(N.4)	4.75	100	100	698.61	87.5%
(N.10)	2.00	135.45	235.45	563.16	70.5%
(N.40)	0.43	304.21	539.66	258.95	32.4%
(N.80)	0.18	150	689.66	108.95	13.6%
(N.200)	0.08	91.2	780.86	17.75	2.2%
PASA 200		17.75	798.61	0	0.0%
PESO TOTAL		798.61			

Tabla 28: Granulometría agregado grueso

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO					
TAMIZ	ABERTURA (mm)	CANTERA PIEDRA CHANCADA CANTERA PILCOMAYO			
		PESO RETENIDO	ACUMULADO	PARCIAL PASANTE	% PASANTE
(1")	25.00	0	0	3519.73	100.0%
(3/4)	19.00	0	0	3519.73	100.0%
(1/2)	12.50	1500.3	1500.3	2019.43	57.4%
(3/8)	9.50	816.3	2316.6	1203.13	34.2%
(N.4)	4.75	1155.76	3472.36	47.37	1.3%
(N.10)	2.00	38.21	3510.57	9.16	0.3%
(N.40)	0.43	4.59	3515.16	4.57	0.1%
(N.80)	0.18	1.79	3516.95	2.78	0.1%
(N.200)	0.08	1.34	3518.29	1.44	0.0%
PASA 200		1.44	3519.73	0	0.0%
PESO TOTAL		3519.73			

3.12. Análisis de resultados de los requerimientos de los agregados

En la caracterización de áridos se debe considerar la durabilidad y calidad de los áridos, por lo que se deben cumplir los parámetros para el control de áridos con granulometría densa.



Figura 84: Ensayo partículas chatas y alargadas
Fuente: Laboratorio Centauro Ingenieros



Figura 85: Ensayo pasante malla 200
Fuente: Laboratorio Centauro Ingeniero

3.13. Resumen de ensayos de agregado fino

Tabla 29: Requerimiento Agregado grueso

Requerimiento Agregado grueso		
ENSAYO	NORMA	VALOR
Durabilidad(Sulfato de magnesio)	MTC E 209	3.86%
Abrasión de los angeles)	MTC E 207	18.47%
Adherencia	MTC E 517	95
Partículas chatas	ASTM 4791	28.11%
Partículas alargadas	ASTM 4791	19.95%
Caras fracturadas	MTC E 210	85/50
Sales solubles totales	MTC E 219	360 ppm
Impurezas Orgánicas	MTC E 213	1
Absorción	MTC E 206	1.11%

3.14. Resumen de ensayos de agregado grueso

Tabla 30: Requerimiento Agregado Fino

Requerimiento Agregado Fino		
ENSAYO	NORMA	VALOR
Equivalente de arena	MTC E 114	71
Azul de metileno	AASTHO TP 57	10.25
Indice de plasticidad (malla N° 40)	MTC E 111	No presenta
Durabilidad (Sulfato de magnesio)	MTC E 209	8.97%
Indice de plasticidad (malla N° 200)	MTC E 111	No presenta
Sales solubles totales	MTC E 219	360 ppm
Peso Unitario Suelto	MTC E 203	1619 Kg/m ³
Peso Unitario Compactado	MTC E 204	1735 Kg/m ³
Adhesividad Riedel Weber	MTC E 220	10
Absorción	MTC E 205	1.97%

3.15. Diseño Marshall mezcla asfáltica tibia

3.15.1. Mezcla de agregados

En la fabricación de mezclas asfálticas es importante utilizar agregados con el tamaño de partícula correcto, pues de esta forma se puede obtener una capa de rodadura de alta calidad, el procedimiento general incluye obtener el tamaño de partícula de cada material, mezclar y calcular el porcentaje para obtener el tamaño de grano requerido (estabilidad del tamaño de grano), en la Tabla 31, se muestra la combinación de los áridos en porcentajes de 35% de agregado grueso y 60% del agregado fino, utilizando la ecuación (1).

Tabla 31: Combinación de agregados grueso y finos

Malla	Abertura (mm)	MAC-2		100.0%	60.0%	35.0%	5.0%	CANTERA ARENA GRUESA CANTERA PILCOMAYO	CANTERA PIEDRA CHANCADA CANTERA PILCOMAYO	FILLER CEMENTO	CANTERA ARENA GRUESA CANTERA PILCOMAYO	CANTERA PIEDRA CHANCADA CANTERA PILCOMAYO	FILLER CEMENTO
		% Que pasa Max	% Que pasa Min										
1"	25.000	100	100	100.0	60.0	35.0	5.0	100.00	100.00	100.0	100.00	100.00	100.0
3/4"	19.000	100	100	100.0	60.0	35.0	5.0	100.00	100.00	100.0	100.00	100.00	100.0
1/2"	12.500	80	100	85.1	60.0	20.1	5.0	100.00	57.37	100.0	100.00	57.37	100.0
3/8"	9.500	70	88	77.0	60.0	12.0	5.0	100.00	34.18	100.0	100.00	34.18	100.0
N° 4	4.750	51	68	58.0	52.5	0.5	5.0	87.48	1.35	100.0	87.48	1.35	100.0
N° 10	2.000	38	52	47.4	42.3	0.1	5.0	70.52	0.26	100.0	70.52	0.26	100.0
N° 40	0.425	17	28	24.5	19.5	0.0	5.0	32.43	0.13	100.0	32.43	0.13	100.0
N° 80	0.180	8	17	13.2	8.2	0.0	5.0	13.64	0.08	100.0	13.64	0.08	100.0
N° 200	0.075	4	8	5.0	-	0.0	5.0	-	0.04	100.0	-	0.04	100.0

Mezcla de agregados

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

Dónde:

P = Combinación de agregados

A, B = Pasante por tamiz, agregado grueso y fino respectivamente

a, b = Porcentaje de contribución del agregado en la mezcla

Tabla 32: Granulometría agregado fino

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO					
TAMIZ	ABERTURA (mm)	CANTERA ARENA GRUESA CANTERA PILCOMAYO			
		PESO RETENIDO	ACUMULADO	PARCIAL PASANTE	% PASANTE
(1")	25.00	0	0	798.61	100.0%
(3/4)	19.00	0	0	798.61	100.0%
(1/2)	12.50	0	0	798.61	100.0%
(3/8)	9.50	0	0	798.61	100.0%
(N.4)	4.75	100	100	698.61	87.5%
(N.10)	2.00	135.45	235.45	563.16	70.5%
(N.40)	0.43	304.21	539.66	258.95	32.4%
(N.80)	0.18	150	689.66	108.95	13.6%
(N.200)	0.08	91.2	780.86	17.75	2.2%
PASA 200		17.75	798.61	0	0.0%
PESO TOTAL		798.61			

Fuente: Laboratorio Centauro

Dicha gradación se compara con los parámetros de las especificaciones de la norma MTC E 204 según tipo de mezcla a efectuar.

Tabla 33: granulometría agregado grueso

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO					
TAMIZ	ABERTURA (mm)	CANTERA PIEDRA CHANCADA CANTERA PILCOMAYO			
		PESO RETENIDO	ACUMULADO	PARCIAL PASANTE	% PASANTE
(1")	25.00	0	0	3519.73	100.0%
(3/4)	19.00	0	0	3519.73	100.0%
(1/2)	12.50	1500.3	1500.3	2019.43	57.4%
(3/8)	9.50	816.3	2316.6	1203.13	34.2%
(N.4)	4.75	1155.76	3472.36	47.37	1.3%
(N.10)	2.00	38.21	3510.57	9.16	0.3%
(N.40)	0.43	4.59	3515.16	4.57	0.1%
(N.80)	0.18	1.79	3516.95	2.78	0.1%
(N.200)	0.08	1.34	3518.29	1.44	0.0%
PASA 200		1.44	3519.73	0	0.0%
PESO TOTAL		3519.73			

Fuente: Laboratorio Centauro

Granulometría MAC Tamaño Máximo nominal ½"

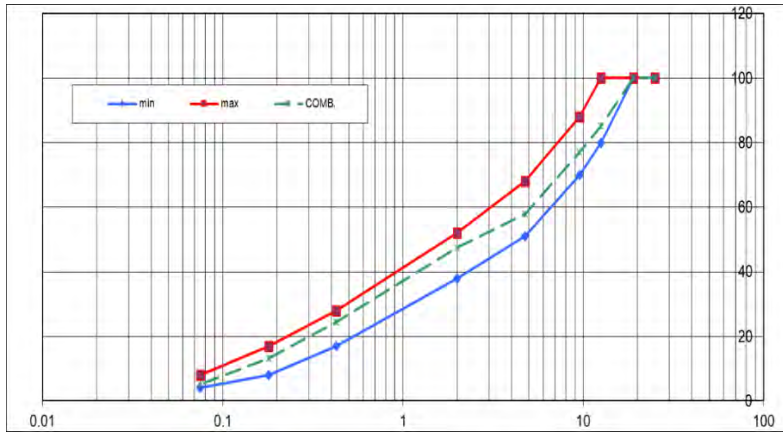


Figura 86: Combinación de curva granulométrica gruesa y fina – Fuente: Laboratorio Centauro

Tabla 34: Especificación de gráfica de Fuller para un tamaño máximo nominal de 12,5 mm

Malla (mm)	Puntos de control		Zona restringida	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
19,0		100,0		
12,5	90,0	100,0		
9,5		90,0		
4,75				
2,36	28,0	58,0	39,1	39,1
1,18			25,6	31,6
0,600			19,1	23,1
0,300			15,5	15,5
0,075	2,0	10,0		

Fuente: EG 2013 MTC

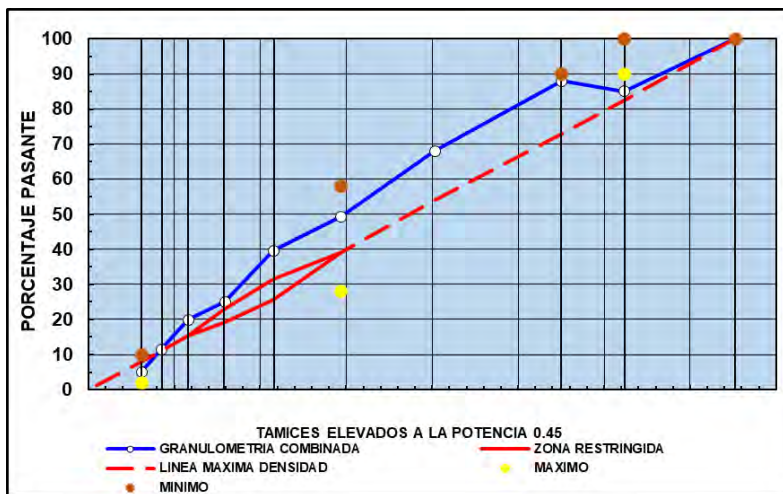


Figura 87: Granulometría agregado fino y grueso PG

En la Figura 87 se muestra la curva granulométrica, la cual cumple con las especificaciones en su totalidad.

3.16. Estabilización Granulométrica

En caso no cumplir la gradación se deberá procedera realizar el procedimiento de estabilización granulométrica.

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

Se debe cumplir:

$$e > 3 \cdot D$$

Dónde:

e = Espesor de la capa

D = Tamaño máximo nominal del agregado

Para poder elegir el tamaño máximo nominal:

$$D < e/3$$

3.17. Características de los materiales

Para las operaciones en el método Marshall se necesitan propiedades de los materiales como la Gravedad específica Bulk de los agregados (G_{sb}), Gravedad específica aparente de los agregados (G_{sa}) y la gravedad efectiva de los agregados (G_{se}) y que deberá cumplir con la siguiente premisa:

$$G_{sb} < G_{se} < G_{sa}$$

$$2.637 < 2.644 < 2.759$$

3.17.1. Porcentaje teórico óptimo de asfalto para briquetas

La ecuación se utiliza para calcular diferentes proporciones de asfalto para preparar la mezcla y obtener el mejor porcentaje de asfalto de la misma, esta ecuación es la misma que usar la distribución de partículas para determinar el mejor contenido teórico de asfalto calculado por esta ecuación. (Asphalt Institute, 1993).

$$P = 0.020a + 0.045b + cd$$

Dónde:

- P = Porcentaje de asfalto con respecto al peso del material
- a = Porcentaje del material retenido en el tamiz N° 8.
- b = Porcentaje de material que pasa el tamiz N°8 y se retiene en el N° 200
- c = Porcentaje que pasa el tamiz N° 200.
- D = Coeficiente que varía con las características del material.

Para este caso $d=0.3$, agregados con absorción media.

$$P=0.020(35) +0.045(60) +(8 \times 0.3) = 5.8\%$$

Por lo tanto, se escoge porcentajes aproximados debajo y encima de 5.8%, sin embargo, para efectos de cálculo y observar los efectos se utilizaron los siguientes porcentajes: 4%, 4.5%, 5%, 5.5%, 6%, 6.5% y 7%.

3.17.2. Gravedad específica bulk de agregados (Gsb)

La relación entre la masa al aire por unidad de volumen de material permeable (incluidos los vacíos permeables e impermeables) a una temperatura especificada y la masa al aire con una densidad de volumen igual al agua destilada a una temperatura especificada, proporcionamos el siguiente resumen en la Tabla 35.

Tabla 35: Resumen de los pesos específicos de los agregados

Proporción de agregado	Gsa	Gsb
35.65% Arena gruesa	2.510	2.440
64.35% Piedra 1/2	2.920	2.760
Promedio	2.759	2.637
Gb	1.065	
Pb	6	
Gmm	2.428	
Gse	2.644	

Fuente: Laboratorio Centauro

Los porcentajes en peso de la Tabla 34, fueron calculados con la ecuación:

$$Gsb = \frac{100}{\frac{P1}{G1} + \frac{P2}{G2} + \frac{P3}{G3} + \dots} =$$

Dónde:

P1, P2, P3... = Porcentaje en peso de cada una de las fracciones de material que intervienen en el total del agregado.

G1, G2, G3.... = Pesos específicos de los materiales a los que corresponden las fracciones anteriormente mencionadas.

3.17.3. Gravedad específica aparente de agregados (Gsa)

La masa seca de agregado por unidad de volumen (o el peso seco en el aire) incluye vacíos permeables sin asfalto y huecos impermeables, es decir, no incluye la relación de vacíos permeables al asfalto a igual volumen de agua a la misma temperatura establecida.

$$Gsa = 2.759 \text{ gr/cm}^3$$

3.18. Caracterización de las mezclas asfálticas

La caracterización para la mezcla asfáltica se utilizó asfalto PEN 85/100 elaborándose briquetas con una masa total de 1200 g, para ello se elaboró la fórmula para la mezcla obteniéndose:

Se elaboraron las briquetas con una masa de 1200 g según indica la formula, para cada uno de porcentajes de asfalto 4%, 4.5%, 5%, 5.5%, 6%, 6.5% y 7%.

Tabla 36: Formula de mezclas Asfáltica Marshall

Cantidad de probetas			1	1	1	1	1	1	1
Agregado	Cantera	Formula para laboratorio (g)	Masa para ensayos (g)	Masa para ensayos (g)	Masa para ensayos (g)	Masa para ensayos (g)	Masa para ensayos (g)	Masa para ensayos (g)	Masa para ensayos (g)
Piedra 3/4 Chancada	Río Mantaro Pilcomayo - Puente Breña	35.0%	399.0	396.9	399.0	396.9	394.8	392.7	390.6
Arena N° 4 Zarandeada Lavada	Río Mantaro Pilcomayo - Puente Breña	60.0%	684.0	680.4	684.0	680.4	676.8	673.2	669.6
Filler - Cal	Filler de aporte	5.0%	57.0	56.7	57.0	56.7	56.4	56.1	55.8
Total Aridos		100.0%	1,140.0	1,134.0	1,140.0	1,134.0	1,128.0	1,122.0	1,116.0
% asfalto s/m			4.00%	4.50%	5.00%	5.50%	6.00%	6.50%	7.00%
Masa de asfalto (gr.)			48.0	54.0	60.0	66.0	72.0	78.0	84.0



Figura 88: Fabricación mezcla Asfáltica
Fuente: Laboratorio Centauro Ingenieros



Figura 89: Incorporación proporción de asfalto
Fuente: Laboratorio Centauro Ingenieros



Figura 90: Fabricación de mezcla Asfáltica
Fuente: Laboratorio Centauro Ingenieros



Figura 91: Compactación de mezcla Asfáltica
Fuente: Laboratorio Centauro Ingenieros



Figura 92: Briquetas de mezcla Asfáltica
Fuente: Laboratorio Centauro Ingenieros



Figura 93: Briquetas para ensayo Cántabro
Fuente: Laboratorio Centauro Ingenieros

3.19. Ensayos del método

3.19.1. Densidad bulk de las briquetas compactadas (ASTM D-2726) (Gmb)

Después de compactar y luego sacarlos del molde para enfriarlos a temperatura ambiente, se realiza la prueba de gravedad volumétrica, la norma estipula que la diferencia máxima permitida entre los dos valores de gravedad específica volumétrica es de 0.02 para que puedan ser promediado y debe descartarse la gravedad volumétrica que exceda este valor.



Figura 94: Gravedad específica en briquetas
Fuente: Laboratorio Centauro Ingenieros



Figura 95: Ensayo gravedad específica Bulk
Fuente: Laboratorio Centauro Ingenieros

3.19.2. Gravedad específica teórica máxima (Gmm).

La gravedad específica teórica máxima (Gmm) es la densidad máxima que puede presentar la mezcla asfáltica, porque no considera los vacíos en la muestra, por estar en estado suelto, es solo la densidad de las partículas del agregado cubiertas por la mezcla de asfalto, es complementario volumen específico bulk, porque en base a estos valores de gravedad se puede obtener el porcentaje de vacíos.



Figura 96: Ensayo Rotura Marshall
Fuente: Laboratorio Centauro Ingenieros



Figura 97: Resultado Ensayo Marshall
Fuente: Laboratorio Centauro Ingenieros

Tabla 37: Calculo ensayo Marshall

Nº DE BRIQUETAS	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1 % de C. A. en Peso de la Mezcla Total		4.00			4.50			5.00			5.50	
2 % de A gregado Grueso (3/4), en Peso de la Mezcla		35.00			35.00			35.00			35.00	
3 % de Arena Gruesa, en Peso de la Mezcla		60.00			60.00			60.00			60.00	
4 % de Filler Cemento, en Peso de la Mezcla		5.00			5.00			5.00			5.00	
5 Peso especifico del cemento asfaltico - Aparente		1.065			1.065			1.065			1.065	
6 Peso especifico del Piedra Chancada (g/cm ³)		2.510			2.510			2.510			2.510	
7 Peso especifico de Arena gruesa (g/cm ³)		2.920			2.920			2.920			2.920	
8 Peso especifico del filler (g/cm ³)		2.860			2.860			2.860			2.860	
9 Altura promedio de la Briqueta (cm)	64.00	63.00	64.83	61.67	61.83	63.00	61.33	62.33	62.00	63.33	63.00	62.00
10 Peso de la Briqueta al aire (gr) (A)	1176.0	1173.0	1180.5	1163.5	1166.5	1184.0	1155.0	1177.0	1162.5	1189.0	1160.0	1166.0
11 Peso de la Briqueta Sat. Seca (gr) (B)	1178.2	1175.1	1183.1	1165.0	1167.9	1185.8	1157.2	1179.3	1165.0	1191.1	1162.6	1168.6
12 Peso de la Briqueta sumergida + canastilla (gr)	1746.0	1738.5	1737.0	1745.5	1743.5	1752.0	1744.5	1755.0	1746.0	1758.5	1736.5	1748.5
13 Peso de la canastilla sumergida (gr)	1080.0	1080.0	1080.0	1080.0	1080.0	1080.0	1080.0	1080.0	1080.0	1080.0	1080.0	1080.0
14 Peso de la Briqueta Sumergida en el agua (gr) (C)	666.0	658.5	657.0	665.5	663.5	672.0	664.5	675.0	666.0	678.5	656.5	668.5
15 Peso Volumen Agua / Volumen Briqueta (gr) (B-C)	512.2	516.6	526.1	499.5	504.4	513.8	492.7	504.3	499.0	512.6	506.1	500.1
16 Peso de Agua Absorbida (gr) (B-A)	2.2	2.1	2.6	1.5	1.4	1.8	2.2	2.3	2.5	2.0	2.6	2.6
17 Porcentaje de Absorción (%) ((B-A)/(B-C))*100	0.43	0.41	0.49	0.30	0.28	0.35	0.45	0.46	0.50	0.40	0.51	0.52
18 Peso Especifico Bulk de la Briqueta (gr/cm ³) (A/(B-C))	2.296	2.271	2.244	2.329	2.313	2.304	2.344	2.334	2.330	2.320	2.292	2.332
19 Peso Especifico Bulk de la Briqueta (gr/cm ³) - PROMEDIO		2.270			2.315			2.336			2.314	
20 Peso Especifico Máximo de la Mezcla - RICE- ASTM D 2041		2.428			2.453			2.452			2.414	



Figura 98: Modificación del asfalto con cera orgánica
Fuente: Laboratorio Centauro Ingenieros



Figura 99: Cera orgánica



Figura 100: Doble modificación asfalto SBS
Fuente: Laboratorio Centauro Ingenieros



Figura 101: Ensayo Cántabro mezclas Asfáltica
Fuente: Laboratorio Centauro Ingenieros



Figura 102: Briquetas luego del ensayo Cántabro
Fuente: Laboratorio Centauro Ingenieros

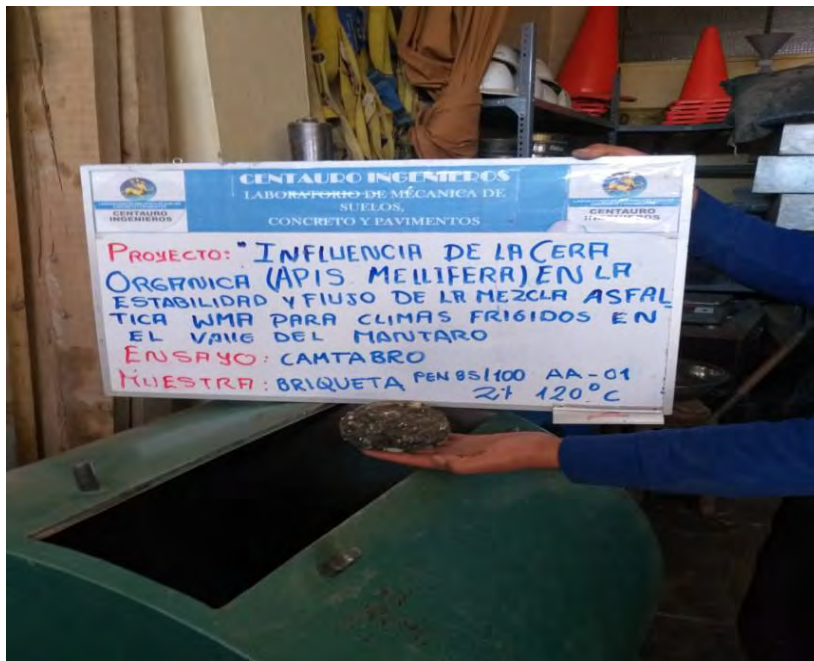


Figura 103: Ensayo cántabro % asfalto 4% 120°C
Fuente: Laboratorio Centauro Ingenieros

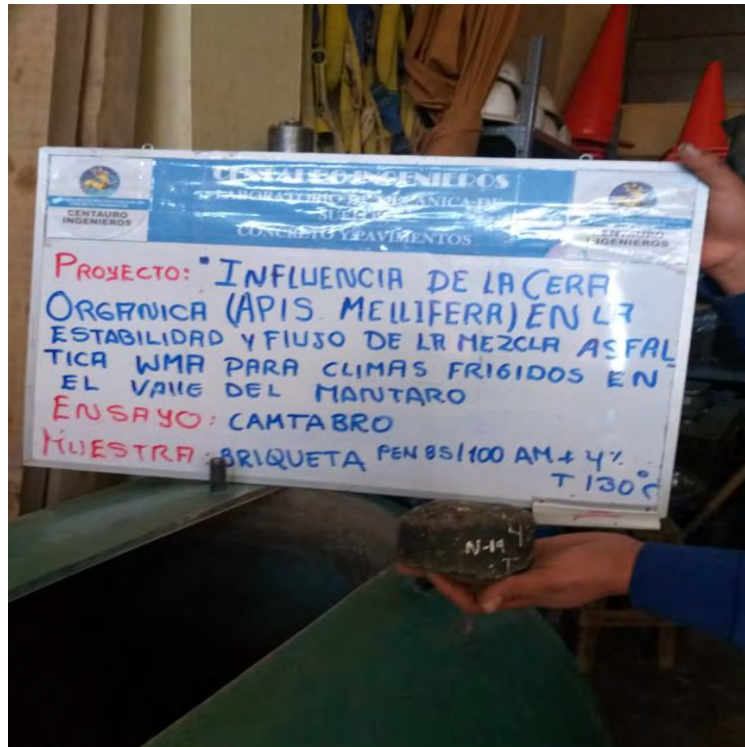


Figura 104: Ensayo cántabro mezcla Asfáltica 4% a 130°C
Fuente: Laboratorio Centauro Ingenieros



Figura 105: Briquetas ensayadas cántabro
Fuente: Laboratorio Centauro Ingenieros



Figura 106: Ensayo cántabro briqueta 4% asfalto 130°C
Fuente: Laboratorio Centauro Ingenieros



Figura 107: Preparado mezcla asfáltica ciclo de congelamiento
Fuente: Laboratorio Centauro Ingenieros

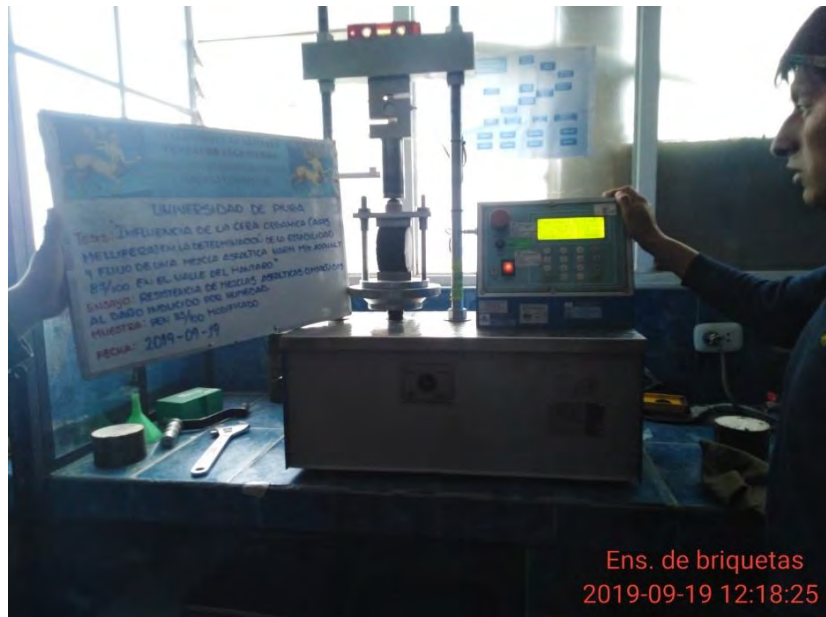


Figura 108: Rotura Marshall
Fuente: Laboratorio Centauro Ingenieros



Figura 109: Briquetas
Fuente: Laboratorio Centauro Ingenieros



Figura 110: Test de Lottman
Fuente: Laboratorio Centauro Ingenieros



Figura 111: Falla test de Lottman
Fuente: Laboratorio Centauro Ingenieros



Figura 112: Procedimiento de ensayo test Lottman
Fuente: Laboratorio Centauro Ingenieros



Figura 113: Primer ciclo de deshielo
Fuente: Laboratorio Centauro Ingenieros



Figura 114:Ciclo de congelamiento briquetas
Fuente: Laboratorio Centauro Ingenieros



Figura 115: Briquetas congeladas
Fuente: Laboratorio Centauro Ingenieros



Figura 118: Briqueta ensayada test lottman
Fuente: Laboratorio Centauro Ingenieros

Capítulo 4 Análisis de resultados

En este capítulo se analizan los resultados obtenidos mediante el mezclado convencional en caliente y como modificadores 0,5%, 1%, 2% y 4% de la cera orgánica APISS MELLIFERA, así como se analizan todos los resultados obtenidos en el laboratorio, como la fluidez, la estabilidad, la resistencia a la tracción indirecta, la pérdida de resistencia y su temperatura de trabajo.

4.1 Diseño de mezcla marshal con cemento asfáltico PEN 85/100

Tabla 38: Valores de parámetros volumétricos

MEZCLA ASFALTICA CON PEN 85/100								
%ASF	%Vacios-Mezcla	Densidad	%Vacios en el agregado mineral VMA	%Vacios llenos de asfalto VFA	Flujo	Estabilidad	Asf/Filler	Estabilidad /Flujo
4	6.50	2.27	21.02	69.19	5.73	16.50	1.25	11834.64
4.5	5.62	2.32	19.86	71.76	8.27	15.17	1.11	7485.89
5	4.72	2.34	19.58	75.92	9.77	16.51	1.00	6891.89
5.5	4.14	2.31	20.74	80.10	9.93	13.00	0.91	5335.74
6	3.67	2.32	20.85	82.43	10.92	11.77	0.83	4396.75
6.5	3.05	2.32	21.23	85.62	18.48	7.37	0.77	1622.81
7	2.86	2.33	21.48	86.71	23.55	6.83	0.71	1198.22

Se presenta el análisis de los gráficos de la mezcla asfáltica utilizando asfalto PEN 85/100 comparando con los parámetros definidos en la EG2013.

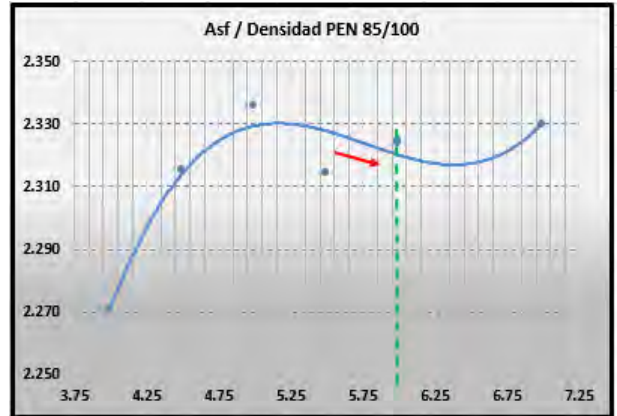
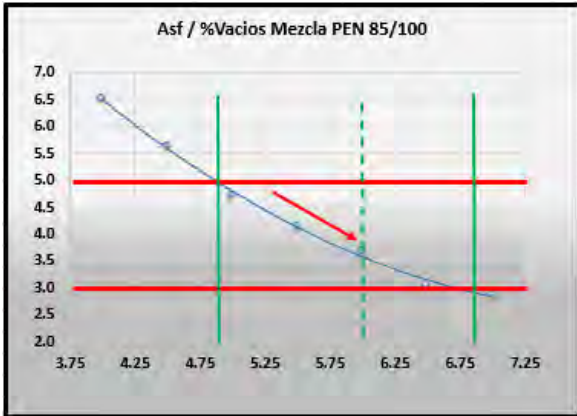


Figura 119: Relación Asfalto – % Vacíos (izquierda) Relación Asfalto - % Vacíos (derecha)

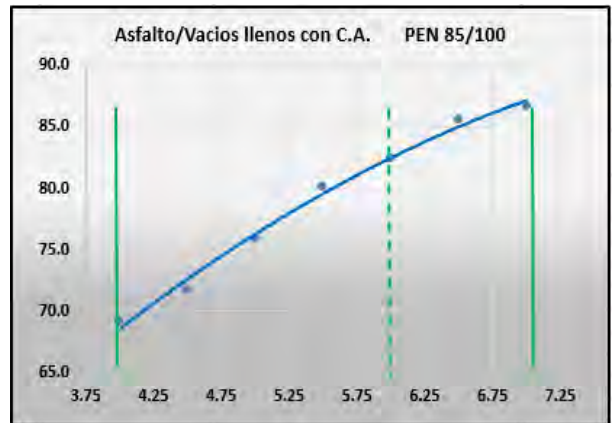
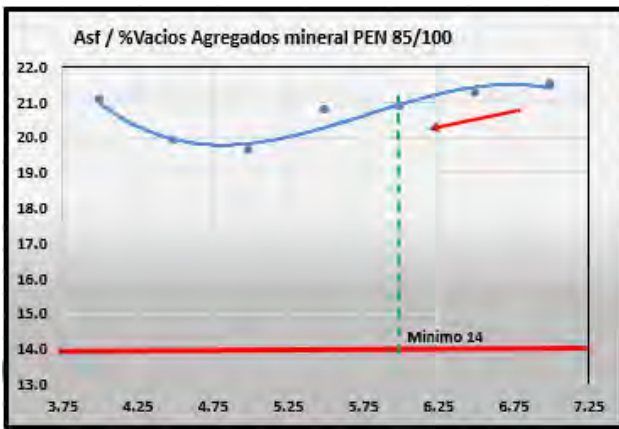


Figura 120: Relación Asfalto - % Vacíos agregado mineral (izquierda) Relación Asfalto – Vacíos llenos de asfalto (derecha)

Fuente: propia

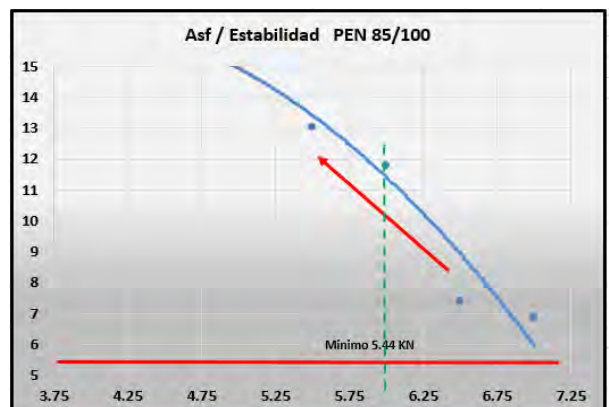
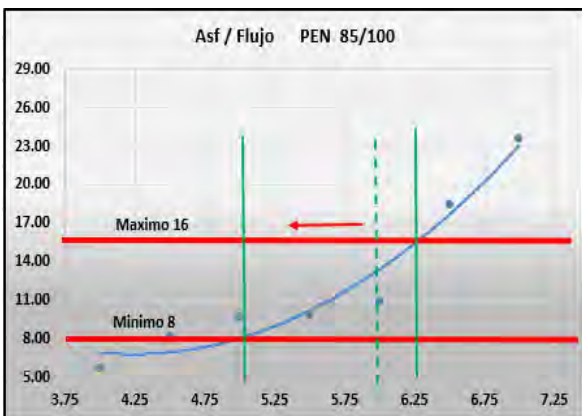


Figura 121: Relación Asfalto – Flujo (izquierda) Relación Asfalto – estabilidad (derecha)

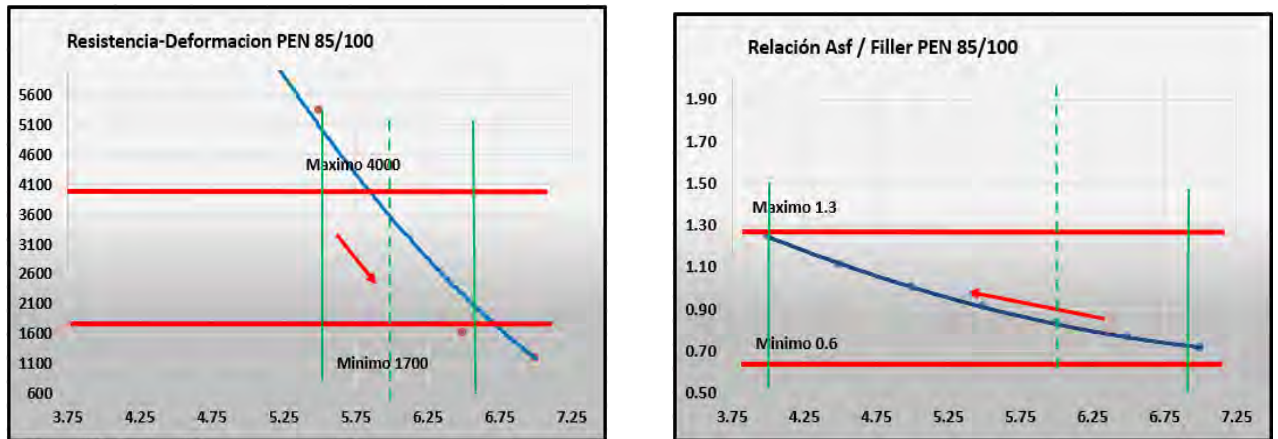


Figura 122:Relacion resistencia – deformación (Izquierda); Relación Asfalto – Filler (derecha)

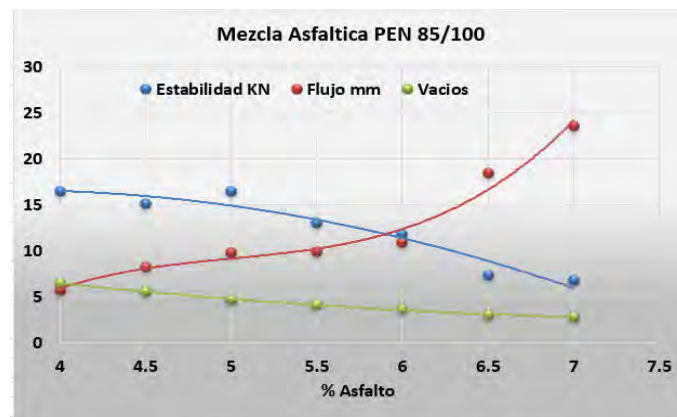


Figura 123: Comportamiento Estabilidad. Flujo y vacíos PEN 85/100

En la evaluación volumétrica de la mezcla asfáltica en caliente utilizando PEN 85/100 se obtuvo un contenido óptimo de asfalto de 6% cumpliendo todos los parámetros establecidos en la EG2013 MTC.

4.1.1 Características de la mezcla asfáltica modificada PEN 85/100 con cera orgánica a 100°C

Para la caracterización de esta mezcla asfáltica tibia que corresponde a una mezcla asfáltica modificada se ha realizado la evaluación de las características.

Tabla 39: Parámetros volumétricos mezcla Marshall con asfalto Pen 85/100

MEZCLA ASFALTICA PEN 85/100 MODIFICADO CON CERA ORGANICA A 100°C								
% Cera Orgánica	%Vacios-Mezcla	Densidad	%Vacios-Agregados	%Vacios en Agregados	Flujo	Estabilidad	Cera/Filler	Estabilidad /Flujo
0.5	5.96	2.26	18.50	67.77	3.91	12.07	13.89	3.09
1	4.72	2.28	18.28	74.21	4.10	10.66	6.94	2.60
2	3.41	2.33	17.38	80.39	3.64	12.77	3.47	3.50
4	2.56	2.31	19.75	87.05	2.37	16.50	1.74	6.95

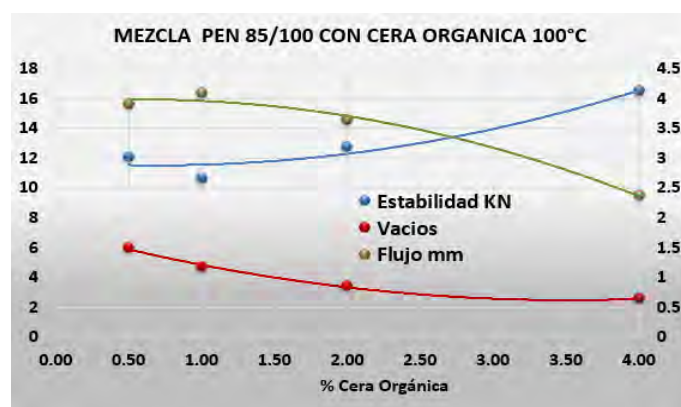


Figura 124: Relación Flujo estabilidad con cera orgánica 100°C

En la evaluación volumétrica de la mezcla asfáltica en caliente utilizando PEN 85/100 el cual modificado con cera orgánica Apis Mellifera en los porcentajes de 0.5%, 1%, 2%, y 4% las mismas que se elaboraron a una temperatura de fabricación de 100°C, se obtuvieron como resultados los siguientes parámetros: vacíos en la mezcla asfáltica en un rango de 4.75%, siendo el rango de aceptación de 4 a 6%; densidad 2.28 gr/cm³, Vacíos en el agregado mineral VAM 18.4%, siendo el mínimo de 14%, Vacíos llenos con cemento asfáltico VAF 73%, cuyo parámetro de control en las mezclas asfálticas modificadas es de 65% a 75%; Flujo 4 mm, siendo el aceptable 2 a 3.5 mm (este parámetro no cumple); Estabilidad 11.6 KN, siendo el mínimo de 9 KN; Relación Resistencia-deformación 2.9, siendo el rango aceptable de 3 a 6 KN/mm (este parámetro no cumple).

4.1.2 Características de la mezcla asfáltica modificada PEN 85/100 con Cera Orgánica a 120°C.

Tabla 40: Mezcla Asfáltica modificada PEN 85/100 con cera orgánica

MEZCLA ASFALTICA PEN 85/100 MODIFICADO CON CERA ORGANICA A 120°C								
%Cera Orgánica	%Vacíos-Mezcla	Densidad	%Vacíos en el agregado mineral VMA	%Vacíos llenos de asfalto VFA	Flujo	Estabilidad	Asf/Filler	Estabilidad /Fluencia
0.5	6.10	2.33	15.84	61.49	4.18	11.86	10.00	2.84
1	4.76	2.34	15.89	70.05	3.83	13.90	5.00	3.63
2	3.85	2.33	17.27	77.79	3.90	13.68	2.50	3.51
4	2.91	2.33	18.77	84.48	3.80	13.12	1.25	3.45

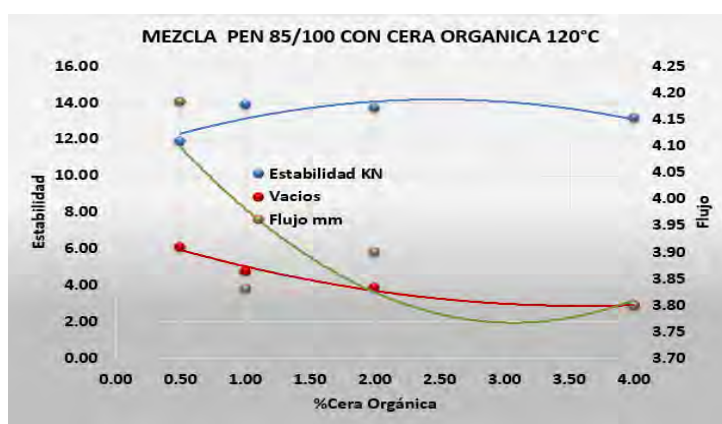


Figura 125: Relación Estabilidad flujo y vacíos; mezcla Asfáltica PEN 85/100 120°C

En la evaluación volumétrica de la mezcla asfáltica en caliente utilizando PEN 85/100 el cual modificado con cera orgánica Apis Mellifera en los porcentajes de 0.5%, 1%, 2%, y 4% las mismas que se elaboraron a una temperatura de fabricación de 120°C, se obtuvieron como resultados los siguientes parámetros: vacíos en la mezcla asfáltica en un rango de 5%, siendo el rango de aceptación de 4 a 6%; densidad 2.28 gr/cm³, Vacíos en el agregado mineral VAM 15.9%, siendo el mínimo de 14%, Vacíos llenos con cemento asfáltico VAF 69%, cuyo parámetro de control en las mezclas asfálticas modificadas es de 65% a 75%; Flujo 3.9 mm, siendo el aceptable 2 a 3.5 mm (este parámetro no cumple); Estabilidad 13 KN, siendo el

mínimo de 9 KN; Relación Resistencia-deformación 3.4, siendo el rango aceptable de 3 a 6 KN/mm (este parámetro no cumple).

4.1.3 Características de la mezcla asfáltica modificada PEN 85/100 con Cera Orgánica a 130°C.

Tabla 41: Mezcla Asfáltica PEN 85/100 modificada con cera orgánica 130°C

MEZCLA ASFALTICA PEN 85/100 MODIFICADO CON CERA ORGANICA A 130°C								
%Cera Orgánica	%Vacíos-Mezcla	Densidad	%Vacíos en el agregado mineral VMA	%Vacíos llenos de asfalto VFA	Flujo	Estabilidad	Asf/Filler	Estabilidad /Fluencia
0.5	5.84	2.33	15.82	63.15	3.97	14.50	10.00	3.66
1	4.75	2.31	17.26	72.91	3.60	14.36	5.00	3.99
2	3.33	2.31	18.05	81.63	3.36	21.38	2.50	6.37
4	2.53	2.32	19.41	86.99	3.09	22.50	1.25	7.29



Figura 126: Relación flujo estabilidad vacíos; mezcla Asfáltica con cera orgánica 130°

En la evaluación volumétrica de la mezcla asfáltica en caliente utilizando PEN 85/100 el cual modificado con cera orgánica Apis Mellifera en los porcentajes de 0.5%, 1%, 2%, y 4% las mismas que se elaboraron a una temperatura de fabricación de 130°C, se obtuvieron como resultados los siguientes parámetros: vacíos en la mezcla asfáltica de 4%, siendo el rango de aceptación de 4 a 6%; densidad 2.30 gr/cm³, Vacíos en el agregado mineral VAM 17.9%, siendo el mínimo de 14%, Vacíos llenos con cemento asfáltico VAF 74%, cuyo parámetro de control en las mezclas asfálticas modificadas es de 65% a 75%; Flujo 3.5 mm, siendo el aceptable 2 a 3.5 mm; Estabilidad 17.8 KN, siendo el mínimo de 9 KN; Relación Resistencia-

deformación 5.7, siendo el rango aceptable de 3 a 6 KN/mm; por lo que con una proporción de cera orgánica de 1.5%.

Tabla 42: Resumen mezcla Asfáltica PE 85/100 fabricado a 100, 120 y 130 °C

% Cera Orgánica	PEN 85/100 100°C			PEN 85/100 120°C			PEN 85/100 130°C		
	ESTABILIDAD	FLUJO	VACIOS	ESTABILIDAD	FLUJO	VACIOS	ESTABILIDAD	FLUJO	VACIOS
	PEN 85/100 100°C	PEN 85/100 100°C	PEN 85/100 100°C	PEN 85/100 120°C	PEN 85/100 120°C	PEN 85/100 120°C	PEN 85/100 130°C	PEN 85/100 130°C	PEN 85/100 130°C
0.50	12.07	3.91	5.96	11.86	4.18	6.10	14.50	3.97	5.84
1.00	10.66	4.10	4.72	13.90	3.83	4.76	14.36	3.60	4.75
2.00	12.77	3.64	3.41	13.68	3.90	3.85	21.38	3.36	3.33
4.00	16.50	2.37	2.56	13.12	3.80	2.91	22.50	3.09	2.53

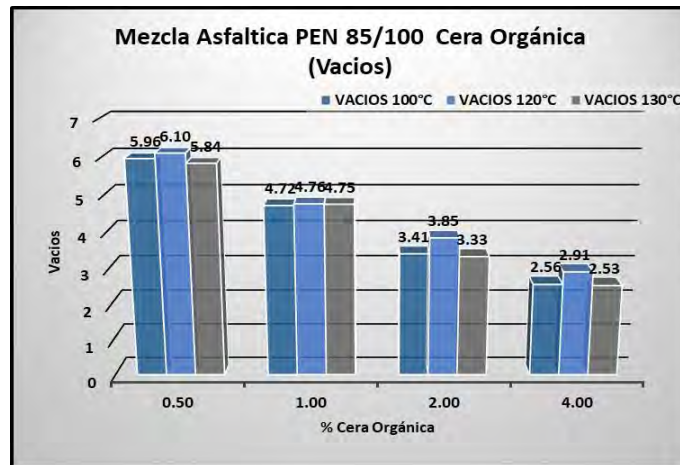


Figura 127: Vacíos PEN 85/100 a 100, 120 y 130°C
Fuente: propia

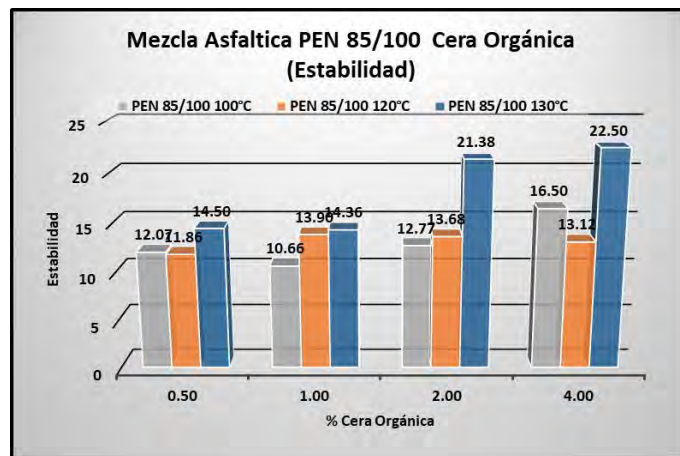


Figura 128: Estabilidad mezcla asfáltica PEN 85/100 a 100,120,130°C

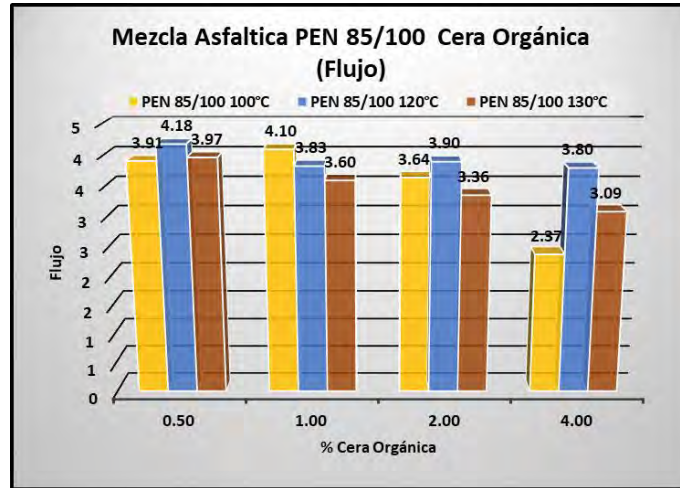


Figura 129: Flujo mezcla Asfáltica PEN 85/100 a 100,120,130°C

4.2 Diseño de mezcla Asfáltica Marshall con cemento asfáltico PEN 85/100 SBS.

Tabla 43: Diseño Marshall mezcla Asfáltica PEN 85/100 SBS

N° DE BRIQUETAS	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1 % de C. A. en Peso de la Mezcla Total		4.00			4.50			5.00			5.50	
2 % de Agregado Grueso (3/4), en Peso de la Mezcla		35.00			35.00			35.00			35.00	
3 % de Arena Gruesa, en Peso de la Mezcla		60.00			60.00			60.00			60.00	
4 % de Filler Cemento, en Peso de la Mezcla		5.00			5.00			5.00			5.00	
5 Peso específico del cemento asfáltico - Aparente		1.065			1.065			1.065			1.065	
6 Peso específico del Piedra Chancada (g/cm ³)		2.510			2.510			2.510			2.510	
7 Peso específico de Arena gruesa (g/cm ³)		2.920			2.920			2.920			2.920	
8 Peso específico del filler (g/cm ³)		2.860			2.860			2.860			2.860	
9 Altura promedio de la Briqueta (cm)	65.67	66.83	65.00	64.33	64.00	63.50	62.67	62.83	63.33	63.50	102.00	102.00
10 Peso de la Briqueta al aire (gr) (A)	1212.5	1191.5	1177.5	1185.0	1187.5	1179.0	1184.5	1193.5	1186.0	1194.0	1185.0	1202.0
11 Peso de la Briqueta Sat. Sup. Seca (gr) (B)	1214.3	1193.1	1179.6	1187.4	1189.9	1181.4	1186.9	1195.6	1188.9	1197.1	1188.2	1204.9
12 Peso de la Briqueta sumergida + canastilla (gr)	1775.0	1776.0	1774.5	1752.0	1753.0	1754.5	1772.0	1773.0	1773.2	1763.0	1763.4	1764.2
13 Peso de la canastilla sumergida (gr)	1080.0	1080.0	1080.0	1080.0	1080.0	1080.0	1080.0	1080.0	1080.0	1080.0	1080.0	1080.0
14 Peso de la Briqueta Sumergida en el agua (gr) (C)	695.0	696.0	694.5	672.0	673.0	674.5	692.0	693.0	693.2	683.0	683.4	684.2
15 Peso V volumen Agua / V volumen Briqueta (gr) (B-C)	519.3	497.1	485.1	515.4	516.9	506.9	494.9	502.6	495.7	514.1	504.8	520.7
16 Peso de Agua Absorbida (gr) (B-A)	1.8	1.5	2.1	2.4	2.4	2.4	2.4	2.1	2.9	3.0	3.2	2.9
17 Porcentaje de Absorción (%) ((B-A)/(B-C))*100	0.35	0.31	0.43	0.47	0.46	0.47	0.48	0.42	0.59	0.59	0.63	0.56
18 Peso Específico Bulk de la Briqueta (gr/cm ³) (A)/(B-C)	2.335	2.397	2.427	2.296	2.297	2.326	2.393	2.375	2.393	2.323	2.347	2.308
19 Peso Específico Bulk de la Briqueta (gr/cm ³) - PROMEDIO		2.386			2.307			2.387			2.326	
20 Peso Específico Máximo de la Mezcla - RIDC- ASTM D 2041		2.552			2.445			2.505			2.427	

4.2.1 Caracterización de mezcla Asfáltica Marshall con cemento asfáltico PEN 85/100 SBS.

Tabla 44: Mezcla asfáltica con PEN 85/100 SBS

MEZCLA ASFALTICA CON PEN 85/100 SBS								
%ASF	%Vacios-Mezcla	Densidad	%Vacios en el agregado mineral VMA	%Vacios llenos de asfalto VFA	Flujo	Estabilidad	Asf/Filler	Estabilidad /Fluencia
4	6.50	2.39	16.97	62.17	2.50	19.30	1.25	7.72
4.5	5.62	2.31	20.14	72.16	2.95	16.33	1.11	5.54
5	4.72	2.39	17.82	73.56	3.51	13.00	1.00	3.70
5.5	4.14	2.33	20.33	79.71	4.15	12.56	0.91	3.03
6	3.67	2.34	20.40	82.24	4.80	10.96	0.83	2.28
6.5	3.05	2.33	21.01	85.58	4.82	10.61	0.77	2.20
7	2.86	2.30	22.49	87.32	5.97	7.78	0.71	1.30

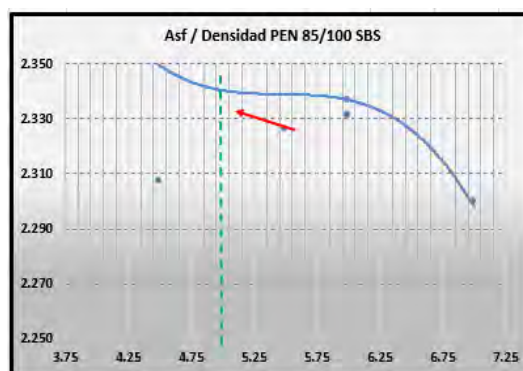
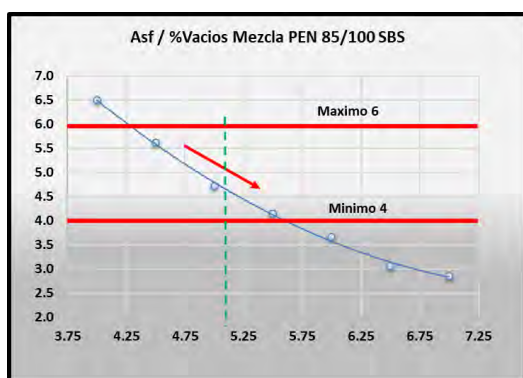


Figura 130: Relación asfalto %vacíos (izquierda); Relación asfalto – densidad (derecha)

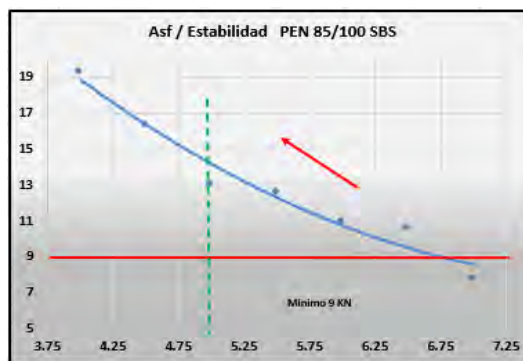
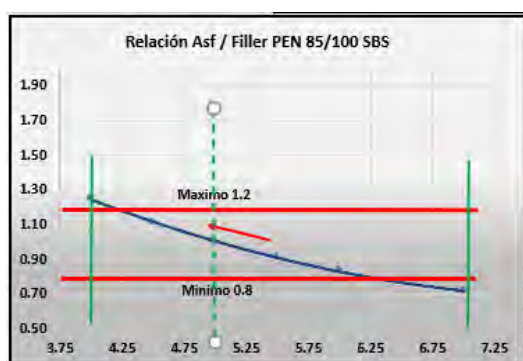


Figura 131: Relación asfalto filler (izquierda); Relación asfalto estabilidad (derecha)

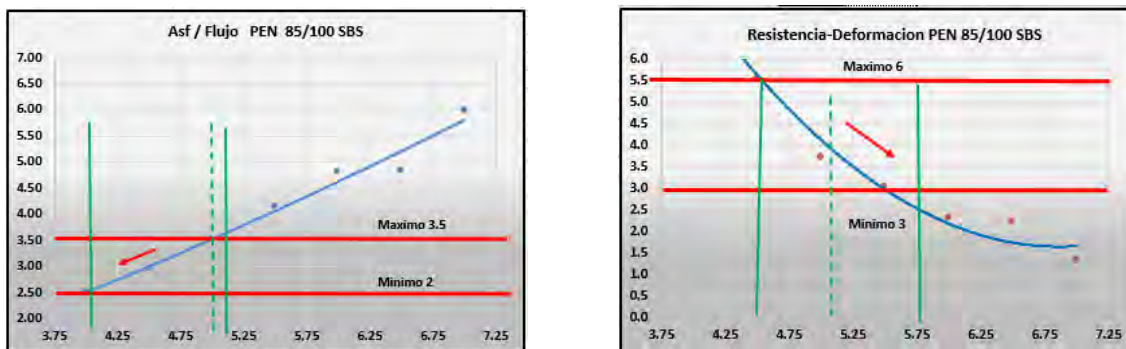


Figura 132: Relación asfalto flujo (izquierda); Relación asfalto deformación (derecha)

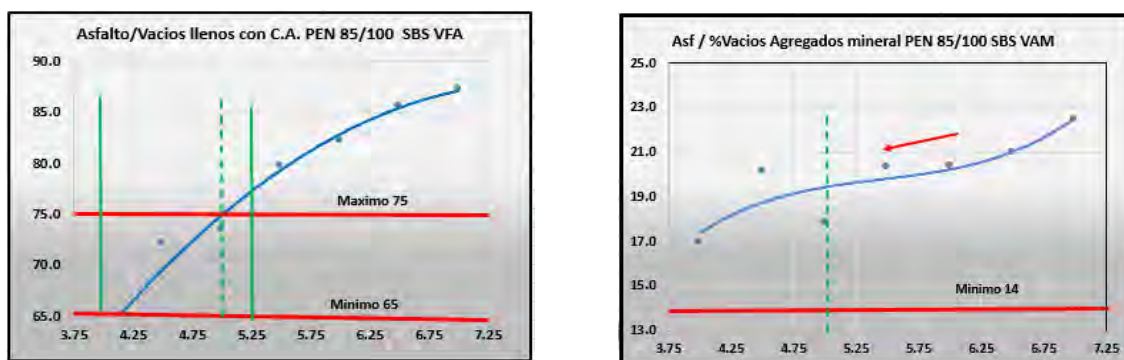


Figura 133: Relación asfalto - VAM (izquierda); Relación asfalto - %vacíos agregado mineral (derecha)

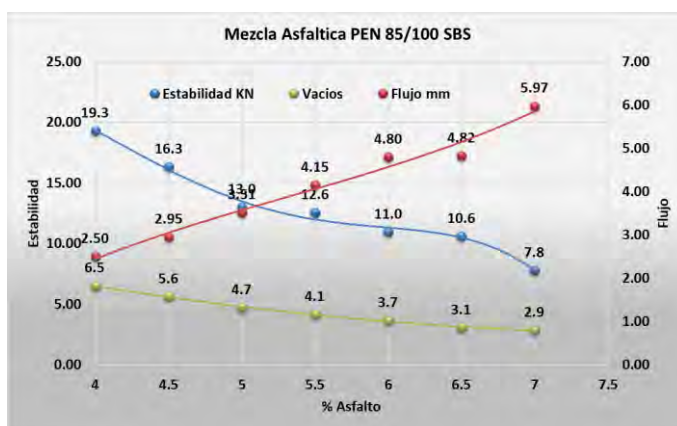


Figura 134: Relación flujo, estabilidad y vacíos PEN 85/100 SBS

En la evaluación volumétrica de la mezcla asfáltica en caliente utilizando PEN 85/100 SBS se obtuvo un contenido óptimo de asfalto de 5% cumpliendo todos los parámetros establecidos en la EG2013 MTC.

4.2.2 Características de la mezcla asfáltica modificada PEN 85/100 SBS con Cera Orgánica a 100°C



Figura 135: Relación flujo, estabilidad y vacíos Mezcla Asfáltica PEN 85/100 SBS con cera orgánica a 100°C

Tabla 45: Parametros mezcla Asfáltica PEN 85/100 SBS segunda modificación 100°C

MEZCLA ASFALTICA PEN 85/100 SBS SEGUNDA MODIFICACION CON CERA ORGANICA A 100°C								
%Cera Orgánica	%Vacíos-Mezcla	Densidad	%Vacíos en el agregado mineral VMA	%Vacíos llenos de asfalto VFA	Flujo	Estabilidad	Asf/Filler	Estabilidad/Fluencia
0.5	6.16	2.34	15.77	60.98	3.36	11.51	10.00	3.43
1	4.58	2.32	16.72	72.65	3.91	12.15	5.00	3.11
2	3.19	2.32	17.59	81.89	3.42	10.89	2.50	3.19
4	2.44	2.29	20.18	87.94	1.70	10.61	1.25	6.24

En la evaluación volumétrica de la mezcla asfáltica en caliente utilizando PEN 85/100 modificado en planta con SBS, se experimentó modificando con cera orgánica Apis Mellifera en los porcentajes de 0.5%, 1%, 2%, y 4% las mismas que se elaboraron a una temperatura de fabricación de 100°C se obtuvieron como resultados los siguientes parámetros: vacíos en la mezcla asfáltica en 4.9%, siendo el rango de aceptación de 4 a 6%; densidad 2.322 gr/cm³, Vacíos en el agregado mineral VAM 16.8%, siendo el mínimo de 14%, Vacíos llenos con cemento asfáltico VAF 69%, cuyo parámetro de control en las mezclas asfálticas modificadas es de 65% a 75%; Flujo 3.68 mm, siendo el aceptable 2 a 3.5 mm (este parámetro no cumple); Estabilidad 11.5 KN, siendo el mínimo de 9 KN; Relación Resistencia-deformación 3, siendo el rango aceptable de 3 a 6 KN/mm.

4.2.3 Características de la mezcla asfáltica modificada PEN 85/100 SBS con Cera Orgánica a 120°C.

Tabla 46: Parámetros mezcla Asfáltica PEN 85/100 SBS segunda modificación 120°C

MEZCLA ASFALTICA PEN 85/100 SBS SEGUNDA MODIFICACION CON CERA ORGANICA A 120°C								
%Cera Orgánica	%Vacíos-Mezcla	Densidad	%Vacíos en el agregado mineral VMA	%Vacíos llenos de asfalto VFA	Flujo	Estabilidad	Cera/Filler	Estabilidad /Fluencia
0.5	5.84	2.29	17.41	66.89	3.49	11.63	10.00	3.33
1	4.63	2.31	17.01	72.89	3.15	14.96	5.00	4.75
2	3.47	2.28	18.97	74.73	3.10	18.51	2.50	5.98
4	2.68	2.26	21.52	87.58	2.92	22.17	1.25	7.60

4.2.3.1 Contenido óptimo de asfalto

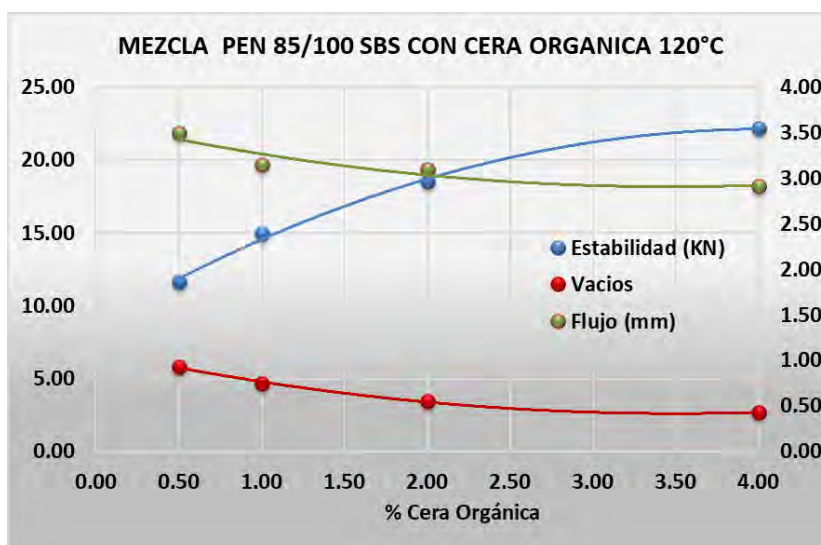


Figura 136: Relación flujo, estabilidad y vacíos mezcla Asfáltica PEN 85/100 SBS con cera orgánica 120°C

En la evaluación volumétrica de la mezcla asfáltica en caliente utilizando PEN 85/100 modificado en planta con SBS, se experimentó modificando con cera orgánica Apis Mellifera en los porcentajes de 0.5%, 1%, 2%, y 4% las mismas que se elaboraron a una temperatura de

fabricación de 120°C se obtuvieron como resultados los siguientes parámetros: vacíos en la mezcla asfáltica en 4.9%, siendo el rango de aceptación de 4 a 6%; densidad 2.317 gr/cm³, Vacíos en el agregado mineral VAM 17.5%, siendo el mínimo de 14%, Vacíos llenos con cemento asfáltico VAF 73%, cuyo parámetro de control en las mezclas asfálticas modificadas es de 65% a 75%; Flujo 3.25 mm, siendo el aceptable 2 a 3.5 mm; Estabilidad 11.8 KN, siendo el mínimo de 9 KN; Relación Resistencia-deformación 3.6, siendo el rango aceptable de 3 a 6 KN/mm.

4.2.4 Características de la mezcla asfáltica modificada PEN 85/100 SBS con Cera Orgánica a 130°C

Tabla 47: Parámetros mezcla Asfáltica PEN 85/100 SBS segunda modificación 130°C

MEZCLA ASFALTICA PEN 85/100 SBS SEGUNDA MODIFICACION CON CERA ORGANICA A 130°C								
%Cera Orgánica	%Vacíos-Mezcla	Densidad	%Vacíos en el agregado mineral VMA	%Vacíos llenos de asfalto VFA	Flujo	Estabilidad	Asf/Filler	Estabilidad /Fluencia
0.5	5.75	2.32	16.29	64.74	3.62	13.70	10.00	3.78
1	4.67	2.22	20.27	77.00	3.58	15.03	5.00	4.20
2	3.47	2.24	20.57	83.28	3.61	13.20	2.50	3.66
4	2.72	2.23	22.53	87.96	3.44	15.95	1.25	4.64

4.2.4.1 Contenido óptimo de asfalto



Figura 137: Relación flujo, estabilidad, vacíos mezcla Asfáltica PEN 85/100 SBS con cera orgánica a 130°C

En la evaluación volumétrica de la mezcla asfáltica en caliente utilizando PEN 85/100 modificado en planta con SBS a una temperatura de 130°C, se experimentó modificando con cera orgánica Apis Mellifera en los porcentajes de 0.5%, 1%, 2%, y 4% se obtuvieron como

resultados los siguientes parámetros: vacíos en la mezcla asfáltica en 4%, siendo el rango de aceptación de 4 a 6%; densidad 2.22 gr/cm³, Vacíos en el agregado mineral VAM 21%, siendo el mínimo de 14%, Vacíos llenos con cemento asfáltico VAF 80%, cuyo parámetro de control en las mezclas asfálticas modificadas es de 65% a 75% (este parámetro no cumple); Flujo 3.5 mm, siendo el aceptable 2 a 3.5 mm; Estabilidad 14 KN, siendo el mínimo de 9 KN; Relación Resistencia-deformación 3.75, siendo el rango aceptable de 3 a 6 KN/mm.

Tabla 48: Resumen parámetros mezcla Asfáltica PEN 85/100 SBS segunda modificación con cera orgánica

% Cera Orgánica	PEN 85/100 SBS 100°C			PEN 85/100 SBS 120°C			PEN 85/100 SBSB 130°C		
	ESTABILIDAD	FLUJO	VACIOS	ESTABILIDAD	FLUJO	VACIOS	ESTABILIDAD	FLUJO	VACIOS
	PEN 85/100 SBS 100°C	PEN 85/100 SBS 100°C	PEN 85/100 SBS 100°C	PEN 85/100 SBS 120°C	PEN 85/100 SBS 120°C	PEN 85/100 SBS 120°C	PEN 85/100 SBSB 130°C	PEN 85/100 SBSB 130°C	PEN 85/100 SBSB 130°C
0.50	11.51	3.36	6.16	11.63	3.49	5.84	13.70	3.62	5.75
1.00	12.15	3.91	4.58	11.96	3.15	4.63	15.03	3.58	4.67
2.00	10.89	3.42	3.19	12.61	3.10	3.47	13.20	3.61	3.47
4.00	10.61	1.70	2.44	18.17	2.92	2.68	15.95	3.44	2.72

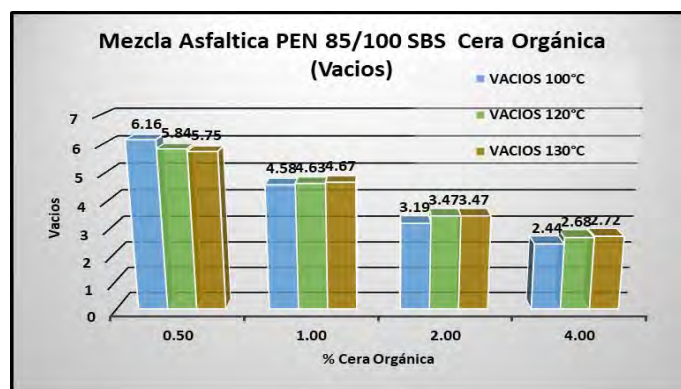


Figura 138: Cuadro comparativo vacíos mezcla PEN 85/100 SBS modificada con cera orgánica

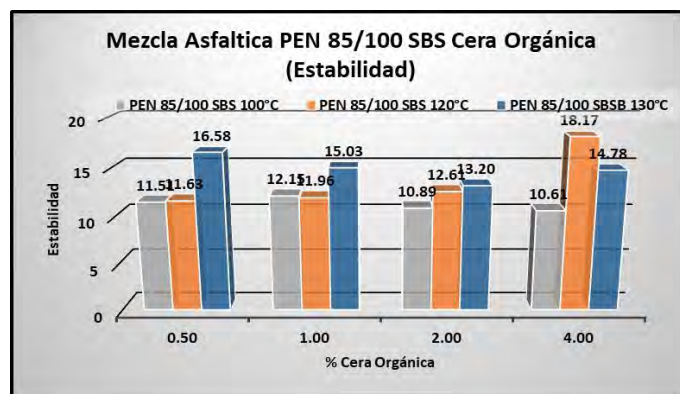


Figura 139: Cuadro comparativo estabilidad mezcla PEN 85/100 SBS modificada con cera orgánica

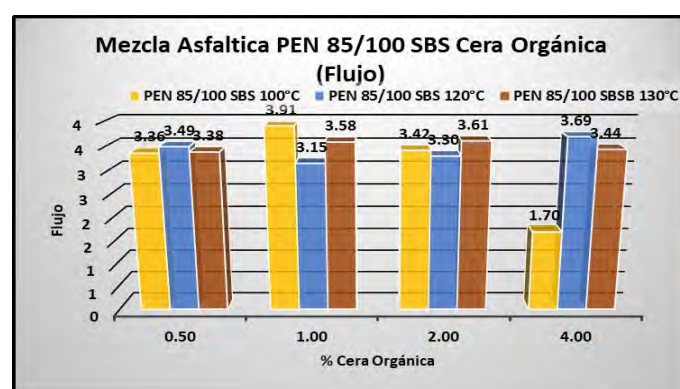


Figura 140: Cuadro comparativo flujo mezcla PEN 85/100 SBS modificada con cera orgánica

4.3 Evaluación del ensayo de cántabro

Con este método, puede observar fácilmente la diferencia de comportamiento ante el envejecimiento del asfalto, apreciándose claramente el comportamiento del cemento asfáltico PEN 85/100 a diferentes proporciones de 4%, 4.5%, 5%, 5.5%, 6%, 6.5% y 7%.

Tabla 49: Resumen ensayo cántabro con asfalto PEN 85/100 SBS

ENSAYO CANTABRO		
%ASF	%Perd PEN 85/100	%Perd PEN 85/100 SBS
4.00	19.81	35.82
4.50	10.13	18.45
5.00	5.71	9.35
5.50	4.36	6.66
6.00	3.36	5.13
6.50	4.08	4.30
7.00	3.53	7.37

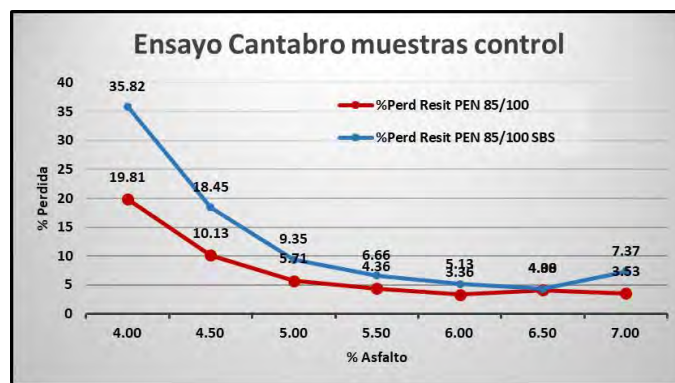


Figura 141: Cuadro comparativo ensayo cántabro PEN 85/100 convencional y modificado

Se aprecia que las pérdidas para porcentajes de asfalto tanto PEN 85/100 y su modificado con SBS a proporciones entre 4 y 5% difieren en porcentajes entre 15% 4% respectivamente, sin embargo, para proporciones de 5% y 7% las perdidas no existen variación significativa para ambos tipos de mezclas.

De otro lado sobre las mezclas asfálticas obtenidas con el óptimo de asfalto con el análisis volumétrico, estas se procedieron a realizar ensayos de cántabro o UCL, para ello se utilizó cera orgánica Apiss Mellifera en porcentaje de 0.5%, 1%, 2% y 4%, a una temperatura de 100°C, 120°C y 130°C obteniéndose los siguientes resultados:

Tabla 50: Cuadro comparativo ensayo cántabro con asfalto PEN 85/100 convencional y modificado

% Cera Organica	ASFALTO PEN 85/100			ASFALTO PEN 85/100 SBS		
	% Perd PEN 85/100 100°C	% Perd PEN 85/100 120°C	% Perd PEN 85/100 130°C	% Perd PEN 85/100 SBS 100°C	% Perd PEN 85/100 SBS 120°C	% Perd PEN 85/100 SBS 130°C
0.50	12.95	11.32	8.61	11.30	10.72	8.57
1.00	10.14	10.67	6.67	10.39	11.50	7.08
2.00	10.36	11.15	8.25	10.35	8.55	7.12
4.00	9.02	9.41	7.67	7.10	7.72	6.70

En el ensayo de Cántabro o UCL se aprecia que el mayor desgaste se produce a temperatura de 100°C con un porcentaje de pérdida de 12.95% hasta 9.02%.

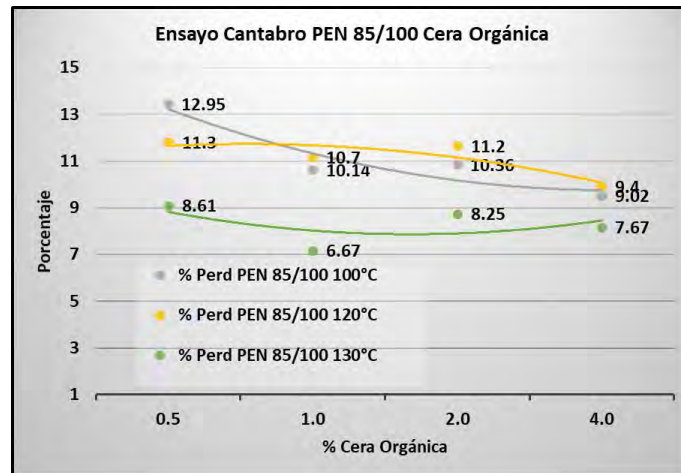


Figura 142: Ensayo cántabro por temperaturas

Se aprecia que a menor proporción de cera orgánica existe mayor probabilidad de pérdida de adhesividad de la mezcla Asfáltica.

Para el caso de mezclas asfáltica con asfalto modificado PEN 85/100 SBS cuyo óptimo contenido de asfalto obtenido con el análisis volumétrico Marshall de 5% se mantiene para todas las mezclas que se pretende realizar y experimentado la segunda modificación con cera orgánica en proporciones de 0.5%, 1%, 2% y 4% y temperaturas de 100, 120 y 130°C se obtienen los siguientes resultados:

La tendencia se mantiene a menor proporción de cera orgánica es propensa a mayor pérdida de adhesividad.

Para las mezclas asfálticas modificadas PEN 85/100 SBS con 5% de asfalto, se obtiene a temperaturas de fabricación de 100°C mayor porcentaje de pérdida de adhesividad llegando a valores de 11.30% hasta 7.10%, en el caso de temperatura de 120°C esta se reduce a 10.72% hasta 7.72% así como con la temperatura de 130°C presenta el mejor comportamiento solo con una reducción de 8.57% hasta 6-7.0%.

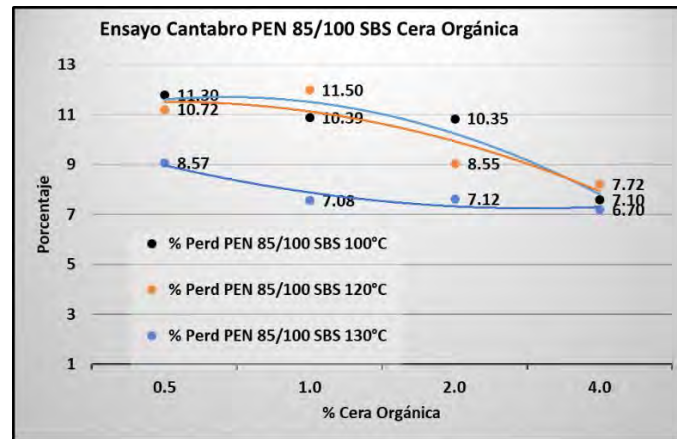


Figura 143: Porcentaje perdida ensayo cántabro

Se observa claramente la diferencia de comportamiento del cemento asfáltico PEN 85/100 a una proporción del 6% y diferentes proporciones de cera orgánica de 0.5%, 1%, 2% y 4% a temperaturas de 100 °C, 120°C y 130°C las dos primeras presentan un rápido envejecimiento y la tercera tiende a envejecer más lentamente.

4.4 Evaluación del ensayo susceptibilidad al agua mediante el test de lottman para mezcla Asfáltica PEN 85/100 con tres ciclos de congelamiento y deshielo.

Para la experimentación en susceptibilidad al agua se realizó mediante el ensayo de lottman, para ello se tuvo como muestra control la mezcla asfáltica fabricada con asfalto PEN 85/100 con los que se efectuaron las briquetas en proporciones de asfalto de 4%, 4.5%, 5%, 5.5%, 6%, 6.5 y 7% a fin de lograr el comportamiento, así mismo estas briquetas fueron sometidos a ciclos de congelamiento y deshielo definiéndose 3 ciclos de congelamiento en un periodo de 16 horas a una temperatura de $-18^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ para luego proceder a efectuar el deshielo colocando en baño maría a una temperatura de $60^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ por un periodo de 24 horas \pm 1 hora, para posteriormente colocarlo en baño de agua a $25 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ por 2 horas \pm 10 minutos y proceder a ensayarlos obteniéndose los siguientes resultados:

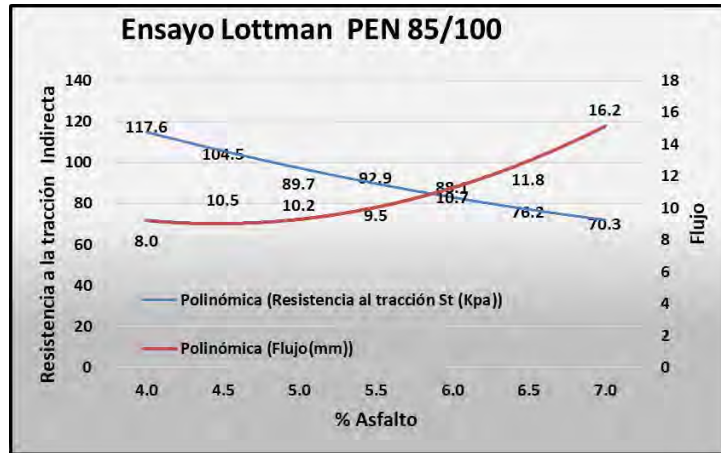


Figura 144: test de lottman mezcla PEN 85/100

Tabla 51: Resistencia a la tracción, flujo y vacíos mezcla PEN 85/100

%ASF	Resistencia a la tracción St (Kpa)	Flujo(mm)	%Vacíos-Mezcla
4.0	117.6	8.0	6.5
4.5	104.5	10.5	5.6
5.0	89.7	10.2	4.7
5.5	92.9	9.5	4.1
6.0	88.1	10.7	3.7
6.5	76.2	11.8	3.1
7.0	70.3	16.2	2.9

Las resistencias a la tracción indirecta como muestra control para proporciones de asfalto PEN 85/100 con 4%, 4.5%, 5%, 5.5%, 6%, 6.5% y 7% varían entre 117.6 kpa hasta 70.3 Kpa que decrece inversamente proporcional a la cantidad de asfalto, por otro lado, el flujo se incrementa directamente proporcional con la cantidad de asfalto llegando a variar desde 8 (0.25mm) hasta 16.2 (0.25 mm).

Resumen de la evaluación mezclas Asfáltica PEN 85/100 con acción de congelamiento y deshielo sometido a modificación con cera orgánica y ciclo de congelamiento y deshielo.

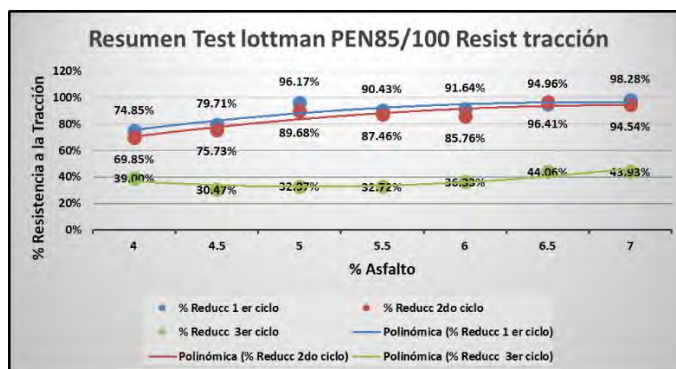


Figura 145: Resumen test lottman por ciclo de congelamiento y deshielo

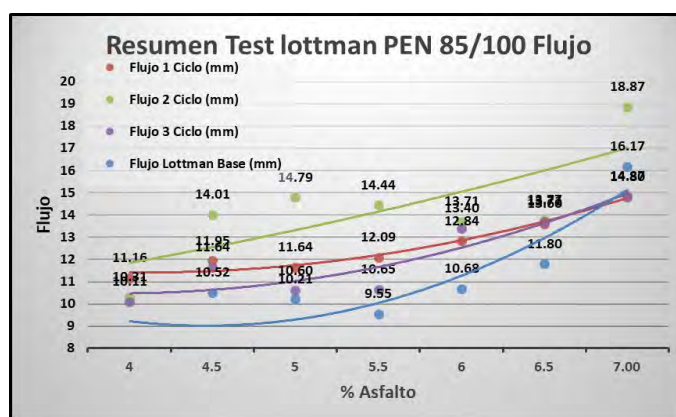


Figura 146: Resumen flujo test de lottman

Tabla 52: Resumen test de lottman base y tres ciclos de congelamiento y descongelamiento

Ensayo Lottman Base			Ensayo Lottman 1er Ciclo		Ensayo Lottman 2do Ciclo		Ensayo Lottman 3er Ciclo	
%ASF	Resistencia al tracción St Base (Kpa)	Flujo Lottman Base (mm)	Resistencia al tracción St 1er Ciclo (Kpa)	Flujo 1 Ciclo (mm)	Resistencia al tracción St 2do Ciclo (Kpa)	Flujo 2 Ciclo (mm)	Resistencia al tracción St 3er Ciclo (Kpa)	Flujo 3 Ciclo (mm)
4	117.57	7.99	88.00	11.16	82.12	10.31	45.85	10.11
4.5	104.47	10.52	83.28	11.95	79.12	14.01	31.83	11.64
5	89.67	10.21	86.24	11.64	80.42	14.79	29.57	10.60
5.5	92.88	9.55	83.99	12.09	81.23	14.44	30.39	10.65
6	88.10	10.68	80.74	12.84	75.56	13.71	32.01	13.40
6.5	76.21	11.80	72.37	13.60	73.48	13.77	33.58	13.71
7.00	70.31	16.17	69.09	14.87	66.47	18.87	30.88	14.80

Tabla 53: porcentaje de pérdida de la tracción mezcla Asfáltica PEN 85/100

%ASF	% Reducc 1 er ciclo	% Reducc 2do ciclo	% Reducc 3er ciclo
4	74.8%	69.8%	39.0%
4.5	79.7%	75.7%	30.5%
5	96.2%	89.7%	33.0%
5.5	90.4%	87.5%	32.7%
6	91.6%	85.8%	36.3%
6.5	95.0%	96.4%	44.1%
7	98.3%	94.5%	43.9%

La reducción de la resistencia en promedio al primer ciclo de congelamiento y deshielo del 89% cumpliendo la norma que nos exige como máxima reducción el 80%; para el segundo ciclo una reducción de hasta el por debajo del 86% exigido en el caso de la proporción de 4% y 4.5% y el resto aun cumple con valores superiores a 80%; finalmente para el tercer ciclo esta se decrementa hasta llegar a un porcentaje promedio de 37%.

Resumen de la evaluación del asfalto modificado en mezcla Asfáltica con cera orgánica Apis Mellifera para contenido óptimo de asfalto de 6% PEN 85/100 para 3 ciclos de congelamiento y deshielo a temperatura de fabricación de 100°C.

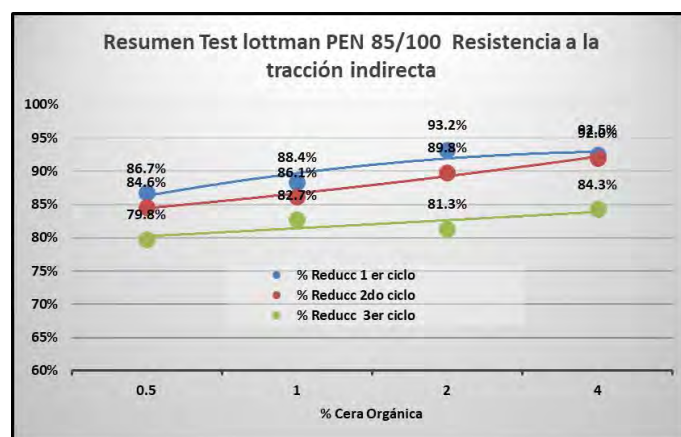


Figura 147:Resumen resistencia a tracción mezcla Asfáltica PEN 85/100

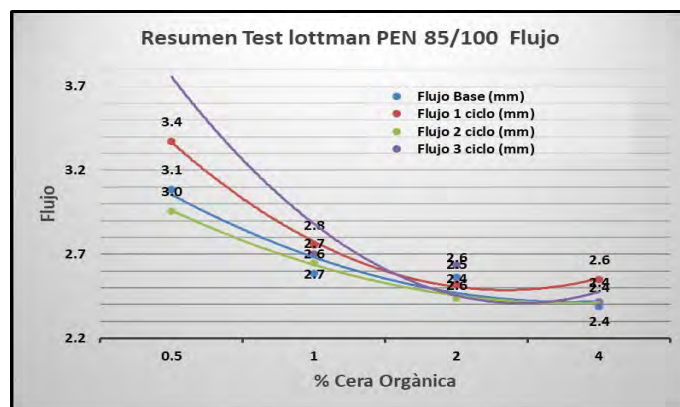


Figura 148: Resumen flujo test lottman

Tabla 54: Resumen test lottman con ciclos de congelamiento y deshielo

Ensayo Lottman Base			Ensayo Lottman 1er Ciclo		Ensayo Lottman 2do Ciclo		Ensayo Lottman 3er Ciclo	
%Cera Orgánica	Resistencia al tracción St Base (Kpa)	Flujo Base (mm)	Resistencia al tracción St 1er Ciclo (Kpa)	Flujo 1 ciclo (mm)	Resistencia al tracción St 2do Ciclo (Kpa)	Flujo 2 ciclo (mm)	Resistencia al tracción St 3er Ciclo (Kpa)	Flujo 3 ciclo (mm)
0.5	65.1	3.1	56.5	3.4	55.1	3.0	51.9	3.8
1	69.4	2.6	61.4	2.8	59.8	2.7	57.4	2.7
2	73.5	2.6	68.5	2.5	66.0	2.4	59.7	2.6
4	78.3	2.4	72.4	2.6	72.0	2.4	66.0	2.4

Tabla 55: Porcentaje de reducción de la resistencia a la tracción

%Cera Orgánica	% Reducc 1 er ciclo	% Reducc 2do ciclo	% Reducc 3er ciclo
0.5	86.7%	84.6%	79.8%
1	88.4%	86.1%	82.7%
2	93.2%	89.8%	81.3%
4	92.5%	92.0%	84.3%

Se obtienen resultados muy por debajo de la muestra control que nos arroja una resistencia a la tracción de 88.10 kpa mientras que con la modificación a 100°C en promedio se obtiene 77.57 kpa, así mismo comparando con la norma INV 450-20 verificando que ninguna cumple la normativa.

Resumen de la evaluación del asfalto modificado en mezcla Asfáltica con cera orgánica Apiss Mellifera para contenido óptimo de asfalto de 6% PEN 85/100 para tres ciclos de congelamiento y deshielo a temperatura de fabricación de 120°C.

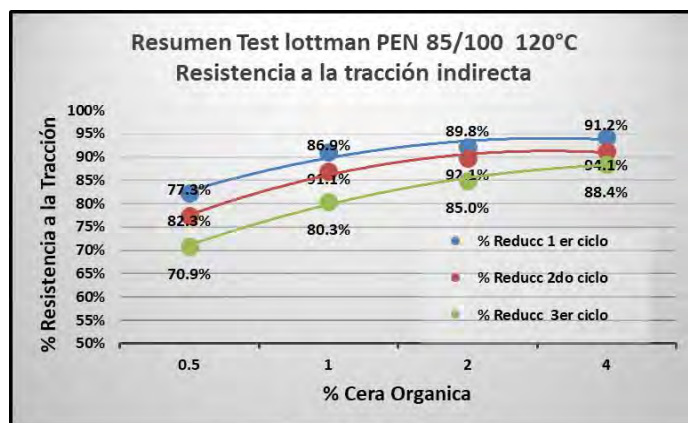


Figura 149: Resumen Resistencia a la tracción 120°C

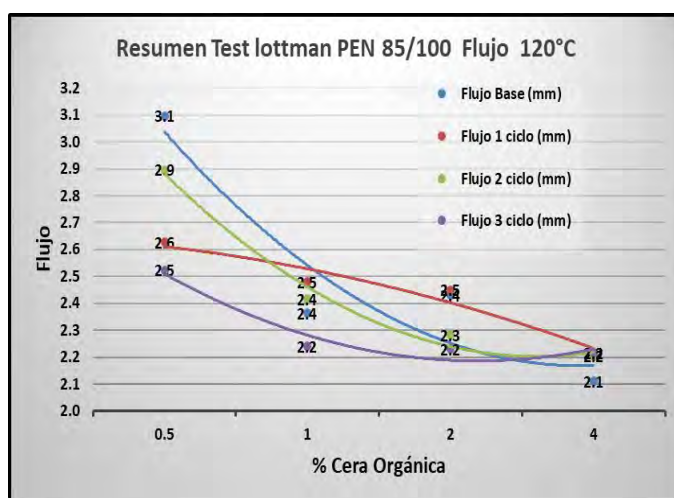


Figura 150: Resumen Flujo 120°C

Tabla 56: Resumen mezcla Asfáltica PEN 85/100 con tres ciclos congelamiento y deshielo

Ensayo Lottman Base			Ensayo Lottman 1er Ciclo		Ensayo Lottman 2do Ciclo		Ensayo Lottman 3er Ciclo	
%Cera Orgánica	Resistencia al tracción St Base (Kpa)	Flujo Base (mm)	Resistencia al tracción St 1er Ciclo (Kpa)	Flujo 1 ciclo (mm)	Resistencia al tracción St 2do Ciclo (Kpa)	Flujo 2 ciclo (mm)	Resistencia al tracción St 3er Ciclo (Kpa)	Flujo 3 ciclo (mm)
0.5	69.9	3.1	57.5	2.6	54.0	2.9	49.6	2.5
1	77.5	2.4	70.7	2.5	67.4	2.4	62.3	2.2
2	71.0	2.4	65.3	2.5	63.7	2.3	60.3	2.2
4	86.2	2.1	81.2	2.2	78.6	2.2	76.2	2.2

Tabla 57: Porcentaje de reducción de resistencia a la tracción

%Cera Orgánica	% Reducc 1er ciclo	% Reducc 2do ciclo	% Reducc 3er ciclo
0.5	82.3%	77.3%	70.9%
1	91.1%	86.9%	80.3%
2	92.1%	89.8%	85.0%
4	94.1%	91.2%	88.4%

Se obtienen resultados muy por debajo de la muestra control que nos arroja una resistencia a la tracción de entre 69.88, 77.55, 70.95 y 86.20 kpa respectivamente por proporción de cera orgánica, siendo la resistencia a tracción control de 88.10 kpa, mientras que en el caso del flujo los valores obtenidos con la modificación a 120°C se obtiene valores de 3.1, 2.4 2.4 y 2.1 mm respectivamente por proporción de asfalto siendo el flujo de la muestra control 2.67mm; verificando que ninguno cumple la exigido.

Resumen de la evaluación del asfalto modificado en mezcla Asfáltica con cera orgánica Apiss Mellifera para contenido óptimo de asfalto de 6% PEN 85/100 para tres ciclos de congelamiento y deshielo a temperatura de fabricación de 130°C.

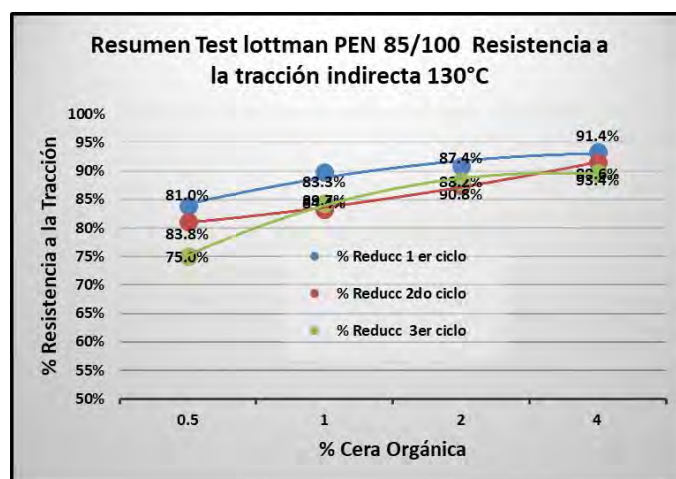


Figura 151: Resumen resistencia a la tracción PEN 85/100 130°C

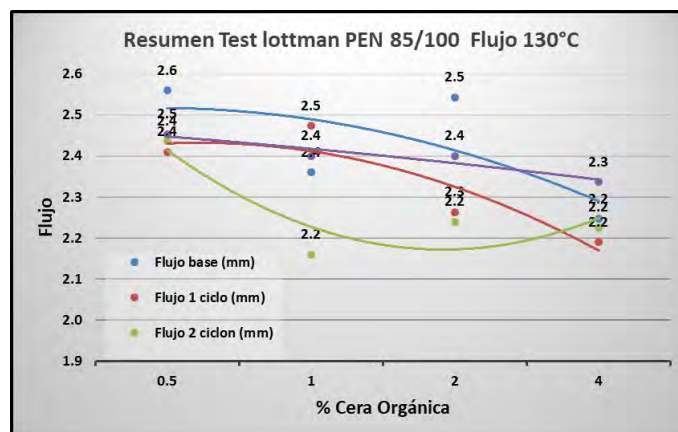


Figura 152: Resumen flujo PEN 85/100 a 130°C

Tabla 58: Resumen test lottman con tres ciclos de congelamiento y deshielo mezcla Asfáltica PEN 85/100 a 130°C

Ensayo Lottman Base			Ensayo Lottman 1er Ciclo		Ensayo Lottman 2do Ciclo		Ensayo Lottman 3er Ciclo	
%Cera Orgánica	Resistencia al tracción St Base (Kpa)	Flujo base (mm)	Resistencia al tracción St 1er Ciclo (Kpa)	Flujo 1 ciclo (mm)	Resistencia al tracción St 2do Ciclo (Kpa)	Flujo 2 ciclon (mm)	Resistencia al tracción St 3er Ciclo (Kpa)	Flujo 3 ciclo (mm)
0.5	78.2	2.6	65.6	2.4	63.4	2.4	58.7	2.5
1	82.4	2.4	74.0	2.5	68.7	2.2	69.6	2.4
2	109.3	2.5	99.2	2.3	95.5	2.2	96.4	2.4
4	122.2	2.2	114.0	2.2	111.7	2.2	109.4	2.3

Tabla 59: Resumen reducción de resistencia a la tracción 130°C

%Cera Orgánica	% Reducc 1 er ciclo	% Reducc 2do ciclo	% Reducc 3er ciclo
0.5	83.8%	81.0%	75.0%
1	89.7%	83.3%	84.4%
2	90.8%	87.4%	88.2%
4	93.4%	91.4%	89.6%

Se obtienen resultados muy por debajo de la muestra control que nos arrojan resistencias a la tracción de entre 78.2, 82.4, 109.3 y 122.2 kpa respectivamente por proporción de cera orgánica, siendo esta resistencia a tracción control de 88.10 Kpa, mientras que en el caso del flujo los valores obtenidos con la modificación a 130°C se obtiene valores de 2.6, 2.4, 2.5 y 2.2 mm respectivamente por proporción de asfalto siendo el flujo de una muestra control 2.67mm; verificando que ninguno de los diseños cumple la normativa.

Resumen de la evaluación de mezclas asfáltica modificada PEN 85/100 SBS con contenido óptimo de asfalto 5% sometido a doble modificación con cera orgánica Apiss Mellifera y acción de tres ciclos de congelamiento y deshielo a temperatura de 150°C.

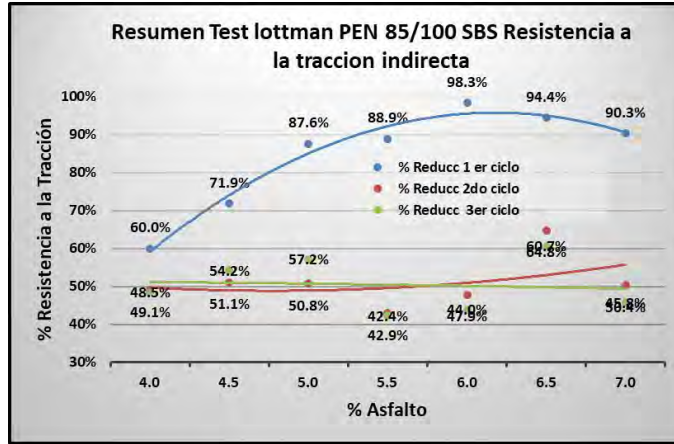


Figura 153: Resumen resistencia a la tracción indirecta PEN 85/100

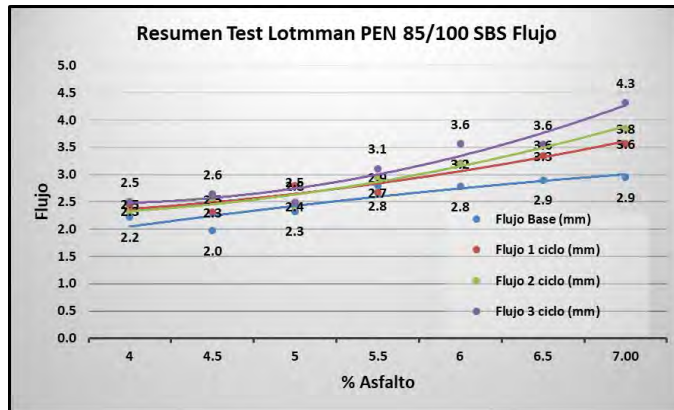


Figura 154: Resumen flujo test lottman PEN 85/100 SBS

Tabla 60: Resumen test lottman mezcla asfáltica PEN 85/100 SBS con tres ciclos de congelamiento y deshielo

Ensayo Lottman Base		Ensayo Lottman 1er Ciclo		Ensayo Lottman 2do Ciclo		Ensayo Lottman 3er Ciclo		
%ASF	Resistencia al tracción St Base (Kpa)	Flujo Base (mm)	Resistencia al tracción St 1er Ciclo (Kpa)	Flujo 1 ciclo (mm)	Resistencia al tracción St 2do Ciclo (Kpa)	Flujo 2 ciclo (mm)	Resistencia al tracción St 3er Ciclo (Kpa)	Flujo 3 ciclo (mm)
4	120.6	2.2	72.4	2.5	59.2	2.3	58.5	2.5
4.5	114.9	2.0	82.6	2.3	58.7	2.5	62.3	2.6
5	106.1	2.3	92.9	2.8	53.9	2.4	60.7	2.5
5.5	97.0	2.8	86.3	2.7	41.7	2.9	41.1	3.1
6	97.1	2.8	95.5	3.2	46.5	3.2	42.7	3.6
6.5	75.1	2.9	70.9	3.3	48.7	3.6	45.6	3.6
7.00	68.8	2.9	62.1	3.6	34.6	3.8	31.5	4.3

Tabla 61: Porcentaje de reducción de resistencia a la tracción indirecta PEN 85/100 SBS

%ASF	% Reducc 1 er ciclo	% Reducc 2do ciclo	% Reducc 3er ciclo
4.0	60.0%	49.1%	48.5%
4.5	71.9%	51.1%	54.2%
5.0	87.6%	50.8%	57.2%
5.5	88.9%	42.9%	42.4%
6.0	98.3%	47.9%	44.0%
6.5	94.4%	64.8%	60.7%
7.0	90.3%	50.4%	45.8%

Se aprecia que a un porcentaje de 5% es el óptimo cumpliendo la normatividad de INV 450-20; así mismo se aprecia que los valores de resistencia a la tracción para proporciones de 4 y 4.5% no cumplen con la normatividad así mismo las proporciones de 5% hasta 7% cumplen con la exigencia del 80%, para el segundo ciclo se reduce la resistencia a la tracción en 51% muy por debajo de exigido, así como en el tercer ciclo cuya reducción del 48% muy por debajo de lo exigido del 80%.

Resumen de la evaluación de mezclas asfáltica modificada PEN 85/100 SBS con contenido óptimo de asfalto 5% sometido a doble modificación con cera orgánica Apiss Mellifera y acción de tres ciclos de congelamiento y deshielo a temperatura de 100°C

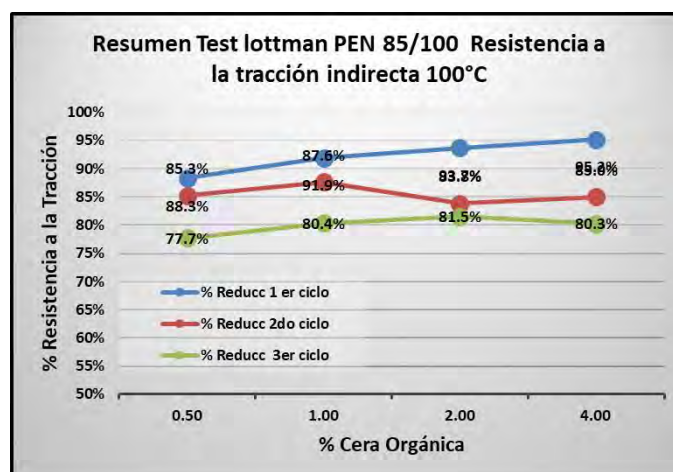


Figura 155: porcentaje de Resistencia a la tracción 100°C

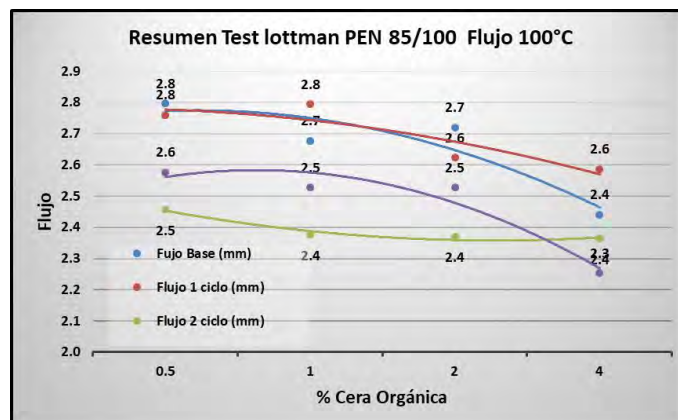


Figura 156: Resumen flujo 100°C

Tabla 62: Resumen test lottman con tres ciclos de congelamiento y deshielo PEN 85/100 SBS.

Ensayo Lottman Base			Ensayo Lottman 1er Ciclo		Ensayo Lottman 2do Ciclo		Ensayo Lottman 3er Ciclo	
%Cera Orgánica	Resistencia al tracción St Base (Kpa)	Fujo Base (mm)	Resistencia al tracción St 1er Ciclo (Kpa)	Flujo 1 ciclo (mm)	Resistencia al tracción St 2do Ciclo (Kpa)	Flujo 2 ciclo (mm)	Resistencia al tracción St 3er Ciclo (Kpa)	Flujo 3 ciclo (mm)
0.5	71.5	2.8	63.2	2.8	61.0	2.5	55.6	2.6
1	76.9	2.7	70.7	2.8	67.4	2.4	61.8	2.5
2	75.9	2.7	71.0	2.6	63.6	2.4	61.8	2.5
4	84.9	2.4	80.8	2.6	72.2	2.4	68.1	2.3

Tabla 63: Porcentaje de reducción resistencia tracción PEN 85/100 SBS.

%Cera Orgánica	% Reducc 1 er ciclo	% Reducc 2do ciclo	% Reducc 3er ciclo
0.50	88.3%	85.3%	77.7%
1.00	91.9%	87.6%	80.4%
2.00	93.7%	83.8%	81.5%
4.00	95.2%	85.0%	80.3%

Los resultados incumplen la normatividad de INV 450-20; se aprecia que los valores de resistencia a la tracción en el primer ciclo se redujeron en un 92% y 85% para el segundo ciclo y 80% para el tercer ciclo cumpliendo con lo exigido normativamente del 80%, sin embargo, no cumple con los valores de muestra control de 106.06 kpa y el flujo se incrementa para primer ciclo en 1.22%, y 10.03% para segundo ciclo y 7.05% para el tercer ciclo.

Resumen de la evaluación de mezclas asfáltica modificada PEN 85/100 SBS con contenido óptimo de asfalto 5% sometido a doble modificación con cera orgánica Apiss Mellifera y acción de tres ciclos de congelamiento y deshielo a temperatura de 120°C

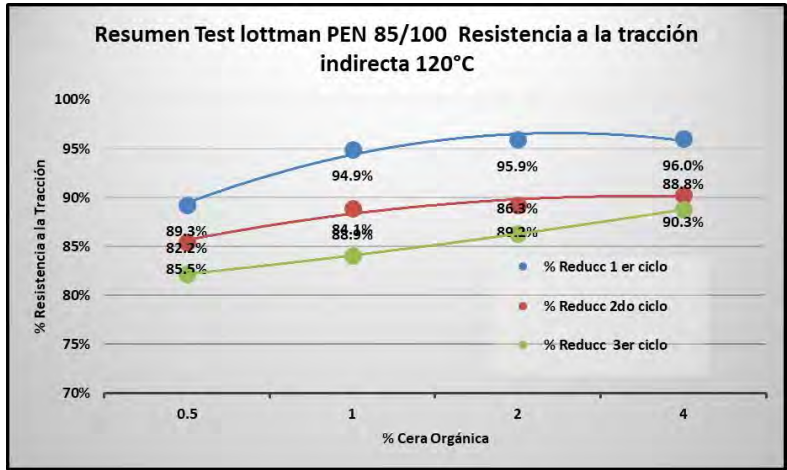


Figura 157: Resumen resistencia a la tracción 120°C

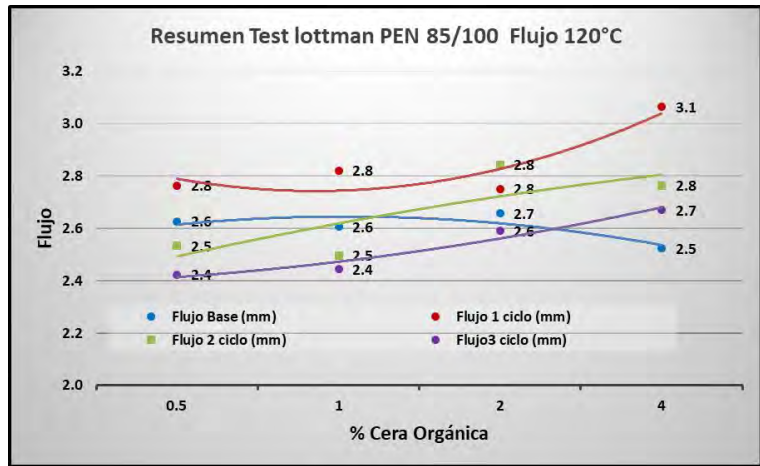


Figura 158: Resumen flujo test lottman 120°C

Tabla 64: Resumen test lottman mezcla asfáltica PEN 85/100 SBS con tres ciclos de congelamiento y deshielo

%Cera Orgánica	Resistencia al tracción St Base (Kpa)	Flujo Base (mm)	Resistencia al tracción St 1er Ciclo (Kpa)	Flujo 1 ciclo (mm)	Resistencia al tracción St 2do Ciclo (Kpa)	Flujo 2 ciclo (mm)	Resistencia al tracción St 3er Ciclo (Kpa)	Flujo3 ciclo (mm)
0.5	85.40	2.63	76.24	2.76	72.99	2.53	70.19	2.42
1	92.17	2.61	87.51	2.82	81.96	2.50	77.52	2.44
2	114.44	2.66	109.79	2.75	102.12	2.84	98.73	2.59
4	118.62	2.52	113.88	3.06	107.10	2.76	105.32	2.67

Tabla 65: Porcentaje de reducción de resistencia a la tracción PEN 85/100 SBS120°C

%Cera Orgánica	% Reducc 1 er ciclo	% Reducc 2do ciclo	% Reducc 3er ciclo
0.50	89.27%	85.46%	82.18%
1.00	94.94%	88.92%	84.10%
2.00	95.93%	89.23%	86.27%
4.00	96.00%	90.29%	88.78%

Los resultados incumplen la normatividad de INV 450-20; se aprecia que los valores de resistencia a la tracción en el primer ciclo se redujeron en un 94% y 88% para el segundo ciclo y 84% para el tercer ciclo cumpliendo con lo exigido normativamente del 80%, sin embargo, no cumple con los valores de muestra control la proporción de 0.5 y 1% mientras que de 2% y 4% son superiores a los valores de 106.06 kpa y el flujo presenta un incremento del 11,6%.

Resumen de la evaluación de mezclas asfáltica modificada PEN 85/100 SBS con contenido óptimo de asfalto 5% sometido a doble modificación con cera orgánica Apiss Mellifera y acción de tres ciclos de congelamiento y deshielo a temperatura de 130°C

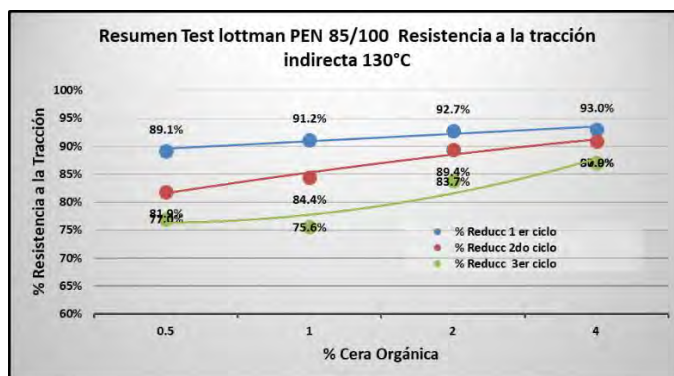


Figura 159: Resumen resistencia a la tracción 130°C

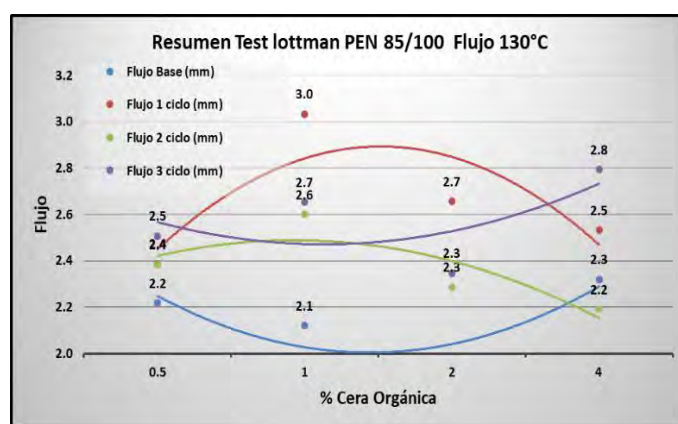


Figura 160: Resumen flujo test lottman 130°C

Tabla 66: Resumen test lottman mezcla asfáltica PEN 85/100 SBS con tres ciclos de congelamiento y deshielo

%Cera Orgánica	Ensayo Lottman Base		Ensayo Lottman 1er Ciclo		Ensayo Lottman 2do Ciclo		Ensayo Lottman 3er Ciclo	
	Resistencia al tracción St Base (Kpa)	Flujo Base (mm)	Resistencia al tracción St 1er Ciclo (Kpa)	Flujo 1 ciclo (mm)	Resistencia al tracción St 2do Ciclo (Kpa)	Flujo 2 ciclo (mm)	Resistencia al tracción St 3er Ciclo (Kpa)	Flujo 3 ciclo (mm)
0.5	96.5	2.2	86.0	2.4	79.0	2.4	74.3	2.5
1	86.0	2.1	78.4	3.0	72.6	2.6	65.0	2.7
2	86.5	1.9	80.2	2.7	77.3	2.3	72.4	2.3
4	106.4	2.3	99.0	2.5	96.7	2.2	92.6	2.8

Tabla 67: Porcentaje de reducción de resistencia a la tracción PEN 85/100 SBS130°C

%Cera Orgánica	% Reducc 1er ciclo	% Reducc 2do ciclo	% Reducc 3er ciclo
0.5	89.1%	81.9%	77.0%
1	91.2%	84.4%	75.6%
2	92.7%	89.4%	83.7%
4	93.0%	90.9%	87.0%

Los resultados incumplen la normatividad de INV 450-20; así mismo se aprecia que los valores de resistencia a la tracción en el primer ciclo se redujeron en un 92% y 87% para el segundo ciclo y 81% para el tercer ciclo cumpliendo con lo exigido normativamente del 80%, sin embargo, no cumple con los valores de muestra control la proporción de 0.5 y 1% mientras que de 2% y 4% son superiores a los valores de 106.06 kpa y el flujo se reduce en un 16.1%.



Discusiones

(Aponte M., Beltrán P. 2013) en su tesis, "Caracterización física y reológica de un ligante asfáltico 60-70 modificado para mezclas asfálticas tibias", presenta las siguientes conclusiones: Los aditivos CECABASE RT® y REDISSETM WMX, Pueden reducir la temperatura de mezcla y compactación además brindar una buena solución, en comparación con la fabricación de mezcla asfáltica en caliente, reducir la contaminación ambiental que produce emisiones de gases; **Discusión:** Efectivamente las ceras orgánicas son capaces de reducir temperatura de fabricación y mezclado en la presente tesis se logró reducir en el caso del asfalto PEN 85/100 de 150°C a 130°C con una proporción de cera orgánica de 1.5% y para el caso del asfalto PEN 85/100 SBS se logró reducir 30°C con una proporción de 1% de cera orgánica.

Macedo F. Johnny Peter (2015). En su investigación "*Avaliação Do Uso de Diferentes Tipos de Cera de Carnaúba como Aditivos para Misturas Mornas*", Concluyo en su investigación que el ligante modificado con 5% (m/m) de la cera tipo 4 (5% CT4) presentó una considerable reducción de 10 °C a la temperatura de mecanizado (TU), probablemente, en función del estado sólido de la cera, que se funde a temperaturas más altas. El ligante puro fue clasificado con el grado de rendimiento PG 64-22, mientras que el ligante modificado (5% CT4) presentó PG 70-28, mostrando mayor potencial para aplicación a temperaturas más bajas que el ligante puro y mayor resistencia a grietas térmicas. Los ensayos mecánicos en mezclas (ligante-agregado) indican que el ligante modificado con el 5% CT4 debe presentar mayor resistencia a la deformación permanente durante la vida de servicio del revestimiento, comparado al ligante no modificado. Los resultados de este estudio muestran que la cera de carnauba cumple con algunos de los requisitos básicos necesarios para su utilización como

aditivo de mezclas asfálticas calientes. **Discusión** para el presente estudio la reducción de la temperatura se efectuó en 20°C y 30°C para asfalto PEN 85/100 y PEN 85/100 SBS modificado; así mismo de la investigación se concluye que la modificación de los asfaltos para ambos casos fue beneficiosa ya que aumentaron la resistencia a la susceptibilidad térmica, deformación y flujo, estos parámetros cumplen con la normativa INVIAS para asfaltos modificados.

Garduño J. (2005) en su Tesis titulado "Control de Calidad de Mezclas Asfálticas Modificadas mediante el Ensayo de Tensión Indirecta", menciona que las diferencias de los ensayos de Resistencia a tensión Indirecta a 5° C y 25° C, demostró que el comportamiento de la mezcla es más elástico a 5°C que, a 25° C, obteniendo diferencias de la Resistencia a Tracción Indirecta un poco superiores al 50%. los valores a 5°C se encuentran en el rango de entre 20 - 30 kg/cm² y a 25°C entre 5 - 10 kg/cm², para los resultados de laboratorio, también se observó que los valores del Resistencia a Tracción Indirecta obtenidos para estas mezclas, son bajos en comparación con los obtenidos por otros investigadores, lo que nos indica que esta mezcla no presenta buenas características de durabilidad y resistencia a la fatiga. **Discusión** la investigación contradice a la investigación de Garduño debido a que la resistencia a la tracción incorporando ceras orgánicas estas si superan los valores de la muestra control realizado con asfalto convencional PEN 85/100 y modificado con SBS.

Valeriano y Catacora (2017) En su tesis "Comportamiento del Diseño de Mezcla Asfáltica Tibia", verifica que agregando zeolita para pavimentar carreteras en la ciudad de Juliaca, llegaron a la siguiente conclusión: Agregar 2% de zeolita natural clinoptilolita en el diseño como filler para una mezcla asfáltica tibia versus una mezcla asfáltica caliente a 140 ° C, resultan que propiedades mecánicas son parcialmente menores, y al mismo tiempo mejores que el diseño de mezcla asfáltica convencional a 100 ° C, la estabilidad de la mezcla tibia es menor que el de mezcla caliente a la temperatura de 140 ° C y en el caso del flujo en la mezcla tibia mayor que el de la mezcla caliente a 140 ° C y es más bajo que el la mezcla caliente a 100 ° C; así mismo en la prueba de resistencia a la compresión simple la mezcla tibia es más baja que la de la mezcla caliente a 140 ° C y es más alta que la resistencia a la compresión simple de la mezcla caliente a 100 ° C. **Discusión** los resultados obtenidos con la presente investigación se aprecia que son superiores en resistencia a la susceptibilidad térmica, estabilidad y flujo para las mezclas tibias en comparación con las muestras control.

Estrada Escalante (2017) expuso la siguiente conclusión en su tesis "Investigación y Análisis de Desempeño de Mezcla Asfáltica Convencional PEN 85/100 plus y Mezcla Asfáltica Modificada y Polímero Tipo SBS PG 70-28": Demostró que el general se asume que "el uso de asfalto convencional en la mezcla se ve afectado por diferentes factores como volumen de tráfico, sobrecarga y factores climáticos y el uso de mezcla asfáltica modificada con polímero SBS nos brindará una mejor respuesta mecánica que la mezcla asfáltica tradicional y mejorará el desempeño de la capa de asfalto y aumentan la vida útil del pavimento "; porque la mezcla de asfalto modificado con polímero SBS PG 70-28 demostró tener un mejor comportamiento mecánico y mucho mayor desempeño que la mezcla asfáltica convencional PEN 85/100 Plus. **Discusión** la presente investigación concuerda con los resultados obtenidos por Estrada ya que efectivamente los resultados de la modificación de los asfaltos convencional y modificado SBS con cera orgánica frente a los del grupo control presentan mejores comportamientos en resistencia a la susceptibilidad térmica, estabilidad y flujo de las mezclas asfálticas.





Conclusiones

- 1.-Al realizar el diseño de mezcla asfáltica con la metodología Marshall utilizando cemento asfáltico PEN 85/100 convencional, cumple los requisitos normativos EG2013 con un contenido óptimo de 6% y en el caso de utilizar cemento asfáltico PEN 85/100 SBS modificado, cumple los requisitos normativos exigidos por la norma INVIAS INV 450-20 con un contenido óptimo de 5%
- 2.-Al realizar la modificación de la mezclas asfálticas con temperatura de 100°C, 120°C y 130°C e incorporación de cera orgánica Apiss Mellifera en 0.5%, 1%, 2% y 4%; como primer caso con un contenido óptimo de 6% de cemento asfáltico PEN 85/100 convencional se verifica que con un contenido del 2% de cera orgánica y una temperatura de fabricación de 130°C, cumple con los requisitos INV 450-10 y en el caso de la mezcla asfáltica con un contenido óptimo de 5% de cemento asfáltico PEN 85/100 SBS modificado se verifica que con un contenido del 2% de cera orgánica a la temperatura de 120°C cumple con los requisitos para mezclas asfálticas, según norma INV 450-10.
- 3.-En la evaluación por el ensayo de test de lottman se aprecia que la reducción de la tracción indirecta con ciclo de congelamiento y deshielo en la mezcla convencional con asfalto PEN 85/100 se obtienen resultados al primer ciclo un porcentaje de reducción de hasta al 94% y segundo ciclo 90% en promedio, cumpliendo con lo exigido del 80% sin embargo al tercer ciclo este cae bruscamente al 36.3%.
- 4.-En la evaluación por el ensayo de test de lottman se aprecia que la reducción de la tracción indirecta con ciclos de congelamiento y deshielo en la mezcla con asfalto PEN 85/100 modificada con SBS se obtienen resultados al primer ciclo una reducción de hasta el 92% cumpliendo con lo exigido del 80% al segundo ciclo se aprecia una reducción del 51% en

promedio y para el tercer ciclo un porcentaje del 50%, estos últimos no cumple con la norma INV 450-10.

- 5.-En la evaluación con test de lottman se aprecia que la reducción de la tracción indirecta con ciclos de congelamiento y deshielo en la mezcla convencional con asfalto PEN 85/100 con porcentaje de cera orgánica de 0.5%, 1%, 2% y 4% a temperaturas de 100°C, 120°C y, 130°C, se aprecia que la reducción de la resistencia a la tracción indirecta para todas las proporciones presentan valores similares obteniéndose para los primeros ciclos una de reducción de hasta 90%, para el segundo ciclo al 87% y para el tercer ciclo al 82%, en los tres casos; por lo que todas cumplen con lo exigido INV 450-10.
- 6.-En la evaluación con test de lottman se aprecia que la reducción de la tracción indirecta con ciclos de congelamiento y deshielo en la mezcla convencional con asfalto PEN 85/100 modificado con SBS con porcentaje de cera orgánica de 0.5%, 1%, 2% y 4% a temperaturas de 100°C, 120°C y, 130°C, se aprecia que la reducción de la resistencia a la tracción indirecta para todas las proporciones presentan valores similares obteniéndose para los primeros ciclos una de reducción de hasta 93%, para el segundo ciclo de 87% y para el tercer ciclo de 82%, en los tres casos; por lo que todas cumplen con lo exigido INV 450-10.
- 7.-En la evaluación de la mezcla por el ensayo de UCL o Cántabro, con proporciones de asfalto de 4%, 4.5%, 5%, 5.5%, 6%, 6.5% y 7% se aprecia que la pérdida de resistencia es mayor en la mezcla con asfalto PEN 85/100 modificado con SBS con valores de 35.82% con 4% hasta 7.38% con 7% en cambio la mezcla asfáltica convencional PEN 85/100 presenta pérdida de 19.81% con 4% y 3.53 con 7%.
- 8.-En la evaluación de la mezcla Asfáltica por el ensayo de UCL o Cántabro, con proporciones de cera orgánica 0.5%, 1%, 2%, y 4% y temperaturas de 100°C, 120°C y 130°C se aprecia que la pérdida de resistencia para temperatura de 100°C. 120°C y 130°C son similares con pérdida de 10.1%, en cambio a una temperatura de 130° se reducen a 7.58%.
- 9.-Con la evaluación realizada en base a la normatividad peruana EG2013 y colombiana INVIAS INV 450-10, los ensayos de UCL Cántabro y test de lottman se concluye que efectivamente la incorporación de la cera orgánica influye significativamente en las propiedades mecánicas de flujo y estabilidad de una mezcla Asfáltica caliente; así mismo está por tener

una viscosidad menor que la del asfalto reduce la temperatura de fabricación convirtiéndola en una mezcla tibia.





Recomendaciones

- 1.- Se recomienda proseguir la investigación implementando el análisis por desempeño para la mezcla asfáltica PEN 85/100 con un contenido óptimo de asfalto de 6%.
- 2.- Se recomienda proseguir la investigación implementando el análisis por desempeño para la mezcla asfáltica PEN 85/100 SBS con un contenido óptimo de asfalto de 5%.





Referencias

- Aponte Cuitiva, M. F. y Beltrán Vásquez, P. A. (2013). *Caracterización física y reológica de un ligante asfáltico 60-70 modificado para mezclas asfálticas tibias* [Proyecto de Grado, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá]. repository.javeriana.edu.co.
<https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/11121>
- Asfalto Perú. (2019). *Tipos de asfalto comercializados*. <https://www.asfaltoperu.com/tipos-de-asfalto-en-el-peru/>
- Bisso Fernández, R. E. (2016, 30 de noviembre). *Especificaciones de asfaltos modificados con polímeros: aspectos reológicos y evolución al superpave modificado*. Asociación Peruana de Carreteras. XVIII Congreso Nacional de Asfalto, Lima. <http://ligante-asfaltico.blogspot.com/2016/12/23-bench-mark-aplicacion-de-la-reologia.html>
- D'Angelo, J., Harm, E., Bartoszek, J., Baumgardner, G., Corrigan, M., Cowser, J., Harman, T., Jamshidi, M., Jones, W., Newcomb, D., Prowell, B., Sines, R., Yeaton, B. y American Trade Initiatives, Inc. (2008, 1 de febrero). *Warm-mix asphalt : European practice* (núm. FHWA-PL-08-007). United States. Federal Highway Administration. Office of International Programs. <https://rosap.nhtl.bts.gov/view/dot/772>
- Estrada Escalante, V. R. (2017). *Estudio y análisis de desempeño de mezcla asfáltica convencional PEN 85/100 plus y mezcla asfáltica modificada con polímero tipo SBS PG 70-28"* [Tesis, Universidad Andina del Cusco, Cusco]. repositorio.uandina.edu.pe.
<https://repositorio.uandina.edu.pe/handle/20.500.12557/1057>
- Feitosa, J. P. M. (2015). *Avaliação do uso de diferentes tipos de cera de carnaúba como aditivo para misturas mornas* [Tesis doctoral, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza]. repositorio.ufc.br. <http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/16942>
- Garduño Pérez, J. (2005). *Control de calidad de mezclas asfálticas modificadas mediante el ensayo de tensión indirecta-edición única* [Tesis de maestría, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Monterrey]. repositorio.tec.mx.
<https://repositorio.tec.mx/handle/11285/567148>
- Garnica Anguas, P., Delgado Alamilla, H., Gómez López, J. A. y Alonso Romero, Sergio, Alarcón Orta, Humberto Alonso (2004). Aspectos del diseño volumétrico de mezclas asfálticas. *Publicación Técnica*(246).
<https://www.imt.mx/archivos/publicaciones/publicaciontecnica/pt246.pdf>

- Gil Redondo, S., Amor, J. I., Felipe, J., Costa, A., Cortes, Christian, Páez, Antonio, Valor, F. y Potti, J. J. (2009, 26 de marzo). *Estudio de los aditivos que permiten reducir la viscosidad del ligante a elevadas temperaturas*. ASEFMA. IV Jornada Nacional ASEFMA 2009, Madrid. https://static.ferrovial.com/wp-content/uploads/2019/12/13131657/aditivos_reductores.pdf
- Hermida, É. (2011). *Polímeros*. Ministerio de Educación. Instituto Nacional de Educación Tecnológica. Colección Encuentro Inet. http://www.inet.edu.ar/wp-content/uploads/2012/11/09_Polimeros.pdf
- Herrera Muñoz, D. (2018a). *Ceras naturales: vegetales y animales*. <https://siwaxgroup.com/wp-content/uploads/2018/07/ceras-naturales.pdf>
- Herrera Muñoz, D. (2018b). *Historia de las Ceras y sus aplicaciones*. <https://siwaxgroup.com/wp-content/uploads/2018/07/historia-de-las-ceras-y-sus-aplicaciones.pdf>
- Maxil Coyopotl, R. y Salinas Hernández, M. A. (2013). *Ventajas y desventajas del uso de polímeros en el asfalto* [Tesis de Licenciatura, Universidad de las Américas Puebla, Puebla]. [catarina.udlap.mx](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lic/maxil_c_r/portada.html). http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lic/maxil_c_r/portada.html
- Ministerio de Transporte y Comunicaciones. (2016). *Manual de Ensayo de Materiales*. https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/documentos/manuales/Manual%20Ensayo%20de%20Materiales.pdf
- Ministerio de Transporte y Comunicaciones. Provias Nacional. (2019). *Proyectos de inversión: solución definitiva: Ayuda memoria 2019, Región Junín*. Ministerio de Transporte y Comunicaciones. Provias Nacional. <https://www.pvn.gob.pe/wp-content/uploads/2019/04/am-junin-mar-2019-1.pdf>
- Rojas Avellaneda, D. A., Quintero Rangel, L. S., Ramírez Caballero, G. E. y Sanabria, L. E. (2017). Evaluación de un aditivo polimérico sintetizado a partir de glicerol para la producción de mezclas asfálticas tibias en Colombia. *Carreteras: Revista Técnica De La Asociación Española De La Carretera*(211), 45–53. https://files.isec.pt/documentos/servicios/biblio/carreteras_resumos/211_evaluacion-de-un-aditivo-polimerico-sintetizado-a-partir-de-glicerol-para-la-produccion-de-mezclas-asfalticas-tibias-en-colombia.pdf
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. (2018). *Indicadores*. <https://ideseq.senamhi.gob.pe/indicadores/app/climandes/ic.jsp>
- Valeriano Turpo, W. y Catacora Mendoza, A. (2017). *Comportamiento del diseño de mezcla asfáltica tibia, con adición de zeolita para la pavimentación de la ciudad de Juliaca* [Tesis, Universidad Nacional del Altiplano, Puno]. repositorio.unap.edu.pe. <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/4985>
- Weather Spark. (s.a.). *El clima y el tiempo promedio en todo el año en Huancayo*. <https://es.weatherspark.com/y/22257/Clima-promedio-en-Huancayo-Per%C3%BA-durante-todo-el-a%C3%B1o>