



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA
CONSTRUCCIÓN**

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

AUTOR: RODRÍGUEZ CEPEDA, JORGE ANTONIO

**TEMA: ANÁLISIS DE DESEMPEÑO DE MEZCLAS
ASFÁLTICAS TIBIAS**

DIRECTOR: ING. BONIFAZ GARCÍA, HUGO FABIÁN

CODIRECTOR: MSc. ROJAS RUALES, FRANCO HERNÁN

SANGOLQUI, MAYO 2014

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por el Sr. RODRÍGUEZ CEPEDA, JORGE ANTONIO, como requerimiento parcial a la obtención del título de Ingeniero Civil.

19 de mayo de 2014

Ing. Bonifaz García, Hugo
Director

MSc. Rojas Ruales, Franco
Codirector

REVISADO POR

Dr. Caiza Sánchez, Pablo
Director CIC

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS – ESPE

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

RODRÍGUEZ CEPEDA, JORGE ANTONIO

DECLARO QUE:

El proyecto de grado denominado: **“ANÁLISIS DE DESEMPEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS TIBIAS”**, ha sido desarrollado con base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros, conforme a las referencias bibliográficas insertadas en el texto, cuyas fuentes se incorporan en las referencias en el final del documento escrito. Consecuentemente este trabajo es de mi autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico del proyecto de grado en mención.

Sangolquí, 19 de mayo de 2014.

EL AUTOR

RODRÍGUEZ CEPEDA, JORGE ANTONIO

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS – ESPE

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

AUTORIZACIÓN

Yo. RODRÍGUEZ CEPEDA, JORGE ANTONIO

Autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE la publicación, en la biblioteca virtual de la institución el proyecto titulado: “**ANÁLISIS DE DESEMPEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS TIBIAS**”, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y autoría.

Sangolquí, 19 de mayo de 2014.

EL AUTOR

RODRÍGUEZ CEPEDA, JORGE ANTONIO

DEDICATORIA

A Dios: Por todas las bendiciones y salud recibidas.

A mis padres: Luz Cepeda y Jorge Rodríguez, por todo su esfuerzo y colaboración en todos los aspectos para culminar con éxito esta etapa.

A mis hermanas: Enmita y Dome, por su amor y apoyo.

A Vale Larco: por su apoyo incondicional, ayuda y su amor.

A toda mi familia y amigos que me han brindado su ayuda en todo momento.

Y en especial todo mi esfuerzo y dedicación lo dedico en nombre de Segundo Rodríguez (+).

Jorge A Rodríguez C.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mi Director de Tesis Ing. Hugo Bonifaz y a mi Codirector Ing. Franco Rojas MSc, personas muy importantes en la vida universitaria por sus conocimientos y ayuda para poder culminar mi proyecto de tesis con los resultados esperados, además al departamento de Ciencias de la Tierra y la Construcción por su dedicación y la entrega con el afán de ayudar y formar profesionales de excelencia. Sin duda debo agradecer a todos los profesores que durante estos años de formación profesional han sabido inculcar valores y conocimientos que nos sirvan para nuestro futuro profesional.

Agradezco a la Constructora Naranjo en especial al Ing. Marco Naranjo, mediante el cual he podido realizar los muestreos de asfalto y agregados.

A la empresa EPACEM S.A., especialmente a Roberto Reich mediante el cual he podido obtener el Aceite Crudo de Palma necesario para la realización de la Tesis.

Jorge A Rodríguez C.

ÍNDICE DEL CONTENIDO

Capítulo 1 : Antecedentes y justificación del proyecto	1
1.1. Introducción	1
1.2. Antecedentes.....	5
1.3. Planteamiento del problema	7
1.4. Justificación	13
1.5. Objetivos.....	15
1.5.1. Objetivo General	15
1.5.2. Objetivos específicos	15
Capítulo 2 Marco Teórico	17
2.1. Introducción.....	17
2.2. El Asfalto.....	18
2.2.1. Definición.....	18
2.2.2. Propiedades físicas del asfalto	18
2.2.2.1. Adhesión y cohesión	19
2.2.2.2. Susceptibilidad térmica	20
2.2.2.3. Durabilidad.....	22
2.2.3. Propiedades químicas del asfalto.....	24
2.3. Viscosidad.....	27
2.3.1. Conceptos de Viscosidad	28
2.3.2. Tipos de fluidos	29
2.3.2.1. Fluidos newtonianos	30
2.3.2.2. Fluidos no newtonianos	31
2.3.2.3. Fluidos viscoelásticos	31

2.3.3. Asfalto modificado	31
2.4. Las Mezclas Asfálticas.....	33
2.4.1. Clasificación de las Mezclas Asfálticas (Padilla, 2008).....	34
2.4.1.1. Por fracciones de agregado empleado	34
2.4.1.2. Por la temperatura de puesta en obra.....	35
2.4.1.3. Por la proporción de vacíos en la mezcla asfáltica	36
2.4.1.4. Por el tamaño máximo del agregado	37
2.4.1.5. Por la estructura del agregado.....	37
2.4.1.6. Por la granulometría.....	37
2.5. Las Mezclas Asfálticas Tibias	38
2.5.1. Definición	38
2.5.2. Estado del Arte	38
2.5.3. Antecedentes históricos del trabajo con mezclas tibias (HMAT, 2008)	42
2.5.4. Beneficios de las mezclas tibias	48
2.5.4.1. Consumo de energía.....	48
2.5.4.2. Emisiones	48
2.5.4.3. Reducción de la viscosidad.....	50
2.5.4.4. Aspectos técnicos	52
2.5.5. Desventajas de las mezclas tibias	53
2.5.6. Balance costo beneficios	54
2.5.7. La temperatura como factor que afecta a la durabilidad del asfalto (Bolzan, 2010)	54
2.5.7.1. Evaporación de los componentes volátiles	55
2.5.8. Métodos para producir mezclas tibias	56
2.5.8.1. Aditivos Orgánicos(Uso de ceras).....	57
2.5.8.2. Aditivos Químicos	60

2.5.8.3. Procesos de espumación.....	64
2.6. Fuentes principales de contaminación ambiental (RITL, 2013).....	67
2.6.1. Contaminantes propios del proceso	67
2.6.2. Contaminantes por combustión	68
2.6.3. Contaminantes por almacenamiento	69
2.7. Impacto ambiental de una planta de asfalto (Pacheco, Impacto ambiental de las plantas de asfalto, 2008).....	69
2.8. Estudios de los beneficios ambientales de las mezclas tibias	71
2.8.1. Exposición laboral a temperaturas menores de producción realizado por Shell Bitumen en Florencia Italia. (Lecomte, 2008).....	71
2.8.2. Estudios realizados por CECA ARKEMA GROUP en Argentina (Ceca, 2012).....	87
2.9. El crudo de palma	89
2.9.1. Historia	89
2.9.2. La planta.....	89
2.9.3. La Palma Africana en el Ecuador	90
2.9.4. El Aceite de Crudo de Palma (ACP)	92
2.9.5. Composición del ACP.....	92
2.9.6. Características del ACP.....	93
2.9.7. Productores de aceite de palma en el Ecuador	96
2.9.8. Usos	96
2.9.9. Los Ácidos Grasos	97
2.9.10. El Aceite de Palma como modificador de la viscosidad	97
Capítulo 3 : Metodología.....	99
3.1. Tipo de estudio.....	99
3.2. Fuentes e instrumentos de recolección de datos	99
3.3. Proceso metodológico.....	100

3.3.1.	Meta 1: Asfalto modificado	100
3.3.2.	Meta 2: Diseño Marshall	102
3.3.3.	Meta 3: Comparación del desempeño	102
3.4.	Procesamiento de datos	102
3.5.	Factibilidad.....	103
Capítulo 4 : Trabajo de laboratorio.....		104
4.1.	Generalidades.....	104
4.2.	Caracterización del asfalto base y el modificado con aceite crudo de palma	105
4.2.1.	Muestreo del Cemento Asfáltico AC-20 (ASTM D-140).....	106
4.2.2.	Muestreo del Aceite Crudo de Palma (INEN-5)	109
4.2.3.	Características del ACP.....	111
4.2.4.	Dosificación en el laboratorio del ACP.....	112
4.2.5.	Ensayos realizados	114
4.2.5.1.	Penetración (ASTM D-5).....	114
4.2.5.2.	Punto de reblandecimiento (ASTM D-36)	117
4.2.5.3.	Ductilidad (ASTM D 113)	120
4.2.5.4.	Ensayo de viscosidad rotacional (ASTM D-4402).....	123
4.2.5.5.	Punto de inflamación Cleveland (ASTM D-92).....	126
4.2.5.6.	Densidad relativa (ASTM D-70)	129
4.2.6.	Análisis de resultados.....	132
4.2.6.1.	Resultados para Asfalto AC-20.....	133
4.2.6.2.	Resultados de los ensayos de caracterización del asfalto modificado para los diferentes porcentajes utilizados de ACP	136
4.2.6.3.	Conclusión	143
4.2.7.	Ensayos de viscosidad en Asfalto AC-20 y modificado con ACP	144

4.2.7.1.	Curvas viscosidad vs temperatura	145
4.2.8.	Temperaturas de mezcla y compactación	148
4.2.9.	Porcentaje de aceite de palma óptimo para realizar briquetas por el método Marshall	149
4.3.	Caracterización de los agregados.....	150
4.3.1.	Muestreo de agregados (ASTM D-75).....	150
4.3.2.	Abrasión de agregado grueso (ASTM C-131)	153
4.3.3.	Equivalente de arena (ASTM D-2419).....	157
4.3.4.	Peso específico y absorción de agregado grueso (ASTM D-127).....	160
4.3.5.	Peso específico y absorción de finos (ASTM D-128)	166
4.3.6.	Límites de consistencia (ASTM D-427)	173
4.3.7.	Análisis granulométrico (ASTM C-117).....	175
4.3.8.	Análisis de resultados.....	178

Capítulo 5 : Diseño Marshall, Mezcla Asfáltica Caliente y Mezcla Asfáltica Tibia	180	
5.1.	Generalidades.....	180
5.2.	Mezcla de agregados.....	180
5.3.	Características de la mezcla asfáltica	182
5.3.1.	Uso de la mezcla en la estructura del pavimento	182
5.3.2.	Tipo de mezcla asfáltica	182
5.3.3.	Estabilización Granulométrica	185
5.3.3.1.	Tamaño Máximo Nominal, a utilizar en la estabilización granulométrica.....	186
5.3.3.2.	Estabilización Muestra de prueba 1	187
5.3.3.3.	Pruebas de granulometrías	189
5.3.3.4.	Granulometría de máxima densidad	190

5.3.3.5. Cálculo de los porcentajes retenidos en cada tamiz para realizar briquetas.....	194
5.4. Características de los materiales	196
5.4.1. Porcentaje teórico óptimo de asfalto para briquetas.....	196
5.4.2. Gravedad específica bulk de agregados (Gsb)	197
5.4.3. Gravedad específica aparente de agregados (Gsa).....	198
5.4.4. Gravedad específica efectiva de agregados (Gse).....	199
5.5. Método Marshall (ASTM D-1559).....	200
5.5.1. Características de la mezcla asfáltica.....	200
5.5.1.1. Densidad.....	200
5.5.1.2. Vacíos de Aire.....	201
5.5.1.3. Vacíos en el Agregado Mineral (VAM).....	202
5.5.1.4. Vacíos llenos de asfalto (VAF).....	202
5.5.1.5. Contenido de Asfalto (Pb).....	204
5.5.2. Equipo	204
5.5.3. Número de briquetas	205
5.5.4. Preparación de agregados	205
5.5.5. Temperatura de mezclado y compactación	205
5.5.6. Preparación de las mezclas.....	206
5.5.7. Compactación de las Briquetas	207
5.5.7.1. Reporte fotográfico de las temperaturas de la mezcla y compactación convencional	209
5.5.7.2. Reporte fotográfico de las temperaturas de mezcla y compactación modificada con ACP.....	210
5.5.8. Ensayos del método	211
5.5.8.1. Densidad bulk de las briquetas compactadas (ASTM D-2726) (Gmb)	211

5.5.8.2.	Determinación de estabilidad y flujo (ASTM D-1559)	212
5.5.8.3.	Gravedad específica teórica máxima (Gmm). Método Corelock (ASTM D-6857)	214
5.5.9.	Proceso de Cálculo. Método Marshall (Gamica, 2004).....	219
5.5.9.1.	Gravedad específica efectiva de agregados (Gse)	220
5.5.9.2.	Porcentaje de asfalto absorbido (Pba)	220
5.5.9.3.	Porcentaje de asfalto efectivo (Pbe)	221
5.5.9.4.	Gravedad específica máxima calculada (Gmm calculado) ..	221
5.5.9.5.	Porcentaje de vacíos (Va)	221
5.5.9.6.	Porcentaje de vacíos de agregado mineral (VAM).....	222
5.5.9.7.	Porcentaje de vacíos llenos de asfalto (VAF)	222
5.5.10.	Resultados de los ensayos y cálculos.....	222
5.5.10.1.	Resultados del Método Marshall.....	224
	Mezcla Asfáltica Tibia al 1% de ACP (MAT-1%).....	227
5.5.11.	Curvas de diseño	228
5.5.11.1.	Mezcla Asfáltica Caliente (MAC)	230
5.5.11.2.	Mezcla Asfáltica Tibia al 1% de ACP (MAT-1%).....	231
5.5.11.3.	Mezcla Asfáltica Tibia al 2% de ACP (MAT-2%).....	232
	Capítulo 6 : Análisis de resultados	233
6.1.	Asfalto	233
6.1.1.	Análisis de ensayos de viscosidad.	233
6.1.1.1.	Variación de la viscosidad.....	233
6.1.1.2.	Variación de la temperatura de mezcla y compactación	237
6.1.2.	Análisis del control de calidad para asfalto AC-20 y modificado con ACP.	242
6.1.2.1.	Penetración.....	242

6.1.2.2.	Reblandecimiento	244
6.1.2.3.	Índice de Penetración	245
6.1.2.4.	Ductilidad	247
6.1.2.5.	Inflamación y combustión.....	248
6.1.2.6.	Densidad Relativa.....	250
6.2.	Diseño Marshall	251
6.2.1.	Análisis del desempeño de la MAC y MAT-1%, MAT-2%.....	251
Capítulo 7 : Conclusiones y Recomendaciones		258
7.1.	Conclusiones.....	258
7.1.1.	Asfalto modificado	258
	<i>Viscosidad</i>	258
	<i>Control de calidad de asfalto</i>	259
7.1.2.	Diseño Marshall.....	260
7.2.	Recomendaciones	262
7.3.	Referencias bibliográficas	264
ANEXOS	¡Error! Marcador no definido.	269

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Clasificación de mezclas asfálticas por temperatura.....	36
Tabla 2: Variedad de producción y tipos de aditivos para mezclas tibias	41
Tabla 3: Variedad de producción y tipos de aditivos para mezclas tibias, (Continuación).....	42
Tabla 4: Emisiones de vapor de agua y material particulado en la etapa de secado.	67

Tabla 5: Consumo de combustible y emisiones por tonelada de producto en calderas.	69
Tabla 6: Valores de exposición	84
Tabla 7: Datos de comparación entre mezclas tibias y en caliente.....	88
Tabla 8: Medición de emisiones en fabricación y colocación.....	88
Tabla 9: Características físico-químicas del ACP.	95
Tabla 10: Características Químicas del Aceite Crudo de Palma (Guineensis).....	111
Tabla 11: Pesos de ACP en función del % añadido.....	113
Tabla 12: Resumen de los resultados del ensayo de penetración.....	117
Tabla 13: Resumen de resultados para ensayo de reblandecimiento	120
Tabla 14: Resumen de resultados del ensayo de ductilidad.....	123
Tabla 15: Resumen de los resultados de ensayos de inflamación y combustión.....	129
Tabla 16: Resumen de resultados del ensayo de densidad relativa del asfalto.....	132
Tabla 17: Valores de referencia para asfalto AC-20 de penetración 60-70.....	133
Tabla 18: Resumen de resultados de ensayos de caracterización del asfalto AC-20.....	135
Tabla 19: Resultados de los ensayos de penetración para los diferentes porcentajes de ACP.	136
Tabla 20: Resultados de los ensayos de reblandecimiento	138
Tabla 21: Resultados de los ensayos de penetración y reblandecimiento y valores del Índice de Penetración (IP)	140
Tabla 22: Resultados de los ensayos de ductilidad	142
Tabla 23: Valoración de los parámetros en función del % de ACP	143
Tabla 24: Resultados de los ensayos de viscosidad a diferentes temperaturas y porcentajes de ACP.	145
Tabla 25: Rango de temperaturas de mezcla y su promedio para cada tipo de modificación.	149

Tabla 26: Rango de temperaturas de compactación y su promedio para cada tipo de modificación.	149
Tabla 27: Granulometría de la muestra a ser ensayada tipo B.....	154
Tabla 28: Caracterización del agregado grueso	179
Tabla 29: Caracterización del agregado fino.....	179
Tabla 30: Mezcla de agregados.....	181
Tabla 31: Granulometría para mezclas de tipo densas.....	184
Tabla 32: Estabilización Muestra 1 de agregados	188
Tabla 33: Pruebas de los tipos de granulometría.....	189
Tabla 34: Cálculo de la granulometría de máxima densidad	192
Tabla 35: Granulometría de máxima densidad a utilizarse para el diseño de la mezcla asfáltica.....	193
Tabla 36: Pesos de los agregados en función de su tamaño para cada briqueta.....	195
Tabla 37: Resumen de los pesos específicos de los agregados	198
Tabla 38: Resultados de pesos específicos aparente de agregados.....	199
Tabla 39: Temperaturas de mezcla.	206
Tabla 40: Temperaturas de compactación.....	206
Tabla 41: Resultados de la Gmm para la mezcla convencional.....	216
Tabla 42: Promedio de los resultados de Gmm para los diferentes porcentajes de asfalto.	217
Tabla 43: Resultados de la Gmm para el 1% de ACP.	218
Tabla 44: Promedio de los resultados de Gmm para los diferentes porcentajes de asfalto.	218
Tabla 45: Resultados de Gmm para el 2% de ACP.	219
Tabla 46: Promedio de los resultados para cada porcentaje de asfalto.....	219
Tabla 47: Características de los materiales para los cálculos del método	223
Tabla 48: Resultados método Marshall (MAC)	224
Tabla 49: Resultados método Marshall (MAT-1%)	225
Tabla 50: Resultados método Marshall (MAT-2%)	226
Tabla 51: Resultados del método para una mezcla MAC.	227

Tabla 52: Resultados del método para una mezcla MAT-1%	227
Tabla 53: Resultados del método para una mezcla MAT-2%	228
Tabla 54: Criterios Marshall	229
Tabla 55: Variación de la viscosidad a 80 °C.....	234
Tabla 56: Variación de la viscosidad a 120 °C.....	234
Tabla 57: Variación de la viscosidad a 160°C.....	234
Tabla 58: Variación de las temperaturas de mezcla en función del contenido de ACP.....	237
Tabla 59: Variación de las temperaturas de compactación en función del contenido de ACP.....	238
Tabla 60: Penetraciones en función del contenido de ACP.....	243
Tabla 61: Punto de reblandecimiento en función del contenido de ACP.	244
Tabla 62: Resultados del cálculo del índice de Penetración.....	246
Tabla 63: Resultados de los ensayos de ductilidad en función del contenido de ACP.....	247
Tabla 64: Resultados del punto de inflamación y combustión en función del contenido de ACP.....	249
Tabla 65: Resultados de la densidad para los diferentes contenidos de ACP.....	250
Tabla 66: Resultados del desempeño de los 3 tipos de mezclas.....	252
Tabla 67: Comparación de los parámetros realizados en el asfalto y sus diferentes contenidos de ACP.....	259
Tabla 68: Parámetros de evaluación del desempeño de las mezclas evaluadas.....	260

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura. 1 : Concepto de desarrollo sostenible.....	3
Figura. 2: Colocación de tipos de mezclas asfálticas.....	11
Figura. 3: Acción de desenvuelta de agua.....	20
Figura. 4: Influencia de la temperatura en el comportamiento del asfalto.	21
Figura. 5: Composición química del asfalto	25

Figura. 6: Esquema de la distribución de los componentes en el asfalto.....	27
Figura. 7: Se puede apreciar la curva de fluidez para representar la viscosidad dinámica y aparente	29
Figura. 8: Tipos de Fluidos.....	30
Figura. 9: Rangos de temperatura para producción de mezclas asfálticas.....	35
Figura. 10: Reducción de las emisiones de gases en la producción de la mezcla.....	49
Figura. 11: Temperatura de fabricación, consumo de combustible y cantidad de emisiones de gases efecto invernadero.....	50
Figura. 12: Curva Viscosidad vs Temperatura del asfalto convencional y tibio.....	51
Figura. 13: Comparación de la descarga de mezcla en la planta de asfalto en donde a la izquierda se tiene una mezcla en caliente y a la derecha una mezcla tibia.	52
Figura. 14: Resumen de los métodos para producir mezclas tibias	57
Figura. 15: Curva viscosidad vs temperatura con aditivo orgánico	58
Figura. 16: Presentación del Producto Sasobit y su versatilidad para la adición.....	60
Figura. 17: Mejora el ángulo de contacto mediante el uso de tensoactivos	62
Figura. 18: Instalación de mezcla tibia con Evotherm 3G	63
Figura. 19: Estudio microscópico electrónico mezcla con Cecabase RT	64
Figura. 20: Presentación de Aspha-min.....	66
Figura. 21: Presentación Advera en polvo	66
Figura. 22: Posiciones de la toma de muestras en la planta.....	76
Figura. 23: (1) Bomba de toma de muestras y (2) el filtro	77
Figura. 24: Ausencia de humos en la colocación del WAM	78
Figura. 25: Implementos de medición en la planta.....	80
Figura. 26: Niveles de emisión de CO ₂ en tres momentos de medida en la planta de asfalto.....	81

Figura. 27: Niveles de emisión de CO y NOx en tres momentos de medida en la planta de asfalto.....	81
Figura. 28: Niveles de emisión de SO ₂ y polvo en tres momentos de medida en la planta de asfalto.....	82
Figura. 29: Emisiones en la planta de asfalto	83
Figura. 30: Emisiones de PAH según resultados del estudio.....	86
Figura. 31: Colocación en Argentina de la mezcla asfáltica tibia	87
Figura. 32: La planta de Palma Africana.....	90
Figura. 33: Distribución en el Ecuador de la producción de Palma	91
Figura. 34: El Aceite Crudo de Palma	92
Figura. 35: Planta de Mezcla Asfáltica de la Constructora Naranjo-López (Sitio de muestreo).....	106
Figura. 36: Tanque de Almacenamiento de Asfalto	107
Figura. 37: Toma de muestras de asfalto.....	108
Figura. 38: Muestras de asfalto tomadas del tanque de almacenamiento.....	109
Figura. 39: Envase de muestreo con ACP.....	110
Figura. 40: El aceite crudo de palma y la cantidad de asfalto muestreado	111
Figura. 41: (1) ACP para la mezcla, (2) envases con Asfalto+ACP con los diferentes porcentajes utilizados.....	113
Figura. 42: Ensayo de penetración en asfalto.....	116
Figura. 43: Ensayo de reblandecimiento en el asfalto	119
Figura. 44: Ejecución del ensayo de ductilidad	122
Figura. 45: Cono con la muestra para ensayo.	124
Figura. 46: Colocación de la muestra en la cámara Thermosel	124
Figura. 47: Equipo completo para el ensayo.....	125
Figura. 48: Combustión del asfalto en el ensayo	128
Figura. 49: Registro del peso “D”, picnómetro +agua destilada +asfalto a 25°C.....	131
Figura. 50: Variación en los ensayos de penetración en el asfalto AC-20 y el cumplimiento con los límites según NEVI-12.....	134

Figura. 51: Cumplimiento con los parámetros mínimos y máximo en el ensayo de reblandecimiento según norma NEVI-12.....	134
Figura. 52: Cumplimiento mínimo para el punto de combustión e inflamación según norma NEVI-12.	135
Figura. 53: % ACP vs Penetración según Tabla 19	137
Figura. 54: % ACP vs Punto de Reblandecimiento según Tabla 20.	138
Figura. 55: % ACP vs Índice de Penetración según Tabla 21.....	141
Figura. 56: Representación de la variación de la ductilidad en función del % de ACP.....	142
Figura. 57: Envases con los asfaltos modificados con ACP en los porcentajes definidos.	144
Figura. 58: Curva de Viscosidad vs Temperatura para el asfalto base y para los diferentes tipos de modificaciones con ACP.	147
Figura. 59: Ubicación del sitio de muestreo de agregados	151
Figura. 60: A la izquierda se presenta el muestreo del agregado fino y a la derecha del agregado grueso	152
Figura. 61: Muestra puesta en la máquina con 11 esferas de carga abrasiva	155
Figura. 62: Muestra de agregado después del ensayo	155
Figura. 63: Lectura de arena y arcilla.....	159
Figura. 64: Muestra en estado SSS	162
Figura. 65: Muestra sumergida para tomar su peso	162
Figura. 66: Peso del picnómetro + muestra y agua.....	167
Figura. 67: Muestra para el ensayo humedecida	174
Figura. 68: A la izquierda se observa el procedimiento para límite plástico y a la derecha el ensayo para límite plástico.	175
Figura. 69: Juego de tamices utilizados	177
Figura. 70: Recomendaciones generales para selección del tipo de mezcla asfáltica.....	183
Figura. 71: Curva granulométrica de la mezcla.....	185
Figura. 72: Estabilización Granulométrica Muestra 1	188
Figura. 73: Pruebas de granulometría	190

Figura. 74: Granulometría de máxima densidad y lo límites	192
Figura. 75: Curva granulométrica con la cual se va a trabajar para mezcla asfáltica.....	194
Figura. 76: Parámetros del diseño volumétrico.....	200
Figura. 77: Componente del diagrama de compactación.....	203
Figura. 78: A la izquierda se muestra los agregados separados por tamaños y a la izquierda ya unidos según la granulometría estabilizada.	207
Figura. 79: A la izquierda se muestra la consolidación de la mezcla y a la derecha el procedimiento de compactación.....	207
Figura. 80: Briquetas de mezcla asfáltica en caliente.	208
Figura. 81: Briquetas realizadas para el 1% y 2% de ACP.	209
Figura. 82: En la de la izquierda se evidencia la temperatura del asfalto a 156.3 °C listo para la mezcla, en la derecha se ve la temperatura de la mezcla lista para para la compactación a 143.4 °C.	209
Figura. 83: Para la mezcla con ACP al 1% en la fotografía de la izquierda se evidencia la temperatura de mezcla del asfalto a 148.5 °C y de compactación a la derecha de 137.3 °C.	210
Figura. 84: Para la mezcla con ACP al 2%, en la fotografía de la izquierda se evidencia la temperatura de mezcla de 145 °C y de compactación a la derecha de 133.7°C.....	210
Figura. 85: A la izquierda las briquetas sumergidas a t=25°C y a la derecha sumergida en canasta de balanza de inmersión.....	211
Figura. 86: En la izquierda se muestra la briqueta y su valor de flujo y a la derecha la estabilidad en Kg.....	213
Figura. 87: A la izquierda está la muestra no compactada ya la derecha la muestra en la funda.	215
Figura. 88: A la izquierda se muestra la funda al vacío y a la derecha la funda sumergida con la muestra,.....	215
Figura. 89: Curvas de Diseño Marshall para MAC.....	230
Figura. 90: Curvas de Diseño Marshall para MAT-1%.....	231
Figura. 91: Curvas de Diseño Marshall para MAT-2%.....	232

Figura. 92: Curva de viscosidad para cada temperatura y % de modificación de ACP.....	235
Figura. 93: Variación de la viscosidad para cada temperatura de ensayo según el % de ACP.....	236
Figura. 94: Variación de las temperaturas de mezcla y compactación en °C.....	238
Figura. 95: Variación en función del mayor valor en porcentaje de las temperaturas de trabajo.....	239
Figura. 96: Disminución de temperatura en función del mayor valor en porcentaje de las temperaturas de trabajo.....	239
Figura. 97: Variación de la temperatura de producción en función del %ACP Dismaprin.....	241
Figura. 98: Variación de la temperatura de producción en función del % ACP Palmagro.....	241
Figura. 99: Variación de la penetración en función del contenido de ACP.....	243
Figura. 100: Variación de la temperatura de reblandecimiento en función del contenido de ACP.....	245
Figura. 101: Variación del IP en función del contenido de ACP.....	246
Figura. 102: Variación de la ductilidad en función del contenido de ACP.....	248
Figura. 103: Variación del Punto de inflamación y Combustión en función del contenido de ACP.....	249
Figura. 104: Variación de la densidad en función del % de ACP.....	250
Figura. 105: Variación del contenido de asfalto óptimo.....	252
Figura. 106: Variación de la densidad de las briquetas en función del tipo de mezcla.....	253
Figura. 107: Variación de la Estabilidad en función del tipo de mezcla.....	254
Figura. 108: Variación del flujo en función del tipo de mezcla.....	255
Figura. 109: Variación del porcentaje de VAM en función del tipo de mezcla.....	256
Figura. 110: Variación del porcentaje de VAF en función del tipo de mezcla.....	257

RESUMEN

El propósito principal de la investigación fue modificar el asfalto mediante el uso de aceite crudo de palma (ACP), para fabricar mezclas asfálticas tibias y establecer su desempeño en laboratorio y compararlas con las mezclas asfálticas en caliente. La mezcla utilizada corresponde a las denominadas mezclas de graduación densa, de tamaño máximo nominal del agregado de 1/2". El trabajo de laboratorio inició con la caracterización de los materiales a utilizar (asfalto, agregados), continuando con ensayos de caracterización para el asfalto modificado con diferentes porcentajes experimentales de Aceite Crudo de Palma, de esta manera seguir con los ensayos de viscosidad rotacional en el asfalto y el modificado con ACP. A partir de lo anterior se eligió porcentajes que puedan ser los potenciales modificadores para la reducción de las temperaturas de producción de mezclas asfálticas de tal manera seguir con la realización del método Marshall, para las mezclas asfálticas en caliente (MAC) y mezclas asfálticas tibias (MAT) evaluando su comportamiento en cuanto a estabilidad y flujo Marshall. Se determinó a partir del análisis del comportamiento de la MAT, el porcentaje óptimo de ACP y el contenido de asfalto óptimo para fabricar mezclas tibias. Del análisis de los resultados se estableció que el ACP utilizado reduce la viscosidad del asfalto y por ende las temperaturas de mezcla y compactación. El desempeño estudiado en las mezclas asfálticas con asfalto modificado con ACP, son similares a las mezclas convencionales, estableciendo la viabilidad para su aplicación y uso.

Palabras clave:

- Mezclas Asfálticas Tibias
- Asfalto modificado
- Aceite de Palma
- Viscosidad
- Temperatura

ABSTRACT

The main purpose of the research was to modify the asphalt using crude palm oil (ACP), to produce warm asphalt mixes and establish its performance in laboratory and compare them with hot mix asphalt. The mixture used corresponds to the named dense gradation mixtures, which aggregate maximum nominal size of 1/2". Laboratory work began with the characterization of the materials to be used (asphalt, aggregates), followed of characterization tests for the asphalt which was modified with different experimental percentages of Crude palm oil, then it continues the rotational viscosity tests in the asphalt and the modified one with ACP. Based on the results obtained above, potential modifiers for the reduction of the production temperatures of asphaltic mixtures were selected, for the implementation of the Marshall Method in the hot mix asphalt (HMA) and in the warm mix asphalt (WMA) and evaluate its stability and Marshall Flow behavior. Based on the WMA behavior analysis, the optimal percentage of ACP and optimum content of asphalt to produce warm mixtures were determined. From the analysis of the results it was established that the used ACP reduces the asphalt viscosity and therefore the mixing and compaction temperatures. Performance of the asphalt mixtures with modified asphalt is similar to the conventional mixtures, establishing the feasibility of its use application.

Keywords:

- Warm Mix Asphalt
- Asphalt Modified
- Palm Oil
- Viscosity
- Temperature

Capítulo 1 : Antecedentes y justificación del proyecto

1.1.Introducción

Para el ser humano es importante la movilización y como parte de su bienestar se considera de trascendencia las carreteras y lo que se involucra directamente en su entorno, todo esto genera su impacto tanto en términos económicos como sociales, pero las carreteras tienen principalmente un impacto negativo en el medio ambiente, tanto en su etapa de construcción como durante el mantenimiento y su uso. A partir de ello, lo que se debe buscar es minimizar parte de dichos impactos de tal manera que los ingenieros en respuesta a esto, presentan la producción y aplicación de mezclas asfálticas pero a temperaturas reducidas. Las mezclas asfálticas en caliente se caracterizan por las altas temperaturas necesarias para su producción, por lo tanto se busca disminuir estas altas temperaturas como parte de la ayuda y conciencia ambiental.

Dentro de esta idea se ha tratado de crear una técnica para poder producir una mezcla tibia, para lo cual se hallan distintas opciones tal que se reduzca el impacto medioambiental en la construcción y mantenimiento de carreteras.

A partir de la contaminación ambiental en el mundo se ha generado regulaciones acerca de las emisiones de gases contaminantes, generando de esta manera el necesario sostenimiento del medio ambiente, para esto se genera la producción de mezclas asfálticas “tibias” con nuevas técnicas e

investigaciones conocidas internacionalmente como WMA (Warm Mix Asphalt) o se las llamará MAT (Mezclas Asfálticas Tibias), mediante las cuales se busca reducir las altas temperaturas utilizadas en las mezclas tradicionales y usadas en el medio llamadas como HMA (Hot Mix Asphalt) o en el Ecuador llamadas MAC (Mezclas Asfálticas Calientes).

Como parte de una conciencia ambiental necesaria para el sostenimiento equilibrado del ambiente la Ingeniería Civil propone como su principal innovación, la utilización y la implementación de las mezclas asfálticas tibias, con el objetivo de reducir las temperaturas de mezclado y compactación en donde la viscosidad del asfalto tiene principal importancia para lograr dicho objetivo fundamental.

El método MAT permite la disminución del consumo de energía utilizada en el proceso de producción de las mezclas asfálticas por consiguiente la reducción de las emisiones contaminantes en la fase de producción tanto como en la fase de colocación y que pueden ser perjudiciales para la salud ocupacional de las personas involucradas en construcciones viales.

Para el mejor entendimiento del impacto que estas mezclas pueden tener, sería bueno recordar el concepto de desarrollo sostenible, ampliamente aplicado y desarrollado actualmente. Según la Comisión de las Naciones Unidas, se entiende por desarrollo sostenible “aquel desarrollo que permite satisfacer las necesidades del presente sin comprometer la habilidad de las sociedades futuras de satisfacer sus propias necesidades”.

Por lo tanto, a partir de la anterior definición queda claro que el desarrollo sostenible no se centra solo en lo que a impacto ambiental se refiere, sino que aún a tres áreas independientes: desarrollo económico, desarrollo social y protección ambiental, como podemos observar en la Figura. 1, las mezclas tibias son consistentes con los ideales descritos por el desarrollo sostenible.



Figura. 1 : Concepto de desarrollo sostenible.

Fuente: D'Angelo, (2007)

Al hablar de mezclas asfálticas tibias y la existencia de varios métodos para la producción de este tipo de mezclas (WMA) existen métodos que buscan reducir la viscosidad del asfalto a una temperatura determinada, permitiendo de esta manera la fluidez del asfalto a una menor temperatura y consiguiendo así que el agregado sea cubierto completamente a esa temperatura menor .

En relación a las mezclas asfálticas tibias existen varias investigaciones realizadas al respecto, en donde en varios países se concentran en

encontrar mediante tecnología, componente o productos útiles para modificar los componentes del asfalto y así producir una mezcla tibia, entonces con estas investigaciones se ha buscado un material alternativo que sea un modificador del asfalto, en este caso se trabajará con el aceite crudo de palma africana como agente reductor de la viscosidad en el asfalto para posteriormente evaluar sus características de desempeño y luego comparar con las mezclas asfálticas en caliente.

La presente investigación está dirigida para todos los involucrados en el ámbito de la Ingeniería Civil como son los propios ingenieros, empresas públicas y privadas, contratistas que tengan por objetivo el desarrollo y la aplicación de mezclas asfálticas y que estén interesados en preservar el medio ambiente y contribuir a la disminución de emisiones contaminantes.

El contenido de la tesis se encuentra estructurado de siete capítulos, de los cuales los tres primeros tratan de antecedentes, marco teórico, metodología, el capítulo cuatro compone el trabajo de laboratorio, el capítulo cinco se compone con el diseño Marshall de las mezclas, el capítulo seis es el análisis de resultados y el último constituye las conclusiones y recomendaciones.

El proyecto se desarrollará en las instalaciones de los laboratorios de asfaltos y mecánica de suelos de la Universidad de las fuerzas Armadas ESPE.

El área de influencia que cubre el proyecto es a nivel nacional, debido a que la investigación se la podría aplicar para el mejoramiento continuo de la calidad y conciencia ambiental en todo el país.

1.2. Antecedentes

A partir de 1997 mediante el tratado de Kyoto desarrollado por la comunidad Económica Europea, se comenzó a desarrollar nuevas técnicas y tecnologías llamadas mezclas asfálticas tibias (MAT o WMA), como una respuesta a los gases del efecto invernadero evidenciadas en el desarrollo de las mezclas asfálticas en caliente. La National Asphalt Pavement Association (NAPA) en cooperación con la Federal Highway Administration (FHWA), introdujeron las MAT en el World Asphalt Show & Conference del 2004, en Nashville, como aporte a los problemas ambientales, con todo esto evidenciando la necesidad del interés que se ha puesto en temas como ahorrar energía y bajar la temperatura de producción y por ende reducir las emisiones contaminantes, estos temas han sido ampliamente discutidos, tratados e investigados.

También como parte de las investigaciones realizadas a nivel mundial en cuanto a mezclas tibias se tiene previamente evidencias desde 1956 en el tema de asfaltos espumados mediante la investigación realizada por el profesor Ladis H. Csanyi, doctor en Iowa State University, el cual investigó acerca del potencial del betún espumado para uso como ligante de suelos. Desde entonces, la tecnología de asfaltos espumados, que permite reducir las temperaturas de mezclado, ha sido usada con éxito en diferentes países.

En 1968, Mobil Oil Australia, que había adquirido los derechos de la investigación de Csanyi, modificó el proceso original añadiendo agua fría en lugar de vapor al betún caliente.

Tales sistemas son eficientes a nivel energético y menos dañino para el medio ambiente, al no emitir hidrocarbonatos y usar menos combustible en su fabricación.

En 1999, Jenkins et al. Introdujeron un nuevo proceso, el tratamiento de betún espumado templado. Sus documentos y estudios exploraron las consideraciones y posibles beneficios de calentar una amplia gama de áridos a temperaturas superiores a la ambiente, pero por debajo de los 100°C, antes de introducir el betún espumado en la mezcla. Los resultados de esta investigación mostraban una buena envuelta de las partículas de árido, así como una gran cohesión de las mezclas, un índice de tracción correcto y una compactación adecuada. Habían nacido así las mezclas semicalientes, tal y como las conocemos actualmente.

Mientras avanzaba el tiempo la experiencia acerca del tema iba incrementándose, al igual que los conocimientos al respecto, por lo tanto esto comienza a generar patentes todo esto ocurrido para el año 2000. Este mismo año, aparece un documento del autor Koenders y su equipo. En éste evaluaban el rendimiento de las mezclas tibias (WMA) mediante el ensayo de mezclas en laboratorio y en campo(en Noruega, Reino Unido y Holanda) con referencia particular a la producción de mezclas densas en capas de rodadura.

El uso de zeolitas sintéticas se comienza a evidenciar en el año 2004, en donde Barthel, Von Devivere et hacen uso de las mismas, recogidas bajo el nombre comercial Aspha-Min®, como aditivo en las mezclas bituminosas de cara a mejorar su trabajabilidad a temperaturas más bajas. Como se comprueba a partir de lo anterior, el desarrollo de los inicios de esta tecnología se produce principalmente en Europa y Australia, no siendo hasta Junio de 2005 cuando aparecen los primeros documentos en EE.UU. de la mano del National Center for Asphalt Technology (NCAT), que publicó dos artículos acerca de investigaciones realizadas con dos productor pertenecientes a la gama de las WMA: Sasobit® y Aspha-Min®. (Al-Rawashdeh, 2008)

Siguiendo con la idea de conseguir una mezcla tibia se incursionó en este ámbito la mezcla de asfalto con aceite crudo de palma en donde se ha investigado principalmente en la Universidad Nacional de Colombia por parte del Ing. Conrado Lopera. MSc. en donde se concluye la investigación con buenos resultados en cuanto a la disminución de temperatura de mezcla, pruebas de desempeño mecánico y dinámico

En el Ecuador no se encuentran registros del tema de mezclas tibias y peor aún con una mezcla alternativa como con el aceite crudo de palma.

1.3. Planteamiento del problema

La contaminación atmosférica, junto con la cada vez mayor quema de combustibles fósiles tienen sus consecuencias como lo son las lluvias ácidas, agujeros en la capa de ozono y efecto invernadero, incremento en la

temperatura global, en definitiva el cambio climático generalizado que a partir del siglo XXI tienen su principal importancia debido a que dentro de los gases contaminantes se destaca el dióxido de carbono el cual es responsable del 80% de las emisiones totales, dicho gas durante miles de años sus niveles en la atmósfera se mantuvieron estables pero a partir de la Revolución Industrial han ido incrementando en tal manera de pasar en los años 1750 de 280 ppm a 430 ppm en la actualidad generando de esta manera con ello un aumento en la temperatura media de la tierra, pasando de 13.7 °C a 14.4 °C y se ha pronosticado que las temperaturas medias de la tierra podrían aumentar durante el presente siglo entre 1.1 y 6.4 °C y un aumento en el nivel del mar entre 18 y 59 cm lo cual ocasionaría catástrofes como sequías, diluvios, ciclones, mareas altas. (Ortega, 2008)

El cambio climático ha motivado a un calentamiento global de la superficie terrestre y una serie de fenómenos naturales como la elevación del nivel del mar que se estima que aumentado entre los años de 1993 y 2008 en unos 3 mm lo cual podría provocar consecuencias catastróficas en numerosas regiones del planeta en caso de no adoptarse medidas urgentes ante este panorama con lo cual todo esto tiene un gran impacto económico, debido a que los costes totales derivados del cambio climático equivaldrían a una pérdida no menor del 5% del PIB mundial porcentaje que podría alcanzar la terrorífica cifra del 20% si en caso no se toman acciones necesarias para mitigar las acciones generadas por el cambio climático por el contrario, si se adoptan medidas inmediatamente esos costes se reduciría a 1% anual del PIB mundial.(Amestoy, 2010)

Por lo citado anteriormente desde la década de los ochenta se ha dado una tendencia hacia la investigación, desarrollo e innovación en productos, procesos y servicios, los cuales generen sostenibilidad ambiental y que contribuyan a la mitigación o a la adaptación frente al Cambio Climático como problema de naturaleza compleja.

El sector del transporte ha tratado de seguir esta tendencia, debido a que es uno de los sectores más contaminantes pues representa el 40% de las emisiones totales de CO₂ de origen energético y un 80% de las de CO, siendo además la primera fuente de contaminación ambiental en el medio urbano, por tal motivo se buscan constantemente nuevas alternativas tanto en el ámbito del medio de transporte propiamente dicho y en cuanto a la infraestructura de los medios de transporte.

En el Ecuador se evidencia la falta de desarrollo vial debido al mal estado de muchas vías en el país, para lo cual se ha invertido en pavimentos rígidos con costos más altos, a todo esto también se involucra la poca duración de la capa de rodadura en pavimentos flexibles, lo cual hace necesario investigar alternativas para mejorar las mezclas en caliente que sean amigables con el medio ambiente y que puedan tener una duración óptima teniendo en cuenta la disminución de costos económicos.

Para la construcción de pavimentos flexibles, la mezcla asfáltica es fundamental y está compuesto por asfalto y agregado mineral. El asfalto actúa como un agente ligante y aglutinador de las partículas minerales, formando una masa cohesiva muy efectiva, por lo que resulta un material

muy atractivo para construir carpetas de rodadura debido a sus propiedades físicas en la cual la mezcla asfáltica se la realiza a altas temperaturas para el mezclado y al enfriar la mezcla se tiene una capa de rodadura flexible y adecuada según su diseño.

Por lo tanto el proceso de mezclado y compactación empleado para realizar mezclas asfálticas en caliente tiene como principal problema las altas temperaturas que se requieren para tal proceso generando con ello la emisión de gases contaminantes por la quema de componentes del asfalto siendo en estos casos niveles altos de emisiones por lo tanto haciéndolo costoso y causante de un grave daño ambiental en cuanto al daño de la capa de ozono principalmente. Para esto se plantea como solución el desarrollo de nuevas tecnologías destinadas a la disminución de las temperaturas utilizadas en el proceso productivo de las mezclas asfálticas en caliente con lo cual se busca disminuir la temperatura mediante la reducción de la viscosidad del cemento asfáltico consiguiendo de esta manera las mezclas asfálticas tibias que además de conseguir un ahorro en el consumo de combustible en la planta de producción, también reducen la emisión de gases que se desprenden en la etapa de producción y aplicación de la mezcla asfáltica como se puede ver en la Figura. 2 , la diferencia entre las mezclas en caliente y las tibias en donde claramente se nota a la izquierda la emisión de gases contaminantes generalmente vistas en la colocación de mezclas en caliente en cambio a la derecha se puede evidenciar en la colocación de mezclas tibias con lo cual no se presentan emisiones grandes de gases.



Figura. 2: Colocación de tipos de mezclas asfálticas.

(1) Hot Mix Asphalt (HMA).

(2): Warm Mix Asphalt (WMA).

Fuente: ADVERA, (2012).

Viendo esta realidad es fundamental interesarnos en el ámbito de la fabricación de mezclas asfálticas de tal manera conseguir temperaturas más bajas de producción, gracias a los avances en la tecnología y junto con la preocupación medioambiental y de seguridad ocupacional se ha orientado las investigaciones hacia una producción más respetuosa con el medio ambiente.

Existen muchos beneficios en cuanto a la importancia de la reducción de la temperatura de producción debido a que al reducir la temperatura en la planta de mezcla asfáltica se disminuye también el consumo de combustible, al igual que la disminución de la cantidad de partículas finas, el humo

generado por el asfalto lo cual se nota en las máquinas de pavimentación y por ende en la cantidad de combustibles fósiles no renovables utilizados.

La industria de la construcción y su producción de mezclas asfálticas constan principalmente de los siguientes componentes: asfalto y agregados minerales. Los agregados minerales son una mezcla de agregado grueso, fino y relleno mineral. En el proceso de producción se mezclan los agregados en proporciones adecuadas con el asfalto caliente y se los calientan a una temperatura aproximadamente entre 150 y 180 °C y para su compactación se recomiendan temperaturas entre 130 y 150 °C.

La razón fundamental de calentar los agregados y el asfalto a altas temperaturas es debido a que el asfalto debe tener una viscosidad tal que pueda ser fluido y cubra las partículas de agregado. Aún caliente la mezcla asfáltica se debe compactar para acomodar las partículas entre sí y a medida que la mezcla disminuye su temperatura se hace más difícil el compactar por lo cual podría ocasionar un incumplimiento de las especificaciones de diseño y disminuyendo sus características de desempeño.

Con lo anteriormente dicho, las dificultades técnicas, los mayores costos y principalmente el impacto ambiental que genera la producción de las mezclas asfálticas en caliente (MAC), se plantea como proyecto investigativo de tesis el diseño de mezclas asfálticas tibias (MAT) y como objetivo disminuir las temperaturas de producción utilizando como modificador de la viscosidad al asfalto el Aceite Crudo de Palma (ACP), en donde el Ecuador

es uno de los principales productores y exportadores de América y del mundo.

Por lo tanto el problema planteado genera la siguiente interrogante: ¿Qué proceso y en qué cantidades se puede utilizar el aceite crudo de palma para modificar el asfalto base y de esta manera obtener una mezcla asfáltica tibia y que sirva para reducir la temperatura de producción de la mezcla y la viscosidad del asfalto?

1.4. Justificación

La juventud y los nuevos profesionales tienen el compromiso de aportar hacia el mejoramiento de las condiciones ambientales a partir del conocimiento adquirido en la etapa de formación profesional, de tal manera no solo se debe ser socialmente responsables, sino también, de asumir con la mayor seriedad del caso, la responsabilidad ambiental aportando cada uno desde el ámbito que le compete a cada tipo de profesional. Pero evidentemente proponernos esto es grande, debido a que tratamos de compaginar el progreso de la humanidad con el mejoramiento de las condiciones de vida, pero además tratando de preservar los recursos naturales que hoy se tienen y que no serán para siempre.

En el ámbito de la Ingeniería Civil se presentan en los proyectos viales con tramos de carreteras, inquietudes sobre la mejor distribución de recursos, principalmente acerca de la mejor manera de reducir costos en cuanto a materias primas, producción y el manejo de desechos materiales, de tal manera y ante este panorama se incluye la necesidad legal y ética de

seguir normativas ambientales consiguiendo así ayudar a la sostenibilidad ambiental a través de la implementación de nuevas alternativas que reduzcan impactos ambientales.

Por lo anteriormente dicho, el presente proyecto pretende proponer una alternativa para producir un tipo de mezclas asfálticas tibias, a partir de la reducción en el uso de altas temperaturas que se aplican en la elaboración de mezclas asfálticas con lo cual se pueda disminuir el uso de combustibles que se utilizan para alimentar a las plantas de mezclas asfálticas.

Actualmente no se tiene una oferta en cuanto a mezclas asfálticas tibias debido a que no se ha tomado en cuenta lo altamente contaminante que son las plantas de producción de mezclas asfálticas pero a partir de la socialización y vigencia de la nueva normativa vial NEVI-12 propuesta por el Ministerio de Transporte y Obras Públicas, mediante la cual se expone las especificaciones generales de control ambiental (Volumen No. 3, Capítulo 200), de tal manera y ante esta normativa se debería concientizar y cambiar la mentalidad de la industria de la construcción, debido a que solo se han enfocado en la producción de mezclas en caliente y no identifican la necesidad de invertir en proyectos que sirvan para el desarrollo e innovación de nuevas tecnologías asfálticas que logren minimizar la contaminación ambiental, de ahí la importancia del presente proyecto de investigación.

Lo que se busca por medio del presente proyecto de tesis es brindar soluciones al tratamiento de mezclas asfálticas, reducir los costos fundamentalmente incursionando en el país sobre el uso y producción de

mezclas asfálticas tibias debido a que este tema no está investigado y contribuye a la reducción de la contaminación ambiental en el Ecuador.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo General

Analizar el desempeño de mezclas asfálticas tibias a partir del diseño de la mezcla de asfalto y aceite crudo de palma con reducción de temperatura de producción de la mezcla y compararla con el desempeño en el laboratorio de las mezclas asfálticas en caliente.

1.5.2. Objetivos específicos

- Definir las características del asfalto base que cumpla con las especificaciones estipuladas para materiales en la Norma Ecuatoriana Vial NEVI-12 MTOP.
- Obtener el asfalto modificado a partir de la mezcla de aceite crudo de Palma y asfalto base, definiendo las proporciones óptimas y que tenga características que satisfagan las especificaciones estipuladas para materiales en la Norma Ecuatoriana Vial NEVI-12 (Sección 812, Mezclas Bituminosas).
- Diseñar la mezcla asfáltica en caliente y tibia, de acuerdo al Método Marshall, realizando la dosificación de agregados y asfalto, aplicados a una mezcla asfáltica de compacidad tipo densa y que cumpla con las especificaciones estipuladas para el diseño Marshall en la norma NEVI-12.

- Comparar los resultados en cuanto a estabilidad y flujo, entre las mezclas asfálticas tibias con mezcla de asfalto y aceite crudo de Palma y las mezclas asfálticas producidas en caliente.

Capítulo 2 Marco Teórico

2.1. Introducción

Como parte de la investigación es importante conocer la base teórica sobre la cual se fundamenta el presente trabajo, partiendo del asfalto, su composición, sus propiedades, características y principalmente el efecto de la temperatura sobre el asfalto. Es importante conocer el comportamiento del asfalto en cuanto a su clasificación como un fluido y lo importante que resulta la viscosidad al momento de conseguir su fluidez necesaria. Otro punto importante es conocer a nivel internacional la oferta de productos para realizar mezclas tibias y partiendo de ello cómo se puede utilizar el ACP como modificador de la viscosidad del asfalto. En cuanto a las mezclas tibias y su justificación como tema propuesto, se presenta dos trabajos acerca de las investigaciones realizadas evidenciando lo altamente contaminante que son las mezclas en caliente y como las mezclas tibias pueden contribuir a disminuir las altas temperaturas utilizadas y las consecuencias que implica utilizarlas.

Hay que tener en cuenta que la producción de las mezclas asfálticas tibias son elaboradas a temperaturas sensiblemente inferiores a las utilizadas en las mezclas asfálticas en caliente, exigiéndose que sus características y su comportamiento sean iguales o superiores a los de estas, inclusive se puede tener hasta una disminución de la temperatura alrededor de entre 20 y 55 °C. (Bolzan, 2010)

Constantemente se buscan nuevos productos y tecnologías para disminuir el impacto ambiental que produce no solo las mezclas en caliente sino la construcción de carreteras en su totalidad generando impactos mínimos.

2.2. El Asfalto

2.2.1. Definición

El asfalto es una mezcla de hidrocarburos de alto peso molecular presentándose como un cuerpo viscoso, no cristalino y con su color característico negro.

Se genera a partir de la destilación natural o artificial del petróleo de manera que los componentes volátiles y más ligeros son extraídos generando así como producto final el asfalto. Se produce en las refinerías y de acuerdo al grado de control se puede tener asfaltos de diferentes características que tienen diferentes usos. Como resultado, se producen asfaltos utilizados para mezclas asfálticas, techos y otros usos especiales. (Mamlouk, 2008)

Cemento asfáltico o asfalto es el utilizado para mezclas asfálticas viéndose como un material viscoso y pegajoso y que se adhiere fácilmente a las partículas de agregado para lo cual se lo considera como un ligante.

2.2.2. Propiedades físicas del asfalto

Debido a las diferentes fuentes de abastecimiento de crudo (petróleo), se pueden tener diferentes características y comportamiento en el asfalto

cambiando constantemente las propiedades físicas y químicas, de estas variaciones surgió la necesidad de poder evaluar su rendimiento y comportamiento por medio de sus propiedades y que en muchos asfaltos se mantienen constantes. (Linares, 2010)

Las propiedades físicas del asfalto, de mayor importancia para el diseño, construcción, y mantenimiento de carreteras son: adhesión, cohesión, susceptibilidad a la temperatura y durabilidad.

2.2.2.1. Adhesión y cohesión

Adhesión es la capacidad del asfalto para adherirse al agregado, en la mezcla de pavimentación. Cohesión es la capacidad del asfalto de mantener firmemente las partículas de agregado en el pavimento terminado. (Linares, 2010)

También el asfalto debe ser capaz de envolver completamente a los agregados, dar cohesión a la mezcla asfáltica y además resistir la acción de desenvuelta del agua (ver Figura. 3), tal efecto produce una separación del asfalto con el árido disminuye así la cohesión de la mezcla.



Figura. 3: Acción de desmenuamiento de agua

Fuente: Linares, (2010)

2.2.2.2. Susceptibilidad térmica

Como una de sus principales características se tiene el comportamiento ante la temperatura, ya que los asfaltos se vuelven más duros es decir más viscosos a medida que la temperatura disminuye, y más blandos a medida que la temperatura aumenta. A este comportamiento se le conoce como la propiedad de susceptibilidad térmica y es su propiedad más valiosa.

En la Figura. 4 se muestra la influencia de la temperatura en el comportamiento del asfalto de manera que asfaltos de grados blandos tienen una menor rigidez que un asfalto de grado duro a la misma temperatura y además un aumento en la temperatura disminuye la viscosidad o la rigidez.

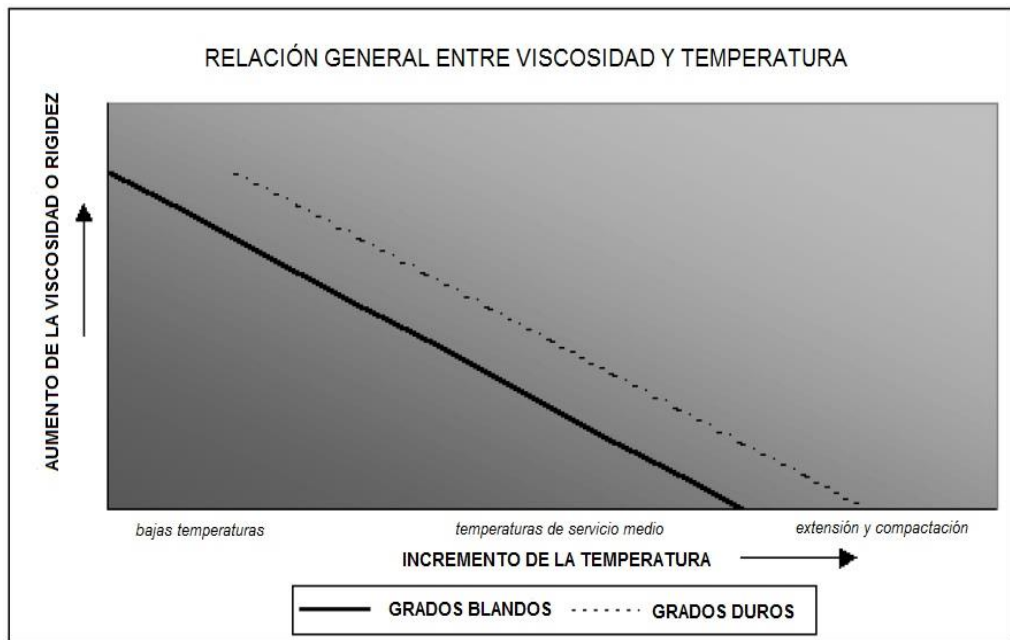


Figura. 4: Influencia de la temperatura en el comportamiento del asfalto.

Fuente: Linares, (2010)

Esta relación viscosidad-temperatura es importante para el estudio ya que con la modificación del asfalto mediante el uso del ACP, se espera que se reduzca la viscosidad y de esta manera a una menor temperatura pueda tener o mejorar las propiedades de cohesión y adhesión necesaria para la mezcla asfáltica. Debe tener suficiente fluidez a altas temperaturas para que pueda cubrir las partículas de agregado durante el mezclado y así permitir que estas partículas se desplacen unas respecto a otras durante la compactación. Luego deberá volverse lo suficientemente viscoso, a temperaturas ambientales normales, para mantener unidas las partículas de agregado.

2.2.2.3. Durabilidad

La durabilidad es otra característica la cual indica que tanto puede un asfalto retener sus propiedades originales ya que constantemente es expuesto a los agentes externos produciéndose degradación y envejecimiento. (Linares, 2010)

En la etapa de mezclado el asfalto es calentado a altas temperaturas generándose películas delgadas ya que así se recubre el agregado, este proceso hace que el asfalto se oxide (se refiere al proceso químico de exponer al asfalto con el oxígeno) y se produzca un endurecimiento más severo perjudicando a la durabilidad del asfalto en esta etapa. (Don Brock, 1999)

El comportamiento del pavimento está directamente relacionado con el diseño de la mezcla asfáltica, a partir de ella se ve influenciado por las características del agregado, la mano de obra en la construcción, y otras variables, que incluyen la durabilidad del asfalto. Sin embargo, para determinar la durabilidad del asfalto frente a los agentes externos como el envejecimiento causado por el proceso de oxidación, existen pruebas rutinarias usadas, estas son: La Prueba de Película Delgada en Horno (TFO) y la Prueba de Película Delgada en Horno Rotatorio (RTFO).

2.2.2.4. Pruebas realizadas de caracterización en el asfalto para conocer sus propiedades físicas (Mamlouk,2008)

Existen algunas pruebas para determinar las propiedades de cemento asfáltico, estas son:

- Densidad: en los asfaltos que se utilizan en la construcción de pavimentos varía desde 0.9 – 1.4 g/cm³. La densidad puede darnos idea de las impurezas que contiene un producto y su medida nos sirve de control de la uniformidad de un suministro. La densidad relativa de un asfalto es la razón entre el peso de un determinado volumen de asfalto y el peso de un volumen igual de agua a una determinada temperatura. Su conocimiento permite pasar de pesos a volúmenes y viceversa.
- Punto de Inflamación. Es una prueba de seguridad que se realiza para conocer a que temperatura provoca flama el material asfáltico.
- Punto de Reblandecimiento (Anillo y esfera). Proporciona una medida de la resistencia del material al cambio de sus propiedades de acuerdo a su temperatura.
- Penetración a 25° C. Con esta prueba se determina la dureza que presentan los diferentes tipos de asfalto; de acuerdo a la dureza nos indica de qué tipo de asfalto se trata.
- Ductilidad a 25° C. Mide al alargamiento que presenta el asfalto sin romperse, la longitud del hilo de material se mide cuando se corta en cm., este ensayo además de indicarnos el tipo de asfalto nos da la edad del mismo; ya que si se rompe a valores menores a los establecidos nos indica que es un asfalto viejo y que ha perdido sus características.

Estos ensayos van a ser los necesarios para la caracterización del asfalto base y para conocer los porcentajes con los cuales se pueda dosificar el

asfalto y el ACP, de esta manera tratar que las propiedades físicas no se vean afectadas con la modificación.

2.2.3. Propiedades químicas del asfalto

Las propiedades químicas del asfalto son las que lo hacen muy versátil y por lo tanto por sus características y comportamiento muy utilizado para la construcción de pavimentos.

Químicamente, el asfalto está compuesto por una amplia variedad de hidrocarburos en donde las moléculas del asfalto según su posición se los puede llamar parafínicos, aromáticos y compuestos heterocíclicos que contienen azufre, nitrógeno y oxígeno; casi en su totalidad solubles en sulfuro de carbono. (Mamlouk, 2008)

El asfalto, cuando es disuelto en un solvente como el heptano, puede separarse en dos partes principales: asfáltenos y máltenos. (Ver Figura. 5)

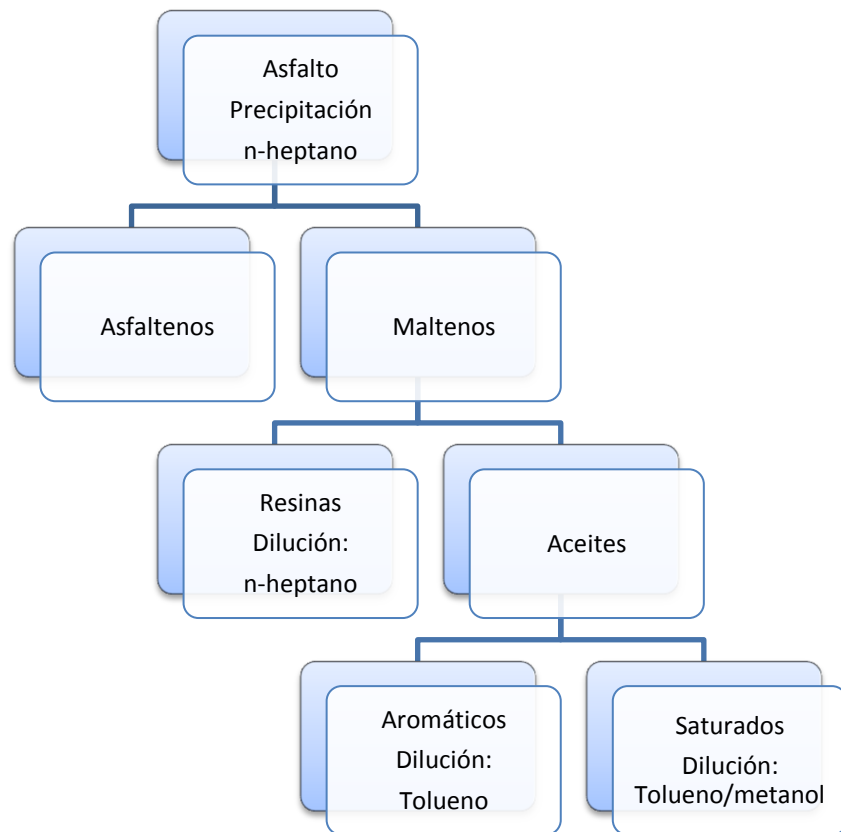


Figura. 5: Composición química del asfalto

Fuente: González, (2007).

- a) Los asfáltenos, son de color negro o pardo oscuro y se parecen al polvo grueso de grafito, son compuestos químicos orgánicos y representan los compuestos más pesados y por tanto de mayor punto de ebullición. Los asfaltenos son los responsables de la viscosidad y las propiedades adhesivas, también son los responsables de darle al asfalto su color, dureza y se encuentran disueltos en los máltenos, es decir es la fase discontinua del asfalto.(González, 2007)
- b) Los máltenos, su contenido se lo vincula generalmente a las propiedades mecánicas del asfalto, su consistencia es de aspecto líquido viscoso formando así la fase continua del asfalto. Generalmente,

existe mayor proporción de máltenos que de asfáltenos en los asfaltos. El mayor contenido de máltenos y su naturaleza química son las que le dan la calidad a un asfalto. Los máltenos se subdividen en:

- Resinas: son oscuras y de tipo sólido o semisólido, con una viscosidad que se ve afectada extremadamente por la temperatura. Actúan como agentes que dispersan los asfáltenos en los aceites.
- Aceites:
 - Aromáticos: su color es negruzco y se presentan como líquidos viscosos. Influyen directamente en la facilidad del asfalto para “admitir” polímeros modificadores. Los aromáticos constituyen de un 40% al 65% el total del asfalto.
 - Saturados: son aceites viscosos de coloración amarillenta, en el cual flotan como islas los asfáltenos. (González, 2007)

Describiendo la estructura del coloide, las resinas circundan en forma inmediata a los asfáltenos y los aceites rodean a ese compuesto (ver Figura. 6) constituyendo así los maltenos y en su totalidad la estructura total del asfalto.

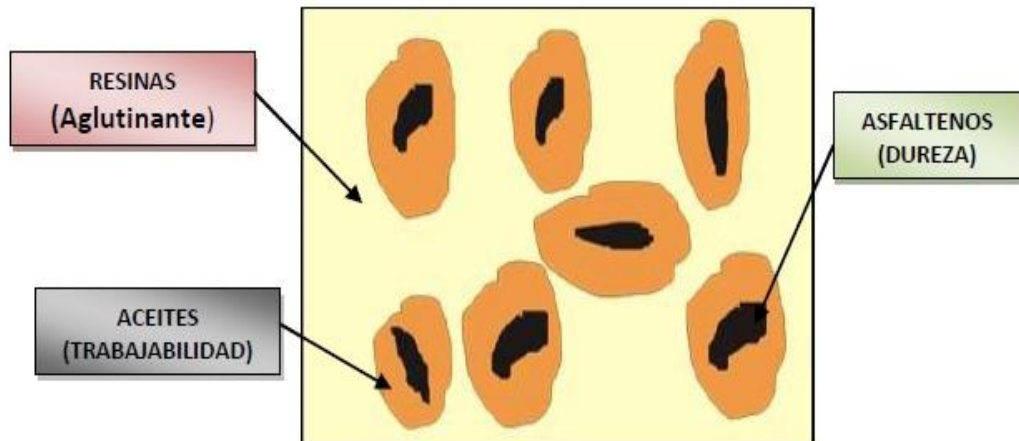


Figura. 6: Esquema de la distribución de los componentes en el asfalto

Fuente: González, (2007),

2.3. Viscosidad

Una parte importante para la investigación a realizarse se considera los ensayos de viscosidad, debido a que el asfalto y los fluidos líquidos o semisólidos se puede conocer el comportamiento a través de la viscosidad y saber de esta manera si el aditivo modificador puede comportarse como un reductor de la viscosidad, que es lo que básicamente se quiere para poder calentar el asfalto a una temperatura menor.

Debido a la estructura química del asfalto se pueden tener comportamientos diferentes y la viscosidad juega un papel muy importante para poder conocer de qué manera el aditivo modificador en este caso el ACP puede modificar dicha viscosidad.

Es muy importante citar la viscosidad en el asfalto ya que en muchos casos este asfalto necesita se bombeado, mezclado o vertido, para lo cual la temperatura le da las características para poder hacer dichas operaciones.

Según la temperatura, el asfalto puede ser considerado como un material termoplásticos por lo que a bajas temperaturas su consistencia es sólida, a una temperatura media se comporta como viscoelástico y por consiguiente a temperaturas altas como un líquido viscoso. (García, 2009)

2.3.1. Conceptos de Viscosidad

La viscosidad se puede definir como una medida de la resistencia a la deformación del fluido. Este concepto relaciona el esfuerzo cortante con la velocidad de deformación. (García, 2009)

$$\tau: \mu \cdot D \quad (1)$$

Dónde:

T: esfuerzo cortante. [MPa]

μ : viscosidad. [MPa.s]

D: velocidad de deformación. [s^{-1}]

Existen 3 tipos de viscosidad que se mencionan a continuación:

- Viscosidad dinámica (μ): representando la curva de fluidez (esfuerzo cortante frente a velocidad de deformación) se define como la pendiente en cada punto de dicha curva.
- Viscosidad cinemática (ν): relaciona la viscosidad dinámica con la densidad del fluido utilizado. Las unidades más utilizadas de esta viscosidad son los centistokes [cst].

- Viscosidad aparente (μ): se define como el cociente entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación. Este término es el que se utiliza al hablar de “viscosidad” para fluidos no newtonianos, esta denominación se explica en la Figura. 7.

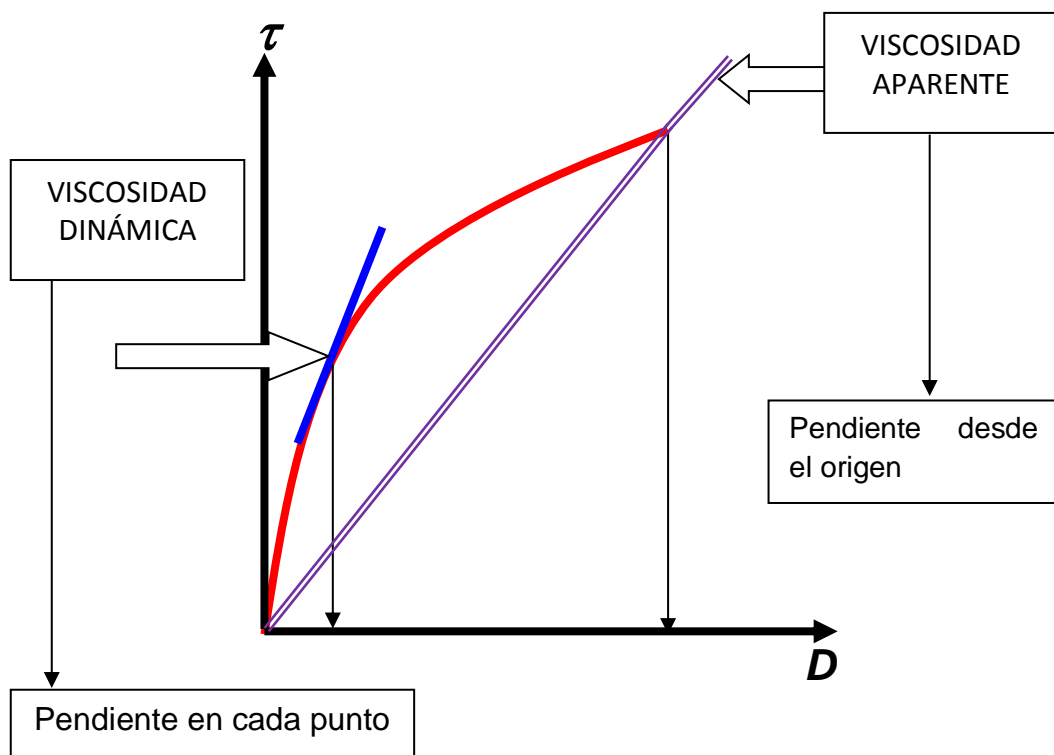


Figura. 7: Se puede apreciar la curva de fluidez para representar la viscosidad dinámica y aparente

Fuente: García, (2009).

2.3.2. Tipos de fluidos

Existen tres tipos de fluidos: newtonianos, no newtonianos y viscoelásticos. Como se puede observar en la Figura. 8, se describe brevemente todos los tipos de fluidos.

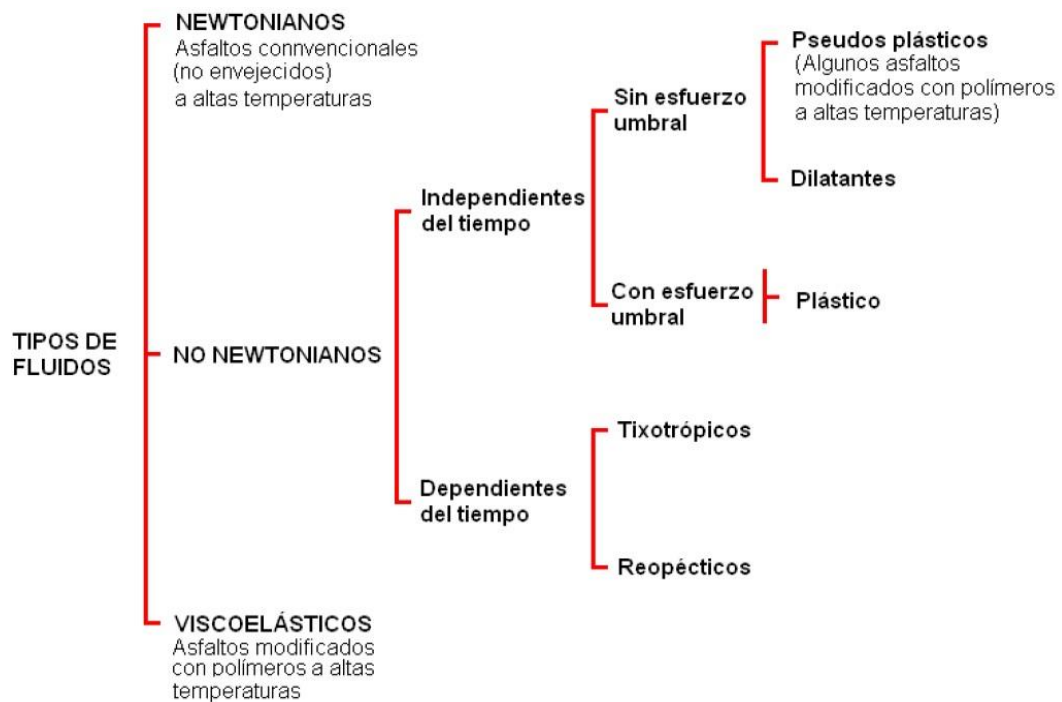


Figura. 8: Tipos de Fluidos

Fuente: García, (2009)

2.3.2.1. Fluidos newtonianos

Este se caracteriza por cumplir la Ley de Newton, es decir, que existe una relación lineal entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación.

Se debe citar que en fluidos newtonianos, la viscosidad depende no depende del tiempo de aplicación del esfuerzo aunque si puede depender de otros factores como la temperatura o la presión a la que se encuentre.

Un ejemplo de este tipo de fluido es el asfalto convencional a altas temperaturas.

2.3.2.2. Fluidos no newtonianos

Son aquellos en los que la relación entre esfuerzo cortante y la velocidad de deformación no es lineal. Estos fluidos a su vez se diferencian en dependientes e independientes del tiempo.

2.3.2.3. Fluidos viscoelásticos

Este tipo de fluidos se caracterizan porque se comportan a la vez como fluidos de propiedades viscosas y elásticas. La mezcla de dichas propiedades puede ser debido a que en el líquido existan moléculas muy largas y flexibles o puede también ser por la presencia de partículas líquidas o sólidos dispersos.

Un ejemplo de este tipo de fluidos son los asfaltos modificados con polímeros a altas temperaturas.

2.3.3. Asfalto modificado

Se lo pueden denominar como asfaltos modificados al asfalto en el cuál se le añadido de manera homogénea y estable en un porcentaje previamente analizado, algún tipo de aditivo que según su propósito, mejore o modifique sus propiedades reológicas (reología: estudia la deformación de un fluido sometido a agentes externos). (García, 2009)

El asfalto es un material muy susceptible a los cambios de temperatura, sufre envejecimiento por intemperismo, es afectado por la oxidación y fotodegradación. Por estas razones el material asfáltico, en ocasiones, tiene

que ser modificado mediante la adición de un agente químico para mejorar sustancialmente sus propiedades reológicas, es decir, que mejoren su comportamiento para una amplia gama de condiciones de temperatura o de aplicación de las cargas (altos desempeños en su funcionamiento al momento de estar en servicio, recibiendo las cargas del tráfico y soportando los posibles gradientes de temperatura).

El término aditivo es general y puede referirse a muy diversos materiales. Con el rápido desarrollo de la tecnología existen en el mercado numerosos productos que pueden tener efectos beneficiosos, aunque deban usarse con prudencia y con el pleno conocimiento de su comportamiento.

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

- **Mejoradores de adherencia:** son agentes de superficie, que incorporados al asfalto optimizan la interacción de éste con los áridos.
- **Filler:** polvos calcáreos o espesantes: El aporte de finos a las mezclas asfálticas hace que se conforme con el ligante asfáltico, encargado de aglomerar los agregados gruesos de las mezclas asfálticas.
- **Asfaltitas:** Es un asfalto natural en estado sólido. Poseen un alto contenido de asfaltenos en aproximadamente un 95% y se incorporan con muy baja energía, con un simple mezclado. Tiene así el sistema un óptimo comportamiento a altas temperaturas ambientes, una mala performance a bajas temperaturas rigidizando las mezclas.

- **Fibras:** El objeto de su adición es lograr mezclas con mayor capacidad de retención de asfalto a efectos de dotar a las mismas de mayor durabilidad y brindar mayor impermeabilidad a la estructura del pavimento protegiendo las capas ligadas de aporte estructural.
- **Polímeros:** Con la incorporación de polímeros se busca contar con ligantes mas viscosos a temperaturas elevadas para reducir las deformaciones permanentes de las mezclas que componen las capas de rodamiento, aumentando la rigidez y por otro lado disminuir el fisuramiento por efecto térmico a bajas temperaturas y por fatiga, aumentando su elasticidad. Finalmente permite disponer de un ligante de mejores características adhesivas y de mayor durabilidad.

2.4. Las Mezclas Asfálticas

La combinación de asfalto y agregados pétreos en proporciones exactas es a lo que generalmente se lo denomina una mezcla asfáltica. Las proporciones relativas de estos agregados determinan las propiedades físicas de la mezcla y, eventualmente, el rendimiento de la misma como mezcla terminada. (Padilla, 2008)

Dicha mezclas asfáltica debe ser duradera, esto quiere decir resistente a las acciones tales como el desprendimiento del asfalto del agregado por efectos del agua, la resistencia a la abrasión del tránsito, etc. Esta mezcla mediante su estabilidad debe ser resistente a las acciones del tránsito. Una mezcla debe ser impermeable para que sus componentes no estén bajo la acción directa de los agentes atmosféricos y debe ser trabajable para su fácil

colocación y compactación en terreno en definitiva una mezcla asfáltica ideal debe tener las siguientes características (Padilla, 2008):

- Baja rigidez a las temperaturas normales de manejo en planta y colocación en obra.
- Alta rigidez a las temperaturas altas de servicio para reducir el ahuellamiento.
- Baja rigidez y buenas características elásticas a temperaturas bajas de servicio para reducir el riesgo de la aparición de fisuras por cambios de temperatura.
- Buenas características adherentes en presencia de humedad.

2.4.1. Clasificación de las Mezclas Asfálticas (Padilla, 2008)

Existen varios parámetros de clasificación para establecer las diferencias entre las distintas mezclas y las clasificaciones pueden ser diversas:

2.4.1.1. Por fracciones de agregado empleado

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

2.4.1.2. Por la temperatura de puesta en obra

Mediante la clasificación de mezclas asfálticas según la temperatura de puesta en obra se pueden tener varias maneras al momento de producirlas, la Figura. 9 muestra una clasificación de producción de mezclas asfálticas por gradiente calorífico y van desde frío hasta caliente. La gama de temperaturas es amplia y van desde 0°C a 30°C es decir temperatura ambiente hasta lograr los 180°C .en producción.

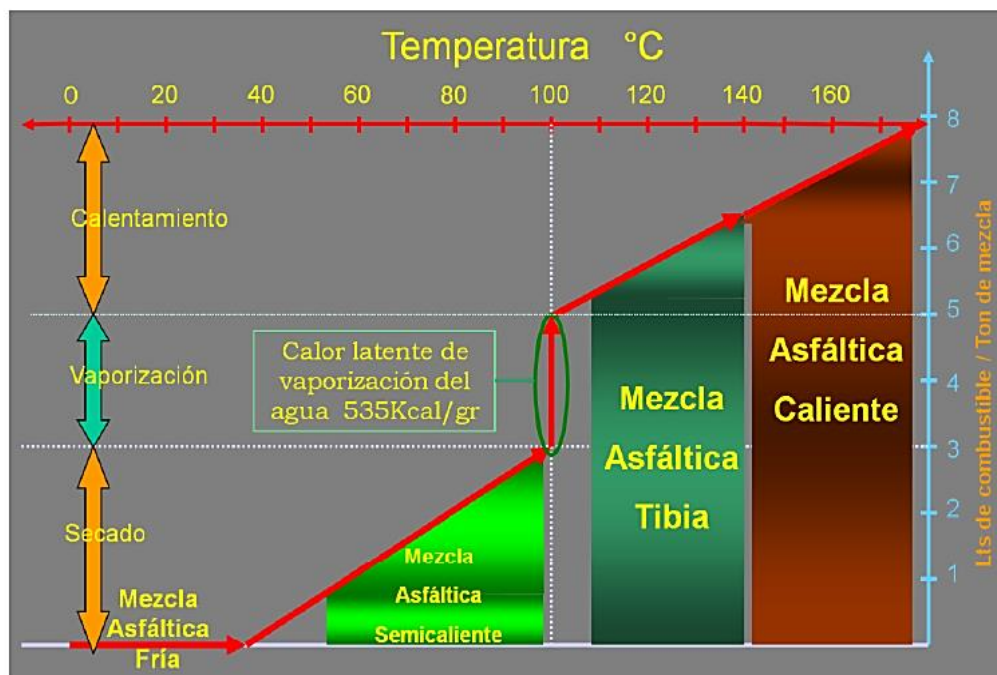


Figura. 9: Rangos de temperatura para producción de mezclas asfálticas

Fuente: Padilla, (2008)

Tabla 1: Clasificación de mezclas asfálticas por temperatura

Nombre de la mezcla	Temperatura	Objetivo	Logro
Mezclas en frío	de 25°C a 60°C	Permitir la incorporación en la mezcla de una alta proporción, de material reciclado.	Las mezclas en Frío con emulsiones asfálticas donde los agregados se revisten a temperaturas bajas en una emulsión de asfalto en agua, pueden utilizarse como capas intermedias, capas de refuerzo en incluso, capas de rodadura.
Mezclas tibias WMA	100°C a 135°C	Reducir los requerimientos térmicos de las mezclas asfálticas	Se mantienen o mejoran las características de rendimiento final de la mezcla asfáltica, para ello se requiere tecnología para reducir la viscosidad del ligante durante las fases de mezcla y tendido, sin tener un efecto negativo a las temperaturas de uso.
Mezclas en caliente	135°C a 180°C	Producción de mezcla asfáltica convencionalmente.	Son mezclas producidas por técnicas convencionales donde la temperatura de producción es elevada. Estas mezclas son de alto desempeño.

Fuente: Comisión Permanente del Asfalto, (2008)

2.4.1.3. Por la proporción de vacíos en la mezcla asfáltica

Este parámetro suele ser imprescindible para que no se produzcan deformaciones plásticas como consecuencia de las cargas y de las variaciones térmicas.

- Mezclas Cerradas o Densas: La proporción de vacíos no supera el 6 %.
- Mezclas Semi-cerradas o Semi-densas: La proporción de vacíos está entre el 6 % y el 10%.
- Mezclas Abiertas: La proporción de vacíos supera el 12 %.

- Mezclas Porosas o Drenantes: La proporción de vacíos supera el 20%.

2.4.1.4. Por el tamaño máximo del agregado

- Mezclas Gruesas: Donde el tamaño máximo del agregado pétreo excede los 10 mm.
- Mezclas Finas: También llamadas microaglomerados, pueden denominarse también morteros asfálticos, pues se trata de mezclas formadas básicamente por un árido fino incluyendo el polvo mineral y un ligante asfáltico.

2.4.1.5. Por la estructura del agregado

- Mezclas con Esqueleto mineral: Poseen un esqueleto mineral resistente, su componente de resistencia debida al rozamiento interno de los agregados es notable. Ejemplo, las mezclas abiertas y los que genéricamente se denominan concretos asfálticos, aunque también una parte de la resistencia de estos últimos, se debe a la masilla.
- Mezclas sin Esqueleto mineral: No poseen un esqueleto mineral resistente, la resistencia es debida exclusivamente a la cohesión de la masilla. Ejemplo, los diferentes tipos de masillas asfálticas.

2.4.1.6. Por la granulometría

- Mezclas Continuas: Una cantidad muy distribuida de diferentes tamaños de agregado pétreo en el huso granulométrico.
- Mezclas Discontinuas: Una cantidad muy limitada de tamaños de agregado pétreo en el huso granulométrico.

2.5. Las Mezclas Asfálticas Tibias

2.5.1. Definición

El término Mezcla Asfáltica Tibia hace referencia a la variedad de tecnologías que permiten bajar las temperaturas de trabajo de las mezclas asfálticas en caliente, tanto en su etapa de producción en planta como en la etapa de extendido y compactación en la vía. El uso de la tecnología de mezcla asfáltica tibia permite bajar las temperaturas de producción y compactación entre 20 y 50 °C es decir se puede trabajar a temperaturas entre 100 °C y 135 °C, todas las nuevas tecnologías involucradas en su producción se concentran en poder colocar asfaltos a temperaturas sensiblemente inferiores a las técnicas tradicionales utilizadas.

2.5.2. Estado del Arte

El concepto de mezcla tibia surgió en Europa, tras la necesidad de una mezcla bituminosa que ofreciera economía de energía y tuviera el mismo desempeño de las mezclas bituminosas en caliente.

Desde la década de los ochenta se ha generado una importante tendencia hacia la investigación, desarrollo e innovación en productos, procesos y servicios, que puedan generar sostenibilidad ambiental por medio de la cual se pueda tener mitigación o una adaptación al cambio climático como problema de naturaleza compleja. (Lopera, 2011)

En cuanto a las investigaciones realizadas al respecto sobre mezclas tibias se presentan a continuación las más relevantes en el continente Americano:

- USA: existe un enorme interés respecto de las Mezclas Tibias, prácticamente todos los estados tienen un programa para investigar y estimular el uso de mezclas tibias.
- Texas lidera las aplicaciones comerciales de mezclas tibias.
- California también está promoviendo fuertemente este tipo de aplicaciones. En el futuro todas las Mezclas en caliente serán transformadas a mezclas tibias.
- En Sudamérica ya hay aplicaciones a escala comercial en Brasil y Argentina.
- En Colombia existe una investigación realizada por el magíster Conrado Hernando Lopera Palacio, experto en ingeniería, infraestructura y sistemas de transporte de la Universidad Nacional de Colombia en Medellín, y el profesor Eliécer Córdoba Maquilón, investigador de la Facultad de Minas, mediante la cual se generó un avance importante en cuanto a la utilización en la construcción de carreteras de las llamadas mezclas asfálticas tibias mediante el uso de un bioasfalto. El bioasfalto es un nuevo compuesto resultado de la amalgama de aceite crudo de palma con asfalto. Según los resultados de la investigación, la fusión reduce la viscosidad del material, lo que facilita su utilización y tiene buena resistencia mecánica.
- Hay pruebas de campo en Uruguay, Chile y Bolivia.

El desarrollo de estas investigaciones enfocándose en la reducción de la temperatura de mezcla y compactación como ya se lo ha mencionado, empezó en 1997, para cumplir con el Protocolo de Kyoto, dicha alternativa

también facilita el trabajo de pavimentación en los países en los que el invierno es muy riguroso debido a que la mezcla tibia se enfría más lentamente que la mezcla en caliente.

Especialistas de los Estados Unidos a partir del 2002 empezaron a investigar esta técnica que rápidamente sería adoptada por ese país. Se empezó a investigar en Brasil y para luego adaptarlas a las condiciones de trabajo locales. Cada país tiene condiciones y recursos existentes distintos, entonces cada técnica desarrollada se debe adaptar a las mismas. (Lopera, 2011)

A continuación se detalla el uso y aplicación de varios tipos de tecnologías utilizadas por empresas en el mundo para lograr bajar las temperaturas mediante la Tabla 2 y Tabla 3:

Tabla 2: Variedad de producción y tipos de aditivos para mezclas tibias

Proceso de Mezclas asfálticas tibias	Empresa	Aditivos	Temperatura de producción (en planta)°C	Reporte de uso	Aproximado total toneladas producidas
ADITIVOS - CERAS					
Sasobit (Fischer Tropsch cera)	Sasol	En Alemania se añadió un promedio de 2.5% en peso	Entre 20 °C-130 °C	Alemania y otros países por todo el mundo	> 10 millones de toneladas por todo el mundo
Asfalto-B (Montan cera)	Romonta	En Alemania se añadió un promedio de 2.5% en peso	Entre 115 °C-135 °C	Alemania	Desconocido
Licomont BS 100 (aditivo) o Súbit (ácido adiposo amidas)	Clariant	Alrededor de 3% del peso	Entre 115 °C-135 °C	Alemania	> 322.500 metros cuadrados desde 1994
3ELT or Ecoflex	Colas	2% del peso	Entre 115 °C-135 °C	Francia	Desconocido
ASFALTOS ESPUMADOS					
Aspha-min (zeolita)	Eurovia y MHI	Alrededor del 0.3% del peso total de la mezcla	Entre 110 °C-135 °C	Alemania, Francia y Estados Unidos	Alrededor de 300.000 toneladas
ECOMAC (mezcla fría antes de echarla)	Screg	Tipo y calidad desconocida	Situado alrededor de 45°C	Francia	Algunas pruebas
LEA, también EBE y EBT	LEACO, Fairco, EIFFAG E, Travaux Publics	0.2% en peso de archivador de capa y agente de adhesión	<100°C	Francia, España, Italia y Estados Unidos	>100.000 toneladas
LEAB® (espuma directa con aditivo archivador)	BAM	Añadieron un 0.1% en peso	90°C	Países Bajos	Siete proyectos comerciales
LT Asfalto (espumoso con adición de higroscopio) pasta de relleno para mantener funcionalidad	Nynas	Añadieron 0.5-1.0 % de una pasta de relleno de Higroscopía	90°C	Países Bajos e Italia	Desconocido

Fuente: (FHWA, 2008)

Tabla 3: Variedad de producción y tipos de aditivos para mezclas tibias, (Continuación).

Proceso de Mezclas asfálticas tibias	Empresa	Aditivos	Temperatura de producción (en planta)°C	Reporte de uso	Aproximado total toneladas producidas
ASFALTOS ESPUMADOS					
Mezclas tibias de asfalto espumoso	Kolo Veidekke, Shell Bitumen(derechos patentes por todo el mundo excepto U.S) y BP(derechos patentes U.S)	Inyección de agua alta presión	110-120°C	Francia, Noruega, Canadá, Italia, Luxemburgo, Países Bajos, Suecia, Suiza, Reino Unido)	>60.000 toneladas
TECNOLOGÍAS DE ESTADOS UNIDOS					
Evotherm (agregado caliente cubierto con emulsión)	Mead-westvaco	Sí, pero se desconoce cantidad	85-115°C	Francia, Canadá, China, Sudáfrica, Estados Unidos	>17.000 toneladas
Doble Barrel Green	Astec	Inyección de agua a presión vaporizada	116-135°C	Estados Unidos	>4.000 toneladas
Advera (zeolita)	PQ corporation	Alrededor de 0.25% del peso total de la mezcla	20-130°C	Estados Unidos	>10.000 toneladas

Fuente: (FHWA, 2008)

2.5.3. Antecedentes históricos del trabajo con mezclas tibias

(HMAT, 2008)

Año 1995

- Shell y Kolo Viedekke, iniciaron un programa en conjunto, para el desarrollo de un producto, y del proceso para la fabricación de mezcla agregado - asfalto a temperaturas más bajas; obteniendo mejores propiedades o equivalentes condiciones de desempeño, con relación a las mezclas tradicionales en caliente.

Año 1999-2001

- Reportes iniciales de las tecnologías de la mezcla tibia en el Congreso Eurasphalt/Eurobitume, el Fórum Alemán de Bitumen, Conferencia sobre Pavimentos Asfálticos en Sudáfrica, principalmente.

Año 2002

- Recorrido de exploración a Dinamarca, Alemania y Noruega realizado por directores de NAPA para examinar las tecnologías de la mezcla asfáltica tibia (WMA), Aspha-min, la Espuma y el Sasobit. En la agenda de trabajo del grupo, se incluyeron reuniones con el Fórum Alemán de Bitumen, con el objetivo de considerar algunas actividades del grupo de Trabajo sobre Reducción de Temperatura.

Año 2003

- Los estudios sobre mezclas tibias, son presentados en la Convención Anual de la Asociación Nacional de Pavimento Asfáltico NAPA.
- El Centro Nacional para la Tecnología en Asfalto, investiga sobre los procesos de las mezclas tibias, Aspha-min (zeolite cristalino) y Sasobit (una cera de Fisher-Tropsch). La investigación es patrocinada por NAPA, Administración Federal de Carreteras FHWA, Eurovia (Aspha-min) y Sasol (Sasobit).

Año 2004

- Meadwestva company, introduce Evotherm DAT (aditivo químico) a la mezcla, al tiempo que apoya la investigación de NCAT.
- La demostración de mezclas tibias, es presentada en el Mundo del Asfalto.

- Las primeras pruebas de campo fueron realizadas en Florida y Carolina del Norte.

Año 2005

- Formación del grupo de trabajo (TWG) de la mezcla Asfáltica Tibia de NAPA-FHWA. El objetivo principal del trabajo es la implementación adecuada a través de recolección de datos y análisis, de un método genérico de especificaciones técnicas en WMA.
- Declaración de investigación de problemas sometido a la consideración de la American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO.
- Se realizan pruebas de campo en Florida, Indiana, Maryland, New Hampshire, Ohio; y en Canadá.
- La NCAT, publica sus primeros reportes sobre Sasobit y Aspha-min.

Año 2006

- Durante la Conferencia de Pavimento Asfáltico en el Mundo del Asfalto, se presenta una sesión de medio día sobre mezclas tibias.
- Grupo de Trabajo Técnico TWG, publica lineamientos sobre el funcionamiento y pruebas ambientales.
- Con base en la declaración de investigación de problemas, cuyo documento fue sometido en 2005 a evaluación por parte de la AASHTO, se define como de alta prioridad la destinación de fondos de la investigación en WMA.

- El TWG, somete dos declaraciones más de investigación, a consideración por parte de la AASHTO.
- Se realizan pruebas de campo en: California, con la mezcla de hule asfáltico; Michigan, Missouri, sobre la nueva aplicación para evitar baches causados por temperatura en la carretera; Nueva York, donde se probó el nuevo proceso de Asfalto de bajo consumo de energía; Ohio, donde se realizó una exhibición abierta al público con 225 asistentes; Carolina del Sur, Texas, Virginia y Wisconsin, también se realizaron exhibiciones abiertas al público.
- Un contratista de Missouri, realiza trabajos de producción de pavimento con mezcla en tibio partiendo de una prueba exitosa.
- NCAT publica un reporte sobre el Evotherm.
- Para la realización de la Conferencia Anual de NAPA, fueron requeridas numerosas presentaciones.

Año 2007

- AASHTO y FHWA, realiza visitas guiadas a experiencias en WMA, en Francia, Alemania y Noruega.
- La sesión de trabajo de 2007, del Grupo en Investigación de Transporte TRB, tuvo como único tema WMA.
- Astec Industries introduce su tecnología de asfalto espumado.
- Meadwestva company, presenta el sistema de introducción de la Tecnología del Asfalto Dispersado (DAT) para el Evotherm.

- Se desarrolla, Advera WMA, un producto a partir de Zeolite, introducido por PQ Corporation.
- Demostración en calle de San Antonio en la Reunión Anual de la APWA.
- 30.000 toneladas de diferentes tecnologías de WMA, son colocadas cerca de Yellowstone, para el mes de Agosto.
- En las pruebas realizadas en la Yellowstone, se utilizaron 9,000 toneladas métricas de asfalto, en cada una de las tres secciones (Sección de Control, Sección Sasobit y Sección de Advera WMA). Durante el proceso de acarreo, las mezclas fueron conducidas cerca de 90 minutos desde una planta portátil en Cody, Wyo.
- Aunque fue difícil la logística, las cuadrillas de pavimentación lograron buenas densidades: el promedio de Advere WMA-93.9% de densidad teórica máxima; el promedio de Sasobit – 93.4%. Neitke, quien estuvo a cargo del proyecto, declaró que: “La densidad no fue difícil de alcanzar, aun cuando las temperaturas de la mezcla bajan”, ante lo cual, “Parecía un tanto difícil mantener bajas las temperaturas de la mezcla; las temperaturas de producción tenían una tendencia a brincar de 120 a 127 °C. Las pruebas mostraron que los agregados se secaron adecuadamente aun con las temperaturas bajas. Los contenidos de humedad estaban abajo del máximo de 0.5% tanto para las mezclas en tibio como para la mezcla de control”.
- Son realizadas numerosas pruebas de campo, en California, Illinois, Nueva Jersey, Nueva York, Carolina del Norte, Ohio, Carolina del Sur,

Tennessee, Texas, Virginia, Wisconsin, Wyoming y otros estados; y en Ontario.

Año 2008

- Un equipo de investigadores expertos estadounidenses visitó Bélgica, Francia, Alemania y Noruega para evaluar las diversas tecnologías WMA con apoyo y respaldo de la Administración Federal de Carreteras de Tecnología del Programa Internacional de Exploración. De este estudio es posible concluir que los beneficios de las tecnologías WMA incluyen el uso reducido de combustible y las emisiones en apoyo del desarrollo sostenible, la compactación mejorada del campo, lo que puede facilitar mayores distancias de acarreo y mejores condiciones de trabajo. Agencias europeas esperan que el rendimiento de las WMA sea el mismo o mejor que el de las HMA. (D' Angelo, 2008)

Año 2011

- En Colombia, se logra un novedoso diseño para la elaboración de mezclas asfálticas tibias a partir de la combinación de asfalto y aceite crudo de palma, con el cual se lograron interesantes reducciones de temperatura en el proceso de fabricación en planta de una mezcla asfáltica de gradación discontinua y de elaboración tibia. Las pruebas de laboratorio muestran al crudo de palma como un aditivo de gran potencial reductor de viscosidad y a su vez la mezcla producida con este refleja una buena resistencia mecánica y desempeño producidas a menor temperatura.

2.5.4. Beneficios de las mezclas tibias

2.5.4.1. Consumo de energía

La reducción del consumo de energía es el beneficio más obvio de las mezclas tibias y es discutido en la literatura como uno de los dos principales beneficios de ésta.

Los estudios han demostrado que la reducción del consumo de energía de alrededor de 30% se puede lograr mediante la reducción de las temperaturas de producción en la planta de asfalto. La reducción en el consumo de energía reduce a su vez el costo de la producción de la mezcla, pero puede haber también un añadido por reducción en los costos involucrados en el uso del proceso de mezcla tibia, es decir, para los aditivos y/o equipos de modificación. (Lopera, 2011)

Otro beneficio adicional de la reducción de las temperaturas de producción que a veces se menciona es el menor desgaste de la planta de asfalto.

2.5.4.2. Emisiones

La reducción de emisiones debido a la reducida temperatura de producción es una de las ventajas importantes dentro de las mezclas tibias.

Según D' Angelo (2008), la producción de mezcla tibia reduce significativamente las emisiones de gas carbónico y los olores, en comparación con la producción de mezclas en caliente.

Cabe recordar que las emisiones de producción de mezcla - asfalto y la colocación pueden, en ciertos niveles elevados, ser perjudiciales para la salud. En 2000, el Instituto Nacional para la Seguridad y Salud Ocupacional (NIOSH) de EE.UU. publicó un estudio de riesgo sobre los efectos en la Salud Ocupacional de la exposición a la mezcla- asfalto. En esta revisión, el NIOSH evaluó los efectos potenciales para la salud de la exposición ocupacional a asfalto. En 1977, el NIOSH determinó que entre los efectos adversos para la salud por la exposición se encuentran la irritación de las membranas de la conjuntiva y el tracto respiratorio.

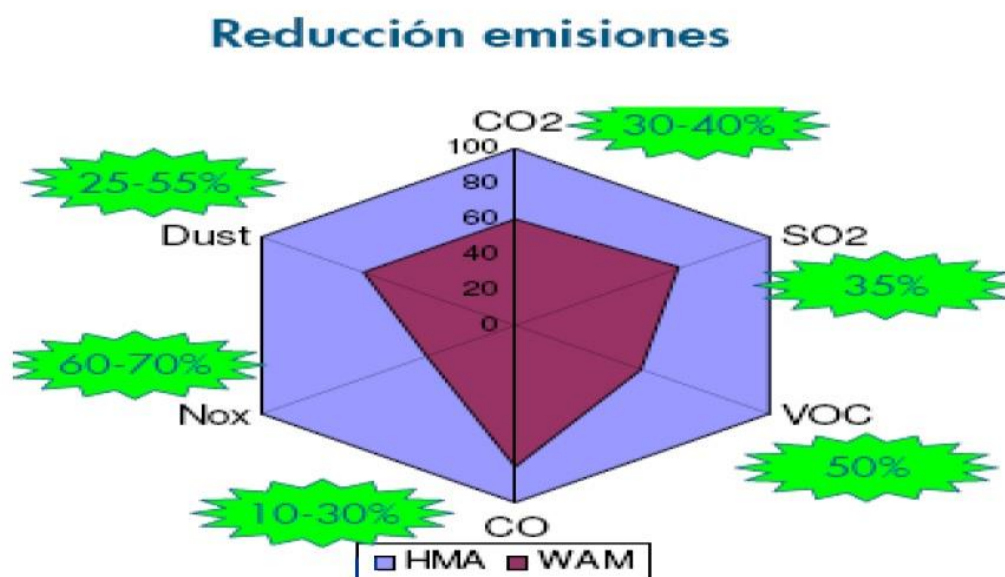


Figura. 10: Reducción de las emisiones de gases en la producción de la mezcla

Fuente: D' Angelo, (2008).

En la Figura. 10, se puede evidenciar las reducciones en las emisiones comparando las mezclas en caliente y las tibias, por ejemplo se puede llegar a tener una reducción del 25-55% de las partículas de polvo, entre 30% y

40% en las emisiones de gas carbónico, entre 60% y 70% en las de óxido de nitrógeno, 50% en compuestos orgánicos volátiles y 35% en las emisiones de dióxido de azufre.

En la Figura. 11 se tiene una comparación del tipo de mezclas asfáltica y su nivel aproximado de emisiones contaminantes y consumo de gasolina.

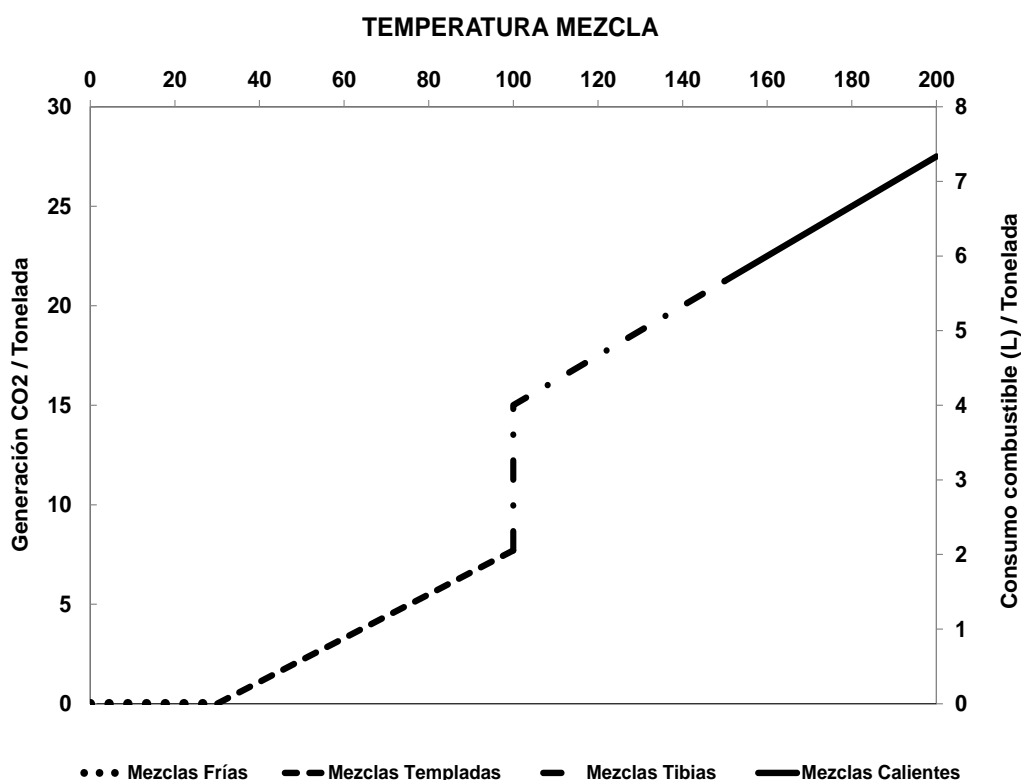


Figura. 11: Temperatura de fabricación, consumo de combustible y cantidad de emisiones de gases efecto invernadero

Fuente: Ramirez, (2008)

2.5.4.3. Reducción de la viscosidad

Todas las tecnologías creadas para las mezclas asfálticas tibias se basan en la reducción de la viscosidad del asfalto lo cual permite al agregado ser totalmente cubierto a una temperatura inferior a lo que

tradicionalmente se requiere en las mezclas de producción en caliente.(Senior, 2013)

Debido a la viscosidad reducida, los procesos de mezcla tibia pueden funcionar como una ayuda en la compactación y algunos beneficios relacionados con este son mencionados a menudo en relación con este tipo de mezclas.

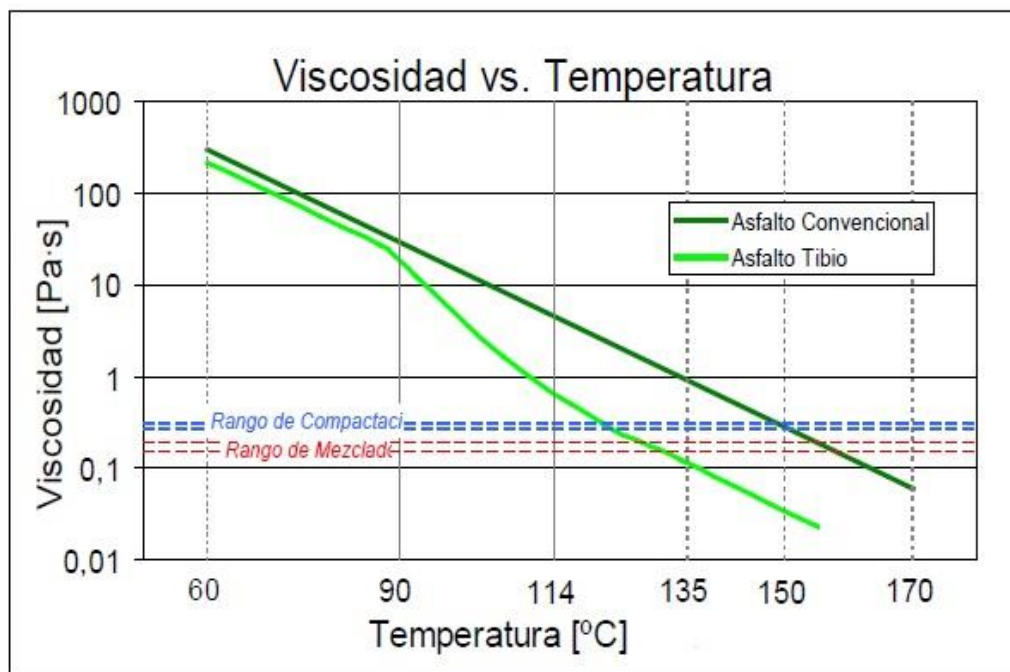


Figura. 12: Curva Viscosidad vs Temperatura del asfalto convencional y tibio.

Fuente: Larsen, (2010)

En la Figura. 12 se tiene la representación de la curva viscosidad vs temperatura en donde para un asfalto convencional se comporta como un líquido newtoniano a esas temperaturas y el asfalto tibio debido a la adición de aditivos se produce la disminución de viscosidad y cambio en la forma de la curva de viscosidad.

2.5.4.4. Aspectos técnicos

Producción, colocación y compactación a temperaturas más menores, lo cual genera un control de densidades más eficaz.

Aumento en las distancias de transporte, dado que por la menor temperatura de producción hay una mayor conservación de la energía de compactación de los equipos, por tanto se requiere menos esfuerzo para obtener las densidades requeridas, en otras palabras, los menores requerimientos de temperatura para la compactación de la mezcla, agilizan el trabajo aumentando las distancias de cobertura de la mezcla asfáltica lo que se traduce en una disminución de los costos. (Senior, 2013)



Figura. 13: Comparación de la descarga de mezcla en la planta de asfalto en donde a la izquierda se tiene una mezcla en caliente y a la derecha una mezcla tibia.

Fuente: Ulloa, (2011)

Se puede incorporar además un mayor porcentaje de RAP (reciclaje de pavimentos asfálticos) debido a las bajas temperaturas.

Se puede lograr también una apertura al tráfico en menor tiempo comparado con las mezclas en caliente y obtener una menor oxidación en el asfalto por los gradientes de temperatura.

2.5.5. Desventajas de las mezclas tibias

Para la industria de la construcción de carreteras, la principal desventaja es el coste añadido que aportan las WMA al incorporarse el mercado, y la inversión principal es adaptar las plantas de fabricación de mezclas en caliente a las modificaciones requeridas de las mezclas tibias. Por otro lado, el precio por tonelada de mezcla se incrementa debido a la incorporación del aditivo. (Linares, 2010)

Al parecer no existe ninguna desventaja destacable en cuanto a las propiedades mecánicas de las WMA comparadas con las HMA.

Sin embargo, es importante destacar que hoy en día hay una desventaja desde el punto de vista económico ya que se prevé que será difícil poner en práctica la entrada de las mezclas tibias como a una tecnología que sustituya a las mezclas en caliente, o que les haga de momento la competencia. El motivo de esta previsión es debido a la posible negativa de las constructoras (fabricantes de mezclas) a hacer frente a una inversión que, a corto plazo, no aportaría ningún beneficio destacable.

2.5.6. Balance costo beneficios

Costo:

Obviamente se agregara cierto costo para la adición del modificador, en este caso el aceite de palma.

Ahorros:

1. Energía
2. Menor desgaste y rotura de equipos
3. Mayor productividad:
 - Pavimentación en zonas frías o a la noche.
 - Extensión en la temporada de aplicación de asfalto.
 - Mayores distancias de acarreo de mezcla.
 - Más rápida apertura al tránsito que con las mezclas calientes.
4. Mejora la densidad de compactación.
5. Extiende la vida útil de pavimento.

2.5.7. La temperatura como factor que afecta a la durabilidad del asfalto (Bolzan, 2010)

Las características del cemento asfáltico es un factor de primordial importancia en la durabilidad de las capas de rodaduras asfálticas. Entre los factores más importantes que producen la disminución de la durabilidad de un asfalto en las condiciones normales de trabajo son:

2.5.7.1. Evaporación de los componentes volátiles

Todo asfalto en su estructura contiene una cierta proporción de maltenos conformados por compuestos de características muy diferentes que le proporcionan la adherencia y flexibilidad; pero que dadas sus propiedades pueden llegar a volatizarse cuando son sometidos a cambios intensos de temperatura. Esta disminución de los maltenos mediante una alteración de sus componentes, se presenta en los siguientes casos:

Durante el proceso de mezclado en la planta

Es de conocimiento acerca del endurecimiento que se produce en los ligantes por efecto de su largo tiempo de permanencia a altas temperaturas en los tanques de almacenamiento y sobretodo durante el proceso de mezclado, al ser pulverizados en caliente sobre la superficie mineral.

Durante la vida útil del pavimento

Este es un proceso de larga duración aunque el asfalto es sometido a temperaturas moderadas, las características propias de la mezcla pueden llegar a afectar irreversiblemente su durabilidad.

Una vez puesta en obra la acción de los agentes atmosféricos, sobre todo la acción del oxígeno, caracterizada por la radiación ultravioleta de la luz solar, y la elevación de temperatura, producen una oxidación de las moléculas más susceptibles y como consecuencia un envejecimiento del asfalto.

Las alteraciones anteriores van a modificar las propiedades de flujo y variar su consistencia; el asfalto va perdiendo su poder ligante, se torna frágil y quebradizo permitiendo que el agua penetre a través de la película y desplace el asfalto con el consiguiente deterioro de la mezcla.

Estudios realizados demuestran que los mayores cambios ocurren durante el mezclado; el ensayo utilizado con mayor frecuencia para reproducir dicha acción es el de pérdida por calentamiento en película delgada (ASTM-D-1754).

2.5.8. Métodos para producir mezclas tibias

Las tecnologías para preparar y producir mezclas tibias son múltiples y cada una de acuerdo al producto modificador del asfalto, la cual da las características finales que se quiere obtener. De acuerdo a esto se pueden obtener varios tipos de métodos los cuales se los va a mencionar en la Figura. 14:

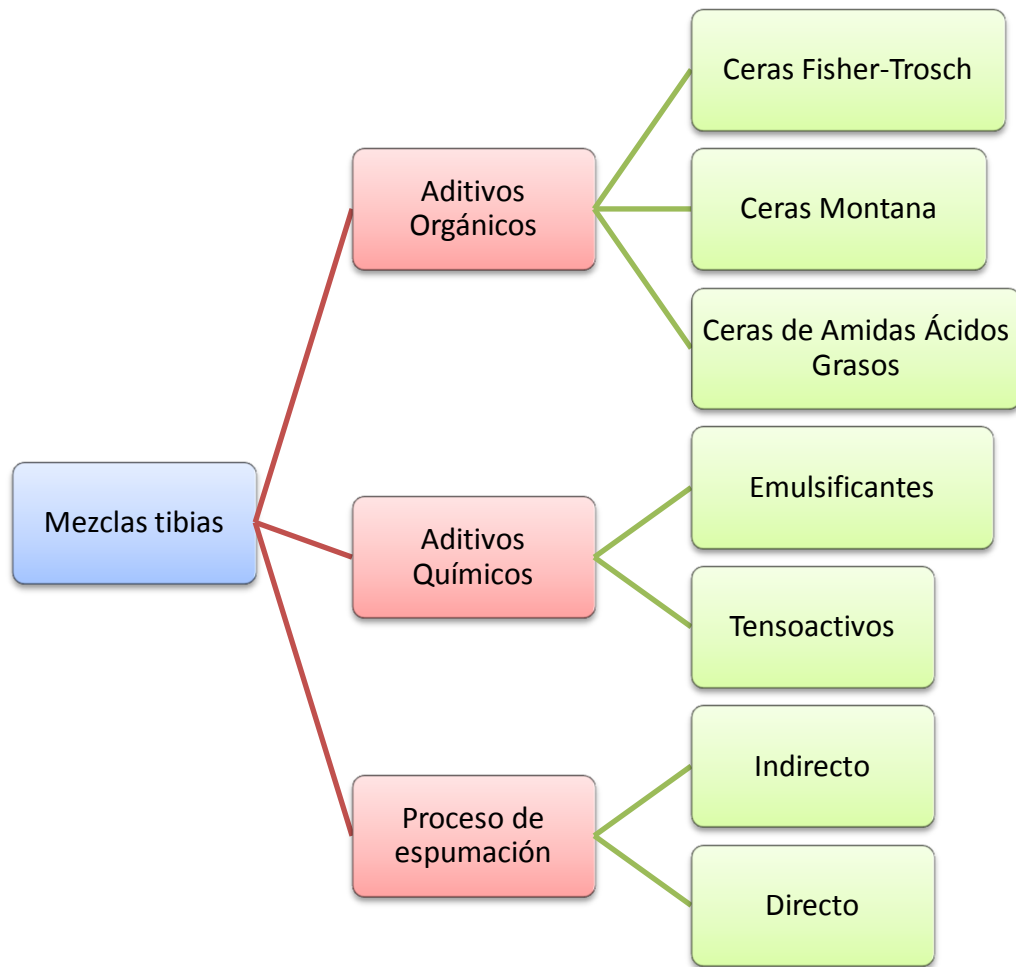


Figura. 14: Resumen de los métodos para producir mezclas tibias

Fuente: Labic, (2012)

2.5.8.1. Aditivos Orgánicos(Usos de ceras)

Principio:

- Adición a la mezcla de distintos tipos de ceras al ligante como modificador de la viscosidad y lubricación.
- Por encima del punto de fusión de las ceras, se produce un decrecimiento de la viscosidad del ligante. Durante el periodo de enfriamiento de la mezcla extendida los aditivos se solidifican en

partículas microscópicas y uniformemente distribuidas que incrementan la dureza del ligante.

- Se debe agregar en la planta de mezcla o directamente al ligante (esta es la mejor solución), debido a la homogeneidad que se requiere de mezclado entre el asfalto y el aditivo.
- Se dosifica entre un 2% y 4% de la cera del total de la masa del ligante.

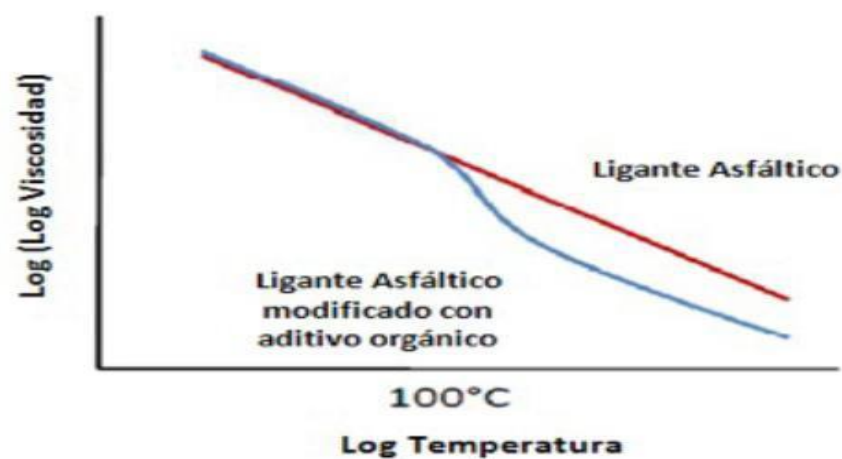


Figura. 15: Curva viscosidad vs temperatura con aditivo orgánico

Fuente: Ulloa, (2011)

Resultados:

- Fácil de utilizar, no es necesario inversiones ni modificación de la planta.
- Temperatura de mezcla de 130-140°C.
- Reducción de la temperatura limitada.
- Se mejora la trabajabilidad en la mezcla.
- Puede mejorar la resistencia al ahuellamiento.

Tipos de ceras:

- Ceras Fischer-Tropsch: Obtenidas a partir un proceso químico para la producción de hidrocarburos líquidos a partir de gas de síntesis, el cual es un combustible gaseoso obtenido a partir de sustancias ricas en carbono (hulla, carbón, coque, nafta, biomasa) sometidas a un proceso químico a alta temperatura. Contiene cantidades variables de monóxido de carbono (CO) e hidrógeno (H₂).
- Ámidas acidas grasas: Las ceras conocidas como amidas ácidas grasas se caracterizan por ser producidas sintéticamente mediante la reacción de amidas con grasas ácidas. Una amida es un compuesto orgánico que consiste en una amina unida a un ácido carboxílico convirtiéndose en una amina ácida (o amida).
- Ceras de Montana: La cera Montana es también conocida como la cera de lignito o la cera OP. Es una cera dura obtenida por extracción con disolventes de determinados tipos de lignito o carbón pardo. Hay muy pocos yacimientos comercialmente, entre ellos en Alemania, y en la cuenca del lone, California.

Sistemas utilizados:

- Sasobit ®: es una cera cristalina, compuesta por una larga cadena de hidrocarburos polimétileno-alifáticos, obtenida mediante un proceso Fischer-Tropsch, que se comercializa en forma de polvo blanco o granulada. (Sasobit, 2012)

- Licomont BS: es un modificador asfáltico basado en ácidos grasos derivados que pueden incrementar la vida útil de los pavimentos, particularmente en ambientes que se encuentran a altas temperaturas. Se comercializa en forma de polvo o granulado.
- Asphaltan: es un producto de Romonta GmbH, disponible comercialmente en sacos de 25 kg. Está compuesto por una mezcla de ceras de montana e hidrocarburos de alto peso molecular.



Figura. 16: Presentación del Producto Sasobit y su versatilidad para la adición

Fuente: Sasobit, (2012)

2.5.8.2. Aditivos Químicos

Principio:

- Son productos que no dependen de ningún proceso de espumación o de reducción de la viscosidad para reducir las temperaturas de mezclado y compactación.
- Estos productos generalmente incluyen una combinación de modificadores del asfalto que mejoran la envuelta de los áridos por el

ligante, la trabajabilidad y compactación de la mezcla, así como promotores de adhesión ligante-agregado.

Resultados:

- Reducción de la Temperatura de 50 a 75°C para Evotherm y 15-30°C para REVIX®
- Mejoran la envuelta, trabajabilidad, compactación de la mezcla mediante sus agentes cohesivos.
- Se requieren algunas modificaciones en la planta para adicionar la emulsión a la mezcla.
- Es indispensable realizar modificaciones en el diseño de la mezcla asfáltica en el laboratorio.
- El emulsificante se adiciona a una tasa aproximadamente de 5% por peso de asfalto antes de mezclarse con el agregado.

Tipos de aditivos químicos:

- Emulsificantes: Estos productos generalmente incluyen una combinación de agente emulsificantes, surfactantes, polímeros y aditivos para mejorar la envuelta, la trabajabilidad de la mezcla. La cantidad añadida y la reducción de temperatura conseguida por estas tecnologías dependen del producto específico utilizado. Los aditivos generalmente se mezclan con el ligante antes de que éste sea introducido en el tambor de mezclado. (Labic, 2012)
- Tensoactivos: Los aditivos basados en tensoactivos ayudan al buen recubrimiento de los áridos reduciendo la tensión superficial árido-

bitumen, disminuyendo el ángulo de contacto entre el ligante y el árido. También actúan como lubricantes mejorando la trabajabilidad de la mezcla como se puede ver en la Figura. 17.



Figura. 17: Mejora el ángulo de contacto mediante el uso de tensoactivos

Fuente: Ulloa, (2011)

Sistemas:

- Evotherm ®: es un paquete químico diseñado para promover la adhesión, envuelta, compactación y trabajabilidad de las mezclas asfálticas a temperaturas menores. Se trata de una forma de Evotherm con ausencia de agua, apropiado para aplicar de una manera más eficiente los aditivos contenidos en la tecnología Evotherm en la planta o en la terminal. Las temperaturas de producción se reducen entre 33 y 45°C. Este producto ha sido también comercializado como REVIX, pero actualmente recibe el nombre únicamente de MWV Evotherm 3G.



Figura. 18: Instalación de mezcla tibia con Evotherm 3G

Fuente: Mcasphalt, (2012)

- Cecabase Rt: se basa en agentes tensoactivos compuestos al menos por un 50% de materia prima renovable. Cuando se mezcla con el betún, la temperatura de extendido puede reducirse hasta en 50°C sin que haya un efecto adverso en el rendimiento del pavimento. Es un aditivo químico que da trabajabilidad a las mezclas de asfalto a temperaturas menores:
 - Es un líquido, fácil de mezclar en el asfalto.
 - Se necesita sólo entre 0.2 y 0.5 % en el asfalto.
 - No se requieren modificaciones en el proceso.
 - Se obtienen reducciones de temperatura de fabricación de hasta 45°C
 - No se modifica la viscosidad del asfalto.

En un estudio en microscopio realizado por el fabricante se encontró una buena repartición de agregados, Excelente recubrimiento de los agregados (incluso las partículas finas), (Ceca, 2012)

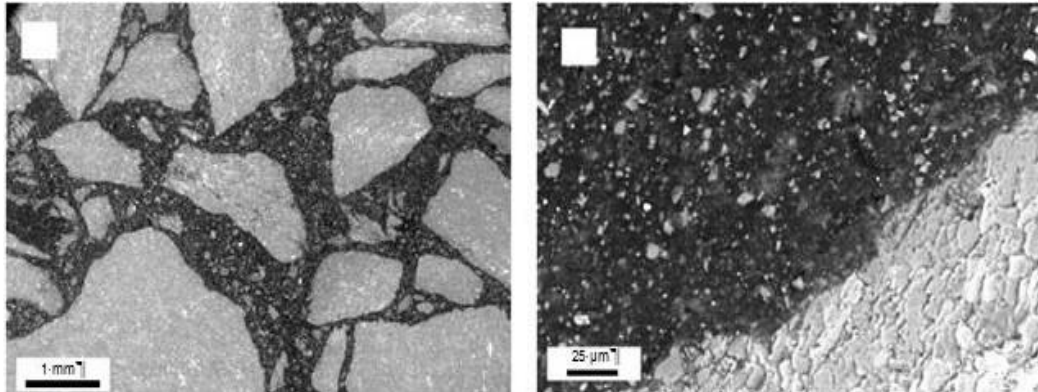


Figura. 19: Estudio microscópico electrónico mezcla con Cecabase RT

Fuente: Ceca, (2012)

2.5.8.3. Procesos de espumación

Principio:

- Se basa en el uso de pequeñas cantidades de agua que se inyectan directamente en el ligante asfáltico o con los áridos en el tambor de mezclado.
- Añadido a los agregados a 130°C.
- El agua se agrega en forma de vapor.
- El betún se espuma incrementando su volumen y disminuye su viscosidad.

Resultados:

- Uso de un alimentador adicional en la planta de mezcla.

- Temperatura de mezcla alrededor de 130°C.
- Facilidad de envoltura de los áridos y la trabajabilidad de la mezcla.

Tipo de procesos:

- Método indirecto (Zeolita): se produce inyectando agua directamente. Las zeolitas son cristales de alta porosidad y canales submicroscópicos que se componen fundamentalmente silicio, aluminio y oxígeno. Los canales submicroscópicos contienen agua, la cual se libera de la estructura ante el aumento de la temperatura (ebullición a altas temperaturas) provocado por la adición del betún, causando el efecto de micro-espumación en la mezcla asfáltica
- Método directo: se produce incluyendo en el ligante materiales que contienen agua.

Sistemas:

- Aspha-Min ® de Eurovia: es una zeolita sintética. Se presenta comercialmente como unos gránulos muy finos, con un tamaño medio de partícula de alrededor de 380 µm o bien como un polvo fino, con 3.5 µm de tamaño medio. En el rango de temperaturas que va desde los 85 hasta los 180 °C, el agua cristalina que contienen las partículas es liberada, creando el ya mencionado efecto de espumación correspondiente.



Figura. 20: Presentación de Aspha-min

Fuente: Asphamin, (2012)

- Advera: Se trata de una zeolita sintética, la cual, dosificando una cantidad igual al 0,25% del peso de la mezcla, consigue la producción y extendido de mezclas a temperaturas de entre 20 a 35 °C menores que las mezclas calientes. Tanto el proceso de obtención, como sus características son similares al anterior, son aluminosilicatos hidratados, que contienen entre un 18 y un 21% de agua cristalizada.



Figura. 21: Presentación Advera en polvo

Fuente: Advera, (2012)

2.6. Fuentes principales de contaminación ambiental (RITL, 2013)

Según su origen se clasifican de la siguiente manera:

2.6.1. Contaminantes propios del proceso

Esta actividad se identifica por las emisiones de material particulado y de orgánicos volátiles que se presentan a lo largo de todo el proceso. Las emisiones se clasifican en dos categorías: fuentes canalizadas, en donde el flujo de emisiones pasan a través de ductos hacia los sistemas de colección primario y/o secundario, para ser posteriormente venteadas hacia la atmósfera por medio de chimeneas o tuberías; y las fugas de emisiones provenientes de los procesos y fuentes abiertas y están compuestas por una combinación de contaminantes gaseosos y material particulado.

Para una planta de mezcla asfáltica en caliente de dosificación, en la etapa de secado y en el transporte del agregado caliente se canalizan las emisiones de material particulado, vapor de agua y residuos de la combustión. De acuerdo con el balance de masa el valor típico de las emisiones de vapor de agua y material particulado corresponden a la Tabla 4:

Tabla 4: Emisiones de vapor de agua y material particulado en la etapa de secado.

EMISIONES	TON./TON. DE PRODUCTO
Vapor de agua	0.07
Material particulado	0.08

Fuente: RITL, (2013)

La fuga de emisiones en el proceso se centra en el mezclador, silos de almacenamiento temporal de la mezcla, y durante el descargue del producto en volqueta. Estas fugas pueden contener compuestos orgánicos gaseosos, aerosoles y finos de partículas orgánicas condensadas.

En plantas de mezclas asfálticas de tambor o continuas, la principal fuente de emisiones canalizadas se sitúan en el secador rotatorio, en donde además de la generación de vapor de agua, productos de combustión y material particulado se producen pequeñas cantidades de compuestos orgánicos de varias especies (incluyendo los compuestos orgánicos volátiles VOCs, metano CH_4 , y contaminantes peligrosos al aire), los cuales resultan tanto de la combustión incompleta como del calentamiento y mezcla del cemento asfáltico.

2.6.2. Contaminantes por combustión

El combustible comúnmente empleado en plantas de mezcla asfáltica, es ACPM, fuel-oil.

Dependiendo del tipo de combustible empleado, se presentan emisiones a la atmósfera de contaminantes como óxidos de carbono (CO_x), Oxidos de azufre (SO_x), Oxidos nitrosos (NO_x), y material particulado a elevadas temperaturas. Para una planta en particular el consumo de combustible fuel oil por tonelada de producto se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5: Consumo de combustible y emisiones por tonelada de producto en calderas.

Consumo combustible	Emisiones SO ₂	Emisiones CO ₂
Ton comb./Ton. pdto	Ton SO ₂ /Ton pdto.	Ton CO ₂ /Ton pdto.
0.008	0.0003	0.025

Fuente: RITL, (2013)

2.6.3. Contaminantes por almacenamiento

En general, las plantas de mezclas asfálticas en caliente presentan el inconveniente de las permanentes emisiones de polvo provenientes de la zona de almacenamiento de los agregados. Estas emisiones se catalogan como emisiones abiertas y por tanto aún no son cuantificables.

2.7. Impacto ambiental de una planta de asfalto (Pacheco, Impacto ambiental de las plantas de asfalto, 2008)

No ha de sorprender pues que según la Agencia de Protección Ambiental (EPA) de EE.UU., las plantas de procesamiento de asfalto y las fábricas de producción de techos con ese material, están dentro de las principales fuentes de contaminación del aire, contándose entre ellos con formaldehído, exano, fenol, materia orgánica policíclica y tolueno. Además, las labores de transporte y almacenamiento hacen que se liberen “compuestos orgánicos volátiles, hidrocarburos aromáticos policíclicos y partículas condensadas muy finas”.

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

Según la organización ambientalista Blue Ridge Environment Defense League (BREDL) en estudios relacionados con el impacto adverso sobre el valor de las propiedades y la salud de los residentes cercanos a las plantas, en un radio de menos de 2 km, documentaron pérdidas de hasta un 56% en el precio de los inmuebles, aparte de que cerca del 50% de los residentes experimentaron deterioro evidente en su salud a partir del momento en que las plantas iniciaron su operación. Las enfermedades más frecuentes fueron alta presión arterial (18%), sinusitis (18%), dolor de cabeza (14%) y problemas respiratorios (9%). Para la citada agencia federal estadounidense (EPA), “la exposición a tales sustancias tóxicas presentes en el aire, puede causar cáncer, problemas en el sistema nervioso central, lesiones hepáticas, problemas respiratorios e irritación de la piel”, informándose además de dolor de cabeza, tos, mareos y náuseas, aparte de que en animales de experimentación se demostraron efectos en los procesos reproductivos, defectos en recién nacidos y problemas en el sistema inmunológico.

El asfalto, originalmente sólido o semisólido, es mezclado con solventes para hacerlo más líquido, usando para ello solventes venenosos como la nafta, el tolueno y el xileno, aparte de otras sustancias químicas usadas

como pegamentos que a veces contienen estireno (un tóxico que puede producir daños en el sistema nervioso), asbesto y sílice, ambos relacionados con enfermedades respiratorias.

2.8. Estudios de los beneficios ambientales de las mezclas tibias

Shell bitumen se planteó investigar los efectos producidos por el uso de las mezclas asfálticas en caliente, las mismas que son perjudiciales en cuanto a la exposición laboral a gases contaminantes y por otro lado la contaminación ambiental que se genera en la producción de las mismas. Mediante esto se busca reflejar las ventajas y beneficios que se merecen el uso de mezclas asfálticas tibias mediante el estudio realizado en Europa.

También se presenta el estudio realizado por la empresa Ceca Arkema Group en Argentina mediante el uso de mezcla tibia y sus resultados en cuanto a las mediciones de contaminación tomadas.

2.8.1. Exposición laboral a temperaturas menores de producción realizado por Shell Bitumen en Florencia Italia. (Lecomte, 2008)

- **Resumen**

Es bien sabido que la reducción de las temperaturas de producción de mezclas asfálticas presenta ventajas ambientales importantes sobre las emisiones, exposiciones laborales y consumo de energía. La industria de las mezclas asfálticas en caliente conoce esto desde hace muchos años. El mayor reto, sin embargo, ha sido siempre conseguir una calidad adecuada

de las mismas a temperaturas de operación inferiores o a temperatura ambiente.

En los últimos años, nuevos procesos de producción a temperaturas comprendidas entre 80 y 135° C han atraído gran interés debido a la posibilidad de aproximarse o incluso alcanzar la calidad de la mezcla en caliente y lograr reducciones en el consumo de energía, las emisiones y la exposición laboral.

Resultados de las mediciones recientes en un sitio en Florencia en Italia muestran que la disminución de la temperatura ofrece una reducción significativa en la emisión de gases de efecto invernadero y una reducción considerable de las emisiones de gases y exposición de los trabajadores, junto con una reducción de energía del 30 %. Esto confirma el gran potencial de esta solución para el medio ambiente.

- **Introducción**

Shell Bitumen es muy activo en el desarrollo de nuevas tecnologías y en las investigaciones para cuantificar adecuadamente los beneficios ambientales.

En este trabajo se describen los resultados de los últimos estudios de emisión y exposición realizadas en Conglobit durante la producción de su nueva mezcla de asfalto, Greenfalt, fabricado a bajas temperaturas y se desarrolla sobre la base de Shell patentados como tecnología de mezcla asfáltica tibia (WAM), usando espuma. Se debe entender que en todos los casos (la producción en caliente y tibia) los valores determinados son muy

por debajo de cualquier límite de exposición ocupacional o ambiental. Esto demuestra claramente que tanto la mezcla en caliente y la producción de espuma WAM son plenamente aceptables desde el punto de vista ocupacional y ambiental.

En octubre de 2006, durante un juicio en la carretera de alta velocidad Florencia- Pisa -Livorno en Italia, varios contaminantes del aire (CO₂ , CO , NO_x , SO₂ , TOC y polvo) emitida por la chimenea de la planta de mezcla se midieron por: Det Norske Veritas AS. Al mismo tiempo, las mediciones de emisiones se llevaron a cabo en tres posiciones en la planta de mezcla de asfalto. Durante las operaciones de colocación de asfalto y compactación, la cuadrilla de pavimentación estaba equipado con dispositivos de recogida de humos para las mediciones de exposición.

Por tanto las emisiones y las exposiciones, se realizó el análisis de humos para determinar los aerosoles totales, los aerosoles orgánicos (fracción de benceno Soluble), la fracción gaseosa y compuestos aromáticos policíclicos específicos.

Todas las mediciones se llevaron a cabo durante la producción de las mezclas calientes convencionales y la producción de Greenfalt. Las temperaturas de mezclado fueron 180 ° C para la mezcla caliente convencional y 120 a 125 ° C para el WAM espuma. Las producciones se realizaron en diferentes días de la misma semana, en la misma planta de mezcla, con los mismos dispositivos de prueba y en condiciones climáticas similares a fin de obtener un conjunto de datos totalmente comparables.

Además, se compararon los consumos de energía para las dos producciones diferentes.

- **Estudio en Florencia, Italia**

En tal sentido, fue llevado a cabo un estudio por funcionarios de Shell Bitumen el cual se realizó los días 25 y 27 de octubre de 2006 en Florencia en una planta mezcladora que se había modificado para producir asfalto de acuerdo con el proceso WAM Foam. El betún duro utilizado para WAM era un grado de penetración 20/30 y el betún flexible era un grado V10000.

Los objetivos del estudio fueron los siguientes:

- Determinar las exposiciones personales para aplicaciones para el contratista de carreteras Conglobit. utiliza el proceso WAM Foam para producir y extender mezclas asfálticas bajo el nombre "Greenfalt".
- Comparar, en condiciones de exposición en campo, el tipo de emisiones utilizando Greenfalt con las producidas utilizando HMA (mezcla en caliente convencional).
- Recoger y comparar los valores de emisión de las operaciones de mezcla en la planta de asfalto durante la producción de WAM y HMA.

Las exposiciones a material constituido por partículas se determinaron y compararon con los Límites de Exposición Laboral (OEL) italianos para humos de betún. Algunos países, tales como Italia en 2003, han adoptado las recomendaciones de la Conferencia Americana de Sanitarios Industriales del Gobierno (ACGIH) en la legislación nacional. En enero de 2000, ACGIH modificó sus límites de exposición recomendados (REL) para humos de

betún. El límite era 5 mg/m³ medido como aerosoles totales (minerales y orgánicos). El último valor REL es 0,5 mg/m³, medido como aerosol soluble en benceno de la fracción inhalable, es decir la fracción orgánica de los aerosoles totales. Los aerosoles totales se miden utilizando una casete de 37 mm de caras cerradas equipada con un filtro de PTFE, que es una toma muestras de "aerosol total" (fracción respirable). Los aerosoles orgánicos totales se extraen y se cuantifican luego (Fracción Soluble en Benceno o BSF). Obsérvese que la fracción inhalable se considera como similar a BSF para este trabajo. Las duraciones de toma de muestras para HMA y WAM estaban comprendidas entre 3 y 4 horas, lo que se adoptó a fin de obtener una cantidad mayor que la mínima (BSF > 0,1 mg/m³) requerida por NIOSH 5042.

Las posiciones en las cuales fueron ubicadas las tomas muestras fueron las siguientes:

- Dos toma muestras próximas a la amasadora; debido a la saturación observada de los filtros en el caso de la producción de mezcla en caliente, se añadió un tercer filtro con un tiempo de toma de muestras de 60 minutos. No se observó saturación alguna en el caso de WAM Foam.
- Dos toma muestras situados en el extremo superior de las tolvas de descarga.
- Uno o más toma muestras en el punto de descarga.
- Toma muestras estáticas, aproximadamente a 50 m de distancia de la planta mezcladora.



Figura. 22: Posiciones de la toma de muestras en la planta

Fuente: Lecomte, (2008)

El 26 de octubre, el trabajo de pavimentación implicaba la construcción de una capa estructural utilizando Greenfalt. Se extendió en el lugar una cantidad de 870 toneladas de Greenfalt con una longitud de 1.300 m, 3,5 m de anchura y con espesores de 90, 50 y 90 mm para las tres secciones de esta capa.

Las temperaturas del aire registradas eran 19 °C por la mañana y 30 °C a las 3 de la tarde. El estado del tiempo era nublado, sin viento. La duración de la toma de muestras por el personal de pavimentación fue aproximadamente 400 minutos.

La toma de muestras para las medidas de exposición se realizó para los puestos de trabajo siguientes:

- Un conductor de la terminadora.
- Dos operarios de la plantilla maestra.
- Un obrero/rastrillador experto.
- Un conductor de la Compactadora.

Se utilizaron bombas personales para la toma de muestras de humos con un caudal de 2 l/min. El material se recogió sobre filtros (2 μm) dispuestos en el casete estándar de 37 mm:

- Aerosoles totales, lo que representa los aerosoles minerales y orgánicos.
- BSF extraído del filtro con benceno, lo que representa los aerosoles orgánicos totales (la parte restante se considera como la fracción mineral o MF).

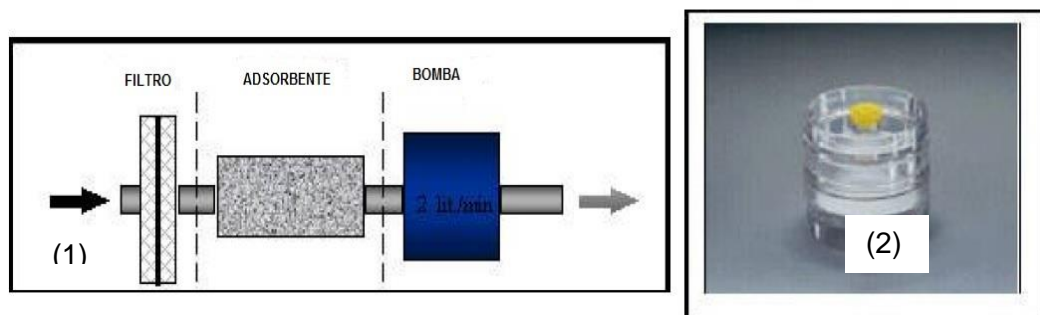


Figura. 23: (1) Bomba de toma de muestras y (2) el filtro

Fuente: Lecomte, (2008)

Se tomaron también dos muestras estáticas a fin de abarcar el área total del lugar de trabajo en la carretera y comprobar si existían fuentes de aerosoles distintas del tren de extensión.

Durante todo el día de la toma de muestras, debió observarse la ausencia de humos (visual y olfativa) durante la extensión de la mezcla de asfalto tibio como se muestra en la Figura. 24 Únicamente se apreció algo de vapor de agua procedente del agua utilizada para la compactadora.



Figura. 24: Ausencia de humos en la colocación del WAM

Fuente: Lecomte, (2008)

Las casetes de filtro estándar de 37 mm se utilizaron en serie con tubos adsorbentes a fin de recoger la fracción de vapores (gases). El adsorbente adecuado utilizado para atrapar los compuestos volátiles es XAD-2 con secciones adsorbentes anterior y posterior. Las secciones anterior y posterior se extrajeron por separado utilizando dicloro metano para comprobar la ruptura. El análisis y las cuantificaciones fueron realizados por medio de cromatografía de gases con detección por ionización de llama (GCFID).

La determinación y cuantificación de los Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (PAH) en las fracciones solubles en benceno se realizaron sobre los toma muestras de HMA. Esto no se ha hecho en el caso de WAM, dado que la cantidad de materia orgánica recogida era demasiado pequeña para dicho análisis. La identificación de los compuestos está Filtro Adsorbente Bomba La ausencia de humos durante la extensión de WAM 5/10 basada en los 16 compuestos de prioridad mencionados en la lista de EPA (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos). El análisis de PAH se realizó de acuerdo con el método Shell AMS 1057-1 elaborado por la propia empresa (basado en el método 610-EPA para aguas residuales). Los PAH se extrajeron con THF a partir de la parte orgánica de las materias particuladas recogidas (BSF) y se analizaron por HPLC-UV.

- **Consumo de combustible de la planta de asfalto**

El consumo de combustible (gas) se midió a diferentes niveles de capacidad de producción de la planta en el intervalo de 60-100%. Los resultados mostraron una reducción en el consumo de combustible de un 35%.

Los resultados de emisiones de gas y polvo por la chimenea durante la producción de mezcla asfáltica para el trabajo de pavimentación en la autopista Florencia-Pisa-Livorno en Italia, fueron medidos por Det Norske Veritas AS varios contaminantes del aire (CO₂, CO, NO_x, SO₂, TOC y polvo) emitidos por la chimenea de la planta mezcladora.

Una impresión de la puesta a punto se muestra en Figura 25.



Figura. 25: Implementos de medición en la planta

Fuente: Lecomte, (2008)

Los resultados obtenidos a una tasa de producción de 140 toneladas por hora de asfalto se presentan en la Figura. 26, Figura 27 y Figura 28. La reducción de las temperaturas de funcionamiento de 180°C en la producción mezcla caliente a aproximadamente $125\text{-}130^{\circ}\text{C}$ en la producción mezcla asfáltica tibia, se produce una reducción considerable en la cantidad de emisiones de gases y partículas de polvo.

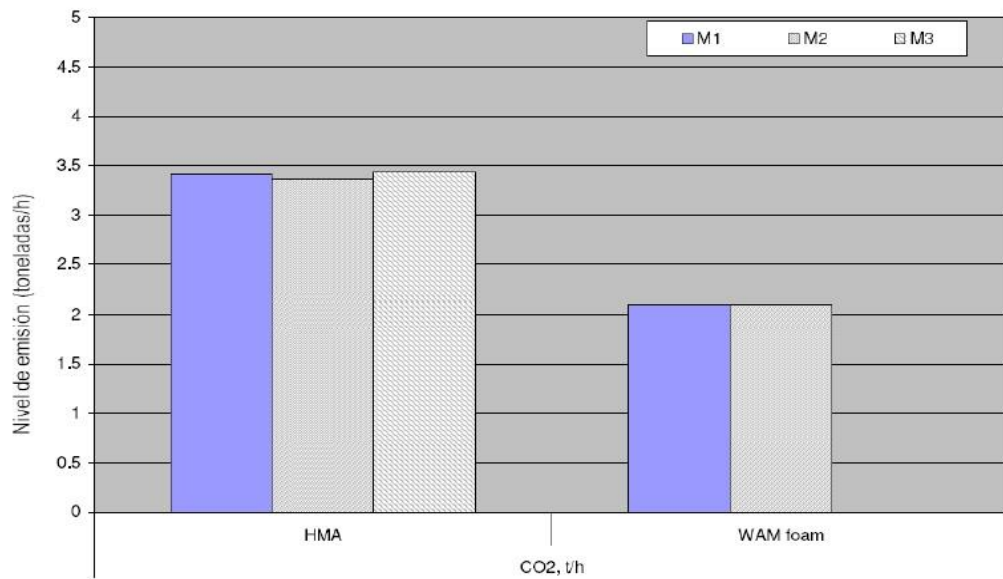


Figura. 26: Niveles de emisión de CO₂ en tres momentos de medida en la planta de asfalto.

Fuente: Lecomte, (2008)

En la Figura. 26 se muestra la emisión de CO₂ en toneladas por hora y la reducción de las emisiones alcanzada es aproximadamente de un 35%.

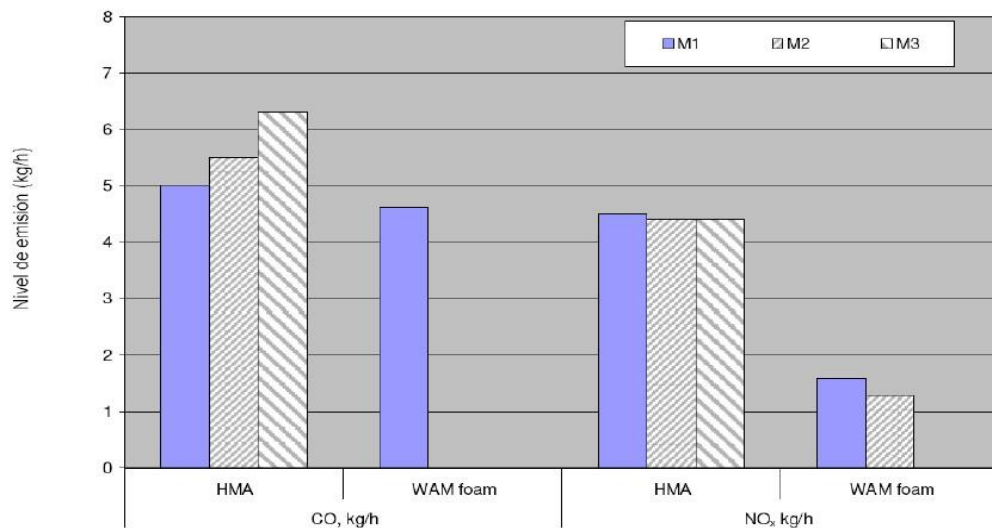


Figura. 27: Niveles de emisión de CO y NO_x en tres momentos de medida en la planta de asfalto.

Fuente: Lecomte, (2008)

En la Figura. 27, se presenta las reducciones de CO alcanzadas fueron aproximadamente de un 8% y la reducción de NOx fue aproximadamente de un 60%.

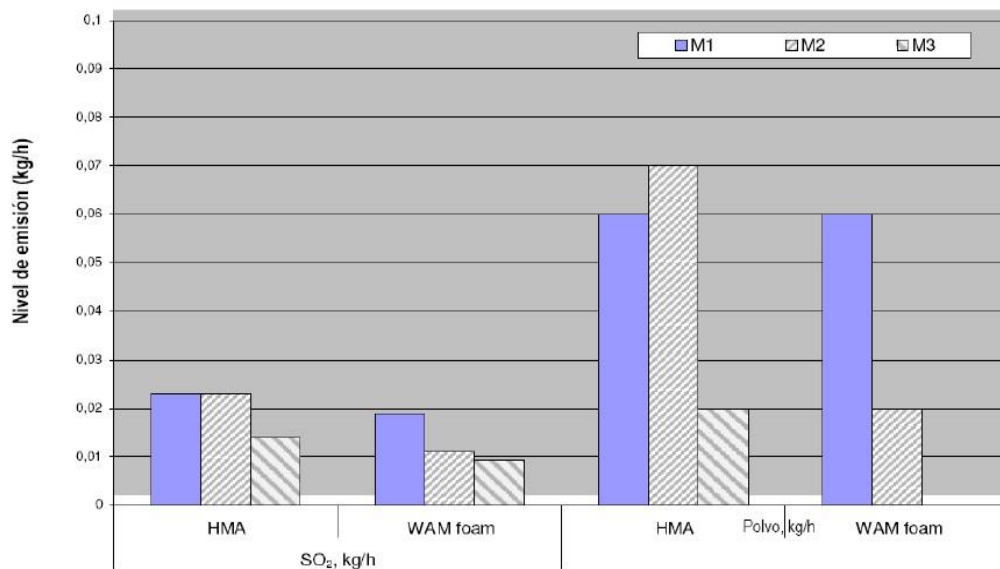


Figura. 28: Niveles de emisión de SO₂ y polvo en tres momentos de medida en la planta de asfalto

Fuente: Lecomte, (2008)

En la Figura 28, se presenta los niveles de emisión de SO₂ y polvo son bajos, pero pueden obtenerse todavía reducciones del orden del 25 al 30%.

- **Emisiones de la planta de asfalto**

Se llevó a cabo un primer estudio de emisiones en una planta mezcladora en el año 2000, este estudio es el más extenso en una planta de este tipo. Los resultados (en mg/m³) se presentan en la Figura 29, en la cual MF indica la fracción mineral, BSF la fracción soluble en benceno y VF la fracción volátil.

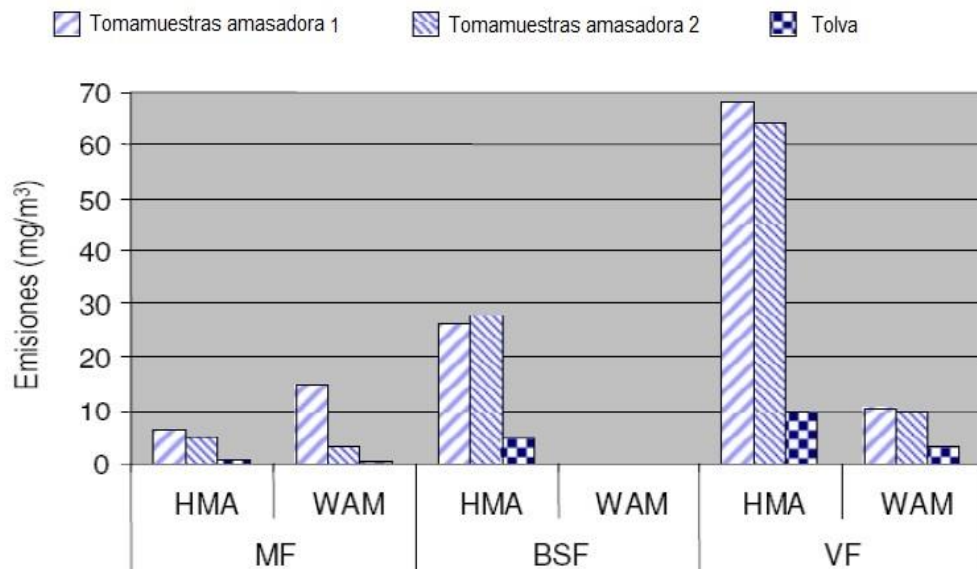


Figura. 29: Emisiones en la planta de asfalto

Fuente: Lecomte, (2010)

- Se aprecia que la descarga de la amasadora es el punto en el que se emiten más humos.
- La fracción mineral (MF) se encontró similar.
- La fracción orgánica (BSF) se encontró notablemente mayor para HMA (hasta 200 veces mayor). Los aerosoles orgánicos representan una pequeña parte de las emisiones totales para WAM al contrario que HMA (hasta el 4% y el 90% respectivamente).
- La fracción volátil (VF) se encontró mayor para HMA (hasta 6 veces mayor).
- Debido al nivel muy bajo de BSF emitida con WAM, las fracciones volátiles pueden representar casi la totalidad de las emisiones orgánicas (hasta el 99%).

- **Exposición en el lugar de pavimentación**

Los valores de exposición (corregidos por ensayo en blanco de campo) se dan en la Tabla 6. Se trata de valores Medios Ponderados por Tiempo (TWA) de 8 horas. Los valores TWA de 8 horas corresponden a la exposición media a lo largo de un turno de trabajo de 8 horas. Este valor es preferido en muchos casos dado que es más representativo de un día de trabajo total.

Tabla 6: Valores de exposición

TWA de 8 h en mg/m ³	Extensión WAM (día 2)		
	MF	BSF	SV
Conductor de asfáltadora	0.22	0.05	3.45
Obrero de la maestra 1	0.19	0.08	2.40
Obrero de la maestra 2	0.19	0.07	1.18
Rastrillador	0.16	0.14	2.93
Conductor de rodillo	0.13	0.03	0.79
Estático 1	0.97	0.02	0.32
Estático 2	0.14	0.01	0.23

Fuente: Lecomte, (2008)

La parte principal de los aerosoles es inorgánica (polvo mineral). Los datos de exposición relevantes (BSF) han sido comparados con los valores OEL italianos.

Sobre una base de Media Ponderada por Tiempo de 8 h, ninguno de los valores medidos excedía de estos OEL. Debe entenderse que en todos los casos (producción en caliente y templada) los valores determinados son muy inferiores a cualquier exposición laboral o límite ambiental. Esto demuestra claramente que tanto la producción de mezcla en caliente como la WAM-

Foam son plenamente aceptables desde un punto de vista laboral y ambiental. Cuando se comparan con las medidas de exposición previas de Shell conducidas sobre la pavimentación HMA, estas emisiones se encuentran en el rango inferior (comúnmente 0,05-0,60 mg/m³ en BSF). El mismo nivel de magnitud (< 0,05) se registró anteriormente cuando se utilizaron ligantes de grado de penetración usuales (v.g. 35/50) a aproximadamente 150°C. Los datos de BSF son también consistentes con los datos de exposición de los estudios anteriores de la Compañía (hasta 0,05 mg/m³). Los valores estáticos se encontraron más bien elevados, especialmente en términos de polvo mineral. Esto se explica probablemente por el tráfico al otro lado de la autopista.

- **PAH en BSF**

Las concentraciones de PAH son los valores sumados para los BSF y los VF. Los resultados del análisis se presentan en la Figura 30 y los valores se expresan en ng/m³. Se presenta la suma de los compuestos de 4-6 anillos y la suma de 15 PAH detectados. Los resultados son consistentes con los valores BSF: cuanto mayor es la fracción orgánica, tanto más alto es el contenido de PAH.

Los valores para la mezcla caliente presentados, son valores típicos derivados de medidas de exposición previas realizadas por Shell.

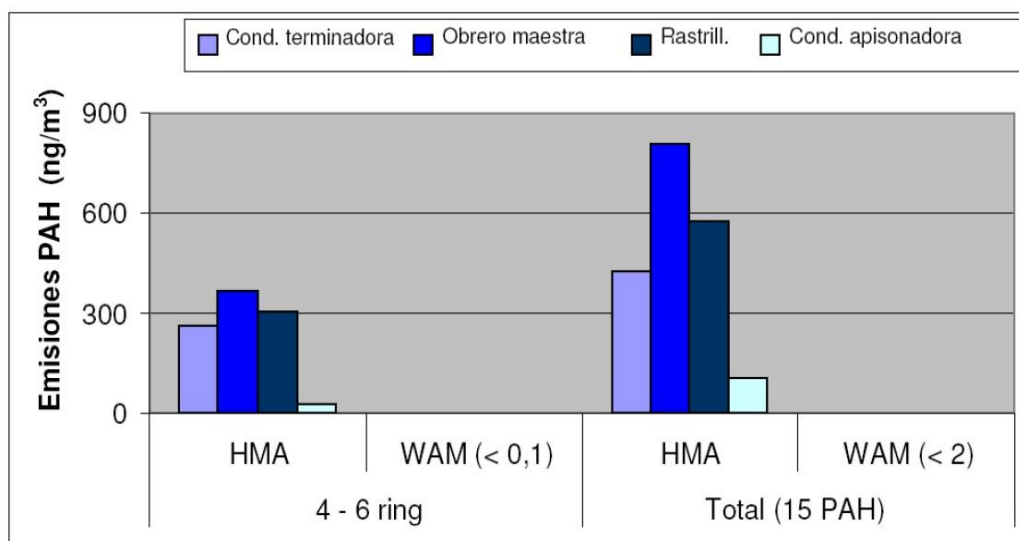


Figura. 30: Emisiones de PAH según resultados del estudio

Fuente: Lecomte, (2008)

- **Conclusión**

El estudio llevado a cabo por Shell Bitumen muestra que en la producción de mezclas asfálticas, la tecnología WAM Foam es significativamente más respetuosa con el medio ambiente en términos de emisiones de CO₂, NO_x, polvo y aerosol orgánico.

Los aerosoles orgánicos, expresados en fracción soluble en benceno, emitidos con WAM a aproximadamente 125°C están comprendidas en el rango inferior encontrado comúnmente para la extensión de mezclas en caliente cuando se utiliza una administración satisfactoria del producto (v.g. el uso de la temperatura mínima recomendada).

Los resultados obtenidos en este estudio están de acuerdo con un estudio previo de Shell Bitumen, que demuestra que en el intervalo de

temperatura relevante para aplicaciones de pavimentación (aproximadamente 140 a 190°C), la tasa de emisión de humos aumenta por un factor de 2 por cada 12°C aproximadamente de aumento en la temperatura.

2.8.2. Estudios realizados por CECA ARKEMA GROUP en Argentina (Ceca, 2012)

Se realizó una prueba de campo durante Octubre de 2008 en Argentina, en la cual se colocó una capa superficial con una temperatura de colocación por debajo de 110 °C y de compactación por debajo de 100 °C como se puede ver en la Figura. 31. Para dicho efecto se adicionó el producto Cecabase RT al 0.5% en peso del asfalto, con un porcentaje del 6.3% del contenido óptimo de asfalto.



Figura. 31: Colocación en Argentina de la mezcla asfáltica tibia

Fuente: Ceca, (2012)

A continuación en la Tabla 7, se presentan los resultados acerca del consumo de energía y la comparación entre las mezclas tibias y en caliente,

estudio realizado por CECA ARKEMA GROUP y presentado en la comisión permanente del asfalto de Argentina en donde se obtiene un ahorro mínimo del 23%.

Tabla 7: Datos de comparación entre mezclas tibias y en caliente

Ventajas en medio ambiente		
Tipo de mezcla	Consumo de combustible (Kg/T)	CO₂ producido (Kg/T de mezcla)
Mezcla tibia	5.5	17
Mezcla caliente	7.1	22.2
Ahorro	1.6	5.2

Fuente: Ceca, (2012)

De la Tabla 7 podemos concluir que se disminuye el consumo de combustible al utilizar la mezcla tibia con respecto al uso de la mezcla en caliente consiguiendo un ahorro de 1.6 Kg/T, y la contaminación producida mediante el dióxido de carbono CO₂, se disminuye en 5.2 Kg/T de mezcla.

A continuación en la Tabla 8, se presentan los resultados datos acerca de las emisiones generadas en la fabricación y colocación y la comparación entre los dos tipos de mezcla en estudio.

Tabla 8: Medición de emisiones en fabricación y colocación

Tipo	Mezcla caliente	Mezcla Tibia	Diferencia
Temperatura de efluentes (°C)	65.6	50.3	15
CO₂ %	2.12	1.59	25%
CO (ppm)	217	151.6	30%
No_x (mg/m³ eq. NO₂)	26.8	21.5	20%
Polvo (mg/m³)	168	21	88%

Fuente: Ceca, (2012)

Se concluye que el uso de la mezcla tibia disminuye un 25% de emisiones de CO₂, 30% de CO, un 20% en Nox y polvo un 88%.

2.9. El crudo de palma

2.9.1. Historia

La palma de aceite es una planta tropical propia de climas cálidos que crece en tierras por debajo de los 500 metros sobre el nivel del mar. Su origen se ubica en el golfo de Guinea en el África occidental. De ahí su nombre científico, *Elaeis guineensis* Jacq. , y su denominación popular: palma africana de aceite. (Wikipedia, 2010).

2.9.2. La planta

El cultivo de la palma tarda entre 3 a 4 años para producir frutos y su capacidad productiva alcanza los 25 o hasta 30 años.

Es de los cultivos de semillas oleaginosas la que mayor cantidad de aceite produce por hectárea. Con un contenido del 50% de aceite en el fruto, puede rendir de 3.000 a 5.000 kilogramos (kg.) de aceite de pulpa por hectárea.

La planta mide aproximadamente 80 centímetros (cm.) de diámetro y profundiza hasta 40 ó 50 cm. Las raíces alcanzan poca profundidad, 30 a 60 cm., y se extienden horizontalmente hasta 5 metros (m.) aproximadamente dependiendo del tipo de suelo. Durante los cuatro primeros años, el bulbo radical se ensancha constituyendo el tallo de la planta, el cual puede

alcanzar una altura de 15 a 20 m., dependiendo de los factores climáticos y genéticos.



Figura. 32: La planta de Palma Africana

Fuente: Oleofinos, (2010)

En cuanto a los racimos de frutos, estos se ubican entre el tronco y las hojas en forma acorazonada y su dimensión promedio es de 50 cm. de largo por 35 de ancho. El peso de cada racimo varía de acuerdo a su edad y el máximo se obtiene a los ocho años, llegando a presentar de 500 a 1,500 frutos en su estado adulto.

La ubicación del país favorece el cultivo de la palma y su buena adaptación a distintas latitudes en nuestra geografía.

2.9.3. La Palma Africana en el Ecuador

Las primeras plantaciones de palma en Ecuador se inician en 1953, en Santo Domingo de los Tsáchilas y Quinindé. Los cultivos en esa época fueron relativamente pequeños, no es sino hasta 1967 cuando comienza a

entrar en auge este sector y para esa fecha se cuentan ya con más de 1000 hectáreas sembradas.

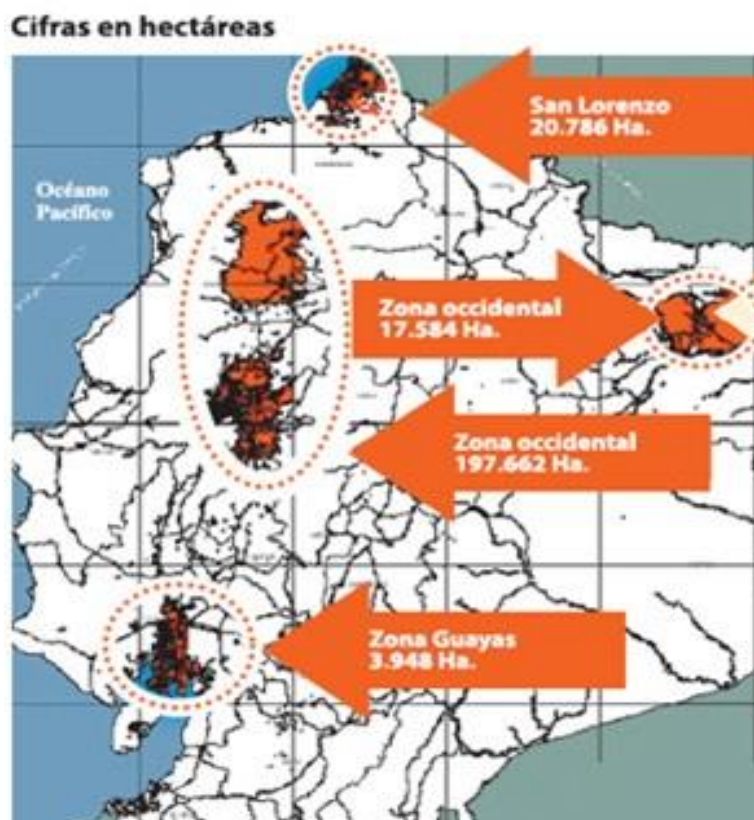


Figura. 33: Distribución en el Ecuador de la producción de Palma

Fuente: ANCUPA, (2012)

Hoy la superficie rebasa las 240 mil hectáreas (ver Figura.33) de esta producción 210 mil Tm se destinaron al consumo interno y el excedente se exporta a países como Venezuela, Perú y otros. Y de acuerdo al último censo palmero (2005), el 98% de los palmicultores son propietarios de fincas con menos de 200 has., lo que representa más del 74% de la superficie cultivada. Esta es una realidad que difiere mucho con otras latitudes en el mundo donde los grandes desarrollos palmeros están en manos de grandes terratenientes.

En el país existen 39 plantas extractoras de palma.

2.9.4. El Aceite de Crudo de Palma (ACP)

El aceite de palma es un aceite de origen vegetal que se obtiene del mesocarpio de la fruta de la palma *Elaeis guineensis*. El fruto de la palma es ligeramente rojo, al igual que el aceite embotellado sin refinar. El aceite crudo de palma es una rica fuente de vitamina A y de vitamina E.



Figura. 34: El Aceite Crudo de Palma

Fuente: Oleofinos, (2010)

2.9.5. Composición del ACP

El aceite de palma es saturado hasta en un 50%, su composición en promedio es:

- 40-48% ácidos grasos saturados (principalmente palmítico)
- 37-46% ácidos grasos monoinsaturados (principalmente oleico)
- 10% ácidos grasos poliinsaturados.

2.9.6. Características del ACP

- **Identificación de sustancia**

Nombre del producto: Aceite crudo de palma.

- **Identificación de peligros**

Peligros para la salud humana: no hay peligros específicos si se emplea adecuadamente.

Reacciones peligrosas: ninguna.

- **Composición química**

Caracterización química: triglicéridos de diferentes ácidos grasos.

Denominación: *Elaeis guineensis*.

- **Identificación de peligros**

General: no requieren medidas importantes.

Primeros auxilios-inhalación: trasladarse a un espacio abierto.

Primeros auxilios-piel: quítese la ropa empapada y lavar la piel con agua y jabón.

Primeros auxilios-ojos: aclarar con abundante agua. Intente mantener los párpados a distancia del globo ocular para asegurar aclarado.

Primeros auxilios-ingestión: no se requieren medidas importantes. Consulte a su médico si es necesario.

- **Medidas de lucha contra incendios**

Modos de extinción: espuma polvo químico seco, dióxido de carbono, arena, tierra.

Inadecuado modo de extinción: agua.

Peligros de exposición especiales: ninguno.

Equipo protector: en caso de ventilación insuficiente, llevar equipo necesario.

Más información: evite contacto con agentes oxidantes.

- **Medidas en caso de vertido accidental**

Precauciones personales: preste atención a los suelos resbaladizos.

Precauciones medioambientales: prevenga la salida o el derrame. Prevenga que se extienda o entre en desagüe, zanjas, o ríos utilizando arena, tierra o barreras apropiadas.

Métodos de limpieza: absorba o contenga el líquido con arena, tierra o material de control.

- **Manipulación y almacenamiento**

Manipulación: las precauciones habituales para manipular sustancias químicas, deben ser observadas.

Almacenamiento: mantenga el contenedor bien cerrado. Evite la luz solar directa, fuentes de calor y agentes de oxidación fuertes. Almacenar a temperatura ambiente.

- **Protección personal**

Protección respiratoria: ninguna.

Protección manos: guantes de goma.

Protección ojos: gafas de seguridad.

Protección cuerpo: ninguna.

- **Propiedades físicas y químicas**

Forma: de pastosa a sólida.

Color: marrón en estado líquido

Olor: rancio, característico.

Tabla 9: Características físico-químicas del ACP.

CARACTERÍSTICAS FÍSICO – QUÍMICAS	MIN	MAX
Punto de fusión °C	0,868	40
Densidad a 40/25 °C	0,868	0,879
Índice de Yodo	50	58
Materia Insaponificable %	---	1,5
Índice de Refracción a 40 °C	1,449	1,455
Índice de Saponificación	195	205
Poder Calorífico	88225	
Punto de chispa	280	
Viscosidad absoluta a 40C (cp)	37,8	
Viscosidad absoluta a 70C (cp)	13,6	
Índice de Cetano	35	

Fuente: Oleofinos, (2010)

2.9.7. Productores de aceite de palma en el Ecuador

En la producción de aceite de palma, el valor agregado es de un 83%, ya que es una actividad que utiliza muy pocos insumos importados. El manejo agrícola y la industrialización de los productos de la palma son técnicamente sencillos y se adapta perfectamente para desarrollar esta agroindustria.

Dentro de esta línea trabajan seis industrias en Ecuador, destacando en orden de importancia: La Fabril, Danec, Ales, EPACEM, Palmar del Rio, mismas que generaron ventas que fluctúan entre los 366.15 millones y 404 millones de dólares en 2012 con aproximadamente 524.580 TM de aceite palma producida. (MAGAP, 2012)

2.9.8. Usos

Por su composición física, el aceite de palma puede usarse en diversas preparaciones sin necesidad de hidrogenarse, proceso mediante el cual se forman los trans, indeseables ácidos grasos precursores de enfermedades como la diabetes y los cardiovasculares, entre otras.

Actualmente, es el segundo aceite más consumido en el mundo y se emplea como aceite de cocina, para elaborar productos de panadería, pastelería, confitería, heladería, salsas, cremas no lácteas para mezclar con el café.

A su vez, los aceites de palma y palmiste sirven de manera especial en la fabricación de productos oleoquímicos como los ácidos grasos, ésteres grasos, alcoholes grasos, compuestos de nitrógeno graso y glicerol,

elementos esenciales en la producción de jabones, detergentes, lubricantes para pintura, barnices, gomas y tinta.

En los últimos tiempos ha venido tomando fuerza su utilización como biocombustible. El biodiésel en la actualidad es una nueva alternativa para la utilización del aceite de palma como materia prima de otros productos.

2.9.9. Los Ácidos Grasos

Los ácidos grasos o sus ésteres pueden ser usados como materia prima para la síntesis de una gran variedad de compuestos, de los cuales se pueden obtener los oleoquímicos derivados.

Los ácidos grasos de origen vegetal son desde hace tiempo una de las materias primas base en la química. En estos momentos, la tendencia está orientada hacia los derivados tipo esterés, principalmente metílicos y etílicos, generalmente obtenidos por transesterificación de los aceites vegetales. Las amidas son utilizadas principalmente por sus propiedades lubricantes, debido a su enlace hidrógeno, a su insolubilidad y a su no-reactividad.

2.9.10. El Aceite de Palma como modificador de la viscosidad

La idea surge de la misma de la composición química del Aceite Crudo de Palma la misma que está principalmente formado por Ácidos grasos, a partir de estos se generan ésteres de ácidos grasos, amidas de ácidos grasos los cuales son conocidos como sustancias que mejoran la fluidez por ejemplo en la industria del procesamiento del caucho. También se evidencia dentro de las mezclas tibias el uso como aditivo orgánico a las amidas de

ácidos grasos, los cuales tienen como materia prima fuentes que contienen ácidos grasos.

Aceite de palma → Ácidos grasos → Amidas grasas

Un estudio químico del efecto que producen los ácidos grasos en la mezcla con el asfalto aclararía de mejor manera exactamente que influencia genera.

También podemos indicar que el Ecuador es uno de los principales productores de Aceite Crudo de Palma y en otros países no se produce dicho aceite ya que este tipo de planta es exclusivamente de la región Ecuatorial, entonces en el país se puede también generar un cambio en su utilización por medio de la propuesta creada como reductor de la viscosidad del asfalto y por medio de esto poder contribuir al mejoramiento medioambiental y el compromiso que se tiene con ser socialmente responsables.

Capítulo 3 : Metodología

3.1. Tipo de estudio

En el presente estudio y su metodología se realizará mediante un proceso experimental en donde el asfalto es mezclado con el aceite crudo de palma, evaluando sus características y desempeño mediante ensayos de laboratorio.

La estrategia de investigación para la sistematización de los datos obtenidos, es la de recopilación de la información en reportes de campo, informes, y tablas.

Para alcanzar cada una de las metas planteadas y, resolver y dar cumplimiento al objetivo general es necesario realizar una búsqueda bibliográfica de forma constante, de recursos relacionados con el tema de las mezclas tibias y los métodos de producción, de igual manera, resulta de la mayor importancia llevar a cabo ensayos en laboratorio para saber cuál es el potencial del asfalto modificado.

3.2. Fuentes e instrumentos de recolección de datos

Para la recolección de datos que se van a utilizar en esta investigación se ha definido dos tipos de información, primaria y secundaria.

Las fuentes secundarias son las que provienen de una actividad investigativa realizada por otro investigador, por grupo de investigadores o por instituciones especializadas y que han sido difundidas por algún medio.

Se caracterizan de acuerdo al medio de difusión en las que se encuentran publicadas. De esta manera la información secundaria para esta investigación está constituida por:

- Libros
- Tesis de Grado
- Publicaciones

La información experimental es aquella que se obtiene de la aplicación de métodos y ensayos a partir de la modificación del asfalto base y sus consecuencias en el diseño de las mezclas asfálticas y su posible utilización para el uso de mezclas tibias. Esta investigación está constituida por las siguientes metas:

- Obtener el asfalto modificado con el porcentaje óptimo de ACP.
- Realizar el diseño Marshall para mezclas asfálticas,
- Comparar el desempeño de las mezclas asfálticas realizadas con el asfalto base y las realizadas con el asfalto modificado con ACP.

3.3. Proceso metodológico

3.3.1. Meta 1: Asfalto modificado

- Se realizará la elección del lugar y el muestreo del asfalto base para lo cual se aplicara la norma AASHTO T-40-78.
- Muestreo del Aceite Crudo de Palma (ACP).

- Control de calidad del asfalto base a partir de los ensayos de penetración, punto de inflamación, punto de reblandecimiento, ductilidad.
- Se desarrollará la experimentación a partir de la adición de diferentes porcentajes de aceite crudo de palma al asfalto base. Los porcentajes a utilizar son el 0.4%, 0.7 % ,1%, 2%, 3%, 5% y 10%.
- Se realizará en control de calidad del asfalto modificado y los posibles valores de Aceite Crudo de Palma que puedan utilizarse en una primera instancia para realizar los ensayos de viscosidad, de manera que el asfalto modificado no se vea afectado en su comportamiento original.
- Ensayos de viscosidad con variación de la temperatura para los porcentajes óptimos que se han concluido en el punto anterior.
- Gráficos de la curva de viscosidad vs temperatura del asfalto base y asfalto modificado, comparación y conclusiones acerca de la modificación y el porcentaje óptimo.
- Obtención del porcentaje óptimo de Aceite Crudo de Palma para el cumplimiento de las especificaciones de materiales según la norma Ecuatoriana vial NEVI-12.
- Control de calidad del asfalto modificado para los porcentajes finales de investigación obtenidas el punto anterior, a partir de los ensayos expuestos anteriormente para el asfalto base.

3.3.2. Meta 2: Diseño Marshall

- Determinación de la fuente de materiales pétreos para el muestreo y posterior utilización para realizar las mezclas asfálticas.
- Caracterización de los materiales pétreos.
- Realización de las briquetas para cada porcentaje de asfalto definido. Se realizará la mezcla con el asfalto base y con el asfalto modificado con el porcentaje óptimo de ACP.
- Diseño de la mezcla asfáltica de acuerdo al método Marshall.
- Realización probetas para las pruebas de desempeño de las mezclas mediante ensayos de laboratorio.

3.3.3. Meta 3: Comparación del desempeño

- Recolección de información y datos que permitan decidir sobre la conveniencia de usar asfalto modificado con aceite de crudo de palma a partir de los ensayos realizados a las probetas y el comportamiento del asfalto modificado mediante los ensayos de caracterización.
- Comparación a partir de los resultados con respecto al comportamiento de las probetas con asfalto convencional y conclusiones de la experimentación.

3.4. Procesamiento de datos

Los datos que van a ser procesados son los que se han tomado de los ensayos de laboratorio para obtener las curvas de temperatura vs

viscosidad, también para demostrar el control de calidad del asfalto base y el modificado con el porcentaje óptimo de aceite crudo de palma y para la caracterización de los agregados.

Los datos procesados en los ensayos del control de calidad serán según las especificaciones de las normas ASTM con su metodología de ensayo y presentación de resultados.

Con la ayuda del software Excel se procesarán los datos mediante gráficos y tablas.

3.5. Factibilidad

La elaboración del proyecto de investigación es posible gracias a que se cuenta con el talento humano requerido en los laboratorios de suelos y pavimentos, el cual está comprendido por estudiante investigador, su director de tesis y codirector los mismos que servirán como guía para desarrollar y encaminar el proyecto, asimismo se cuenta con los recursos económicos que serán por autogestión y por cuenta propia, por ejemplo los materiales pétreos y el cemento asfáltico pueden ser muestreados por lo cual el costo no implica en cálculo; del mismo modo se cuenta con recursos bibliográficos y web gráficos que serán específicos y suficientes, sobre todo se dispone un periodo de tiempo suficiente de septiembre a febrero de 2014.

En cuanto al aceite crudo de palma africana, Ecuador tiene importantes empresas que producen dicho producto, para lo cual es posible tener lo necesario para realizar el proyecto.

Capítulo 4 : Trabajo de laboratorio

4.1. Generalidades

Los parámetros referentes al asfalto y agregados pétreos para diseño de mezclas asfálticas se obtienen a partir de ensayos realizados en el laboratorio. El objetivo de este capítulo es la realización de los ensayos para los proyectos en donde se involucra el diseño de una mezcla asfáltica y explicar la metodología a seguir y los resultados obtenidos de dichos ensayos.

Siendo el asfalto, por lo general, un medio heterogéneo, el ingeniero lo idealiza para poder hacer uso de las teorías elásticas; el paso de la compresión entre lo que es la mecánica de materiales y su experiencia idealizada y teórica a lo que es el comportamiento real del asfalto, es lo que se realiza en la actividad experimental y de esta manera también cumplir con los parámetros elementales y necesarios sobre la calidad del cemento asfáltico y los agregados. (Hernández, 2008)

Para poder valorar el efecto que puede tener el Aceite Crudo de Palma en el asfalto, se realizaron los ensayos de control de calidad para los porcentajes experimentados siendo estos los siguientes: 0.4, 0.7, 1, 2, 3, 5 y 10% de ACP, como modificadores de la viscosidad y que puedan cumplir las especificaciones en cuanto a estabilidad y flujo en la mezcla asfáltica.

4.2. Caracterización del asfalto base y el modificado con aceite crudo de palma

Es importante evaluar la calidad del asfalto y de esta manera caracterizar mediante ensayos que tratan de reproducen el comportamiento del material a escala real, debido a la importancia de los requisitos en cuanto a la calidad del asfalto por parte del productor, del comercializador, transportista, contratista y finalmente regidas a un control de calidad de manera que se tenga un asfalto bajo normas y que para este caso se regirá bajo la Norma Ecuatoriana Vial NEVI-12.

De esta manera, para verificar los porcentajes con los que se pueden modificar el asfalto y conocer la influencia del ACP en la mezcla con el asfalto , se realizaron los ensayos de penetración, reblandecimiento y ductilidad, con los siguientes porcentajes: 0.4, 0.7, 1, 2, 3, 5 y 10% de ACP, para luego decidir los porcentajes que puedan ser los óptimos que cumplan con los requerimientos de la normativa NEVI-12 y que al analizar el comportamiento mediante los ensayos de viscosidad rotacional, sean reductores de la viscosidad y que por consiguiente sean adecuados para realizar la mezcla asfáltica y evaluar su comportamiento.

A continuación se presenta los ensayos realizados con su procedimiento y regidos bajo normativa ASTM para su realización, además se presentan los resultados obtenidos para el asfalto y también para su modificación con ACP y a partir de los mismos, el análisis y su comparación se llevará a cabo en el Capítulo 6(Análisis de resultados) tomando como base la norma del

MTOP NEVI-12, de manera que se pueda interpretar los resultados en función del control de calidad exigido para el asfalto.

4.2.1. Muestreo del Cemento Asfáltico AC-20 (ASTM D-140)

El asfalto necesario para el diseño de las mezclas asfálticas y su respectivo control de calidad, fue tomado de la planta de mezcla asfáltica de la Constructora Naranjo López ubicada en el sector de Cashapamba.



Figura. 35: Planta de Mezcla Asfáltica de la Constructora Naranjo-López (Sitio de muestreo)

La norma ASTM D-140, se utilizó para el procedimiento que se debe seguir para la toma de muestras de asfaltos líquidos, semisólidos; sólidos y emulsionados en los sitios de producción, almacenamiento y entrega.

Según el numeral 4.1 (Tipos de Recipientes) de la norma, la toma de las muestras se realizó con recipientes de metal, limpios y de acuerdo a lo descrito en la norma y de capacidad de 1 litro.

- **Método de toma de muestras:**

Según el numeral 7 de la norma en referencia el muestreo se realizó del tanque de almacenamiento de la planta de producción de mezcla asfáltica (ver Figura. 36). Se utilizó un recipiente desechable de boca ancha con soporte para el muestreo, mediante la inmersión del mismo en el tanque de almacenamiento y el material muestreado fue transferido a los recipientes nuevos y limpios para posteriormente guardarlo como muestra a ensayar (ver Figura. 37).



Figura. 36: Tanque de Almacenamiento de Asfalto



Figura. 37: Toma de muestras de asfalto

- **Tamaño de la muestra:**

Según el numeral 3 de la norma, para análisis rutinarios en el asfalto por lo menos se tomará 1 litro y en total se debe tomar 3 muestras, cada una en la parte superior, media e inferior del tanque de almacenamiento. Tanto para los ensayos necesarios del asfalto y del modificado con ACP en total para realización de las mezclas asfálticas, ensayos de control de calidad del asfalto y luego del modificado, para los ensayos de viscosidad con lo cual se tomó un total de 14 muestras de 1 litro cada una.



Figura. 38: Muestras de asfalto tomadas del tanque de almacenamiento

4.2.2. Muestreo del Aceite Crudo de Palma (INEN-5)

En referencia a la norma INEN-5 que especifica el muestreo para grasas y aceites vegetales y a partir del numeral 3.1 que menciona el tamaño de la muestra, en donde se indica como un mínimo número de envases de plástico muestreados de 1 litro, pero para el fin que se solicita, por lo tanto aleatoriamente se solicitó a la empresa productora, adquirir el Aceite Crudo de Palma en una cantidad de seis botellas de un litro cada una. El muestreo se lo realizó en la planta industrial localizada en Santo Domingo, cabe recalcar que el muestreo fue directamente realizado por el departamento de control de calidad de la empresa productora.



Figura. 39: Envase de muestreo con ACP.

El volumen de la muestra, según la norma en referencia, es adecuada para la dosificación y mezcla con el asfalto base y por consiguiente todos los ensayos necesarios para el control de calidad del asfalto modificado con ACP, ensayos de viscosidad y por consiguiente el diseño de la mezcla asfáltica tibia.

En relación al numeral 3.2 de la norma, que menciona las condiciones de muestreo, las muestras requeridas de ACP, deben tener identificación y las especificaciones de en cuanto a calidad del producto. Además se debe precautelar que las muestras no deben estar expuestas a la luz solar por lo tanto las muestras se encontraban contenidas en una caja de cartón hasta su posterior utilización. En la Figura: 40, se tiene los aceites de palma y los asfaltos muestreados.



Figura. 40: El aceite crudo de palma y la cantidad de asfalto muestreado

4.2.3. Características del ACP

A partir de la norma INEN-1640 sobre los requisitos del aceite crudo de palma africana, el aceite muestreado debe cumplir con los valores de referencia de los parámetros para control de calidad, en función de las especificaciones del producto muestreado, de tal manera que los parámetros se muestran en la Tabla. 10 a continuación:

Tabla 10: Características Químicas del Aceite Crudo de Palma (Guineensis)

Características	Valor	Referencia	Método de ensayo AOCs	Norma INEN de Calidad
Acidez	2.71%	Max 5.5%	Ca-5a-40	NTE INEN 38
Humedad	0.15%	Max 1.0%	Ca-2b-38	NTE INEN 39
Impurezas	0.06%	Max 0.1%	Centrifugación	NTE INEN 39
I.Yodo	53 cg/g	Max 54 cg/g	Cd-1-25	NTE INEN 37
I. Peróxido	1.4 Me O/Kg	Max 4.0 Me O/Kg	Cd-8-53	NTE INEN 277
Color-Lovibond celda 1pulg	A:27.0	Max 30 A*	-	-
	R:27.0	Max 30 R*	-	-

A*: Amarillo, R*: Rojo

Fuente: Departamento de control de calidad EPACEM S.A.

A partir de la Tabla 10, se puede evidenciar que las especificaciones del ACP suministrado, están dentro de los parámetros de calidad regidos por las normas INEN especificadas en la misma tabla, de tal manera que el ACP muestreado se lo puede utilizar para el presente proyecto.

4.2.4. Dosificación en el laboratorio del ACP

Para los ensayos necesarios de caracterización del asfalto modificado con ACP, de viscosidad y luego para el diseño de la mezcla tibia se deberán realizar la mezcla del asfalto y del ACP en peso con los diferentes porcentajes de mezcla.

Para propósito de ensayos de caracterización y posteriormente de viscosidad se propone añadir al asfalto los siguientes porcentajes de ACP: 0.4%, 0.7%, 1%, 2%, 3%, 5% y como valor extremo de un 10%. De esta manera se busca conocer el comportamiento que pueda tener el asfalto modificado dependiendo de cada porcentaje añadido y así poder escoger los porcentajes que al ser modificados tengan características similares al asfalto sin modificar, de tal manera que posteriormente se puedan realizar los ensayos de viscosidad.

Para cada porcentaje de ACP, la mezcla se realizó en envases de metal de 235 cc, de manera que se recomienda utilizar en laboratorio este tipo de recipientes debido a que en esta menor cantidad se facilita el calentamiento de la muestra y su manipulación para los ensayos y así el asfalto no sea

calentado constantemente para los ensayos necesarios ya que este proceso puede afectar el comportamiento del asfalto.

Un aspecto a tomar en cuenta es que la mezcla se realizó en función al peso del asfalto y para lo cual se debe tomar en cuenta que para que haya una buena dispersión del ACP en el asfalto, se debe mezclar por lo menos 5 minutos a temperatura en la cual el asfalto de encuentre fluido y se pueda mezclar, de manera que para este caso se realizó a una temperatura aproximada de 110 °C.

Para el cálculo del peso de ACP se lo realizará en función de la ecuación (2):

$$W_{ACP} = \%ACP * W_{asfalto} \quad (2)$$

De esta manera y siendo el peso del asfalto $W_{asfalto}=200$ gr para todos los casos, los pesos de ACP calculados se muestran en la Tabla 11 mostrados a continuación:

Tabla 11: Pesos de ACP en función del % añadido

%ACP	0.4	0.7	1	2	3	5	10
W_{ACP}(gr)	0.8	1.4	2	4	6	10	20



Figura. 41: (1) ACP para la mezcla, (2) envases con Asfalto+ACP con los diferentes porcentajes utilizados.

En la Figura. 41 se puede ver el ACP listo para la mezcla con el asfalto y posteriormente los envases listos con la mezcla.

Cabe indicar que la mezcla asfáltica tibia deberá tener la mezcla de asfalto con ACP para el porcentaje óptimo que se elija y además será realizada para un porcentaje extremo de manera que se pueda comparar los resultados obtenidos y saber el comportamiento de la mezcla asfáltica en función del % de ACP, para lo cual se dosificará para dicho efecto en envases de metal de 1 litro con un tamaño de la muestra de 2 unidades y que cada una se dosificará de la manera descrita en la ecuación (2) teniendo para este caso como $W_{asfalto}=900gr$.

4.2.5. Ensayos realizados

4.2.5.1. Penetración (ASTM D-5)

Este método describe un procedimiento para determinar la dureza, mediante penetración, de materiales bituminosos sólidos y semisólidos. El ensayo de penetración se usa como una medida de consistencia; valores altos de penetración indican consistencias más blandas.

La penetración se define como la longitud, expresada en décimas de milímetro hasta la cual penetra verticalmente en el material una aguja. El ensayo se realiza a 25 °C durante un tiempo de 5 segundos y con una carga móvil vertical total, incluida la aguja, de 100 g.

Equipo:

- Penetrómetro.
- Aguja de penetración.
- Recipiente o molde para la muestra.
- Baño María.
- Termómetro.
- Espátula.
- Asfalto y modificado con ACP
- Dispositivo medidor de tiempo.

Procedimiento:

- Se preparará un total de dos moldes por cada muestra de asfalto.
- Dejar enfriar al aire por aproximadamente entre 1 y 1.5 horas. Finalmente, se sumergen los recipientes en el baño de agua maría a la temperatura de 25 ° C.
- La aguja de penetración debe estar limpia y seca, se aproxima la aguja del penetrómetro hasta que su punta toque justamente la superficie de la muestra. Se pone en cero el penetrómetro y se suelta seguidamente el mecanismo que libera la aguja durante el tiempo especificado (ver Figura. 42). Finalmente, se lee y anota la distancia, expresada en décimas de milímetro, que haya penetrado la aguja en la muestra.
- Se realizarán al menos tres penetraciones en cada molde.



Figura. 42: Ensayo de penetración en asfalto

Resultados:

El procedimiento descrito anteriormente se realizará para las muestras de asfalto modificado con los diferentes porcentajes de ACP.

En el Anexo 1 se adjunta los formatos de ensayos de penetración realizados para el asfalto y el modificado con ACP.

En la Tabla 12 se presenta el resumen de los resultados de los ensayos de penetración realizados para el asfalto y el modificado con ACP.

Tabla 12: Resumen de los resultados del ensayo de penetración

% ACP	Muestra N°	Ensayo de Penetración (mm/10)					
		N° 1	N° 2	N° 3	N° 4	Promedio	Penetración
ASFALTO AC-20	1	58	60	63	59	60	61
	2	60	61	59	62	61	
	3	62	63	61	62	62	
0.4	1	65	64	65	67	65	65
	2	65	66	65	63	65	
0.7	1	68	67	69	66	68	68
	2	67	69	66	67	67	
1	1	70	72	70	71	71	71
	2	69	70	71	69	70	
2	1	98	99	97	103	99	101
	2	100	104	97	105	102	
3	1	110	95	110	112	107	107
	2	104	112	104	107	107	
5	1	153	160	156	161	158	159
	2	155	162	160	158	159	
10	1	298	316	304	310	307	305
	2	300	315	295	301	303	

4.2.5.2. Punto de reblandecimiento (ASTM D-36)

Este ensayo mide de forma indirecta la consistencia y equivale a una temperatura de equiviscosidad en las condiciones de ensayo. Junto a la penetración a 25° C, permite calcular el índice de penetración y estimar mediante su valor la susceptibilidad a la temperatura de los asfaltos.

Equipo:

- Anillos, de bronce, de bordes cuadrado.
- Platos de base.
- Esferas de acero.
- Guías de contacto de las bolas.
- Recipiente de vidrio capacidad 800 ml.

- Soporte de anillos y montaje completo.
- Termómetro.
- Agua destilada.
- Asfalto y modificado con ACP.

Procedimiento:

- Calentar la muestra evitando sobrecalentamientos localizados, hasta que esté fluida para poderla verter.
- Al verter el asfalto, realizarlo con un ligero exceso dentro de los anillos y dejar enfriar a temperatura ambiente durante 30 minutos. Con una espátula caliente se enraza la muestra de ensayo.
- Hacer el montaje de los aparatos, colocando los anillos con las muestras, las guías para las bolas y llenar el baño con agua destilada hasta una altura de 105 ± 3 mm.
- Colocar las dos bolas en el fondo del baño para que adquieran la misma temperatura de iniciación que el resto del montaje y a continuación colocarlas en las guías.
- Calentar a una temperatura de 5 °C/minuto Anotar, la temperatura indicada por el termómetro en el momento en que el asfalto rodeando la bola, toca el fondo del baño (ver Figura 43).
- Se debe repetir el ensayo en caso que la diferencia de caída de las bolas difiera en más de 1 °C al momento de topar la placa base.



Figura. 43: Ensayo de reblandecimiento en el asfalto

Resultados:

El procedimiento descrito anteriormente se realizará para las muestras de asfalto modificado con los diferentes porcentajes de ACP.

En el Anexo 2 se adjunta los formatos de ensayos de reblandecimiento realizados para el asfalto y el modificado con ACP.

En la Tabla 13 se presenta el resumen de los resultados de los ensayos de reblandecimiento realizados para el asfalto y el modificado con ACP.

Tabla 13: Resumen de resultados para ensayo de reblandecimiento

% ACP	Muestra N°	Temperatura de Reblandecimiento(°C)			Punto Reblandecimiento
		Anillo		Promedio	
		A(Der.)	B(Izq.)		
Asfalto AC-20	1	48.0	48.1	48.1	48.4
	2	48.7	49.0	48.9	
	3	47.9	48.9	48.4	
0.4	1	44.8	44.9	44.9	45.9
	2	45.8	46.1	46.0	
	3	46.7	47.3	47.0	
0.7	1	44.3	43.1	43.7	44.1
	2	43.8	43.9	43.9	
	3	44.7	45.0	44.9	
1	1	43.2	43.8	43.5	44.0
	2	44.4	44.1	44.3	
	3	44.2	44.3	44.3	
2	1	42.7	43.2	42.9	43.7
	2	44.4	44.3	44.4	
	3	43.9	44.0	44.0	
3	1	38.3	38.5	38.4	38.7
	2	39.1	38.6	38.9	
	3	38.6	38.9	38.8	
5	1	35.7	36.0	35.9	35.9
	2	35.9	35.8	35.9	
	3	35.5	36.4	36.0	
10	1	30.3	31.1	30.7	31.0
	2	30.9	30.8	30.9	
	3	31.5	31.2	31.4	

4.2.5.3. Ductilidad (ASTM D 113)

El ensayo de ductilidad, da la distancia en centímetros que una muestra normalizada de asfalto puede alargarse antes de que se rompa en dos. La ductilidad es medida en un equipo denominado “ductilómetro” mediante una prueba de “extensión” en donde una probeta de asfalto es extendida o

estirada a una velocidad de 5 cm/minuto, en un baño de agua de igual densidad y una temperatura $25^{\circ} \pm 0.5^{\circ} \text{C}$.

Equipo:

- Moldes.
- Placa.
- Baño de agua.
- Ductilómetro.
- Termómetro.
- Espátula
- Asfalto y modificado con ACP

Procedimiento:

- El material asfáltico se calienta hasta que esté lo suficientemente fluido para verterlo en los moldes.
- Verter el material en un recorrido alternativo de extremo a extremo hasta llenar las probetas.
- Dejar enfriar a temperatura ambiente durante 30 a 40 minutos, sumergiéndola a continuación en el baño de agua a la temperatura de 25°C durante otros 30 minutos. Seguidamente se quita el exceso de material del molde con una espátula recta caliente, hasta dejar la probeta perfectamente enrasada.
- El conjunto de la placa, molde y probeta se introduce de nuevo en el baño de agua, manteniéndolo a la temperatura de 25°C , con una variación máxima de 0.1°C , durante un tiempo comprendido entre 85 y 95 minutos. A continuación, se retira la placa del molde, se quitan las piezas laterales y se da comienzo al ensayo.

- La probeta se monta en el ductilómetro, poner a continuación en marcha el mecanismo de arrastre del ensayo a la velocidad especificada (ver Figura 44), hasta que se produzca la rotura midiéndose la distancia en cm que se hayan separado ambas pinzas hasta este instante.



Figura. 44: Ejecución del ensayo de ductilidad

Resultados:

El procedimiento descrito anteriormente se realizará para las muestras de asfalto modificado con los diferentes porcentajes de ACP.

En el Anexo 3 se adjunta los formatos de ensayos de ductilidad realizados para el asfalto y el modificado con ACP.

En la Tabla 14 se presenta el resumen de los resultados de los ensayos de ductilidad realizados para el asfalto y el modificado con ACP.

Tabla 14: Resumen de resultados del ensayo de ductilidad

% ACP	Briqueta	Longitud de Rotura (cm)				Ductilidad
		Briqueta		Promedio		
		A(Der.)	B(Izq.)			
ASFALTO AC-20	1	110	110	110	110	
	2	110	110	110		
0.4	1	110	110	110	110	
	2	110	110	110		
0.7	1	110	110	110	110	
	2	110	110	110		
1	1	110	110	110	110	
	2	110	110	110		
2	1	105	107	106	102.9	
	2	99.7	99.8	99.8		
3	1	92.8	94.3	93.6	94.6	
	2	94.3	96	95.6		
5	1	80.1	83.5	81.8	84.2	
	2	85.6	87.7	86.7		
10	1	72.3	70.2	71.3	71.8	
	2	71.7	72.9	72.3		

4.2.5.4. Ensayo de viscosidad rotacional (ASTM D-4402)

Determinación de la viscosidad mediante un viscosímetro rotacional con cámara termostaticada, de tipo Brookfield Thermosel. Esta norma describe un procedimiento para la medición de la viscosidad aparente del asfalto en un ámbito de temperatura entre 38 °C y 200 °C.

Equipo:

- Viscosímetro rotacional Brookfield DV II+Pro.
- Cámara termostaticada, de tipo Brookfield Thermosel.
- Cono porta muestras
- Pinzas

- Asfalto y modificado con ACP

Procedimiento:

- Calentar el asfalto a una temperatura de aproximadamente 80 °C mayor que el punto de ablandamiento o hasta que esté lo suficientemente fluido como para poder ser vertido en el cono.



Figura. 45: Cono con la muestra para ensayo.

- Colocar la cantidad de asfalto necesaria. Seleccionar la temperatura de ensayo con el controlador de temperaturas y encenderlo.

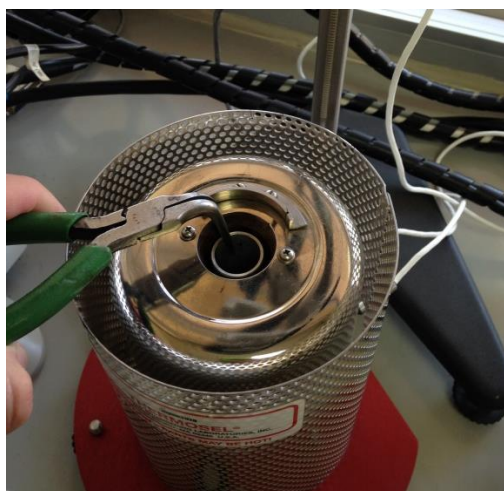


Figura. 46: Colocación de la muestra en la cámara Thermosel

- Presionar cualquier tecla para tarar en cero el equipo. Colocar el juego porta aguja alargador - aguja en el cabezal del eje del viscosímetro.
- Seleccionar el número de aguja y las revoluciones por minuto para comenzar el ensayo.
- Colocar la cámara dentro del horno del thermosel. Bajar la aguja hasta que haga tope la guía de ensayo sobre la base del horno. Colocar la tapa del thermosel y esperar 30 minutos para que se establezca la temperatura.



Figura. 47: Equipo completo para el ensayo

- Luego encender el Brookfield. Pasados los 60 segundos tomar la viscosidad que indica la pantalla.

- Son aceptados los valores en los cuales el torque sea mayor o igual al 10% y menor que el 98%, de no ser así variar las R.P.M.

Resultados:

Los resultados de los ensayos de viscosidad rotacional realizados se presentan en el literal 4.2.7 del presente capítulo, en el cual se determina a partir del presente ensayo, las curvas Viscosidad vs Temperatura y por consiguiente las temperaturas de mezcla y compactación.

4.2.5.5. Punto de inflamación Cleveland (ASTM D-92)

El punto de inflamación de un asfalto es la temperatura más baja a la cual se separan materiales volátiles de la muestra, y crean un “destello” en presencia de una llama abierta. El punto de inflamación no debe ser confundido con el punto de combustión, el cual es la temperatura más baja a la cual el ligante asfáltico se inflama y se quema. El punto de inflamación consiste, tan solo, en la combustión instantánea de las fracciones volátiles que se están separando del asfalto.

Equipo:

- Copa abierta Cleveland.
- Soporte.
- Termómetro.
- Asfalto y modificado con ACP.

Procedimiento:

- Llenar la copa a cualquier temperatura que no exceda de 100 °C por encima del punto de ablandamiento de la muestra de tal manera que la parte superior del menisco quede en la línea de llenado.
- Se aplica calor inicialmente de tal manera que se incremente 14 a 17 °C por minuto. Cuando la temperatura de la muestra sea de aproximadamente 56 °C por debajo del punto de llama esperado, se disminuye el calor de manera que la temperatura se aumente, para los últimos 28 °C antes de llegar al punto de inflamación, en 5 a 6 °C por minuto.
- Por lo menos a 28°C bajo el punto de inflamación, se empieza a aplicar la llama de ensayo, una vez por cada aumento de 2 °C. Pasar la llama de ensayo a través del centro de la copa (ver Figura. 48).
- Se registra como punto de inflamación, la lectura de temperatura sobre el termómetro cuando aparezca una llama en cualquier punto sobre la superficie.
- Para determinar el punto de combustión, se continúa calentando la muestra de tal manera que la temperatura se aumente a una rata de 5 a 6 °C por minuto. Continuar la aplicación de la llama de ensayo, hasta que el asfalto se encienda y permanezca quemándose por lo menos durante 5 s. Se registra la temperatura en este punto, como el punto de combustión.



Figura. 48: Combustión del asfalto en el ensayo

Resultados:

A continuación se presentan los resultados de los ensayos realizados para el asfalto.

El presente ensayo se realizó para el asfalto modificado con los porcentajes que se consideran para el diseño de la mezcla asfáltica analizado en el literal 4.2.9 del presente capítulo y se analizarán los resultados en el Capítulo 6.

En el Anexo 4 se adjunta los formatos de ensayos de inflamación realizados para el asfalto y el modificado con ACP.

En la Tabla 15 se presenta el resumen de los resultados del presente ensayo realizado para el asfalto y el modificado con ACP.

Tabla 15: Resumen de los resultados de ensayos de inflamación y combustión

% ACP	Punto	Temperatura(°C)			
		Muestra N°			Promedio
		1	2	3	
ASFALTO AC-20	Inflamación	286	296	291	291
	Combustion	298	300	299	299
1	Inflamación	290	289	-	290
	Combustion	297	298	-	298
2	Inflamación	285	287	-	286
	Combustion	295	298	-	297

4.2.5.6. Densidad relativa (ASTM D-70)

La densidad relativa del ligante es la razón entre el peso de un determinado volumen de ligante asfáltico y el peso de un volumen igual de agua una determinada temperatura. La temperatura normalizada de ensayo es la de 25 °C aunque puede emplearse otras temperaturas, siempre que se determine las calibraciones y correcciones correspondientes. Su conocimiento permite pasar de pesos a volúmenes o viceversa.

El asfalto cuando es calentado se expande y cuando es enfriado se contrae, esto significa que el volumen dado de una cierta cantidad de cemento asfáltico será mayor a altas temperaturas. Las medidas de peso específico proveen un patrón para efectuar correcciones de temperatura-volumen. Dichas correcciones son necesarias al momento de realizar el diseño de la mezcla asfáltica en el método marshall.

Equipo:

- Picnómetro de 24 ml a 30 ml de capacidad.
- Balanza de precisión de 0.01 gr.
- Baño maría
- Agua destilada
- Vaso de precipitación
- Asfalto y modificado con ACP

Procedimiento:

- Se debe calibrar el picnómetro, para lo cual se determina la masa del picnómetro limpio y seco con su tapa y registrar como "A".
- Llenar el picnómetro con agua destilada y sumergirlo en un vaso con agua destilada.
- Colocar el vaso en el baño maría a 25°C y mantenerlo por 30 minutos, después retirar del baño, secarlo y rápidamente registrar el peso "B" el picnómetro más agua destilada.
- Preparar una muestra de asfalto, la cual debe estar fluida, se introduce en el picnómetro hasta la mitad y se deja enfriar la muestra. Después se toma el peso con la tapa y asfalto hasta la mitad y se registra como "C".
- Llenar con agua destilada el picnómetro con asfalto y sumergir en el baño maría a 25°C por 30 minutos y registrar el peso como "D" (ver Figura 49).



Figura. 49: Registro del peso “D”, picnómetro +agua destilada +asfalto a 25°C.

- Se procede al cálculo mediante la ecuación (3)

$$\rho_b = \frac{C - A}{(B - A) - (D - C)} * \rho_w \quad (3)$$

El peso específico del agua destilada (ρ_w) a 25°C es de 0.997 g/cm³.

Resultados:

A continuación se presentan los resultados de los ensayos realizados para el asfalto.

El presente ensayo también se realizó para el asfalto modificado con los porcentajes que se consideran para el diseño de la mezcla asfáltica analizado en el literal 4.2.9 del presente capítulo y se analizarán los resultados en el Capítulo 6.

En el Anexo 5 se adjunta los formatos de ensayos de densidad relativa realizados para el asfalto y el modificado con ACP.

En la Tabla 16 se presenta el resumen de los resultados del presente ensayo realizado para el asfalto y el modificado con ACP.

Tabla 16: Resumen de resultados del ensayo de densidad relativa del asfalto

% ACP	DESCRIPCIÓN	Masa (gr)	Densidad(gr/cm ³)
ASFALTO AC-20	(A): Masa del picnómetro	19.62	1.011
	(B): Masa del picnómetro lleno con agua destilada	69.17	
	(C): Masa del picnómetro con asfalto hasta la mitad	48.43	
	(D):Masa del picnómetro+asfalto+agua destilada	69.57	
1	(A): Masa del picnómetro	19.62	1.006
	(B): Masa del picnómetro lleno con agua destilada	69.17	
	(C): Masa del picnómetro con asfalto hasta la mitad	43.75	
	(D):Masa del picnómetro+asfalto+agua destilada	69.38	
2	(A): Masa del picnómetro	19.62	1.004
	(B): Masa del picnómetro lleno con agua destilada	69.17	
	(C): Masa del picnómetro con asfalto hasta la mitad	42.23	
	(D):Masa del picnómetro+asfalto+agua destilada	69.33	

4.2.6. Análisis de resultados

En el siguiente acápite se analizan los resultados obtenidos en los diferentes ensayos realizados en el literal 4.2.5 del presente capítulo, para el asfalto AC-20 y para el asfalto modificado con los diferentes porcentajes de ACP, de tal manera escoger los porcentajes de ACP para realizar los ensayos de viscosidad.

Para analizar los resultados de los ensayos de tal manera que los mismos se encuentren dentro de los rangos aceptables de calidad para un asfalto AC-20 de penetración 60-70, se hace referencia a los parámetros

indicados en la Tabla 17 según la Norma Ecuatoriana Vial NEVI-12 tabla 810-3.5, para cumplir con la calidad del asfalto a utilizar, además como referencia para saber con qué porcentajes se puede utilizar para las mezclas asfálticas tibias.

Tabla 17: Valores de referencia para asfalto AC-20 de penetración 60-70

ENSAYO	REFERENCIA
Penetración(mm/10)	60-70
Reblandecimiento(°C)	48-55
Índice de Penetración	-1.5 -1.5
Ductilidad(cm)	min 100
Densidad Relativa(gr/cm ³)	min 1

Fuente: NEVI-12 Tabla 810-3.5

4.2.6.1. Resultados para Asfalto AC-20

La caracterización del asfalto AC-20 y su cumplimiento de calidad en función de los parámetros de la Tabla 17, se muestra en la Figura 50, Figura 51, Figura 52 y Tabla 18.

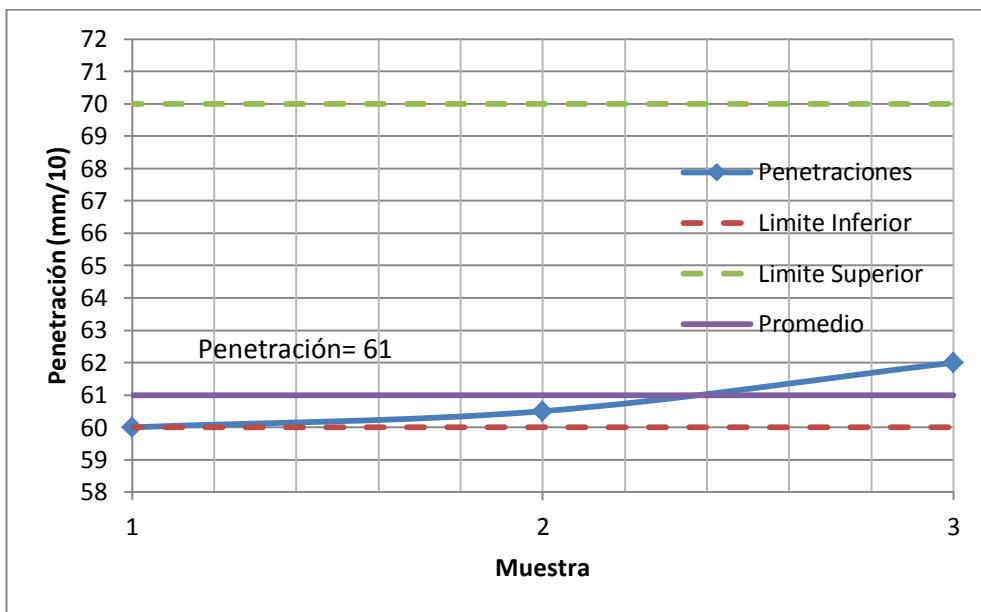


Figura. 50: Variación en los ensayos de penetración en el asfalto AC-20 y el cumplimiento con los límites según NEVI-12.

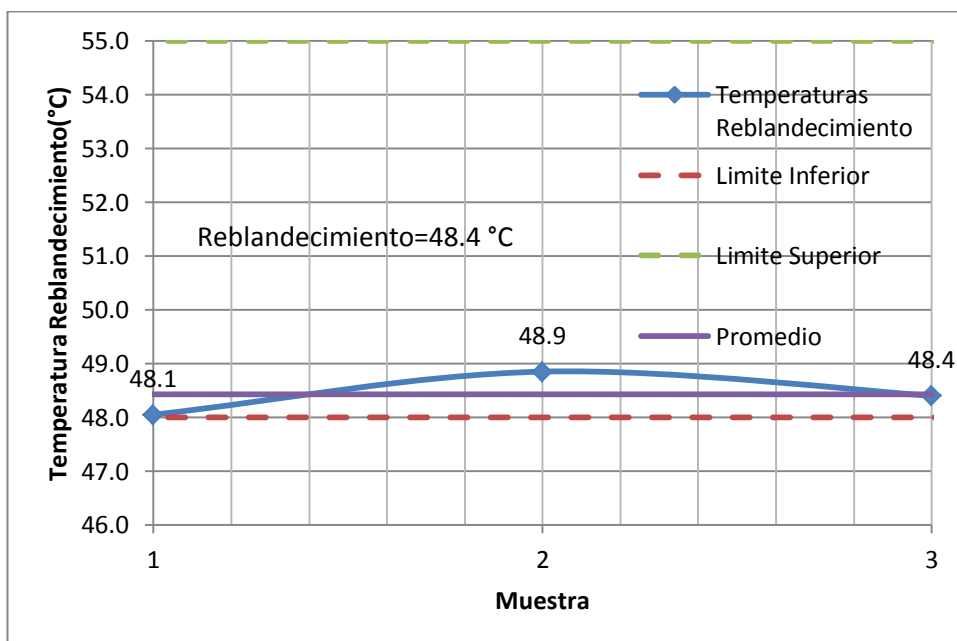


Figura. 51: Cumplimiento con los parámetros mínimos y máximo en el ensayo de reblandecimiento según norma NEVI-12.

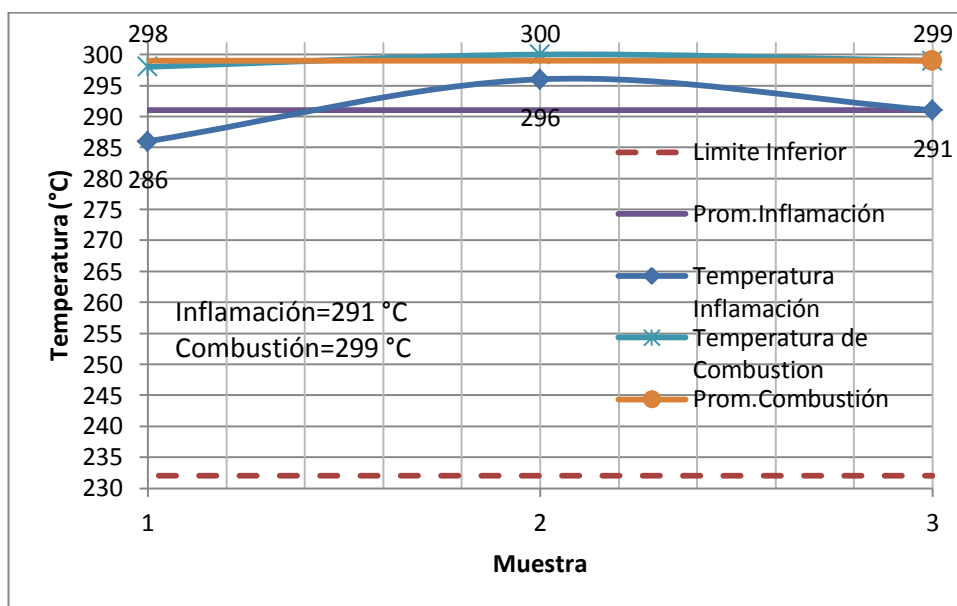


Figura. 52: Cumplimiento mínimo para el punto de combustión e inflamación según norma NEVI-12.

Tabla 18: Resumen de resultados de ensayos de caracterización del asfalto AC-20

Parámetro	Resultado	Mínimo	Máximo
Penetración (mm/10)	61	60	70
Reblandecimiento (°C)	48.4	48	55
Índice de Penetración	-1.14	-1.5	1.5
Ductilidad (cm)	110	100	-
Punto de Inflamación (°C)	291	232	-
Densidad relativa (gr/cm ³)	1.011	1.000	-

En la Tabla 18 se muestran los resultados en cuanto a los ensayos de caracterización del asfalto AC-20, para lo cual deben cumplir los parámetros indicados en la Tabla 17 y a partir de esto se considera que cumple con todos los parámetros de calidad, por lo tanto se lo considera apto para ser utilizado en las mezclas asfálticas.

4.2.6.2. Resultados de los ensayos de caracterización del asfalto modificado para los diferentes porcentajes utilizados de ACP

Se realizaron los ensayos de caracterización con los porcentajes de ACP dosificados de forma experimental, para saber el comportamiento del asfalto modificado con ACP y a partir de los mismos conocer los porcentajes aptos a ser utilizados como modificadores de la viscosidad en el asfalto siempre y cuando cumplan con los parámetros de calidad de la Tabla 17.

Penetración:

A partir de la Tabla 12 se presenta la siguiente tabla para el análisis de resultados.

Tabla 19: Resultados de los ensayos de penetración para los diferentes porcentajes de ACP.

Porcentaje ACP	Penetración(mm/10)
ASFALTO AC-20	61
0.4	65
0.7	68
1	71
2	101
3	107
5	159
10	305

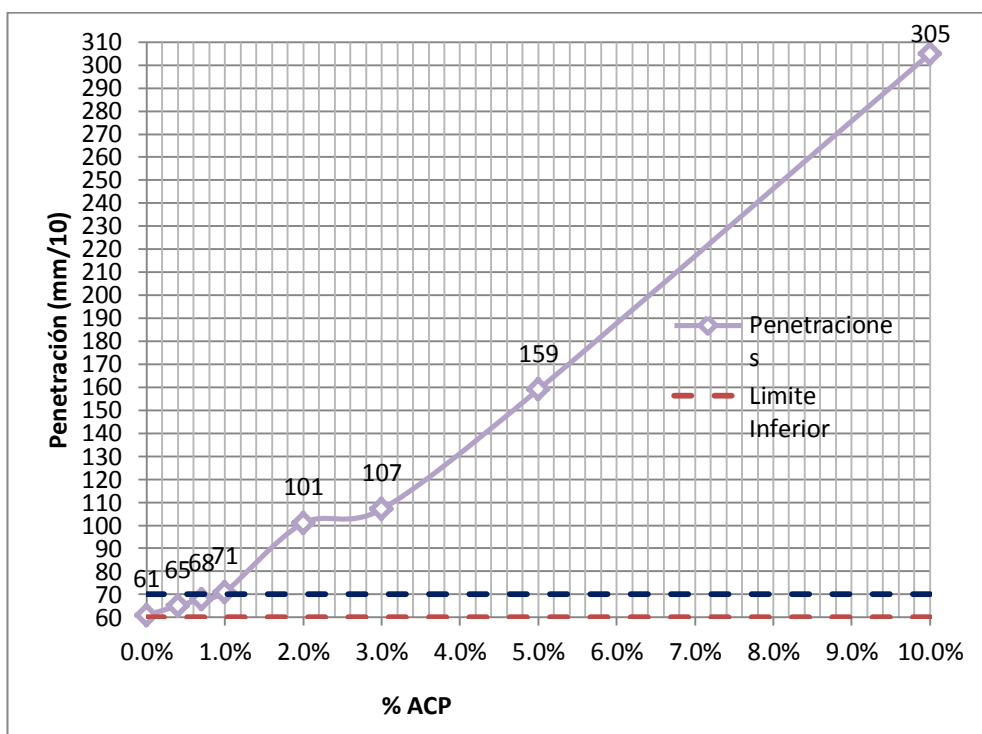


Figura. 53: % ACP vs Penetración según Tabla 19

A partir de los resultados de los ensayos de penetración en el asfalto modificado con ACP, se puede ver en la Figura 53 que los porcentajes de ACP en relación al peso del asfalto, más aptos en cuanto a cumplir con el parámetro de calidad, serán los siguientes: 0.4%, 0.7% y el 1%, debido a que están dentro del rango de penetración mínima y máxima y en función que aumenta el contenido de ACP aumenta su penetración.

Reblandecimiento:

A partir de la Tabla 13 se presenta la siguiente tabla para el análisis de resultados.

Tabla 20: Resultados de los ensayos de reblandecimiento

Porcentaje ACP	Punto de Reblandecimiento(°C)
0.0%	48.4
0.4%	45.9
0.7%	44.1
1.0%	44.0
2.0%	43.7
3.0%	38.7
5.0%	35.9
10.0%	31.0

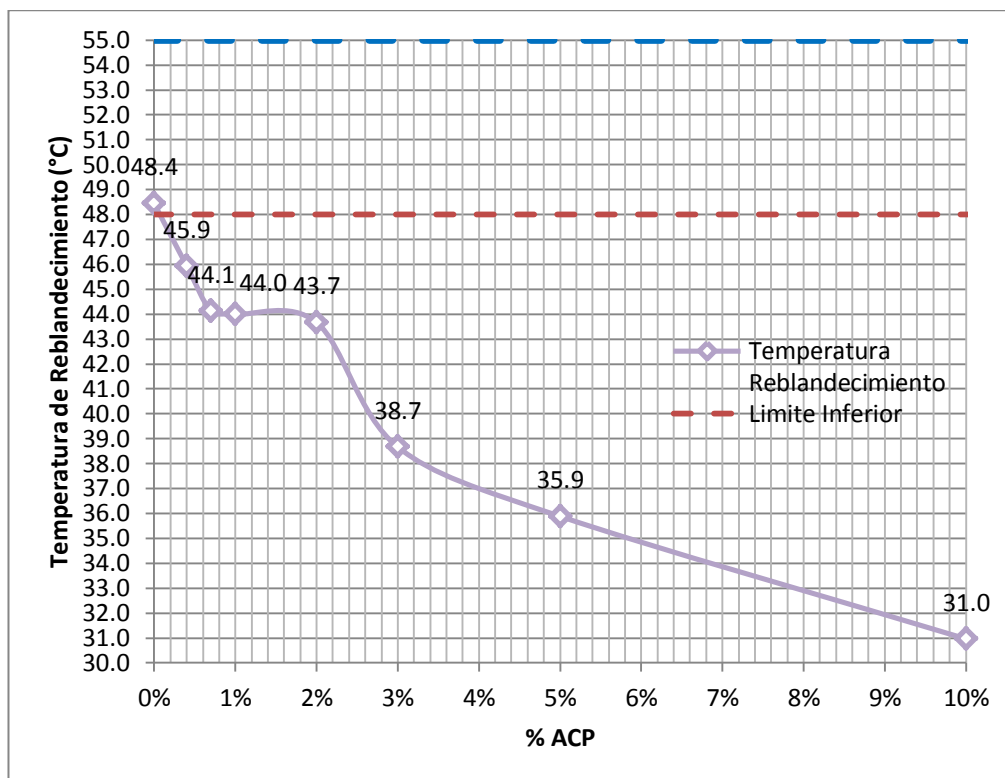


Figura. 54: % ACP vs Punto de Reblandecimiento según Tabla 20.

A partir de los resultados de los ensayos de reblandecimiento, se considera a los asfaltos susceptibles a la temperatura cuando su punto de

reblandecimiento es menor al rango especificado, para este caso el asfalto modificado es susceptible a la temperatura debido a que los resultados están por debajo a 48 °C, de tal manera solo cumple el asfalto AC-20 y en relación al asfalto modificado con ACP, dicho asfalto se vuelve más susceptible del cambio de su consistencia, es decir disminuir su viscosidad, en función del incremento de ACP, siendo para este tipo de ensayo ningún porcentaje el adecuado.

Índice de Penetración:

El índice de penetración no es un ensayo, dicho índice proporciona un criterio de medida de susceptibilidad del asfalto a los cambios de temperatura.

Para el cálculo del índice de penetración IP, se requieren los resultados hallados en los ensayos de penetración a 25 °C y el punto de reblandecimiento.

El índice de penetración se calcula con las ecuaciones (4) y (5):

$$A = 50 * \left[\frac{\log(800) - \log(Pen)}{Tab - 25} \right] \quad (4)$$

$$IP = \frac{20 - 10 * A}{A + 1} \quad (5)$$

Dónde:

- Pen: valor de penetración en mm/10 a 25°C, 100 gr y 5 segundos.

- Tab: punto de reblandecimiento en °C, obtenido por el método de anillo y bola.

En la Tabla 21 se muestran los resultados del IP a partir de las ecuaciones (4) y (5) y calculados con los resultados de los ensayos de penetración y reblandecimiento.

Tabla 21: Resultados de los ensayos de penetración y reblandecimiento y valores del Índice de Penetración (IP)

Porcentaje ACP	Penetración (mm/10)	Punto de Reblandecimiento(°C)	IP
ASFALTO AC-20	61	48.4	-1.14
0.4	65	45.9	-1.68
0.7	68	44.1	-2.10
1	71	44.0	-2.04
2	101	43.7	-1.20
3	107	38.7	-2.85
5	159	35.9	-2.90
10	305	31.0	-3.35

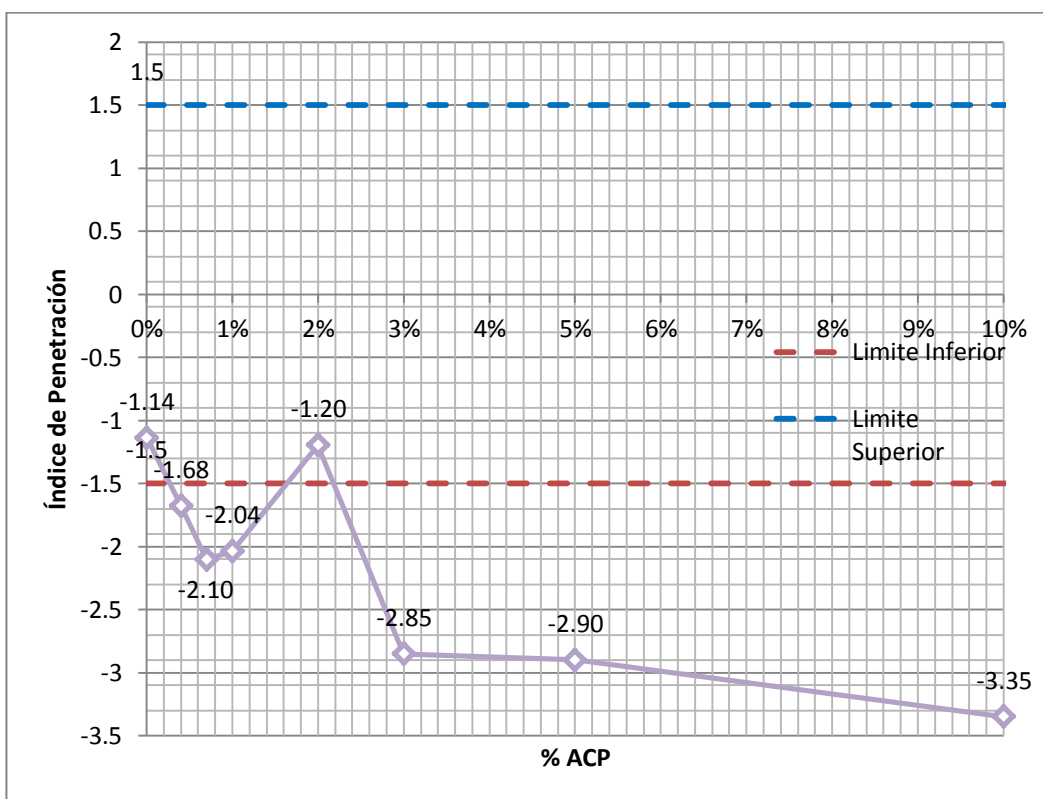


Figura. 55: % ACP vs Índice de Penetración según Tabla 21

A partir de los resultados para el índice de penetración el asfalto modificado se comporta mejor con los porcentajes del 0.4%, 0.7%, 1% y el 2%, no cumplen con los rangos pero están más cercanos y se debe tomar en cuenta que para todos los porcentajes de ACP el IP disminuye considerando así que cuando tiende este parámetro hacia la valores negativos se los considera más susceptible a los cambio de temperatura por su alto contenido en su estructura de resinas y aceites.

Ductilidad:

A partir de la Tabla 14 se presenta la siguiente tabla para el análisis de resultados.

Tabla 22: Resultados de los ensayos de ductilidad

Porcentaje ACP	Ductilidad(cm)
ASFALTO AC-20	110
0.4	110
0.7	110
1	110
2	103
3	95
5	84
10	72

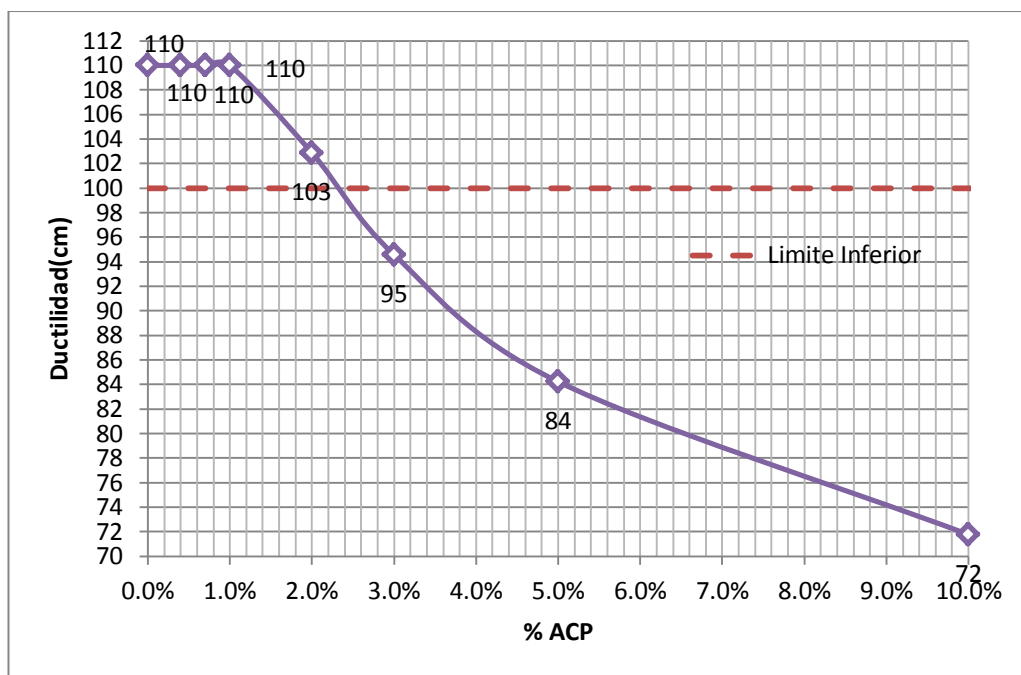


Figura. 56: Representación de la variación de la ductilidad en función del % de ACP

Para el ensayo de ductilidad y a partir de los resultados, el rango de porcentaje de ACP que entra en especificaciones, está entre el 0.4% al 2%.

En función del porcentaje de ACP añadido la ductilidad del asfalto modificado disminuye.

4.2.6.3. Conclusión

En función de los resultados obtenidos de los ensayos de penetración, reblandecimiento, índice de penetración y ductilidad se presenta la siguiente tabla:

Tabla 23: Valoración de los parámetros en función del % de ACP

Parámetro	% de Aceite Crudo de Palma							
	0%	0.4%	0.7%	1%	2%	3%	5%	10%
Penetración	C	C	C	C	N	N	N	N
Reblandecimiento	C	N	N	N	N	N	N	N
IP	C	N	N	N	C	N	N	N
Ductilidad	C	C	C	C	C	N	N	N
N° de Parámetros Cumplidos	4	2	2	2	2	-	-	-

C=Cumple, N= No cumple

A partir de la Tabla 23, se considera importante trabajar con los porcentajes de ACP que cumple con mínimo 2 parámetros de calidad para posteriormente realizar los ensayos de viscosidad. Dichos porcentajes de ACP son los siguientes: 0.4%, 0.7%, 1% y el 2%. El 2% es el porcentaje que más lejano está en los valores de los ensayos pero para ver el efecto que tiene se lo considera para realizar los ensayos de viscosidad siendo considerado como un valor extremo con el cual se vea que comportamiento tiene.

4.2.7. Ensayos de viscosidad en Asfalto AC-20 y modificado con ACP

Como parte principal del proyecto de investigación se considera realizar los ensayos de viscosidad, descrito por medio de la norma ASTM D-4402, la cual se utiliza para determinar la viscosidad entre 38 °C y 200 °C del asfalto por medio de uso del viscosímetro rotacional y con el fin de determinar las temperaturas de mezcla y compactación. El objetivo de este ensayo para el presente proyecto es determinar la influencia del ACP en el asfalto como un potencial modificador de la viscosidad para conseguir de esta manera la disminución en las temperaturas de producción de la mezcla asfáltica.

Se realizaron los ensayos para los porcentajes de: 0.4%, 0.7%, 1% y 2% de ACP, utilizando las temperaturas de ensayo de: 80, 120 y 160 °C (ver Figura 57), para luego realizar las curvas de viscosidad vs temperatura para los diferentes porcentajes.



Figura. 57: Envases con los asfaltos modificados con ACP en los porcentajes definidos.

4.2.7.1. Curvas viscosidad vs temperatura

Para calcular la influencia de adicionar ACP al asfalto, es necesario graficar los resultados de los ensayos de viscosidad rotacional a las temperaturas indicadas, dichas temperaturas indicadas en el eje x y las viscosidades en el eje y. A partir de lo anterior se mide las propiedades del asfalto modificado a altas temperaturas para determinar las características de mezclado y compactación.

Al igual que en los asfaltos convencionales se considera temperatura de mezclado la que se obtiene para una viscosidad de 170+-20 Centipoises (Cp) y la temperatura de compactación para una viscosidad de 280+-30 Centipoises.

En la Tabla 24 se presentan los resultados de los ensayos realizados al asfalto AC-20, asfalto modificado con 0.4%, 0.7%, 1% y 2% de ACP y a temperaturas de 80 °C, 120 °C y 160 °C.

Tabla 24: Resultados de los ensayos de viscosidad a diferentes temperaturas y porcentajes de ACP.

% ACP Añadido	Temperatura de ensayo (°C)		
	80	120	160
Viscosidad (Cp)			
ASFALTO AC-20	21400	842.5	120.0
0.40%	19300	792.5	115.5
0.70%	18050	765.0	112.5
1%	17350	724.5	110.0
2%	14067	660.0	102.0

El análisis de los resultados presentados en la Tabla 24, se realizarán en el Capítulo 6.

A continuación se presenta las curvas de viscosidad vs temperatura para los diferentes porcentajes de ACP utilizados a partir de la Tabla 24.

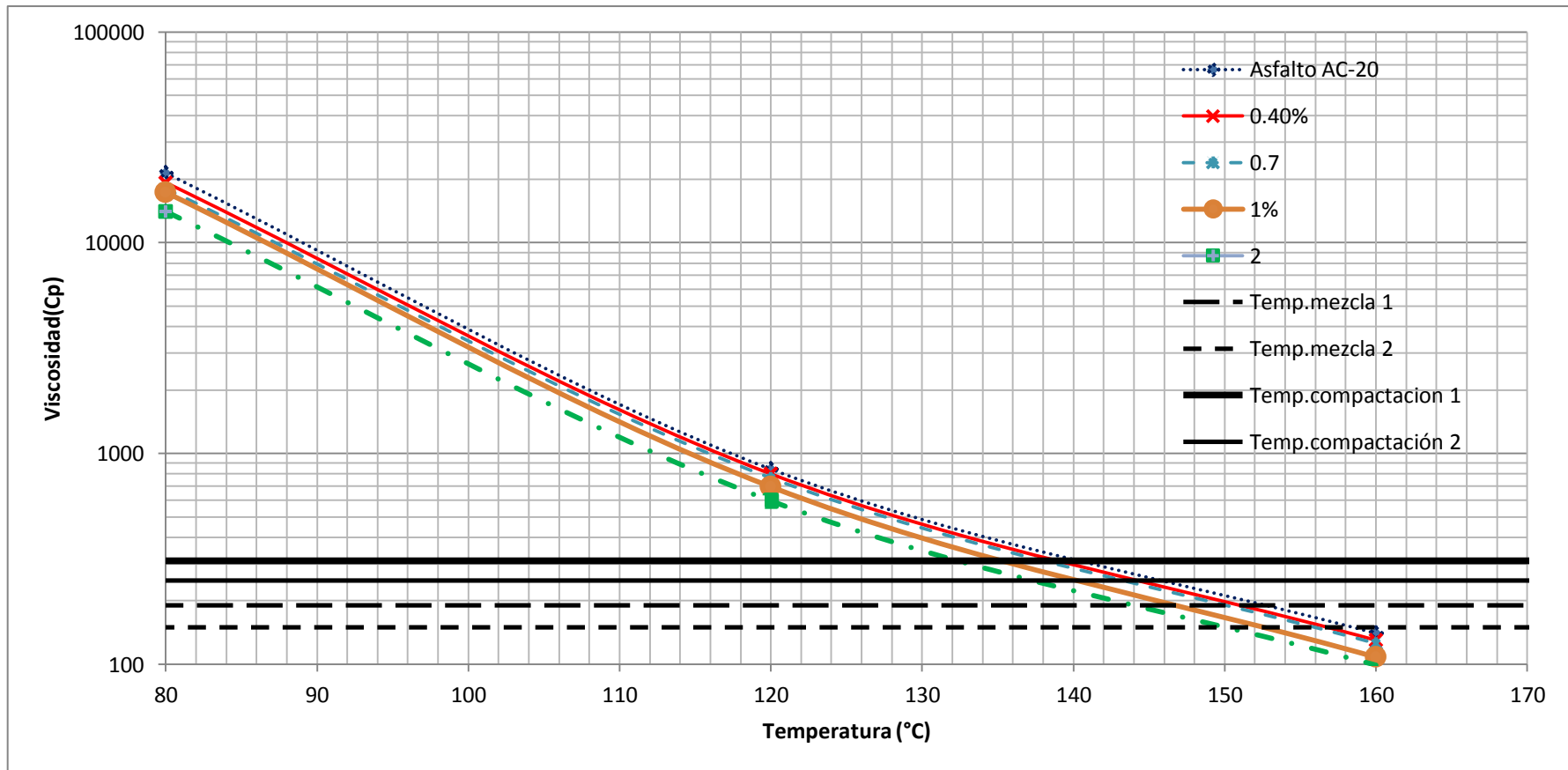


Figura. 58: Curva de Viscosidad vs Temperatura para el asfalto base y para los diferentes tipos de modificaciones con ACP.

De manera general, mediante la Figura 58 se puede evidenciar la forma en que el Aceite Crudo de Palma (ACP), modifica la viscosidad del asfalto, en este caso la disminución de la misma, de manera que las curvas al 0.4, 0.7, 1 y 2% de ACP siguen inmediatamente debajo una por una en orden del incremento del ACP, considerando así disminución en la viscosidad. Dichas variaciones se analizarán en el Capítulo 6.

A continuación se presenta los resultados de las temperaturas de mezcla y compactación obtenidas de la Figura 58.

4.2.8. Temperaturas de mezcla y compactación

Para obtener las temperaturas de mezclado y compactación de la mezcla asfáltica, se toma las temperaturas a la cual se genera una viscosidad de 170 ± 20 Centipoises (Cp) para mezclado y una viscosidad de 280 ± 30 Centipoises, para compactación, las cuales para los diferentes tipos de porcentajes de ACP se obtienen a partir de la intersección de las curvas de viscosidad, con las líneas de los rangos de temperatura de mezcla y compactación dibujados e indicados en la Figura 58, de tal manera que entre las líneas Temp. Mezcla 1 y Temp. Mezcla 2 es el rango en el cual puede estar la temperatura de mezclado y entre las líneas Temp. Compactación 1 y Temp. Compactación 2, es el rango en el cual puede estar la temperatura de compactación.

A continuación en las Tablas 25 y 26 se presentan las temperaturas obtenidas.

Tabla 25: Rango de temperaturas de mezcla y su promedio para cada tipo de modificación.

% ACP Añadido	Temperaturas (°C)		
	Mezcla		
	Máxima	Mínima	Promedio
ASFALTO AC-20	159	153	156
0.40%	156	151	153.5
0.70%	155	150	152.5
1%	152	146	149
2%	149	143	146

Tabla 26: Rango de temperaturas de compactación y su promedio para cada tipo de modificación.

% ACP Añadido	Temperaturas (°C)		
	Compactación		
	Máxima	Mínima	Promedio
ASFALTO AC-20	146	140	143
0.40%	144	139	141.5
0.70%	143	138	140.5
1%	140	134	137
2%	137	132	134.5

4.2.9. Porcentaje de aceite de palma óptimo para realizar briquetas por el método Marshall

En un primer acercamiento a los porcentajes a utilizar para modificar al asfalto base y por consiguiente la realización de la mezcla asfáltica tibia se obtuvo que para realizar los ensayos de viscosidad se realizó para el 0.4%, 0.7%, 1% y 2%, tales porcentajes fueron aceptados y comparados con los parámetros de control de calidad del asfalto AC-20 de penetración 60-70 según la norma NEVI-12 y cuyos parámetros están en la Tabla 17.

Después de realizar los ensayos de viscosidad, se cree pertinente utilizar para el diseño de mezclas asfálticas, el 1% como un porcentaje que cumple parámetros de calidad y que logró una disminución de la viscosidad, pero al mismo tiempo se va a evaluar e comportamiento de una mezcla asfáltica con el 2% de ACP de tal manera saber si en cuanto a estabilidad y flujo Marshall pueda cumplir con las especificaciones y pueda ser utilizado como potencial reductor de viscosidad.

4.3. Caracterización de los agregados

Todo material debe ser sometido a pruebas de laboratorio con el fin de conocer sus características y comprobar si las mismas se encuentran dentro de los requisitos que las especificaciones exigen. De tal manera se procede a caracterizar los agregados y por ende obtener sus propiedades físicas. A continuación se presenta el proceso de muestreo y la realización de los ensayos.

4.3.1. Muestreo de agregados (ASTM D-75)

Los agregados son materiales que se obtienen de la trituración o disgregación de la roca, deben cumplir con sus principales características que son dureza, durabilidad, tamaño máximo, finura. Los agregados naturales se clasifican en finos y gruesos, los finos o arenas pasan por el tamiz #4 y el agregado grueso se retiene en el tamiz #4 y se conocen como gravas.

El proceso de trituración se lleva a cabo para obtener agregados de diferentes tamaños, los mismos que presentan mejores propiedades de adherencia de acuerdo a la forma del agregado triturado.

Para realizar el muestreo del agregado primero se debe realizar una inspección general de la fuente de material o del lugar a muestrear el agregado, para el presente proyecto se realizó una inspección en el sector de Cashapamba, en el cual existe una fuente de materiales llamado Mina Rio Pita, la misma que será la utilizada para el presente proyecto y que provee de material para la planta de mezcla asfáltica de la cual se realizó el muestreo del asfalto. En la Figura 59 se presenta la ubicación de la Mina Rio Pita, la misma que se encuentra en las siguientes coordenadas UTM: 78773519.19 E, 9961719.95 N.

Figura. 59: Ubicación del sitio de muestreo de agregados



Fuente: Google Earth

El método de muestreo a realizarse será directamente de las pilas de almacenamiento de agregados, de tal manera se debe tomar en cuenta que las muestras deben ser tomadas en un lugar apropiado de manera que represente un buen muestreo. Cuando se realiza el muestreo en pilas de almacenamiento de debe tomar la muestra en tres partes, la primera de la parte superior, la segunda del punto medio y la última del fondo de la pila.

Para determinar el tamaño de la muestra se debe saber el tamaño máximo nominal que se tiene en las pilas de almacenamiento, por lo tanto la planta de mezcla asfáltica utiliza dos tamaños de agregado, para el Grueso con un tamaño máximo nominal de 3/4" y para el agregado fino con un tamaño de 3/8" (ver Figura 60).



Figura. 60: A la izquierda se presenta el muestreo del agregado fino y a la derecha del agregado grueso

Para un tamaño de agregado de 3/4" (19mm) la masa de muestra mínimo es de 25 Kg, de tal manera que para ensayos rutinarios de caracterización de agregados y posterior mezcla de agregados para mezcla

asfáltica y en función del número estimado de briquetas a realizar, se toma como muestreo una masa de 45 Kg. Para un tamaño de agregado de 3/8" o menor, la masa de muestra mínima es de 10 Kg, en función del fin al que se va utilizar el agregado, se cree conveniente muestrear una masa de 90 Kg, en función de que para la realización de las briquetas, el agregado fino entra en mayor proporción en la mezcla de agregados.

4.3.2. Abrasión de agregado grueso (ASTM C-131)

Este ensayo se emplea para determinar la resistencia al desgaste de agregados naturales o triturados, empleando la citada máquina con una carga abrasiva.

Equipo:

- Balanza A \pm 0.1gr. Horno.
- Tamices (3/4", 1/2", 3/8" y N°12).
- Máquina de los Ángeles.
- Horno
- Esferas de acero de diámetro 46.38 mm y peso 390 gr.
- Agregado grueso de la mina Rio Pita.

Procedimiento:

- La muestra de ensayo consiste en agregado limpio por lavado y secado en horno a una temperatura constante, separada por fracciones de cada tamaño y recombinadas con una de las

granulometrías indicadas en la Tabla 27. El tipo de abrasión que se realizara será de tipo B. La muestra antes de ensayarla será pesada con aproximación de 1 g.

Tabla 27: Granulometría de la muestra a ser ensayada tipo B

Tamices				Granulometría de la muestra			
(Abertura Cuadrada)				(peso en gramos)			
Pasa		Retenido en		A	B	C	D
mm	in	mm	in				
37.5	1 1/2	25	1	1250±25	-	-	-
25.0	1	19	3/4	1250±25	-	-	-
19	3/4	12.5	1/2	1250±10	1250±10	-	-
12.5	1/2	9.5	3/8	1250±10	1250±10	-	-
9.5	3/8	6.3	1/4	-	-	2500±10	-
6.3	1/4	4.75	N°4	-	-	2500±10	-
4.75	N°4	2.36	N°8	-	-	-	5000±10
Total:				5000±10	5000±10	5000±10	5000±10

- La muestra y la carga abrasiva correspondiente, se colocan en la máquina de Los Ángeles (ver Figura 61), y se hace girar el cilindro, el número total de vueltas será 500.
- Una vez cumplido el número de vueltas prescrito, se descarga el material del cilindro y se procede con una separación preliminar de la muestra ensayada, en un tamiz más grueso que el No.12. La fracción fina que pasa, se tamiza a continuación empleando el tamiz No.12. El material retenido en el tamiz No.12 se lava y se seca en el horno, a una temperatura comprendida entre 105 a 110°C, y luego se pesa.



Figura. 61: Muestra puesta en la máquina con 11 esferas de carga abrasiva



Figura. 62: Muestra de agregado después del ensayo

Resultados

A continuación se muestra los resultados para el ensayo de abrasión:

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE																																								
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL																																								
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS Y ENSAYO DE MATERIALES																																								
DESGASTE POR ABRASIÓN MÁQUINA DE LOS ÁNGELES																																								
Fecha:	07/11/2013	Muestra:	Mina Río Pita																																					
Norma:	ASTM C-131																																							
<p>Gradación: B</p> <p># Esferas: 11</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th colspan="3">GRANULOMETRÍA DE LA MUESTRA</th> </tr> <tr> <th colspan="2">Tamices (plg)</th> <th rowspan="2">Peso en Gramos</th> </tr> <tr> <th>Pasa</th> <th>Retenido</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>3/4</td> <td>1/2</td> <td>2,504.50</td> </tr> <tr> <td>1/2</td> <td>3/8</td> <td>2,500.50</td> </tr> <tr> <td colspan="2">TOTAL MUESTRA</td> <td>5,005.00</td> </tr> </tbody> </table> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tbody> <tr> <td style="width: 10%;">P1</td> <td style="width: 50%;">Peso muestra seca antes del ensayo</td> <td style="width: 10%;">(g)</td> <td style="width: 30%;">5,005.00</td> </tr> <tr> <td>P2</td> <td>Peso muestra seca después del ensayo</td> <td>(g)</td> <td>3,589.00</td> </tr> <tr> <td>P3</td> <td>Pérdida de la muestra</td> <td>(g)</td> <td>1,416.00</td> </tr> <tr> <td colspan="4" style="padding: 5px;"> $\%Desgaste = \frac{P1 - P2}{P1} * 100$ </td> </tr> <tr> <td colspan="3">% DESGASTE</td> <td>(%) 28.3%</td> </tr> </tbody> </table> <p style="margin-top: 20px;">OBSERVACIONES:</p>				GRANULOMETRÍA DE LA MUESTRA			Tamices (plg)		Peso en Gramos	Pasa	Retenido	3/4	1/2	2,504.50	1/2	3/8	2,500.50	TOTAL MUESTRA		5,005.00	P1	Peso muestra seca antes del ensayo	(g)	5,005.00	P2	Peso muestra seca después del ensayo	(g)	3,589.00	P3	Pérdida de la muestra	(g)	1,416.00	$\%Desgaste = \frac{P1 - P2}{P1} * 100$				% DESGASTE			(%) 28.3%
GRANULOMETRÍA DE LA MUESTRA																																								
Tamices (plg)		Peso en Gramos																																						
Pasa	Retenido																																							
3/4	1/2	2,504.50																																						
1/2	3/8	2,500.50																																						
TOTAL MUESTRA		5,005.00																																						
P1	Peso muestra seca antes del ensayo	(g)	5,005.00																																					
P2	Peso muestra seca después del ensayo	(g)	3,589.00																																					
P3	Pérdida de la muestra	(g)	1,416.00																																					
$\%Desgaste = \frac{P1 - P2}{P1} * 100$																																								
% DESGASTE			(%) 28.3%																																					
ENSAYÓ: Jorge Rodríguez		CALCULÓ: Jorge Rodríguez																																						
		VERIFICÓ: Ing. Hugo Bonifaz Ing. Franco Rojas																																						

4.3.3. Equivalente de arena (ASTM D-2419)

Es una medida de la cantidad de limos o arcillas contaminantes presentes en agregados finos o arenas de un suelo. Se expresa como un valor porcentual. El propósito de este ensayo es indicar, bajo condiciones estandarizadas, las proporciones relativas de finos plásticos y polvos finos perjudiciales, presentes en suelos granulares y agregados finos que pasan la malla N° 4 (4.75 mm).

Equipo:

- Tamiz N° 4
- Embudo de boca ancha.
- Bandeja ancha para mezclado
- Cronómetro
- Cilindro de plástico transparente graduado, con capacidad de 1000 ml con tapón plástico.
- Pequeño recipiente cilíndrico de estaño de 85 ± 5 ml de capacidad.
- Botella de 1 Gal (3.78 lts) de capacidad, para almacenar las soluciones de Cloruro de Calcio (CaCl_2). Con tapón de plástico que lleva dos orificios en los cuales se colocan los conductores en forma de sifón.

Reactivos y Materiales:

Preparar la solución de cloruro de calcio que se va a usar, diluyendo una medida llena de solución de cloruro de calcio almacenada en 1 gal (3.8 lts)

de agua destilada o desmineralizada. Se podrá usar agua potable en lugar de agua desmineralizada siempre que la pureza del agua potable no afecte los resultados. Así el agua desmineralizada quedará lista para su uso.

Procedimiento:

- Obtener por lo menos 1500 g del material que pase la malla N° 4.
- Desmenuzar cualquier grumo del material que exista en la muestra con la ayuda de un mortero o pistilo u otro equipo que no proporcione degradación significativa al material.
- Remover cualquier recubrimiento de finos que exista en el agregado grueso. Esto se puede realizar secando el material en horno a 110 ± 5 °C.
- Cuando ya se tiene preparada la muestra de suelo, se coloca dentro de la probeta.
- Se coloca la manguera para introducir la solución de Cloruro de Calcio.
- Se agita en vaivén horizontal, de aproximadamente 180 repeticiones que es igual a 90 ciclos y un tiempo aproximado de 30 seg., para hacer que las partículas de suelo se dispersen por toda la solución.
- Se deja durante 20 minutos que las partículas de suelo se asienten, para tomar la lectura de arcilla, la cual se llamara lectura inicial.
- Se coloca el contrapeso para dividir la arena de la arcilla, se tomara lectura, la cual se le llamara lectura final (ver Figura 63).



Figura. 63: Lectura de arena y arcilla

Resultados:

A continuación se muestran los resultados de los ensayos realizados de equivalente de arena:

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE																																							
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL																																							
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS Y ENSAYO DE MATERIALES																																							
EQUIVALENTE DE ARENA																																							
Fecha	20/11/2013			Muestra:	Mina Río Pita																																		
Norma:	ASTM D-2419																																						
<table border="1" style="width: 80%; margin: auto; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="3"># ENSAYO</th> <th>1</th> <th>2</th> <th>3</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A</td> <td>MEDIDA DE ARCILLA</td> <td>(plg)</td> <td>4.4</td> <td>3.7</td> <td>3.6</td> </tr> <tr> <td>B</td> <td>MEDIDA DE ARENA</td> <td>(plg)</td> <td>3.4</td> <td>3.0</td> <td>3.0</td> </tr> <tr> <td colspan="6" style="text-align: center;"><i>Equivalente de arena = $\frac{\text{Medida Arena}}{\text{Medida Arcilla}} * 100$</i></td> </tr> <tr> <td>A/B*100</td> <td rowspan="2">%Equivalente de Arena</td> <td rowspan="2">(%)</td> <td>77%</td> <td>81%</td> <td>83%</td> </tr> <tr> <td>Promedio</td> <td colspan="3">81%</td> </tr> </tbody> </table> <p>OBSERVACIONES:</p>						# ENSAYO			1	2	3	A	MEDIDA DE ARCILLA	(plg)	4.4	3.7	3.6	B	MEDIDA DE ARENA	(plg)	3.4	3.0	3.0	<i>Equivalente de arena = $\frac{\text{Medida Arena}}{\text{Medida Arcilla}} * 100$</i>						A/B*100	%Equivalente de Arena	(%)	77%	81%	83%	Promedio	81%		
# ENSAYO			1	2	3																																		
A	MEDIDA DE ARCILLA	(plg)	4.4	3.7	3.6																																		
B	MEDIDA DE ARENA	(plg)	3.4	3.0	3.0																																		
<i>Equivalente de arena = $\frac{\text{Medida Arena}}{\text{Medida Arcilla}} * 100$</i>																																							
A/B*100	%Equivalente de Arena	(%)	77%	81%	83%																																		
Promedio			81%																																				
ENSAYÓ: Jorge Rodríguez		CALCULÓ: Jorge Rodríguez		VERIFICÓ: Ing. Hugo Bonifaz Ing. Franco Rojas																																			

4.3.4. Peso específico y absorción de agregado grueso (ASTM D-127)

Este ensayo sirve para determinar los pesos específicos aparente y nominal, así como la absorción, después de 24 horas de sumergidos en agua, de los agregados con tamaño igual o mayor a 4.75 mm (tamiz No.4).

Equipo:

- Balanza A ± 0.01 gr.
- Tamiz No.4.
- Canastilla metálica.
- Agregado grueso de la mina Rio Pita.

Procedimiento:

- Cuartear y eliminar el material inferior al tamiz No. 4. En este caso al tener un tamaño nominal de $\frac{3}{4}$ pulg, la cantidad de la muestra es de 3kg.
- La muestra se lava inicialmente, se seca a continuación en un horno a 110 ± 5 °C y se enfría al aire a la temperatura ambiente durante 1 a 3 horas. Una vez fría, se sumerge en agua, también a temperatura ambiente, durante 24 ± 4 horas.
- Después del período de inmersión, se saca la muestra del agua y se secan las partículas rodándolas sobre una franela absorbente de gran tamaño, hasta que se elimine el agua superficial visible. A continuación, se determina el peso de la muestra en el estado de saturada con superficie seca (S.S.S.) (ver Figura 64).



Figura. 64: Muestra en estado SSS

- Se coloca la muestra en el interior de la canastilla metálica y se determina su peso sumergida en el agua, se toma la temperatura de ensayo y luego se corrige en los cálculos (ver Figura 65).



Figura. 65: Muestra sumergida para tomar su peso

- Se seca entonces la muestra y se determina su peso seco hasta peso constante.

Resultados:

A continuación se presentan los resultados para el agregado grueso muestreado inicialmente y para el agregado retenido en el tamiz de $\frac{1}{2}$ " y N°4 requerido para la mezcla de agregados y gravedad específica bulk de los agregados:

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE																																					
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL																																					
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS Y ENSAYO DE MATERIALES																																					
PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO GRUESO																																					
Fecha:	01/11/2013	Muestra:	Mina Río Pita																																		
Norma:	ASTM C-127																																				
<p>Temperatura de ensayo: 19.4 °C</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin: 10px 0;"> <tr> <td style="width: 5%; text-align: center;">A</td> <td style="width: 65%;">MASA SECA AL HORNO</td> <td style="width: 10%; text-align: center;">(g)</td> <td style="width: 20%; text-align: right;">2,898.30</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">B</td> <td>MASA AL AIRE CONDICIÓN SSD</td> <td style="text-align: center;">(g)</td> <td style="text-align: right;">2,957.50</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">C</td> <td>MASA SUMERGIDA CONDICIÓN SSD</td> <td style="text-align: center;">(g)</td> <td style="text-align: right;">1,805.00</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">γ</td> <td>DENSIDAD DEL AGUA A LA TEMPERATURA DE ENSAYO</td> <td style="text-align: center;">(g/cm³)</td> <td style="text-align: right;">0.99833</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">A/(B-C)*γ</td> <td>DENSIDAD RELATIVA (Seca al Horno)</td> <td style="text-align: center;">(g/cm³)</td> <td style="text-align: right;">2.51</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">B/(B-C)*γ</td> <td>DENSIDAD RELATIVA EN ESTADO SSD</td> <td style="text-align: center;">(g/cm³)</td> <td style="text-align: right;">2.56</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">A/(A-C)*γ</td> <td>DENSIDAD APARENTE RELATIVA</td> <td style="text-align: center;">(g/cm³)</td> <td style="text-align: right;">2.65</td> </tr> </table> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin: 10px 0;"> <tr> <td colspan="3" style="text-align: center;">ABSORCIÓN</td> </tr> <tr> <td style="width: 25%;">(B-A)/A*100</td> <td style="width: 50%;">% ABSORCIÓN</td> <td style="width: 25%; text-align: right;">2.0%</td> </tr> </table> <p>OBSERVACIONES:</p>				A	MASA SECA AL HORNO	(g)	2,898.30	B	MASA AL AIRE CONDICIÓN SSD	(g)	2,957.50	C	MASA SUMERGIDA CONDICIÓN SSD	(g)	1,805.00	γ	DENSIDAD DEL AGUA A LA TEMPERATURA DE ENSAYO	(g/cm³)	0.99833	A/(B-C)*γ	DENSIDAD RELATIVA (Seca al Horno)	(g/cm³)	2.51	B/(B-C)*γ	DENSIDAD RELATIVA EN ESTADO SSD	(g/cm³)	2.56	A/(A-C)*γ	DENSIDAD APARENTE RELATIVA	(g/cm³)	2.65	ABSORCIÓN			(B-A)/A*100	% ABSORCIÓN	2.0%
A	MASA SECA AL HORNO	(g)	2,898.30																																		
B	MASA AL AIRE CONDICIÓN SSD	(g)	2,957.50																																		
C	MASA SUMERGIDA CONDICIÓN SSD	(g)	1,805.00																																		
γ	DENSIDAD DEL AGUA A LA TEMPERATURA DE ENSAYO	(g/cm³)	0.99833																																		
A/(B-C)*γ	DENSIDAD RELATIVA (Seca al Horno)	(g/cm³)	2.51																																		
B/(B-C)*γ	DENSIDAD RELATIVA EN ESTADO SSD	(g/cm³)	2.56																																		
A/(A-C)*γ	DENSIDAD APARENTE RELATIVA	(g/cm³)	2.65																																		
ABSORCIÓN																																					
(B-A)/A*100	% ABSORCIÓN	2.0%																																			
ENSAYÓ: Jorge Rodríguez		CALCULÓ: Jorge Rodríguez																																			
		VERIFICÓ: Ing. Hugo Bonifaz Ing. Franco Rojas																																			

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE																																																									
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL																																																									
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS Y ENSAYO DE MATERIALES																																																									
PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO GRUESO																																																									
Fecha:	22/11/2013	Muestra:	Mina Río Pita																																																						
Norma:	ASTM C-127	Agregado:	Retenido 1/2"																																																						
<p>Temperatura ensayo 1: 19.4 °C</p> <p>Temperatura ensayo 2: 17.1 °C</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin-top: 10px;"> <tr> <td style="width: 5%;">A</td> <td style="width: 45%;">MASA SECA AL HORNO</td> <td style="width: 10%;">(g)</td> <td style="width: 10%;">1,284.19</td> <td style="width: 10%;">1,039.71</td> <td></td> </tr> <tr> <td>B</td> <td>MASA AL AIRE CONDICIÓN SSD</td> <td>(g)</td> <td>1,306.62</td> <td>1,064.73</td> <td></td> </tr> <tr> <td>C</td> <td>MASA SUMERGIDA CONDICIÓN SSD</td> <td>(g)</td> <td>803.05</td> <td>649.37</td> <td></td> </tr> <tr> <td>γ</td> <td>DENSIDAD DEL AGUA A LA TEMPERATURA DE ENSAYO</td> <td>(g/cm³)</td> <td>0.99833</td> <td>0.99876</td> <td style="text-align: center;">Promedio</td> </tr> <tr> <td>$A/(B-C)*\gamma$</td> <td>DENSIDAD RELATIVA (Seca al Horno)</td> <td>(g/cm³)</td> <td>2.55</td> <td>2.50</td> <td style="text-align: center;">2.52</td> </tr> <tr> <td>$B/(B-C)*\gamma$</td> <td>DENSIDAD RELATIVA EN ESTADO SSD</td> <td>(g/cm³)</td> <td>2.59</td> <td>2.56</td> <td style="text-align: center;">2.58</td> </tr> <tr> <td>$A/(A-C)*\gamma$</td> <td>DENSIDAD APARENTE RELATIVA</td> <td>(g/cm³)</td> <td>2.66</td> <td>2.66</td> <td style="text-align: center;">2.66</td> </tr> </table> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin-top: 10px;"> <tr> <td colspan="5" style="text-align: center;">ABSORCIÓN</td> </tr> <tr> <td style="width: 15%;">$(B-A)/A*100$</td> <td style="width: 45%;">% ABSORCIÓN</td> <td style="width: 10%;">1.7%</td> <td style="width: 10%;">2.4%</td> <td style="width: 10%; text-align: center;">2.1%</td> </tr> </table> <p style="margin-top: 10px;">OBSERVACIONES:</p>						A	MASA SECA AL HORNO	(g)	1,284.19	1,039.71		B	MASA AL AIRE CONDICIÓN SSD	(g)	1,306.62	1,064.73		C	MASA SUMERGIDA CONDICIÓN SSD	(g)	803.05	649.37		γ	DENSIDAD DEL AGUA A LA TEMPERATURA DE ENSAYO	(g/cm ³)	0.99833	0.99876	Promedio	$A/(B-C)*\gamma$	DENSIDAD RELATIVA (Seca al Horno)	(g/cm ³)	2.55	2.50	2.52	$B/(B-C)*\gamma$	DENSIDAD RELATIVA EN ESTADO SSD	(g/cm ³)	2.59	2.56	2.58	$A/(A-C)*\gamma$	DENSIDAD APARENTE RELATIVA	(g/cm ³)	2.66	2.66	2.66	ABSORCIÓN					$(B-A)/A*100$	% ABSORCIÓN	1.7%	2.4%	2.1%
A	MASA SECA AL HORNO	(g)	1,284.19	1,039.71																																																					
B	MASA AL AIRE CONDICIÓN SSD	(g)	1,306.62	1,064.73																																																					
C	MASA SUMERGIDA CONDICIÓN SSD	(g)	803.05	649.37																																																					
γ	DENSIDAD DEL AGUA A LA TEMPERATURA DE ENSAYO	(g/cm ³)	0.99833	0.99876	Promedio																																																				
$A/(B-C)*\gamma$	DENSIDAD RELATIVA (Seca al Horno)	(g/cm ³)	2.55	2.50	2.52																																																				
$B/(B-C)*\gamma$	DENSIDAD RELATIVA EN ESTADO SSD	(g/cm ³)	2.59	2.56	2.58																																																				
$A/(A-C)*\gamma$	DENSIDAD APARENTE RELATIVA	(g/cm ³)	2.66	2.66	2.66																																																				
ABSORCIÓN																																																									
$(B-A)/A*100$	% ABSORCIÓN	1.7%	2.4%	2.1%																																																					
ENSAYÓ: Jorge Rodríguez		CALCULÓ: Jorge Rodríguez		VERIFICÓ: Ing. Hugo Bonifaz Ing. Franco Rojas																																																					

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS Y ENSAYO DE MATERIALES					
PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO GRUESO					
Fecha:	22/11/2013	Muestra:	Mina Río Pita		
Norma:	ASTM C-127	Agregado:	Retenido N° 4		
Temperatura ensayo 1: 19.4 °C Temperatura ensayo 2: 17.1 °C					
A	MASA SECA AL HORNO	(g)	1,453.76	1,026.08	
B	MASA AL AIRE CONDICIÓN SSD	(g)	1,489.57	1,054.52	
C	MASA SUMERGIDA CONDICIÓN SSD	(g)	884.10	638.62	
γ	DENSIDAD DEL AGUA A LA TEMPERATURA DE ENSAYO	(g/cm³)	0.99833	0.99876	Promedio
A/(B-C)*γ	DENSIDAD RELATIVA (Seca al Horno)	(g/cm³)	2.40	2.46	2.43
B/(B-C)*γ	DENSIDAD RELATIVA EN ESTADO SSD	(g/cm³)	2.46	2.53	2.49
A/(A-C)*γ	DENSIDAD APARENTE RELATIVA	(g/cm³)	2.55	2.64	2.60
ABSORCIÓN					
(B-A)/A*100	% ABSORCIÓN	2.5%	2.8%	2.6%	
OBSERVACIONES:					
ENSAYÓ: Jorge Rodríguez		CALCULÓ: Jorge Rodríguez		VERIFICÓ: Ing. Hugo Bonifaz Ing. Franco Rojas	

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

Este ensayo tiene como objetivo la determinación del peso específico aparente, lo mismo que la cantidad de agua que se absorbe en el agregado fino cuando se sumerge en agua por un periodo de 24 horas, expresada como un porcentaje en peso.

El peso específico aparente es la relación entre el peso al aire del sólido y el peso del agua correspondiente a su volumen aparente.

Equipo:

- Balanza A ± 0.01 gr.
- Tamiz N° 4.
- Picnómetro.
- Agregado fino de la mina Rio Pita.

Procedimiento:

- Eliminar el material de tamaño superior a 4.75 mm (tamiz No.4), se selecciona, por cuarteo, una cantidad de aproximadamente 1000 g, que se seca. Una vez fría se pesa, a continuación se cubre la muestra completamente con agua y se la deja así sumergida durante 24 ± 4 horas.
- Después del período de inmersión, se retira cuidadosamente el agua para evitar la pérdida de finos y se extiende la muestra sobre una bandeja y se coloca en el sol para que se evapore el agua hasta lograra superficie saturada seca.

- Inmediatamente, se introducen en el picnómetro previamente tarado, 500 gramos del agregado fino, y se le añade agua hasta aproximadamente un 90 por ciento de su capacidad; para eliminar el aire atrapado se coloca el picnómetro en la bomba de vacío.
- Se llena con agua el picnómetro y se determina su peso total (picnómetro, muestra y agua), (ver Figura 66), con una aproximación de 0.1 g y además se toma la temperatura para corregir el cálculo.

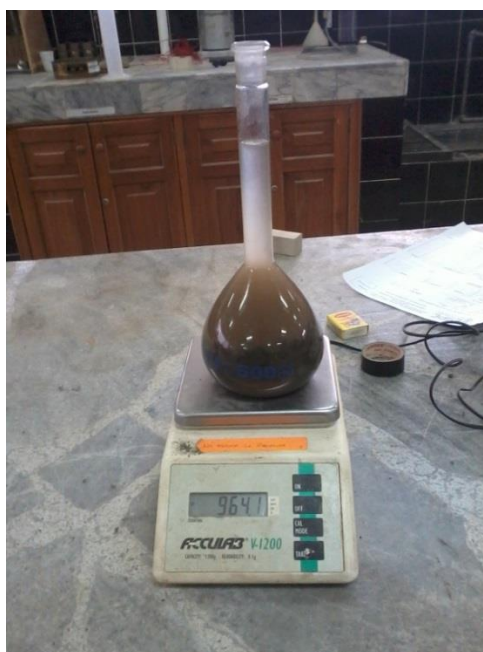


Figura. 66: Peso del picnómetro + muestra y agua

Resultados:

A continuación se presentan los resultados del agregado fino muestreado y de los agregados separados por tamaños necesarios según su granulometría:

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS Y ENSAYO DE MATERIALES																																							
PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO FINO																																							
Fecha	07/11/2013	Muestra:	Mina Río Pita																																				
Norma:	ASTM C-128																																						
Temperatura de ensayo: 19.8 °C																																							
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td colspan="3" style="text-align: center;">NÚMERO DEL PICNÓMETRO</td> <td style="text-align: center;">3</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">A</td> <td style="text-align: center;">MASA DE LA MUESTRA SECA AL HORNO</td> <td style="text-align: center;">(g)</td> <td style="text-align: center;">489.14</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">B</td> <td style="text-align: center;">MASA PICNÓMETRO+ AGUA DESTILADA</td> <td style="text-align: center;">(g)</td> <td style="text-align: center;">658.20</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">C</td> <td style="text-align: center;">MASA PICNÓMETRO +MUESTRA+AGUA</td> <td style="text-align: center;">(g)</td> <td style="text-align: center;">964.10</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">D</td> <td style="text-align: center;">MASA MUESTRA EN ESTADO SSD</td> <td style="text-align: center;">(g)</td> <td style="text-align: center;">502.50</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">γ</td> <td style="text-align: center;">DENSIDAD DEL AGUA A LA TEMPERATURA DE ENSAYO</td> <td style="text-align: center;">(g/cm³)</td> <td style="text-align: center;">0.99825</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">A/(B+D-C)*γ</td> <td style="text-align: center;">DENSIDAD RELATIVA SECA AL HORNO</td> <td style="text-align: center;">(g/cm³)</td> <td style="text-align: center;">2.48</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">D/(B+D-C)*γ</td> <td style="text-align: center;">DENSIDAD RELATIVA EN ESTADO SSD</td> <td style="text-align: center;">(g/cm³)</td> <td style="text-align: center;">2.55</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">A/(B+A-C)*γ</td> <td style="text-align: center;">DENSIDAD APARENTE RELATIVA</td> <td style="text-align: center;">(g/cm³)</td> <td style="text-align: center;">2.66</td> </tr> </table>				NÚMERO DEL PICNÓMETRO			3	A	MASA DE LA MUESTRA SECA AL HORNO	(g)	489.14	B	MASA PICNÓMETRO+ AGUA DESTILADA	(g)	658.20	C	MASA PICNÓMETRO +MUESTRA+AGUA	(g)	964.10	D	MASA MUESTRA EN ESTADO SSD	(g)	502.50	γ	DENSIDAD DEL AGUA A LA TEMPERATURA DE ENSAYO	(g/cm³)	0.99825	A/(B+D-C)*γ	DENSIDAD RELATIVA SECA AL HORNO	(g/cm³)	2.48	D/(B+D-C)*γ	DENSIDAD RELATIVA EN ESTADO SSD	(g/cm³)	2.55	A/(B+A-C)*γ	DENSIDAD APARENTE RELATIVA	(g/cm³)	2.66
NÚMERO DEL PICNÓMETRO			3																																				
A	MASA DE LA MUESTRA SECA AL HORNO	(g)	489.14																																				
B	MASA PICNÓMETRO+ AGUA DESTILADA	(g)	658.20																																				
C	MASA PICNÓMETRO +MUESTRA+AGUA	(g)	964.10																																				
D	MASA MUESTRA EN ESTADO SSD	(g)	502.50																																				
γ	DENSIDAD DEL AGUA A LA TEMPERATURA DE ENSAYO	(g/cm³)	0.99825																																				
A/(B+D-C)*γ	DENSIDAD RELATIVA SECA AL HORNO	(g/cm³)	2.48																																				
D/(B+D-C)*γ	DENSIDAD RELATIVA EN ESTADO SSD	(g/cm³)	2.55																																				
A/(B+A-C)*γ	DENSIDAD APARENTE RELATIVA	(g/cm³)	2.66																																				
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td colspan="3" style="text-align: center;">ABSORCIÓN</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">(D-A)/A*100</td> <td style="text-align: center;">% ABSORCIÓN</td> <td style="text-align: center;">2.7%</td> </tr> </table>				ABSORCIÓN			(D-A)/A*100	% ABSORCIÓN	2.7%																														
ABSORCIÓN																																							
(D-A)/A*100	% ABSORCIÓN	2.7%																																					
OBSERVACIONES:																																							
ENSAYÓ: Jorge Rodríguez		CALCULÓ: Jorge Rodríguez																																					
		VERIFICÓ: Ing. Hugo Bonifaz Ing. Franco Rojas																																					

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE					
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL					
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS Y ENSAYO DE MATERIALES					
PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO FINO					
Fecha	26/11/2013	Muestra:	Mina Río Pita		
Norma:	ASTM D-854	Agregado:	Retenido N°8		
<p>Temperatura ensayo 1: 20.4 °C</p> <p>Temperatura ensayo 2: 21 °C</p>					
NÚMERO DEL PICNÓMETRO					
			2	2	
A	MASA DE LA MUESTRA SECA AL HORNO	(g)	489.61	499.13	
B	MASA PICNÓMETRO+ AGUA DESTILADA	(g)	658.26	658.53	
C	MASA PICNÓMETRO +MUESTRA+AGUA	(g)	963.30	966.84	
D	MASA MUESTRA EN ESTADO SSD	(g)	500.40	510.68	
γ	DENSIDAD DEL AGUA A LA TEMPERATURA DE ENSAYO	(g/cm³)	0.99812	0.99799	Promedio
A/(B+D-C)*γ	DENSIDAD RELATIVA SECA AL HORNO	(g/cm³)	2.50	2.46	2.48
D/(B+D-C)*γ	DENSIDAD RELATIVA EN ESTADO SSS	(g/cm³)	2.56	2.52	2.54
A/(B+A-C)*γ	DENSIDAD APARENTE RELATIVA	(g/cm³)	2.65	2.61	2.63
ABSORCIÓN					
(F-A)/A*100	% ABSORCIÓN		2.2%	2.3%	2.3%
OBSERVACIONES:					
ENSAYÓ: Jorge Rodríguez		CALCULÓ: Jorge Rodríguez		VERIFICÓ: Ing. Hugo Bonifaz Ing. Franco Rojas	

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE																																																						
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL																																																						
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS Y ENSAYO DE MATERIALES																																																						
PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO FINO																																																						
Fecha	26/11/2013	Muestra:	Mina Río Pita																																																			
Norma:	ASTM D-854	Agregado:	Retenido N°50																																																			
<p>Temperatura ensayo 1: 21.2 °C</p> <p>Temperatura ensayo 2: 20.9 °C</p>																																																						
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="2">NÚMERO DEL PICNÓMETRO</th> <th>2</th> <th>3</th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">A</td> <td>MASA DE LA MUESTRA SECA AL HORNO</td> <td style="text-align: center;">(g)</td> <td style="text-align: center;">480.89</td> <td style="text-align: center;">494.38</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">B</td> <td>MASA PICNÓMETRO+ AGUA DESTILADA</td> <td style="text-align: center;">(g)</td> <td style="text-align: center;">658.60</td> <td style="text-align: center;">658.62</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">C</td> <td>MASA PICNÓMETRO +MUESTRA+AGUA</td> <td style="text-align: center;">(g)</td> <td style="text-align: center;">957.83</td> <td style="text-align: center;">963.65</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">D</td> <td>MASA MUESTRA EN ESTADO SSD</td> <td style="text-align: center;">(g)</td> <td style="text-align: center;">500.55</td> <td style="text-align: center;">512.29</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">γ</td> <td>DENSIDAD DEL AGUA A LA TEMPERATURA DE ENSAYO</td> <td style="text-align: center;">(g/cm³)</td> <td style="text-align: center;">0.99795</td> <td style="text-align: center;">0.99802</td> </tr> <tr> <td colspan="2"></td> <td></td> <td></td> <td style="text-align: center;">Promedio</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">$A/(B+D-C)*\gamma$</td> <td>DENSIDAD RELATIVA SECA AL HORNO</td> <td style="text-align: center;">(g/cm³)</td> <td style="text-align: center;">2.38</td> <td style="text-align: center;">2.38</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">$D/(B+D-C)*\gamma$</td> <td>DENSIDAD RELATIVA EN ESTADO SSS</td> <td style="text-align: center;">(g/cm³)</td> <td style="text-align: center;">2.48</td> <td style="text-align: center;">2.47</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">$A/(B+A-C)*\gamma$</td> <td>DENSIDAD APARENTE RELATIVA</td> <td style="text-align: center;">(g/cm³)</td> <td style="text-align: center;">2.64</td> <td style="text-align: center;">2.61</td> </tr> </tbody> </table>					NÚMERO DEL PICNÓMETRO		2	3		A	MASA DE LA MUESTRA SECA AL HORNO	(g)	480.89	494.38	B	MASA PICNÓMETRO+ AGUA DESTILADA	(g)	658.60	658.62	C	MASA PICNÓMETRO +MUESTRA+AGUA	(g)	957.83	963.65	D	MASA MUESTRA EN ESTADO SSD	(g)	500.55	512.29	γ	DENSIDAD DEL AGUA A LA TEMPERATURA DE ENSAYO	(g/cm ³)	0.99795	0.99802					Promedio	$A/(B+D-C)*\gamma$	DENSIDAD RELATIVA SECA AL HORNO	(g/cm ³)	2.38	2.38	$D/(B+D-C)*\gamma$	DENSIDAD RELATIVA EN ESTADO SSS	(g/cm ³)	2.48	2.47	$A/(B+A-C)*\gamma$	DENSIDAD APARENTE RELATIVA	(g/cm ³)	2.64	2.61
NÚMERO DEL PICNÓMETRO		2	3																																																			
A	MASA DE LA MUESTRA SECA AL HORNO	(g)	480.89	494.38																																																		
B	MASA PICNÓMETRO+ AGUA DESTILADA	(g)	658.60	658.62																																																		
C	MASA PICNÓMETRO +MUESTRA+AGUA	(g)	957.83	963.65																																																		
D	MASA MUESTRA EN ESTADO SSD	(g)	500.55	512.29																																																		
γ	DENSIDAD DEL AGUA A LA TEMPERATURA DE ENSAYO	(g/cm ³)	0.99795	0.99802																																																		
				Promedio																																																		
$A/(B+D-C)*\gamma$	DENSIDAD RELATIVA SECA AL HORNO	(g/cm ³)	2.38	2.38																																																		
$D/(B+D-C)*\gamma$	DENSIDAD RELATIVA EN ESTADO SSS	(g/cm ³)	2.48	2.47																																																		
$A/(B+A-C)*\gamma$	DENSIDAD APARENTE RELATIVA	(g/cm ³)	2.64	2.61																																																		
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="5">ABSORCIÓN</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">$(F-A)/A*100$</td> <td style="text-align: center;">% ABSORCIÓN</td> <td style="text-align: center;">4.1%</td> <td style="text-align: center;">3.6%</td> <td style="text-align: center;">3.9%</td> </tr> </tbody> </table>					ABSORCIÓN					$(F-A)/A*100$	% ABSORCIÓN	4.1%	3.6%	3.9%																																								
ABSORCIÓN																																																						
$(F-A)/A*100$	% ABSORCIÓN	4.1%	3.6%	3.9%																																																		
OBSERVACIONES:																																																						
ENSAYÓ: Jorge Rodríguez		CALCULÓ: Jorge Rodríguez		VERIFICÓ: Ing. Hugo Bonifaz Ing. Franco Rojas																																																		

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS Y ENSAYO DE MATERIALES																																																											
PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO FINO																																																											
Fecha:	26/11/2013	Muestra:	Mina Río Pita																																																								
Norma:	ASTM D-854	Agregado:	Retenido N° 200																																																								
Temperatura ensayo 1: 20.9 °C Temperatura ensayo 2: 24.1 °C																																																											
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td colspan="3" style="text-align: center;">NÚMERO DEL PICNÓMETRO</td> <td style="text-align: center;">2</td> <td style="text-align: center;">2</td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">A</td> <td style="text-align: center;">MASA DE LA MUESTRA SECA AL HORNO</td> <td style="text-align: center;">(g)</td> <td style="text-align: center;">491.23</td> <td style="text-align: center;">489.16</td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">B</td> <td style="text-align: center;">MASA PICNÓMETRO+ AGUA DESTILADA</td> <td style="text-align: center;">(g)</td> <td style="text-align: center;">658.26</td> <td style="text-align: center;">658.53</td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">C</td> <td style="text-align: center;">MASA PICNÓMETRO +MUESTRA+AGUA</td> <td style="text-align: center;">(g)</td> <td style="text-align: center;">946.43</td> <td style="text-align: center;">942.85</td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">D</td> <td style="text-align: center;">MASA MUESTRA EN ESTADO SSD</td> <td style="text-align: center;">(g)</td> <td style="text-align: center;">501.52</td> <td style="text-align: center;">497.92</td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">γ</td> <td style="text-align: center;">DENSIDAD DEL AGUA A LA TEMPERATURA DE ENSAYO</td> <td style="text-align: center;">(g/cm³)</td> <td style="text-align: center;">0.99802</td> <td style="text-align: center;">0.99727</td> <td style="text-align: center;">Promedio</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">A/(B+D-C)*γ</td> <td style="text-align: center;">DENSIDAD RELATIVA SECA AL HORNO</td> <td style="text-align: center;">(g/cm³)</td> <td style="text-align: center;">2.30</td> <td style="text-align: center;">2.28</td> <td style="text-align: center;">2.29</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">D/(B+D-C)*γ</td> <td style="text-align: center;">DENSIDAD RELATIVA EN ESTADO SSS</td> <td style="text-align: center;">(g/cm³)</td> <td style="text-align: center;">2.35</td> <td style="text-align: center;">2.32</td> <td style="text-align: center;">2.34</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">A/(B+A-C)*γ</td> <td style="text-align: center;">DENSIDAD APARENTE RELATIVA</td> <td style="text-align: center;">(g/cm³)</td> <td style="text-align: center;">2.41</td> <td style="text-align: center;">2.38</td> <td style="text-align: center;">2.40</td> </tr> </table>						NÚMERO DEL PICNÓMETRO			2	2		A	MASA DE LA MUESTRA SECA AL HORNO	(g)	491.23	489.16		B	MASA PICNÓMETRO+ AGUA DESTILADA	(g)	658.26	658.53		C	MASA PICNÓMETRO +MUESTRA+AGUA	(g)	946.43	942.85		D	MASA MUESTRA EN ESTADO SSD	(g)	501.52	497.92		γ	DENSIDAD DEL AGUA A LA TEMPERATURA DE ENSAYO	(g/cm³)	0.99802	0.99727	Promedio	A/(B+D-C)*γ	DENSIDAD RELATIVA SECA AL HORNO	(g/cm³)	2.30	2.28	2.29	D/(B+D-C)*γ	DENSIDAD RELATIVA EN ESTADO SSS	(g/cm³)	2.35	2.32	2.34	A/(B+A-C)*γ	DENSIDAD APARENTE RELATIVA	(g/cm³)	2.41	2.38	2.40
NÚMERO DEL PICNÓMETRO			2	2																																																							
A	MASA DE LA MUESTRA SECA AL HORNO	(g)	491.23	489.16																																																							
B	MASA PICNÓMETRO+ AGUA DESTILADA	(g)	658.26	658.53																																																							
C	MASA PICNÓMETRO +MUESTRA+AGUA	(g)	946.43	942.85																																																							
D	MASA MUESTRA EN ESTADO SSD	(g)	501.52	497.92																																																							
γ	DENSIDAD DEL AGUA A LA TEMPERATURA DE ENSAYO	(g/cm³)	0.99802	0.99727	Promedio																																																						
A/(B+D-C)*γ	DENSIDAD RELATIVA SECA AL HORNO	(g/cm³)	2.30	2.28	2.29																																																						
D/(B+D-C)*γ	DENSIDAD RELATIVA EN ESTADO SSS	(g/cm³)	2.35	2.32	2.34																																																						
A/(B+A-C)*γ	DENSIDAD APARENTE RELATIVA	(g/cm³)	2.41	2.38	2.40																																																						
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td colspan="5" style="text-align: center;">ABSORCIÓN</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">(F-A)/A*100</td> <td style="text-align: center;">% ABSORCIÓN</td> <td style="text-align: center;">2.1%</td> <td style="text-align: center;">1.8%</td> <td style="text-align: center;">1.9%</td> </tr> </table>						ABSORCIÓN					(F-A)/A*100	% ABSORCIÓN	2.1%	1.8%	1.9%																																												
ABSORCIÓN																																																											
(F-A)/A*100	% ABSORCIÓN	2.1%	1.8%	1.9%																																																							
OBSERVACIONES:																																																											
ENSAYÓ: Jorge Rodríguez		CALCULÓ: Jorge Rodríguez		VERIFICÓ: Ing. Hugo Bonifaz Ing. Franco Rojas																																																							

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE																																													
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL																																													
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS Y ENSAYO DE MATERIALES																																													
PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO FINO																																													
Fecha	26/11/2013	Muestra:	Mina Rio Pita																																										
Norma:	ASTM D-854	Agregado:	Pasante del 200																																										
<p>Temperatura ensayo: 20.6 °C</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin: 10px auto;"> <tr> <td colspan="3" style="text-align: center;">NÚMERO DEL PICNÓMETRO</td> <td style="text-align: center;">3</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">A</td> <td>MASA DE LA MUESTRA SECA AL HORNO</td> <td style="text-align: center;">(g)</td> <td style="text-align: center;">118.54</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">B</td> <td>MASA PICNÓMETRO+ AGUA DESTILADA</td> <td style="text-align: center;">(g)</td> <td style="text-align: center;">658.62</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">C</td> <td>MASA PICNÓMETRO +MUESTRA+AGUA</td> <td style="text-align: center;">(g)</td> <td style="text-align: center;">729.50</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">D</td> <td>MASA MUESTRA EN ESTADO SSD</td> <td style="text-align: center;">(g)</td> <td style="text-align: center;">124.68</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">γ</td> <td>DENSIDAD DEL AGUA A LA TEMPERATURA DE ENSAYO</td> <td style="text-align: center;">(g/cm³)</td> <td style="text-align: center;">0.99808</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">A/(B+D-C)*γ</td> <td>DENSIDAD RELATIVA SECA AL HORNO</td> <td style="text-align: center;">(g/cm³)</td> <td style="text-align: center;">2.20</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">D/(B+D-C)*γ</td> <td>DENSIDAD RELATIVA EN ESTADO SSS</td> <td style="text-align: center;">(g/cm³)</td> <td style="text-align: center;">2.31</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">A/(B+A-C)*γ</td> <td>DENSIDAD APARENTE RELATIVA</td> <td style="text-align: center;">(g/cm³)</td> <td style="text-align: center;">2.48</td> </tr> </table> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin: 10px auto;"> <tr> <td colspan="3" style="text-align: center;">ABSORCIÓN</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">(F-A)/A*100</td> <td style="text-align: center;">% ABSORCIÓN</td> <td style="text-align: center;">5.2%</td> </tr> </table> <p>OBSERVACIONES:</p>				NÚMERO DEL PICNÓMETRO			3	A	MASA DE LA MUESTRA SECA AL HORNO	(g)	118.54	B	MASA PICNÓMETRO+ AGUA DESTILADA	(g)	658.62	C	MASA PICNÓMETRO +MUESTRA+AGUA	(g)	729.50	D	MASA MUESTRA EN ESTADO SSD	(g)	124.68	γ	DENSIDAD DEL AGUA A LA TEMPERATURA DE ENSAYO	(g/cm ³)	0.99808	A/(B+D-C)*γ	DENSIDAD RELATIVA SECA AL HORNO	(g/cm ³)	2.20	D/(B+D-C)*γ	DENSIDAD RELATIVA EN ESTADO SSS	(g/cm ³)	2.31	A/(B+A-C)*γ	DENSIDAD APARENTE RELATIVA	(g/cm ³)	2.48	ABSORCIÓN			(F-A)/A*100	% ABSORCIÓN	5.2%
NÚMERO DEL PICNÓMETRO			3																																										
A	MASA DE LA MUESTRA SECA AL HORNO	(g)	118.54																																										
B	MASA PICNÓMETRO+ AGUA DESTILADA	(g)	658.62																																										
C	MASA PICNÓMETRO +MUESTRA+AGUA	(g)	729.50																																										
D	MASA MUESTRA EN ESTADO SSD	(g)	124.68																																										
γ	DENSIDAD DEL AGUA A LA TEMPERATURA DE ENSAYO	(g/cm ³)	0.99808																																										
A/(B+D-C)*γ	DENSIDAD RELATIVA SECA AL HORNO	(g/cm ³)	2.20																																										
D/(B+D-C)*γ	DENSIDAD RELATIVA EN ESTADO SSS	(g/cm ³)	2.31																																										
A/(B+A-C)*γ	DENSIDAD APARENTE RELATIVA	(g/cm ³)	2.48																																										
ABSORCIÓN																																													
(F-A)/A*100	% ABSORCIÓN	5.2%																																											
ENSAYÓ: Jorge Rodríguez		CALCULÓ: Jorge Rodríguez																																											
		VERIFICÓ: Ing. Hugo Bonifaz Ing. Franco Rojas																																											

4.3.6. Límites de consistencia (ASTM D-427)

Este método de ensayo cubre la determinación de límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad.

Se incluye en este ensayo el método de un punto para determinar el límite líquido de los suelos, utilizando una preparación húmeda de la muestra.

Procedimiento:

- ***Preparación de la muestra:***

Se tomará una muestra seca al aire y por consiguiente cuarteada. Del cuarteo se obtiene una porción del material capaz de obtener ± 500 g del material que pasa por la malla N° 40.

- **Límite líquido:**

Es determinado mediante ensayos, en los cuales una porción de la muestra, es colocada dentro de un recipiente de bronce (copa de Casagrande) y se golpea a una razón de 2 golpes/seg. Antes de iniciar el golpeteo la muestra es dividida en dos partes aproximadamente iguales, utilizando una herramienta ranuradora de dimensiones especificadas. Debe de anotarse el número de golpes (N) para el cual la ranura de la muestra ensayada se cerró en una longitud aproximada de 3 mm (1/2") en su base.

- **Límite plástico:**

Para obtener el límite plástico se hace uso de los 250 g de la muestra dividida en este procedimiento. Sobre una superficie de vidrio se trata de formar un cilindro con el suelo de 1/8" de diámetro. Luego se cortan en dos partes el cilindro formado, para determinar el porcentaje de agua. Transcurrido este tiempo se pesan las muestras y se obtiene el porcentaje de agua, que es el límite plástico.



Figura. 67: Muestra para el ensayo humedecida

Resultados:

Para el tipo de agregado fino que se tiene no se pudo realizar los ensayos de límite plástico y tampoco los de límite líquido debido a que es un suelo arenoso y por ejemplo para el límite plástico al humedecer la muestra no se puede realizar un rollo y al momento de realizar el límite líquido en la copa de casa grande, al poner en la copa, si la muestra estaba en estado no muy húmedo al cuartear se unían las partes inmediatamente, si se

aumentaba la humedad no alcanzaba los 3 golpes, entonces al final se reporta como No Plástico (NP).



Figura. 68: A la izquierda se observa el procedimiento para límite plástico y a la derecha el ensayo para límite plástico.

4.3.7. Análisis granulométrico (ASTM C-117)

Este método de ensayo cubre la determinación de la granulometría de los suelos que contienen partículas que pasan la malla No 200, utilizando agua para lavar la muestra de suelo a través de esta malla y cribando manualmente el retenido en estado seco.

Equipo:

- Balanza con 0.1 gramos de aproximación.
- Juego de mallas: 3/4", 1/2", 3/8", N° 4, N° 8, N° 10, N° 50, N° 100, N° 200, Fondo y tapa.
- Recipiente contenedor para lavado de la muestra de ensayo.
- Horno eléctrico con capacidad para 110 °C.

Procedimiento:

- La muestra de ensayo deberá estar seca hasta peso constante.
- Se deja enfriar a temperatura ambiente y luego se cuartea esta porción. Registrar este peso como peso total de la muestra.
- Obtenida la muestra de ensayo, se deposita en el recipiente contenedor para lavado. Se agrega agua potable dentro de este recipiente y se remueve manualmente el suelo para facilitar el desprendimiento del fino.
- Se coloca la muestra sobre la malla N° 200 de tal forma que el agua enturbiada por los finos desprendidos, pase a través de esta.
- Luego se pesa para obtener el peso perdido por lavado.
- Cuando se tuvo seco el material, se colocaron los diferentes tamices con su respectivo fondo, por los cuales se iba hacer pasar el suelo y obtener el peso retenido en cada malla (ver Figura 69).



Figura. 69: Juego de tamices utilizados

El suelo se coloca en la parte superior del juego de tamices, se pesa el material retenido en cada una de las mallas, para luego encontrar el porcentaje del peso parcial retenido.

Resultados:

A continuación se presenta el informe del análisis granulométrico obtenido de la muestra de agregados utilizados para la mezcla asfáltica:

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS-ESPE									
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL									
LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS Y ENSAYO DE MATERIALES									
ANALISIS GRANULOMETRICO									
Norma:		ASTM C-117			Muestra:		Río Pita		
Fecha:		20/11/2013			Proyecto:		Tesis		
MUESTRA No. MUESTRA GRUESO					MUESTRA No. MUESTRA FINO				
TAMICES	PESO RETENIDO	RETENIDO ACUMULAD	% RETENIDO	% ACUMULAD	TAMICES	PESO RETENIDO (g)	RETENIDO ACUMULADO	% RETENIDO ACUMULADO	% ACUMULADO
3" (76,1 mm)					3/8" (9,5mm)	16.2	16.2	2	98
2" (51,8mm)					No. 4 (4,76 mm)	112.4	128.6	20	80
1 1/2 " (38,1 mm)					No. 8 (2,36 mm)	116.6	245.2	37	63
1" (25,4mm)	0	0	0	100	No. 16(1,18 mm)	108.3	353.5	54	46
3/4 " (19,0 mm)	939.6	939.6	17	83	No. 30(0,6 mm)	64.8	418.3	64	36
1/2"(12,5mm)	3597.9	4537.5	83	17	No. 50(0,30mm)	66.1	484.4	74	26
3/8 " (9,51 mm)	748.2	5285.7	96	4	No. 100(0,15 mm)	41.8	526.2	80	20
No. 4 (4,76 mm)	39.7	5325.4	97	3	No. 200(0.075)	24.7	550.9	84	16
No. 8 (2,36 mm)	1.7	5327.1	97	3	Pasa No. 200	103.8			
Pasa No. 8	168.3								
TOTAL	5495.4								
PESO INICIAL DE LA MUESTRA: (g) 5495.4					PESO INICIAL DE LA MUESTRA: (g) 654.7				
TAM. MAX. NOMINAL 3/4"					MODULO DE FINURA				
ENSAYO: Jorge A. Rodríguez C.			CALCULO: Jorge Rodríguez			VERIFICO: Ing. Hugo Bonifaz. Ing. Franco Rojas			

4.3.8. Análisis de resultados

Dentro de la caracterización de los agregados se debe tomar en cuenta la durabilidad de los agregados y su calidad, por lo tanto se debe cumplir con los parámetros que rigen para agregados con granulometría densa según la norma NEVI-12. En las tablas 28 y 29 se muestran los valores obtenidos de

los ensayos realizados y su comparación con su valor de referencia dentro de la norma.

Tabla 28: Caracterización del agregado grueso

Ensayo	Resultados	Especificación NEVI-12 Tabla 811-4.1
Densidad relativa(seca al horno) [gr/cm ³]	2.51	-
Densidad relativa SSS [gr/cm ³]	2.56	-
Densidad aparente relativa [gr/cm ³]	2.65	-
Absorción	2.0%	-
Desgaste en la Máquina de los Ángeles	28.3%	max 40%

Fuente: NEVI-12, Sección 811

Tabla 29: Caracterización del agregado fino

Ensayo	Resultados	Especificación NEVI-12 Tabla 811-4.2
Densidad relativa(seca al horno) [gr/cm ³]	2.48	-
Densidad relativa SSS [gr/cm ³]	2.55	-
Densidad aparente relativa [gr/cm ³]	2.66	-
Absorción	2.7%	-
Equivalente de Arena	81%	minimo 50%
Índice de plasticidad	NP	max 4%

Fuente: NEVI-12, Sección 811

Por lo tanto los agregados cumplen de las especificaciones en cuanto a su durabilidad en la máquina de los ángeles y su calidad por el equivalente de arena y como material no plástico.

Capítulo 5 : Diseño Marshall, Mezcla Asfáltica Caliente y Mezcla Asfáltica Tibia

5.1. Generalidades

En el presente capítulo se va analizar mediante el método Marshall el desempeño que puede tener una mezcla asfáltica preparada en el laboratorio y que puede ser analizada para determinar el comportamiento mediante los ensayos de estabilidad y flujo que por consiguiente los resultados serán comparados en función del comportamiento de la mezcla con el asfalto base y luego el comportamiento de la mezcla asfáltica tibia modificada al 1% y al 2%. Con lo cual se concluirán los ensayos de laboratorio y se procederá al análisis de resultados y sus conclusiones pertinentes.

5.2. Mezcla de agregados

En la fabricación de carpetas asfálticas, es importante emplear áridos de granulometría correcta porque entonces se conseguirá una carpeta de rodadura de buena calidad. La calidad del agregado está condicionada al cumplimiento de un conjunto de especificaciones entre las que se encuentra el % de vacíos, el %vacíos llenos de asfalto, la estabilidad, la fluencia, etc. Y todas están íntimamente relacionadas con la granulometría.

El procedimiento general consiste en obtener la granulometría de cada uno de los materiales, a mezclarse y calcular el porcentaje que se precisa de

cada uno para obtener una granulometría deseada (Estabilidad granulométrica).

En la Tabla 30, se presenta la combinación de los agregados en una proporción de a=38% del agregado grueso y b=62% del agregado fino a partir de la ecuación (6)

$$P = A * a + B * b \quad (6)$$

Dónde:

- P=mezcla de agregados
- A, B=pasante de cada tamiz, agregado grueso y fino respectivamente
- a,b=% agregado en la mezcla

Tabla 30: Mezcla de agregados

GRANULOMETRÍA DE LA MEZCLA MÉTODO NUMÉRICO						
Tamiz	Abertura (mm)	A		B		P
Masa Inicial (g)		% RETENIDO	%PASA	% RETENIDO	%PASA	%
1"	25.4	0	100	-	-	100
3/4"	19	17	83	-	-	94
1/2"	12.5	83	17	0	100	69
3/8"	9.51	96	4	2	98	62
N°4	4.75	97	3	20	80	51
N°8	2.36	96.9	3	37	63	40
N°16	1.18	97	3	54	46	30
N°30	0.6	97	3	64	36	24
N°50	0.3	97	3	74	26	17
N°100	0.15	98	2	80	20	13
N°200	0.075	98	2	84	16	11

Esta granulometría de la mezcla se compara con los límites de las especificaciones de la norma NEVI-12 en función del tipo de mezcla asfáltica a realizar.

5.3. Características de la mezcla asfáltica

5.3.1. Uso de la mezcla en la estructura del pavimento

Para el diseño de la mezcla asfáltica y elección de las características de la misma, se considera como datos previos los siguientes:

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

Dichos parámetros son datos del anteproyecto de un diseño completo de pavimentos pero para efectos del proyecto se considera como asumidos.

A partir de lo anterior, para definir el tipo de mezcla a utilizar y el tamaño del agregado, se debe tener como dato el uso que se le va a dar a la mezcla asfáltica, para el presente proyecto de investigación se propone utilizar dicha mezcla asfáltica para Capa de rodadura, la misma que en el diseño de la estructura del pavimento se debe tener como dato el espesor de la capa a utilizar y a partir de ello decidir si se utiliza una sola capa de mezcla asfáltica o varias capas.

5.3.2. Tipo de mezcla asfáltica

En el capítulo 2, literal 2.4.1 se enuncia la clasificación de las mezclas asfálticas, de tal manera que en el presente proyecto se elige utilizar una

mezcla asfáltica de gradación densa, en función de los siguientes parámetros:

- **Intensidad del tráfico y el tipo de uso de la mezcla asfáltica.**

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

Figura. 70: Recomendaciones generales para selección del tipo de mezcla asfáltica

Fuente: NEVI-12, Sección 812-3.3

Para el presente proyecto se toma como dato que la mezcla asfáltica tendrá como fin el uso en una capa de superficie (rodadura) y para una intensidad de tráfico alta, de tal manera que los tres tipos de graduaciones, densa, abierta y discontinua cumplen.

- **Tipo de diseño a utilizar en función del tipo de graduación.**

De la norma NEVI-12, sección 812-4.01.2, en la cual se establece que para una mezcla asfáltica de tipo densa, el diseño de la misma estará bajo criterios de la metodología Marshall. Pero para los tipos de graduación

abierta y discontinua se establecerá en función de la metodología del NCHRP (National Cooperative Highway Research Program). Por lo tanto se considera utilizar la mezcla asfáltica de tipo densa.

- **Contenido de Vacíos.**

En función del contenido de vacíos, en la clasificación de las mezclas asfálticas una mezcla de tipo densa, la porción de vacíos no supera el 6%, de tal manera en la norma NEVI-12 en la tabla 811-4.1, en los criterios Marshall, se especifica que para un tráfico de intensidad alta, el contenido de vacíos se especifica entre 3 % y 5%, de tal manera se ratifica el uso de la mezcla de tipo densa.

En la Tabla 31 y en función del tipo de mezcla asfáltica se presentan los límites en cuanto a la granulometría a usar y en función del tamaño máximo nominal del agregado: 3/4".

Tabla 31: Granulometría para mezclas de tipo densas

Tamiz	Abertura (mm)	TMN: 3/4" (%Pasa)	
		Límite Inf.	Límite Sup.
1"	25.4	100	100
3/4"	19	90	100
1/2"	12.7		
3/8"	9.51	56	80
N°4	4.75	35	65
N°8	2.36	23	49
N°16	1.18		
N°30	0.6		
N°50	0.3	5	19
N°100	0.15		
N°200	0.075	2	8

Fuente: NEVI-12, Tabla 811-4.4.

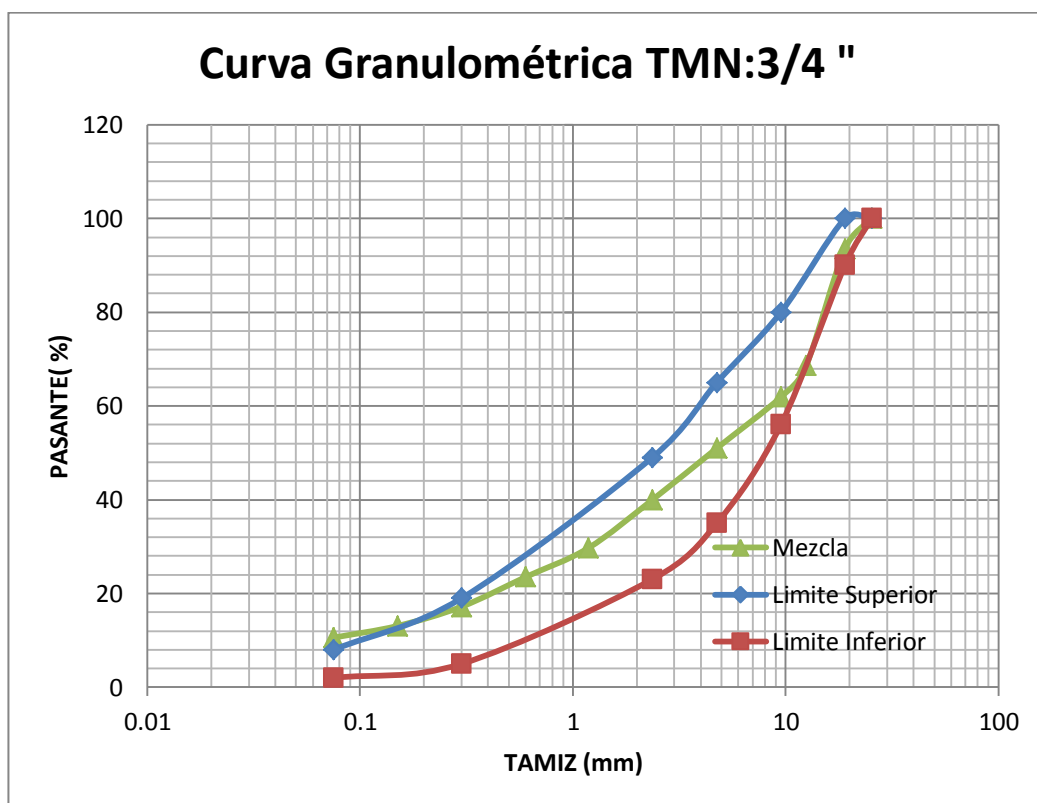


Figura. 71: Curva granulométrica de la mezcla

En la Figura 71 se muestra la curva granulométrica, la cual no cumple con las especificaciones en su totalidad, de manera que para tener un diseño de buena calidad se procede a separar en tamaños a los agregados para cumplir con los límites en las especificaciones llamándolo como estabilidad granulométrica.

5.3.3. Estabilización Granulométrica

A partir del incumplimiento de las especificaciones de la curva granulométrica de la mezcla de agregados muestreados, a continuación se procede a realizar el procedimiento de estabilización granulométrica, de tal manera que al separar los agregados en tamaños de acuerdo a los tamices

de los límites de la faja granulométrica a utilizar, se crea una curva granulométrica en función de los límites especificados.

Para tal efecto se determina el tamaño máximo nominal a utilizar en la mezcla de agregados.

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

El instituto del asfalto recomienda lo siguiente:

- Para tráfico alto el espesor mínimo es de 2" (50mm) para capa de rodadura.
- Se debe respetar la relación:

$$e > 3 \cdot D \quad (7)$$

Dónde:

- e = espesor de la capa
- D = tamaño máximo nominal del agregado

Para poder elegir el tamaño máximo nominal con el cual trabajar al momento de realizar la estabilización de la granulometría, se considera la ecuación (7) de la cual se despeja el parámetro "D":

$$D < e/3 \quad (8)$$

De tal manera $e=50\text{mm}$, $D=16.67\text{mm}$, por lo tanto el tamaño máximo nominal menor a este valor es para $\text{TMN}=1/2"$ (12.5mm).

5.3.3.2. Estabilización Muestra de prueba 1

Para realizar la mezcla de agregados, estabilizando la granulometría en el centro de los límites, se lleva a cabo a partir de la ecuación (9), para lo cual se toman los límites de la Tabla 811-4.4 de la norma NEVI-12 requisitos de graduación densa TMN:1/2". Se utilizan los tamices: 3/4", 1/2", N° 4, N° 8, N° 50 y N° 200 para separar por tamaños a los agregados indicados en la norma ASTM 1559, literal 3.2, en el cual se recomienda utilizar dichos tamices para el proceso de separar agregados para su posterior mezcla y se procede al cálculo de la siguiente manera:

$$\%Pasa\ acumulado = \frac{L.Superior - L.Inferior}{2} + L.Inferior \quad (9)$$

Dónde:

- L. Superior= % Pasante del límite superior de las especificaciones para cada tamiz.
- L. Inferior= % Pasante del límite inferior de las especificaciones para cada tamiz.

A partir de la ecuación se presentan los resultados en la Tabla 32

Tabla 32: Estabilización Muestra 1 de agregados

Tamiz	Abertura(mm)	TMN:1/2"		%Pasa Acumulado
		L.Inf	L.Sup	
3/4"	19	100	100	100
1/2"	12.7	90	100	95
3/8"	9.51			
N°4	4.75	44	74	59
N°8	2.36	28	58	43
N°16	1.18			
N°30	0.6			
N°50	0.3	5	21	13
N°100	0.15			
N°200	0.075	2	10	6

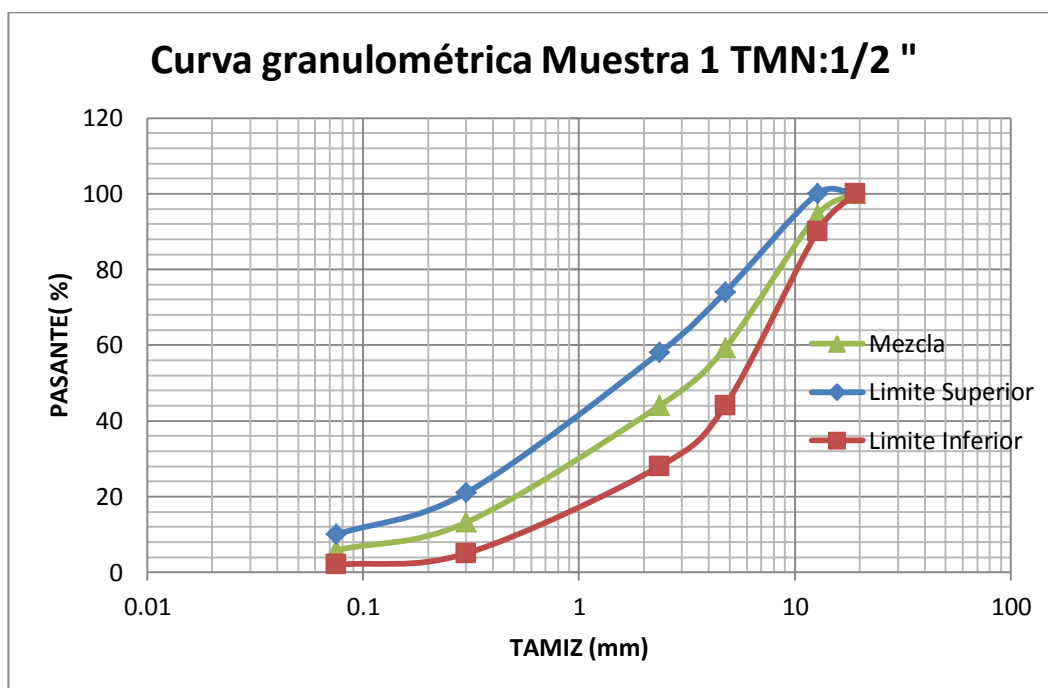


Figura. 72: Estabilización Granulométrica Muestra 1

A partir de la mezcla de agregados indicada en la Tabla 32 se genera la Figura 72, en la cual se evidencia que la curva granulométrica se encuentra dentro de los límites de la norma NEVI-12 por lo tanto se procede a realizar

el diseño Marshall con la misma, pero al realizar dicho diseño se genera un problema, el contenido de vacíos entre 8% a 12%.

5.3.3.3. Pruebas de granulometrías

Se realiza las pruebas de granulométricas en los agregados, obteniendo en el diseño de la mezcla asfáltica un porcentaje de vacíos entre el 8 y 12%, los mismos que no se encuentran dentro los límites permisibles que para este tipo de mezclas es entre 3 y 5%, para lo cual se recomienda incrementar el relleno mineral en la granulometría y tratar de estar cerca de la curva de máxima densidad, para lo cual se realizó otro tipo de granulometrías que se presentan en la Tabla 33 de resumen:

Tabla 33: Pruebas de los tipos de granulometría

PRUEBAS DE GRANULOMETRÍA (%Pasa en peso)							
Tamiz (plg)	Abertura (mm)	Límites NEVI-12		Muestra de prueba 1	Muestra de prueba 2	Muestra de prueba 3	Muestra 4 con granulom etría Densidad Máxima
		100	5				
3/4"	19	100	100	100	100	100	100
1/2"	12.7	90	100	95	95	97	90
3/8"	9.51						
N°4	4.75	44	74	59	70	65	54
N°8	2.36	28	58	43	55	45	39
N°16	1.18						
N°30	0.6						
N°50	0.3	5	21	13	18	16	15
N°100	0.15						
N°200	0.075	2	10	6	6	5	10

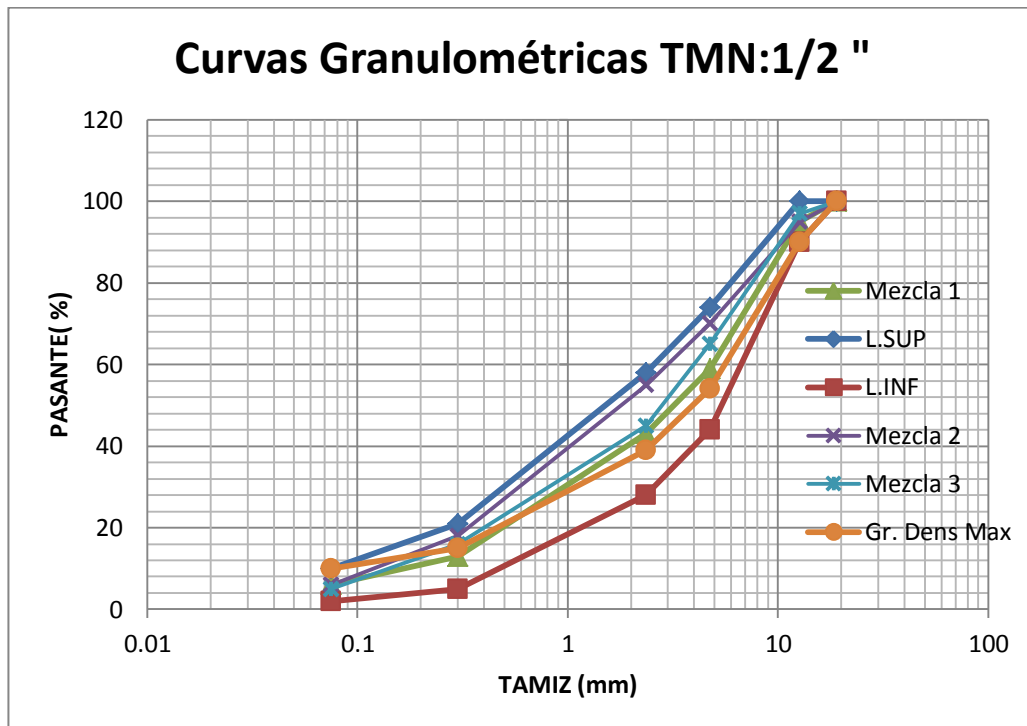


Figura. 73: Pruebas de granulometría

Para la última granulometría después de varios intentos fallidos con las demás, se procedió a realizarla mediante la curva de Fuller (Máxima Compacidad) que se describe a continuación.

5.3.3.4. Granulometría de máxima densidad

Dentro del análisis de la gradación de áridos, para obtener la granulometría de máxima densidad para reducir el contenido de vacíos, se utiliza la gráfica de Fuller, la cual representa en el eje de las ordenadas el porcentaje de áridos que pasa y teniendo como abscisa, la abertura de los tamices de la serie normal elevado al exponente n , lo cual representa la curva granulométrica (Alvarado, 2011).

La ecuación (10) describe la curva granulométrica:

$$p_i = \left(\frac{D_i}{D_{max}}\right)^n \quad (10)$$

Dónde:

- p_i = % acumulado que pasa, para el tamiz de diámetro D_i .
- D_i = diámetro del tamiz.
- $D_{máx}$ = tamaño máximo del material.
- n = valor asociado a la forma de la curva.

Con esta representación la graduación de agregados para una mezcla asfáltica se puede expresar por un par de números, esto es, un coeficiente de forma (n) y el tamaño máximo ($D_{máx}$). La experiencia sugiere que mezclas asfálticas con n cercano a 0.45 pueden llegar al máximo de su densificación cuando se compactan. Esta curva corresponde a una línea recta extendida desde la abscisa de tamaño máximo de agregado y ordenada 100%, hasta el origen (0%, 0 mm) (Alvarado, 2011).

La importancia de usar la gráfica de Fuller, es que facilita la expresión y manejo de la graduación, de las especificaciones granulométricas y hasta la definición de la buena graduación y el potencial de densificación de la mezcla.

Se presenta el cálculo de máxima compactación en la Tabla 34, con un tamaño de agregado de 1/2" y un coeficiente $n=0.45$ a partir del uso de la ecuación (7), de tal manera obtener los porcentaje acumulados pasantes, los cuales de acuerdo al método descrito, genera una curva granulométrica, la misma que tiene la particularidad de hacer más compacta a la mezcla de

asfáltica y por ende reducir el porcentaje de vacíos que en un inicio y con varias pruebas de granulometría no entraban dentro de los rangos.

Tabla 34: Cálculo de la granulometría de máxima densidad

TMN: 1/2" (%Pasa)		
Tamiz	Abertura (mm)	Máxima compacidad
3/4"	19	100
1/2"	12.7	83
3/8"	9.51	73
N°4	4.75	54
N°8	2.36	39
N°16	1.18	29
N°30	0.6	21
N°50	0.3	15
N°100	0.15	11
N°200	0.075	8

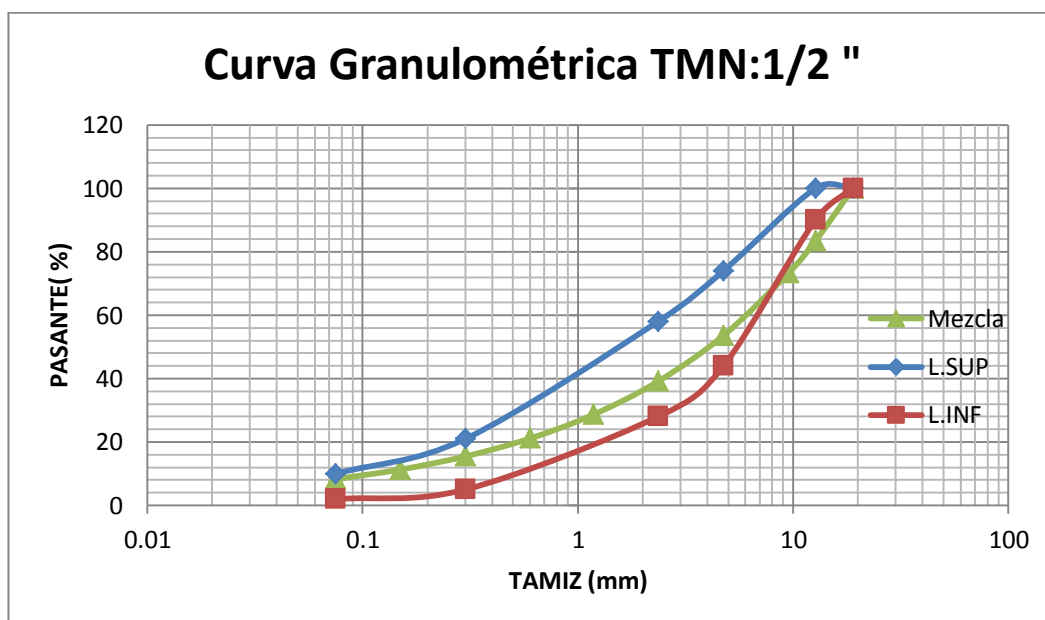


Figura. 74: Granulometría de máxima densidad y lo límites

Se puede ver en la Figura 74 que no cumple los límites especificados de granulometría para un TMN:1/2" y de graduación densa especificado en la Tabla 811-3.4 de la norma NEVI-12, de tal manera a partir de la misma se modifica el porcentaje del pasante del tamiz de 1/2" y además para reducir el porcentaje de vacíos, se aumenta el pasante del tamiz N° 200 al 10%. Con lo cual la granulometría final queda como en lo especificado en la Tabla 35 de manera que está dentro de los límites de la especificación NEVI-12, tabla 811-4.4 para TMN: 1/2".

Tabla 35: Granulometría de máxima densidad a utilizarse para el diseño de la mezcla asfáltica.

Tamiz	Abertura (mm)	TMN:1/2"		%Pasa
		L.Inf	L.Sup	
3/4"	19	100	100	100
1/2"	12.7	90	100	90
3/8"	9.51			
N°4	4.75	44	74	54
N°8	2.36	28	58	39
N°16	1.18			
N°30	0.6			
N°50	0.3	5	21	15
N°100	0.15			
N°200	0.075	2	10	10

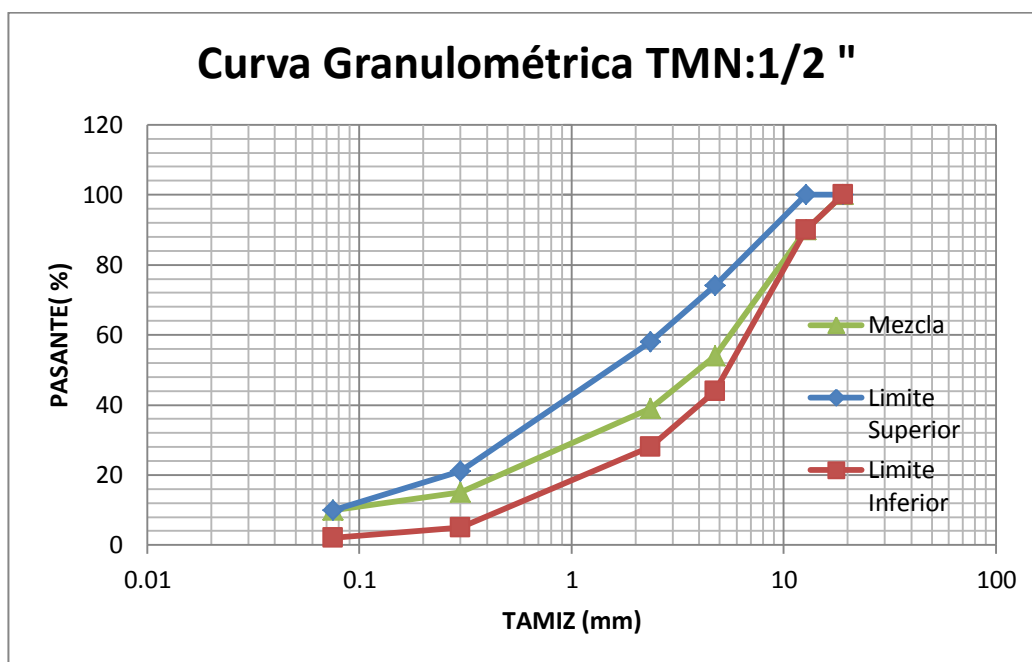


Figura. 75: Curva granulométrica con la cual se va a trabajar para mezcla asfáltica.

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

En la Tabla 36 se presenta los tamaños y la masa requerida para cada tamaño, especificados para una briketa (masa individual) y masa total para 45 briquetas. El número de briquetas se genera a partir de que se necesitan para la mezcla asfáltica en caliente 15 briquetas, 15 más para mezcla asfáltica tibia al 1% y 15 más para mezcla asfáltica tibia al 2%.

El porcentaje retenido y la masa individual y total se calculan a partir de las ecuaciones (11) y (12):

$$\%Retenido = \%Pasante Sup - \%Pasante \quad (11)$$

De donde:

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

$$Masa\ individual = Masa\ briqueta * \%Retenido \quad (12)$$

De donde:

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

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

Tabla 36: Pesos de los agregados en función de su tamaño para cada briqueta.

Tamiz	Abertura (mm)	%Pasa	%Retenido	Masa individual (gr)	Masa total (gr)
3/4"	19	100	0	0	0
1/2"	12.7	90	10	120	5400
3/8"	9.51				
N°4	4.75	54	36	432	19440
N°8	2.36	39	15	180	8100
N°16	1.18				
N°30	0.6				
N°50	0.3	15	24	288	12960
N°100	0.15				
N°200	0.075	10	5	60	2700
Pasa tamiz 200				120	5400
Total				1200	54000

5.4. Características de los materiales

Para los cálculos correspondientes en el método Marshall se necesitan parámetros 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:

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

También se analiza el porcentaje óptimo de asfalto a partir del cual se va a tomar el rango de porcentaje a analizar.

5.4.1. Porcentaje teórico óptimo de asfalto para briquetas

Los diferentes porcentajes de asfalto para realizar la mezcla y a partir de ellos obtener el porcentaje de asfalto óptimo se calcularon con la ecuación (13), la misma que utiliza la distribución de las partículas de agregado para la determinación del contenido de asfalto teórico óptimo que se calcula a partir de la ecuación (13). (Asphalt Institute, 1993)

$$P = 0.020a + 0.045b + cd \quad (13)$$

Dónde:

- P =porcentaje de asfalto con respecto al peso del material
- a = porcentaje del material retenido en la tamiz N° 8.
- b = porcentaje de material que pasa el tamiz N°8 y se retiene en el N°

- 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.

$$P = 0.020(61) + 0.045(29) + (10 * 0.3) = 5.53\%$$

Por lo tanto se escogerán dos porcentajes aproximados debajo y encima de 5.53%, como son los siguientes: 4.5%, 5%, 5.5%, 6%, 6.5%.

5.4.2. Gravedad específica bulk de agregados (Gsb)

Definición: Proporción de la masa al aire de una unidad de volumen de un material permeable (incluyendo vacíos permeables e impermeables del material) a una temperatura indicada, con respecto a una masa al aire de igual densidad de volumen igual al de agua destilada a una temperatura indicada

Se calcula la gravedad específica bulk de agregados en función de los tamaños de los agregados y su porcentaje retenido en peso con el cual intervienen en la mezcla estabilizada de agregados. Para lo cual se tiene el siguiente resumen presentado en la Tabla 37, en función de los tamaños de los agregados; las gravedades específicas de los agregados se obtuvieron en el capítulo 4 y el cálculo de Gsb se presenta mediante la ecuación (14).

Tabla 37: Resumen de los pesos específicos de los agregados

Tamaño del Agregado	Porcentaje en peso	Gravedad Específica (gr/cm ³)
Pasante 3/4"- Retenido 1/2"	10	2.523
Pasante 1/2"- Retenido N°4	36	2.431
Pasante N°4- Retenido N°8	15	2.481
Pasante N°8- Retenido N°50	24	2.382
Pasante N°50- Retenido N°200	5	2.291
Pasa 200	10	2.199

Los porcentajes en peso indicados en la Tabla 37, fueron calculados mediante la ecuación (11).

$$G_{sb} = \frac{100}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \frac{P_3}{G_3} + \dots} = 2.403 \frac{gr}{cm^3} \quad (14)$$

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.

5.4.3. Gravedad específica aparente de agregados (Gsa)

Definición: Proporción de la masa en aire de una unidad de volumen de un material impermeable a una temperatura indicada, con respecto a una masa al aire de igual densidad de volumen igual al de agua destilada a una temperatura indicada

Se obtiene la gravedad específica aparente de los agregados mediante el promedio de la misma manera que el punto anterior. En la tabla 38 se presenta el resumen de las gravedades específicas teóricas en función del tamaño de los agregados.

Tabla 38: Resultados de pesos específicos aparente de agregados

Tamaño del Agregado	Porcentaje en peso	Gravedad Específica Aparente (gr/cm ³)
Pasante 3/4"- Retenido 1/2"	10	2.662
Pasante 1/2"- Retenido N°4	36	2.596
Pasante N°4- Retenido N°8	15	2.629
Pasante N°8- Retenido N°50	24	2.624
Pasante N°50- Retenido N°200	5	2.398
Pasa 200	10	2.482

Los porcentajes en peso indicados en la Tabla 38, fueron calculados mediante la ecuación (11).

G_{sa}, se calcula a partir de la ecuación (14), por lo tanto:

$$G_{sa}=2.598 \text{ gr/cm}^3$$

5.4.4. Gravedad específica efectiva de agregados (G_{se})

La relación entre la masa en estado seco (o el peso seco en el aire) de una unidad de volumen de agregado, incluyendo los vacíos permeables sin asfalto y los impermeables, o sea excluyendo los vacíos permeables al asfalto, y la masa de un igual volumen de agua, ambos a la misma temperatura establecida.

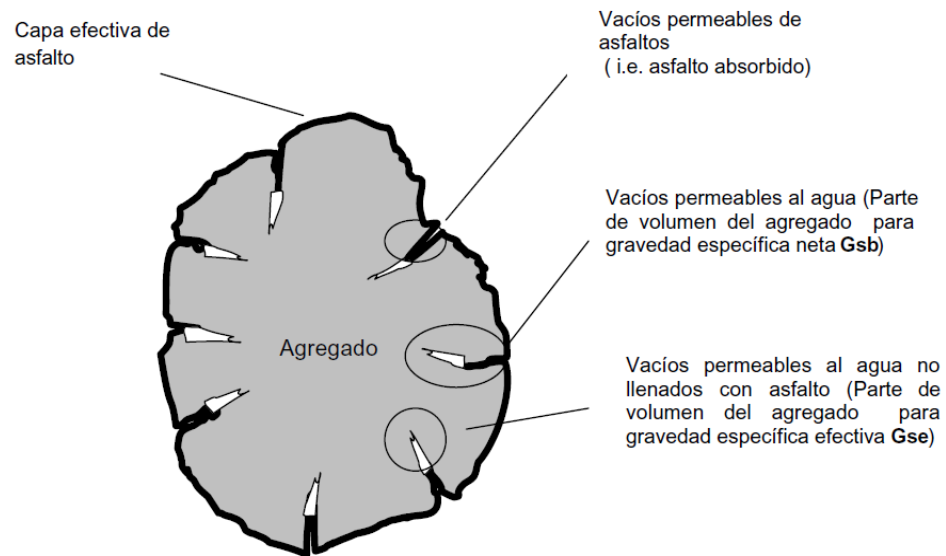


Figura. 76: Parámetros del diseño volumétrico

Fuente: Gamica, (2004)

5.5. Método Marshall (ASTM D-1559)

El método original de Marshall, es aplicable a mezclas asfálticas en caliente para pavimentación que contengan agregados con un tamaño máximo de 25 mm (1") o menor. Está pensado para diseño en laboratorio y control de campo de mezclas asfálticas en caliente con graduación densa.

El método Marshall usa muestras de prueba normalizadas (briquetas) de 2 y ½" de espesor por 4" de diámetro (64 x 102 mm).

5.5.1. Características de la mezcla asfáltica

5.5.1.1. Densidad

La densidad está definida para la mezcla asfáltica compactada como su peso unitario (peso de un volumen específico de mezcla). La densidad es

una característica muy importante debido a que, es esencial obtener una densidad alta para obtener un rendimiento duradero.

Las especificaciones usualmente requieren que la densidad de la capa de rodadura sea un porcentaje de la densidad del laboratorio, debido a que no siempre se logra una compactación in – situ con las densidades que se obtienen en el laboratorio, en la sección 405-5.18 de la norma NEVI-12 se especifica cómo el 97% de la densidad en el laboratorio.

5.5.1.2. Vacíos de Aire

Los vacíos de aire son espacios pequeños de aire, o bolsas de aire, que están presentes entre los agregados revestidos en la mezcla final compactada.

El porcentaje permitido de vacíos (en muestras de laboratorio) para capas de rodadura es del 3 al 5 %, dependiendo del diseño específico.

La densidad y el contenido de vacíos están directamente relacionados. Entre más alta es la densidad, menor es el porcentaje de vacíos en la mezcla y viceversa. El rango de vacíos dado por el criterio de diseño, está basado en numerosas investigaciones que muestran que el desempeño de la mezcla depende fundamentalmente del contenido de vacíos tras 2 a 3 años de servicio (CPA, 2008):

- Vacíos en la Mezcla inferiores al 3% tienden a producir inestabilidad y exudación.

- Vacíos en la Mezcla mayores al 5% producen mezclas permeables al aire y agua, por lo que son propensas a sufrir envejecimiento prematuro y posterior desintegración por oxidación prematura.

5.5.1.3. Vacíos en el Agregado Mineral (VAM)

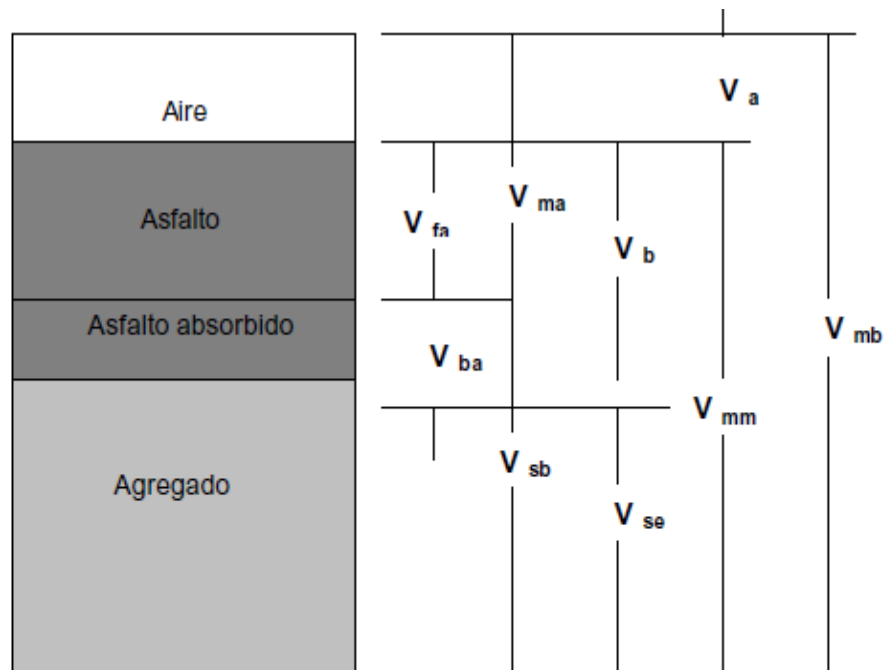
Son los espacios de aire que existen entre las partículas de agregado en una mezcla compactada, incluyendo los espacios que están llenos de asfalto.

El VAM representa el espacio disponible para acomodar el volumen efectivo de asfalto y el volumen de vacíos necesarios en la mezcla. Cuanto mayor sea el VAM, más espacio habrá disponible para las películas de asfalto.

Existen valores mínimos para VAM los cuales están recomendados y especificados como función del tamaño del agregado. Cuyos valores se basan en el hecho de que, cuanta más gruesa sea la película de asfalto que cubre las partículas de agregado, más durable será la mezcla. (Gamica, 2004)

5.5.1.4. Vacíos llenos de asfalto (VAF)

Es el porcentaje de vacíos entre los agregados minerales, en el cual se encuentra la película de asfalto en la mezcla.



- V_{ma} = volumen de vacíos en agregado mineral
 V_{mb} = volumen total de la mezcla asfáltica.
 V_{mm} = volumen de la mezcla asfáltica sin vacíos
 V_{fa} = volumen de vacíos llenados con asfalto
 V_a = volumen de vacíos de aire
 V_b = volumen de asfalto
 V_{ba} = volumen de asfalto absorbido
 V_{sb} = volumen de agregado mineral (gravedad específica de la masa)
 V_{se} = volumen de agregado mineral (gravedad específica efectiva)

Figura. 77: Componente del diagrama de compactación

Fuente: Gamica, (2004)

Los vacíos en el agregado mineral (VAM) y vacíos de aire (V_a), se expresan como un porcentaje del volumen de la mezcla asfáltica. Los vacíos llenos de asfalto (VFA) son el porcentaje del VAM llenado con el asfalto efectivo.

5.5.1.5. Contenido de Asfalto (Pb)

El contenido óptimo de asfalto de una mezcla depende, en gran parte, de las características del agregado, tales como la granulometría y la capacidad de absorción.

La granulometría del agregado está directamente relacionada con el contenido óptimo de asfalto. Entre más finos contenga la granulometría de la mezcla, mayor será la superficie específica total, y mayor será la cantidad de asfalto necesario para cubrir las partículas uniformemente. Inversamente, las mezclas más gruesas (agregados más grandes), requieren menos asfalto pues tienen menor superficie específica.

5.5.2. Equipo

- Horno, para calentar los materiales.
- Termómetro.
- Balanza de 2 kg de capacidad, con aproximación a 0,1 g. Balanza de 5 kg con aproximación a 1 g.
- Compactador Marshall automático con contador de golpes.
- Molde de compactación que consta de una base, molde encofrado y collar de extensión.
- Martillo de compactación. La barra pesa 10 libras (4,5 kg) y tiene una caída (guía) de 18" de altura.
- Extractor de muestra o prensa para extraer la muestra (briqueta) ya compactada.
- Accesorios como cucharas, espátula, etc.

5.5.3. Número de briquetas

Para determinar el contenido óptimo de asfalto se preparan y compactan una serie de muestras de prueba (briquetas), por lo menos tres briquetas por cada porcentaje de asfalto, dicho porcentaje de asfalto debe tener un rango de variación que no debe ser mayor a 0,5%. Como mínimo se debe incluir dos porcentajes por encima y dos por debajo del óptimo contenido de asfalto estimado, por lo tanto como mínimo se realizará, 15 briquetas.

5.5.4. Preparación de agregados

Se selecciona el agregado que cumpla con las especificaciones requeridas y deben estar mezclados de acuerdo a las proporciones indicadas de la granulometría de la mezcla.

Se secan los agregados hasta peso constante, considerando que deben estar libres de humedad.

5.5.5. Temperatura de mezclado y compactación

En el capítulo 4, literal 4.2.8, se obtuvieron mediante los ensayos de viscosidad, las temperaturas a las cuáles se va a trabajar para la realización de la mezcla asfáltica y que se anotan en la Tabla 39 y Tabla 40, las mismas que contienen las temperaturas de mezcla y compactación.

Tabla 39: Temperaturas de mezcla.

% ACP Añadido	Temperaturas (°C)		
	Mezcla		
	Máxima	Mínima	Promedio
ASFALTO AC-20	159	153	156
1%	152	146	149
2%	149	143	146

Tabla 40: Temperaturas de compactación.

%ACP añadido	Temperaturas (°C) Compactación		
	Máxima	Mínima	Promedio
ASFALTO AC-20	146	140	143
1%	140	134	137
2%	137	132	134.5

5.5.6. Preparación de las mezclas

- Pesar aproximadamente 1200 gr de agregados que cumpla con la curva granulométrica seleccionada y colocarlo al horno hasta que se caliente a una temperatura de 10 °C más que la temperatura de mezcla con el asfalto.



Figura. 78: A la izquierda se muestra los agregados separados por tamaños y a la izquierda ya unidos según la granulometría estabilizada.

- Calentar el asfalto hasta la temperatura de mezcla.
- Añadir la cantidad de asfalto especificada al agregado.
- Mezclar el asfalto y el agregado totalmente de manera que todos los agregados sean cubiertos del ligante.

5.5.7. Compactación de las Briquetas

- Cuando esté completamente mezclado, colocar la mezcla en el molde de compactación y consolidar la mezcla con la espátula.



Figura. 79: A la izquierda se muestra la consolidación de la mezcla y a la derecha el procedimiento de compactación.

- Esperar a la temperatura de compactación y colocar el martillo en el compactador automático con el número de golpes indicador. Encender el compactador y generar el número de golpes indicado por cada cara.
- Dejar enfriar la briqueta a temperatura ambiente durante 24 horas y proceder a extraer la briqueta del molde.



Figura. 80: Briquetas de mezcla asfáltica en caliente.



Figura. 81: Briquetas realizadas para el 1% y 2% de ACP.

5.5.7.1. Reporte fotográfico de las temperaturas de la mezcla y compactación convencional



Figura. 82: En la de la izquierda se evidencia la temperatura del asfalto a 156.3 °C listo para la mezcla, en la derecha se ve la temperatura de la mezcla lista para para la compactación a 143.4 °C.

5.5.7.2. Reporte fotográfico de las temperaturas de mezcla y compactación modificada con ACP



Figura. 83: Para la mezcla con ACP al 1% en la fotografía de la izquierda se evidencia la temperatura de mezcla del asfalto a 148.5 °C y de compactación a la derecha de 137.3 °C.



Figura. 84: Para la mezcla con ACP al 2%, en la fotografía de la izquierda se evidencia la temperatura de mezcla de 145 °C y de compactación a la derecha de 133.7°C.

5.5.8. Ensayos del método

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

Después de la compactación de las briquetas y su posterior extracción de los moldes para ser enfriadas a temperatura ambiente, se procede a realizar el ensayo de la gravedad bulk. Dicha norma establece que la diferencia máxima permitida entre dos valores de gravedad específica bulk es de 0.02, para que puedan ser promediados, aquella gravedad bulk que sobrepasa dicho valor debe ser descartada.

Equipo:

- Balanza para pesos sumergidos
- Baño María

Procedimiento:

- Se toma el peso en el aire de la briqueta.
- Las briquetas se sumergen en baño maría por 5 minutos a 25 °C.
- Se sumerge en la balanza de inmersión y se toma el peso sumergido.



Figura. 85: A la izquierda las briquetas sumergidas a $t=25^{\circ}\text{C}$ y a la derecha sumergida en canasta de balanza de inmersión.

- La briqueta se retira de la sumersión y se seca con una franela ligeramente el exceso de agua superficial y se toma el peso en estado SSS (saturado Superficie Seca).

5.5.8.2. Determinación de estabilidad y flujo (ASTM D-1559)

El valor de estabilidad Marshall es una medida de la carga bajo la cual una probeta cede o falla totalmente. Debido a que la estabilidad Marshall indica la resistencia de una mezcla asfáltica a la deformación; sin embargo en las mezclas asfálticas no siempre se aplica que si un valor de estabilidad es bueno, entonces un valor más alto será mejor. Estabilidades extremadamente altas se obtienen a sacrificio de durabilidad, por lo que un valor de estabilidad demasiado alto no siempre es bueno en una carpeta asfáltica, todo dependerá de las solicitaciones del tráfico para un determinado proyecto.

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

Equipo:

- Prensa de carga Marshall
- Cabezales de prueba
- Deformímetro

Procedimiento:

- Se coloca la briqueta en baño maría, sumergido totalmente durante 30 minutos a 60 °C.
- Se precalientan los cabezales y se lubrican, cuando esté lista la briqueta, se coloca en los cabezales y se aplica carga, y se coloca el dial de deformación encerado.
- Cuando la carga es aplicada lentamente, los cabezales, superior e inferior del aparato se acercan, y la carga sobre la briqueta aumenta al igual que la lectura en el indicador dial. Luego se suspende la carga una vez se obtiene la carga máxima.
- La carga máxima indicada por el medidor es el valor de Estabilidad Marshall.



Figura. 86: En la izquierda se muestra la briqueta y su valor de flujo y a la derecha la estabilidad en Kg.

5.5.8.3. Gravedad específica teórica máxima (Gmm). Método Corelock (ASTM D-6857)

La gravedad específica teórica máxima (Gmm), como su nombre lo dice es la máxima densidad que puede presentar una mezcla asfáltica, ya que no considera vacíos en la muestra por estar esta en condición suelta, simplemente es la densidad de sólo las partículas de agregado recubiertas por el asfalto; es complementaria de la gravedad específica bulk, ya que con los valores de dichas gravedades se obtiene el porcentaje de vacíos.

Equipo:

- Balanza para pesos sumergidos
- Medidor eléctrico de densidad CORELOCK.

Procedimiento:

- Se toma una mezcla asfáltica no compactada de mínimo 1200 gr.
- Se pesa en conjunto las fundas necesarias para la máquina de densidad.
- Se pone la muestra en la funda transparente y se lo ubica dentro de la funda amarilla ya colocada en la máquina de densidad.



Figura. 87: A la izquierda está la muestra no compactada ya la derecha la muestra en la funda.

- La muestra debe estar esparcida en la funda sin que se produzca roturas en la funda cuando sea sometida al vacío.
- Se prende la máquina, se configura y se cierra la tapa con lo cual comenzará a ejercer vacío.
- Ya obtenida la muestra al vacío, se sumerge la muestra en la balanza de pesos sumergidos y dentro del agua se corta la funda y se deja entrar e agua en las fundas, se toma el peso sumergido y la temperatura de ensayo.

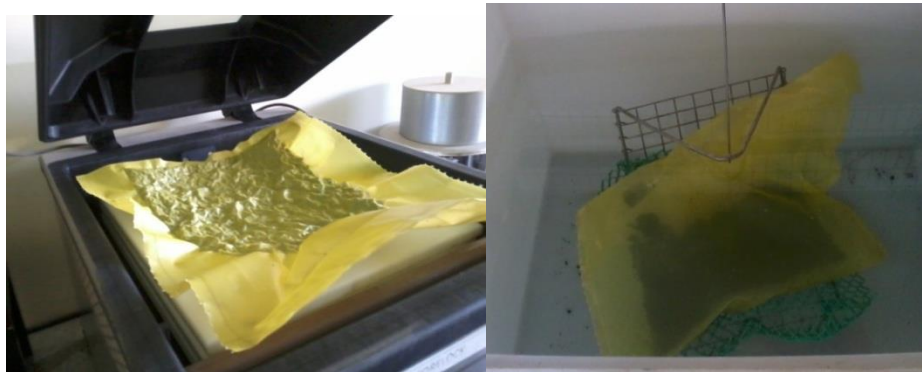


Figura. 88: A la izquierda se muestra la funda al vacío y a la derecha la funda sumergida con la muestra,

- La máquina viene con un software que se instala en la computadora y que pide datos tomados en el ensayo y que automáticamente genera el resultado.

Resultados:

A continuación se presentan los resultados para los ensayos realizados, cabe recalcar que se realizaron dos por cada porcentaje de asfalto y después para los cálculos correspondientes fueron promediados.

- **Gmm para Mezcla asfáltica en caliente (MAC)**

A continuación se presenta los resultados de los ensayos realizados con la ayuda del medidor eléctrico de densidad CORELOCK para la mezcla sin modificación.

Tabla 41: Resultados de la Gmm para la mezcla convencional.

MaxGravity(TM)						
21/12/2013						
Max Gr.Densidad Max						
RubberVC: 0						
Sample Type:				Asphalt		
Sample ID	Bag Weight (g)	Rubber Sheets Combined Weight (g)	Sample Weight in air (g)	Weight of Sample Opened in Water (g)	Density of Water (g/cm ³) for temperature correction	Maximum Specific Gravity (g/cm ³)
4.5 gr4	77.080	0	1214.790	695.830	0.99839	2.374
5 gr 4	77.050	0	1239.170	702.290	0.99839	2.340
4.5 g4 2*	76.070	0	1210.200	692.340	0.99839	2.370
5 gr4 2	77.02	0	1228.96	698.56	0.99839	2.349
5.5 gr4	77.12	0	1216.38	685.65	0.99876	2.325
6 gr 4	75.98	0	1198.67	673.45	0.99876	2.315
5.5 gr4 2	76.03	0	1226.54	690.98	0.99876	2.322
6 gr4 2	77.3	0	1206.66	676.78	0.99876	2.31
6.5 gr4	76.94	0	1254.87	700.87	0.99876	2.296
6.5 gr4 2	76.12	0	1245.76	694.23	0.99838	2.288

*4.5: Porcentaje de asfalto, gr4: granulometría muestra 4. 2: número de ensayo.

Fuente: Programa Gravity Suite (Corelock)

Para utilizar estos resultados se promediaron los dos resultados obtenidos para cada contenido de asfalto como a continuación se muestra en la Tabla 42:

Tabla 42: Promedio de los resultados de Gmm para los diferentes porcentajes de asfalto.

%Asfalto	Ensayo 1 (gr/cm ³)	Ensayo 2 (gr/cm ³)	Promedio (gr/cm ³)
4.5	2.374	2.370	2.372
5	2.340	2.349	2.345
5.5	2.325	2.322	2.324
6	2.315	2.310	2.313
6.5	2.296	2.288	2.292

- **Gmm para Mezcla asfáltica tibia (MAT)**

En el mismo procedimiento descrito por el método de Corelock, se determina Gmm para mezcla asfáltica tibia, realizando dos ensayos en la máquina de densidad para los porcentajes con 1% y 2% de ACP.

En la Tabla 43 y Tabla 45, se muestran los resultados.

Tabla 43: Resultados de la Gmm para el 1% de ACP.

MaxGravity(TM)						
07/02/2014						
Max Gravity-ACP						
RubberVC: 0						
Sample Type:				Asphalt		
Sample ID	Bag Weight (g)	Rubber Sheets Combined Weight (g)	Sample Weight in air (g)	Weight of Sample Opened in Water (g)	Density of Water (g/cm ³) for temperature correction	Maximum Specific Gravity (g/cm ³)
4.5 % ACP 1%-1*	76.54	0	1267.22	721.76	0.99865	2.355
4.5 % ACP 1%-2	76.23	0	1247.23	710.56	0.99865	2.356
5 % ACP 1%-1	76.21	0	1152.27	651.73	0.99865	2.337
5% ACP 1%-2	76.12	0	1210.21	684.36	0.99865	2.334
5.5 % ACP 1%-1	76.22	0	1210.61	680.78	0.99876	2.317
5.5 % ACP 1%-2	76.08	0	1200.02	674.54	0.99876	2.316
6 % ACP 1%-1	76.13	0	1249.55	700.07	0.99876	2.305
6 % ACP 1%-2	76.02	0	1248.76	698.99	0.99876	2.302
6.5 % ACP 1%-1	76.16	0	1247.3	693.22	0.99876	2.282
6.5 % ACP 1%-2	76.43	0	1245.98	693.06	0.99876	2.284

*4.5%: Porcentaje de asfalto, ACP 1%: porcentaje de ACP, 1: número de ensayo.

Fuente: Programa Gravity Suite (Corelock)

Tabla 44: Promedio de los resultados de Gmm para los diferentes porcentajes de asfalto.

% Asfalto	Ensayo 1 (gr/cm ³)	Ensayo 2 (gr/cm ³)	Promedio (gr/cm ³)
4.5	2.355	2.356	2.356
5	2.337	2.334	2.336
5.5	2.317	2.316	2.317
6	2.305	2.302	2.304
6.5	2.282	2.284	2.283

Tabla 45: Resultados de Gmm para el 2% de ACP.

MaxGravity(TM)						
02/11/2014						
Max Gravity-ACP						
RubberVC: 0						
Sample Type:				Asphalt		
Sample ID	Bag Weight (g)	Rubber Sheets Combined Weight (g)	Sample Weight in air (g)	Weight of Sample Opened in Water (g)	Density of Water (g/cm ³) for temperature correction	Maximum Specific Gravity (g/cm ³)
4.5 % ACP 2%-1*	76.12	0	1228.67	696.34	0.99865	2.340
4.5 % ACP 2%-2	76.23	0	1227.86	695.23	0.99865	2.338
5 % ACP 2%-1	75.65	0	1234.88	696.78	0.99865	2.326
5 % ACP 2%-2	76.88	0	1240.97	699.87	0.99865	2.325
5.5 % ACP 2%-1	75.44	0	1236.6	694.55	0.99865	2.312
5.5 % ACP 2%-2	75.87	0	1206.56	676.99	0.99865	2.310
6 % ACP 2%-1	76.54	0	1240.56	692.89	0.99865	2.296
6 % ACP 2%-2	76.18	0	1240.43	693.02	0.99865	2.297
6.5 % ACP 2%-1	76.22	0	1241.98	689.04	0.99865	2.276
6.5 % ACP 2%-2	76.41	0	1242.65	689.97	0.99865	2.279

*4.5%: Porcentaje de asfalto, ACP 1%: porcentaje de ACP, 1: número de ensayo.

Fuente: Programa Gravity Suite (Corelock)

Tabla 46: Promedio de los resultados para cada porcentaje de asfalto.

% Asfalto	Ensayo 1 /gr/cm ³	Ensayo 2 (gr/cm ³)	Promedio (gr/cm ³)
4.5	2.34	2.338	2.339
5	2.326	2.325	2.326
5.5	2.312	2.31	2.311
6	2.296	2.297	2.297
6.5	2.276	2.279	2.278

5.5.9. Proceso de Cálculo. Método Marshall (Gamica, 2004)

Para el método Marshall se realizan varios cálculos necesarios para saber el comportamiento de la mezcla en función de su contenido de asfalto y después obtener mediante gráficas el contenido óptimo de asfalto para la

mezcla realizada. A continuación se enuncian los cálculos que se realizan para el método con sus respectivas fórmulas.

5.5.9.1. Gravedad específica efectiva de agregados (Gse)

La relación entre la masa en estado seco (o el peso seco en el aire) de una unidad de volumen de agregado, incluyendo los vacíos permeables sin asfalto y los impermeables, o sea excluyendo los vacíos permeables al asfalto, y la masa de un igual volumen de agua, ambos a la misma temperatura establecida.

$$Gse = \frac{Pmm - Pb}{\frac{Pmm}{Gmm} - \frac{Pb}{Gb}} \quad (15)$$

En donde:

- Pmm= sumatoria de los porcentajes de mezcla (100%).
- Pb= % de asfalto al que se quiere el cálculo.
- Gmm= gravedad específica máxima teórica.
- Gb= gravedad específica del asfalto.

Este cálculo se realiza para los diferentes porcentajes de asfalto, lo cual estará en las Tablas 48, 49 y 50.

5.5.9.2. Porcentaje de asfalto absorbido (Pba)

Es el contenido de asfalto absorbido por el agregado. El porcentaje de asfalto absorbido en los poros del agregado.

$$Pba = 100 \left[\frac{Gse - Gsb}{Gsb * Gse} * Gb \right] \quad (16)$$

5.5.9.3. Porcentaje de asfalto efectivo (P_{be})

El contenido efectivo de asfalto es el volumen de asfalto no absorbido por el agregado; es la cantidad de asfalto que forma una película ligante efectiva sobre las superficies de los agregados.

$$P_{be} = P_b - \frac{P_{ba}}{100} * (100 - P_b) \quad (17)$$

5.5.9.4. Gravedad específica máxima calculada (G_{mm} calculado)

Se calcula para cada porcentaje de Asfalto, el cual corresponde al que teóricamente se obtendría si fuera posible comprimir la muestra hasta obtener una masa de asfalto y agregados carente de vacíos con aire. Se calcula con la ecuación (18):

$$G_{mm} = \frac{100}{\frac{100 - P_b}{G_{se}} + \frac{P_b}{G_b}} \quad (18)$$

5.5.9.5. Porcentaje de vacíos (V_a)

Los vacíos de aire, V_a , en la mezcla asfáltica compactada consiste en los pequeños espacios de aire entre las partículas de agregado. El porcentaje del volumen de vacíos de aire en una mezcla compactada, puede determinarse usando:

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

5.5.9.6. Porcentaje de vacíos de agregado mineral (VAM)

Es el porcentaje de vacíos entre los agregados minerales, incluye los vacíos de aire y del volumen de asfalto efectivo. Se calcula a partir de la gravedad específica de la briqueta, la gravedad bulk de los agregados y del porcentaje de asfalto.

$$VAM = 100 - \left[\frac{Gmb * (100 - Pb)}{Gsb} \right] \quad (20)$$

5.5.9.7. Porcentaje de vacíos llenos de asfalto (VAF)

Es el porcentaje de vacíos entre los agregados minerales, en el cual se encuentra la película de asfalto en la mezcla. Se calcula a partir del porcentaje de vacíos de agregado mineral y el porcentaje de vacíos de la mezcla.

$$VAF = 100 \left[\frac{VAM - Va}{VAM} \right] \quad (21)$$

5.5.10. Resultados de los ensayos y cálculos

A continuación se presentan los resultados de los ensayos realizados en la mezcla asfáltica caliente (MAC) y en las mezclas asfálticas tibias modificadas con ACP y para los diferentes porcentajes de asfalto.

Tabla 47: Características de los materiales para los cálculos del método

Características de los materiales			
% ACP=	0%	1%	2%
GSb (Grav. esp. de agregados) =	2.403		
GSa (Grav. esp. Aparente de agregados) =	2.598		
Gb (Grav. esp. Asfalto) =	1.011	1.006	1.004

5.5.10.1. Resultados del Método Marshall

- Mezcla Asfáltica en Caliente (MAC)

Tabla 48: Resultados método Marshall (MAC)

Fecha	Briqueleta	Porcentaje Asfalto	Peso Aire	Peso Sat. Sup. Seca	Peso en agua	Volumen Briqueleta (cm3)	Gmb g/cm3	Gmm (calc) g/cm3	V. a. %	VAM %	VAF %	Estabilidad (lb)		Flujo 0.01"		
												Medida	Corregida			
2013-12-18	1	4.5	1233.81	1239.83	674.65	565.18	2.183	2.372	7.97	13.23	39.80	3238	0.86	2785	9	
	2	4.5	1210.21	1218.76	665.08	553.68	2.186	2.372	7.85	13.13	40.18	2735	0.89	2434	8	
	3	4.5	1220.96	1231.37	672.67	558.70	2.185	2.372	7.87	13.14	40.13	3344	0.89	2976	8	
						Promedio	2.185	2.372	7.896		13.167	40.037			2732	8
	4	5.0	1247.99	1257.66	687.05	570.61	2.187	2.345	6.71	13.53	50.37	3619	0.86	3112	9	
	5	5.0	1247.13	1253.68	686.50	567.18	2.199	2.345	6.21	13.06	52.44	3512	0.86	3020	10	
	6	5.0	1230.25	1237.22	674.58	562.64	2.187	2.345	6.74	13.55	50.28	3574	0.86	3074	12	
						Promedio	2.191	2.345	6.554		13.380	51.031			3069	10
	7	5.5	1253.01	1262.16	693.45	568.71	2.203	2.324	5.18	13.35	61.23	4320	0.86	3715	12	
	8	5.5	1245.92	1250.83	684.31	566.52	2.199	2.324	5.35	13.50	60.40	4245	0.86	3651	11	
	9	5.5	1244.17	1250.56	685.23	565.33	2.201	2.324	5.28	13.44	60.72	4298	0.86	3697	11	
						Promedio	2.201	2.324	5.268		13.432	60.782			3688	11
	10	6.0	1253.75	1260.68	694.76	565.92	2.215	2.313	4.20	13.33	68.51	4385	0.86	3771	13	
	11	6.0	1267.41	1270.82	700.12	570.70	2.221	2.313	3.97	13.12	69.77	4344	0.86	3736	11	
	12	6.0	1258.40	1267.54	701.45	566.09	2.223	2.313	3.87	13.03	70.30	4228	0.86	3636	12	
					Promedio	2.220	2.313	4.012		13.161	69.526			3715	12	
13	6.5	1255.28	1260.76	691.43	569.33	2.205	2.292	3.80	14.20	73.22	3789	0.86	3258	14		
14	6.5	1252.70	1260.82	695.43	565.39	2.216	2.292	3.33	13.78	75.83	3809	0.86	3276	13		
15	6.5	1258.65	1261.43	695.03	566.40	2.222	2.292	3.05	13.53	77.48	3642	0.86	3132	13		
					Promedio	2.214	2.292	3.393		13.837	75.512			3222	13	

Agregado de la mina de Río Pita
Asfalto proveniente de la refinería de Esmeraldas

GSb (Grav. esp. de agregados) = 2.403 gr/cm3
GSa (Grav. esp. aparente de agregados) = 2.598 gr/cm3
Gb (Grav. esp. Asfalto) = 1.011 gr/cm3

ENSAYO "MARSHALL" NORMA ASTM D 1559

Observación: El agregado mineral fue proporcionado por el Ing Mario Naranjo
Temperatura de ensayo 60 °C
Criterio de compactación Marshall: 75 golpes briqueletas
Temperatura de mezcla entre 153-159 °C
Temperatura de compactación entre 140-146 °C

- Mezcla Asfáltica Tibia al 1% de ACP (MAT-1%)

Tabla 49: Resultados método Marshall (MAT-1%)

GSb (Grav. esp. de agregados) = 2.403 gr/cm3
 GSa (Grav. esp. aparente de agregados) = 2.598 gr/cm3
 Gb (Grav. esp. Asfalto) = 1.006 gr/cm3

Agregado de la mina de Rio Pita
 Asfalto proveniente de la refinería de Esmeraldas

ENSAYO "MARSHALL" NORMA ASTM D 1559

Fecha	Briqueta	Porcentaje Asfalto	Peso Aire	Peso Sup. Seca	Peso en agua	Volumen Briqueta (cm3)	Gmb g/cm3	Gmm (calc) g/cm3	V. a. %	VAM %	VAF %	Estabilidad (lb)		Flujo 0.01"		
												Medida	Correc.			
2014-02-07	1	4.5	1275.34	1279.50	686.55	592.95	2.151	2.356	8.69	14.51	40.13	2705	0.78	2110	11	
	2	4.5	1202.05	1206.54	648.68	557.86	2.155	2.356	8.52	14.36	40.64	2740	0.89	2439	11	
	3	4.5	1245.34	1249.76	670.53	579.23	2.150	2.356	8.72	14.55	40.03	2637	0.89	2347	12	
						Promedio	2.152	2.356	8.645	14.473	40.268				2299	11
	4	5.0	1222.70	1230.01	665.32	564.69	2.165	2.336	7.29	14.39	49.35	3134	0.86	2695	12	
	5	5.0	1240.07	1243.57	669.69	573.88	2.161	2.336	7.48	14.57	48.66	3253	0.86	2798	12	
	6	5.0	1235.76	1240.72	668.26	572.46	2.159	2.336	7.57	14.65	48.33	3107	0.86	2672	12	
						Promedio	2.162	2.336	7.446	14.536	48.778				2722	12
	7	5.5	1154.51	1159.72	632.25	527.47	2.189	2.317	5.51	13.92	60.38	3329	0.96	3196	13	
	8	5.5	1246.39	1251.02	683.77	567.25	2.197	2.317	5.15	13.58	62.10	3442	0.86	2960	12	
	9	5.5	1221.67	1228.09	667.85	560.24	2.181	2.317	5.87	14.24	58.80	3517	0.86	3025	14	
						Promedio	2.189	2.317	5.509	13.913	60.427				3060	13
	10	6.0	1251.40	1258.56	690.41	568.15	2.203	2.304	4.38	13.83	68.33	3597	0.86	3094	14	
	11	6.0	1248.56	1252.13	689.80	562.33	2.220	2.304	3.61	13.14	72.52	3632	0.86	3123	13	
	12	6.0	1253.98	1259.40	692.08	567.32	2.210	2.304	4.04	13.53	70.11	3635	0.86	3126	13	
					Promedio	2.211	2.304	4.012	13.499	70.319				3114	13	
13	6.5	1247.40	1251.65	692.35	559.30	2.230	2.283	2.31	13.21	82.52	3887	0.86	3343	15		
14	6.5	1228.97	1235.66	680.03	555.63	2.212	2.283	3.12	13.93	77.63	3737	0.89	3326	14		
15	6.5	1252.56	1259.45	697.67	561.78	2.230	2.283	2.34	13.24	82.34	3750	0.86	3225	14		
					Promedio	2.224	2.283	2.588	13.460	80.831				3298	14	

Observación: El agregado mineral fue proporcionado por el Ing Mario Naranjo
 Temperatura de ensayo 60 °C
 Criterio de compactación Marshall: 75 golpes briquetas
 El asfalto fue modificado al 1% de ACP.
 Temperatura de mezcla entre 146-152 °C
 Temperatura de compactación entre 134-140°C

- Mezcla Asfáltica Tibia al 2% de ACP (MAT-2%)

Tabla 50: Resultados método Marshall (MAT-2%)

Fecha	Briquea	Porcentaje Asfalto	Peso Aire	Peso Sat. Sup. Seca	Peso en agua	Volumen Briquea (cm ³)	Gmb g/cm ³	Gmm (calc) g/cm ³	V. a. %	VAM %	VAF %	Estabilidad (lb)		Flujo 0.01"		
												Medida	Correc.			
2014-02-11	1	4.5	1230.31	1235.71	666.13	569.58	2.160	2.339	7.65	14.15	45.92	3281	0.86	2822	13	
	2	4.5	1229.31	1234.38	664.70	569.68	2.158	2.339	7.74	14.23	45.60	3458	0.86	2974	12	
	3	4.5	1221.32	1227.86	661.87	565.99	2.158	2.339	7.74	14.24	45.59	3175	0.86	2730	13	
	4	5.0	1175.40	1178.73	637.32	541.41	2.159	2.339	7.713	14.206	45.704			2842	13	
	5	5.0	1243.48	1247.51	672.44	575.07	2.171	2.326	6.64	14.16	53.09	3193	0.93	2970	14	
	6	5.0	1210.67	1216.75	661.45	555.30	2.180	2.326	7.02	14.51	51.63	3568	0.83	2961	14	
							2.171	2.326	6.25	13.80	54.73	3469	0.89	3088	14	
							Promedio		6.636	14.157	53.150				3006	14
							2.182	2.311	5.58	14.18	60.66	3694	0.86	3176	14	
							2.207	2.311	4.50	13.20	65.90	3473	0.89	3091	15	
							2.182	2.311	5.60	14.20	60.56	3352	0.86	2883	15	
							Promedio		5.227	13.861	62.371				3050	15
							2.199	2.297	4.23	13.96	69.67	3545	0.86	3048	15	
							2.219	2.297	3.39	13.20	74.34	3570	0.86	3070	16	
							2.211	2.297	3.73	13.51	72.36	3568	0.89	3176	15	
						Promedio		3.785	13.559	72.125				3098	15	
						2.218	2.278	2.60	13.68	81.02	3665	0.86	3152	16		
						2.222	2.278	2.43	13.53	82.03	3734	0.89	3324	17		
						2.199	2.278	3.45	14.43	76.12	3737	0.86	3213	16		
						Promedio		2.824	13.878	79.722				3230	16	

Observación: El agregado mineral fue proporcionado por el Ing Mario Naranjo

Temperatura de ensayo 60 °C

Criterio de compactación Marshall: 75 golpes briquetas

El asfalto fue modificado al 2% de ACP.

Temperatura de mezcla entre 143-149 °C

Temperatura de compactación entre 132-137°C

Gsb (Grav. esp. de agregados) = 2.403 gr/cm³
 Gsa (Grav. esp. aparente de agregados) = 2.598 gr/cm³
 Gb (Grav. esp. Asfalto) = 1.004 gr/cm³
 Agregado de la mina de Rio Pita
 Asfalto proveniente de la refinería de Esmeraldas

ENSAYO "MARSHALL" NORMA ASTM D 1559

- **Resultados de los cálculos del método**

Mezcla Asfáltica Caliente (MAC)

Tabla 51: Resultados del método para una mezcla MAC.

% Asfalto	Gmm(gr/cm ³)	Gse (gr/cm ³)	%Pba	%Pbe
4.5	2.372	2.533	2.158	2.440
5	2.345	2.519	1.947	3.150
5.5	2.324	2.513	1.852	3.750
6	2.313	2.520	1.950	4.167
6.5	2.292	2.513	1.851	4.769
Promedio	2.329	2.520	1.952	3.655

Gsb	<	Gse	<	Gsa
2.403	<	2.520	<	2.598

Mezcla Asfáltica Tibia al 1% de ACP (MAT-1%)

Tabla 52: Resultados del método para una mezcla MAT-1%

% Asfalto	Gmm (gr/cm ³)	Gse (gr/cm ³)	%Pba	%Pbe
4.5	2.356	2.515	1.860	2.724
5	2.336	2.510	1.791	3.299
5.5	2.317	2.507	1.734	3.861
6	2.304	2.510	1.792	4.316
6.5	2.283	2.504	1.693	4.917
Promedio	2.319	2.509	1.774	3.823

Gsb	<	Gse	<	Gsa
2.403	<	2.509	<	2.598

Mezcla Asfáltica Tibia al 2% de ACP (MAT-2%)

Tabla 53: Resultados del método para una mezcla MAT-2%

% Asfalto	Gmm (gr/cm ³)	Gse (gr/cm ³)	%Pba	%Pbe
4.5	2.339	2.495	1.550	3.020
5	2.326	2.499	1.602	3.478
5.5	2.311	2.500	1.632	3.958
6	2.297	2.502	1.658	4.441
6.5	2.278	2.498	1.588	5.015
Promedio	2.310	2.499	1.606	3.983

Gsb	<	Gse	<	Gsa
2.403	<	2.499	<	2.598

5.5.11. Curvas de diseño

Se procede a trazar los resultados del ensayo en gráficas, para poder analizar las características particulares de cada muestra. Mediante el estudio de las gráficas se puede determinar cual muestra de la serie, cumple mejor los criterios establecidos para el pavimento terminado. Las proporciones de asfalto y agregado en estas muestras se convierten en las proporciones usadas en la mezcla final.

Se debe tomar en cuenta cumplir con las especificaciones del MTOP según la norma NEVI-12 y los criterios Marshall que se mencionan a continuación en la Tabla 54:

Tabla 54: Criterios Marshall

Criterio	Tráfico Alto	
	min	max
Número de golpes por cara	75	
Estabilidad(Ib)	1800	-
Flujo(0.01")	8	14
Vacíos de Aire (%)	3	5
Vacíos de agregado mineral (%)	13	-
Vacíos llenos de asfalto (%)	65	75

Fuente: Tabla 812-4.1, NEVI-12

Las gráficas que se deben trazar para el diseño son:

- Porcentajes de vacíos(V_a)
- Porcentajes de vacíos en el agregado mineral (VAM)
- Porcentajes de vacíos llenos de asfalto (VAF)
- Gravedades específica Bulk
- Estabilidad Marshall
- Flujo Marshall

5.5.11.1. Mezcla Asfáltica Caliente (MAC)

Material: Agregado de la mina de Rio Pita
Asfalto proveniente de la refinera de Esmeraldas

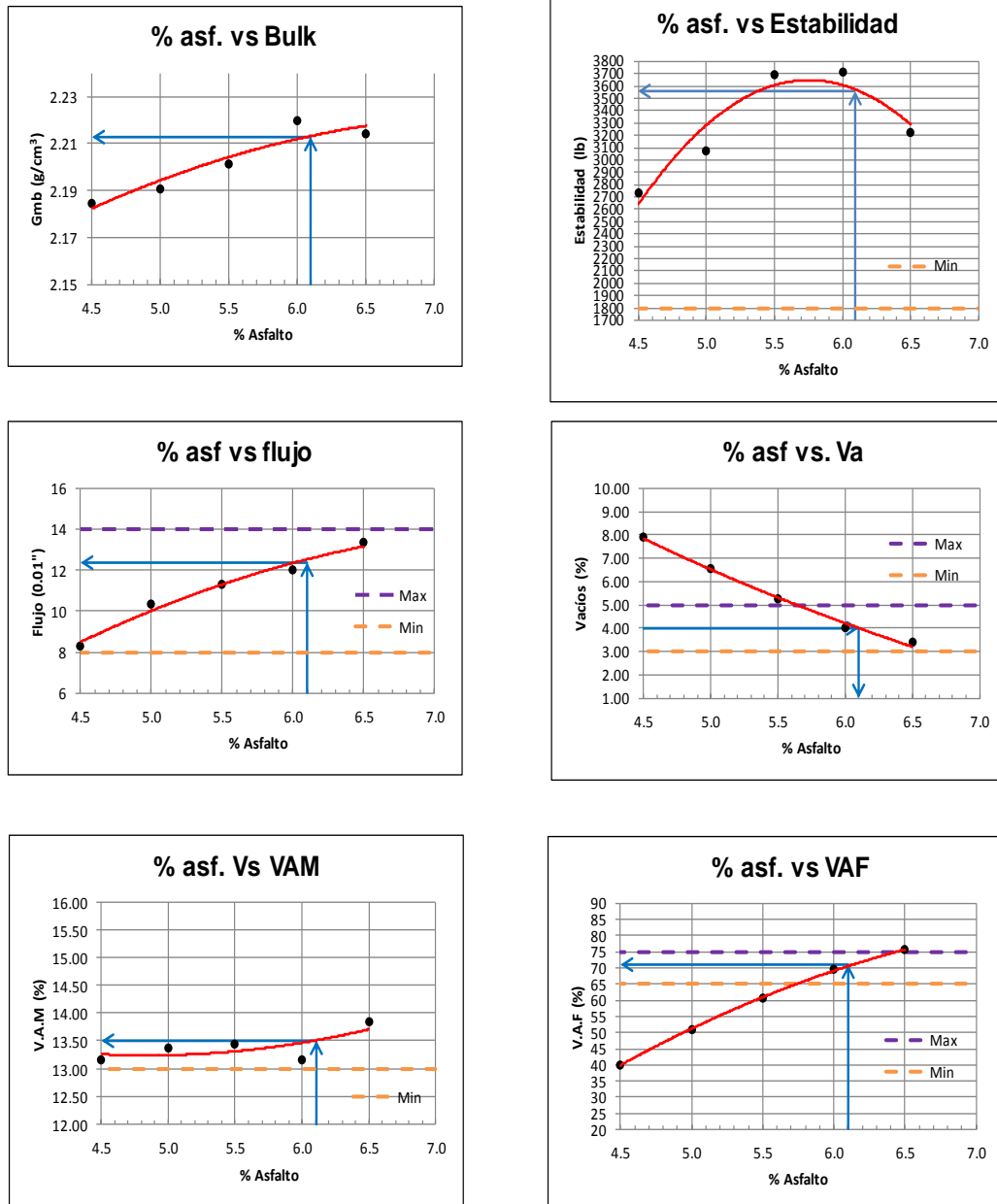


Figura. 89: Curvas de Diseño Marshall para MAC.

Porcentaje de vacíos: 4% → Porcentaje de asfalto óptimo: 6.1 %

5.5.11.2. Mezcla Asfáltica Tibia al 1% de ACP (MAT-1%)

Material: Agregado de la mina de Rio Pita
Asfalto proveniente de la refinería de Esmeraldas

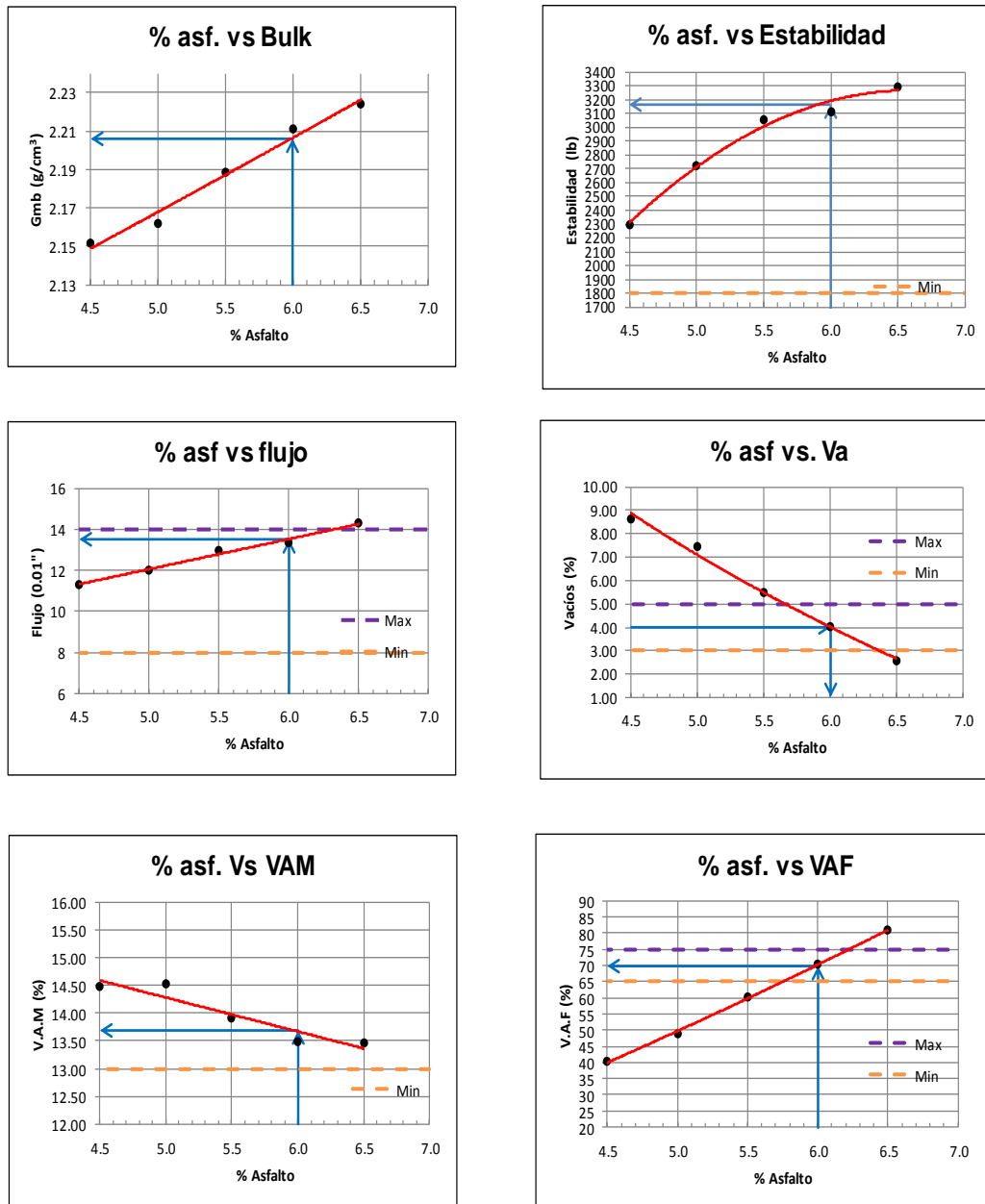


Figura. 90: Curvas de Diseño Marshall para MAT-1%

Porcentaje de vacíos: 4% → Porcentaje de asfalto óptimo: 6.0 %

5.5.11.3. Mezcla Asfáltica Tibia al 2% de ACP (MAT-2%)

Material: Agregado de la mina de Rio Pita
Asfalto proveniente de la refinería de Esmeraldas

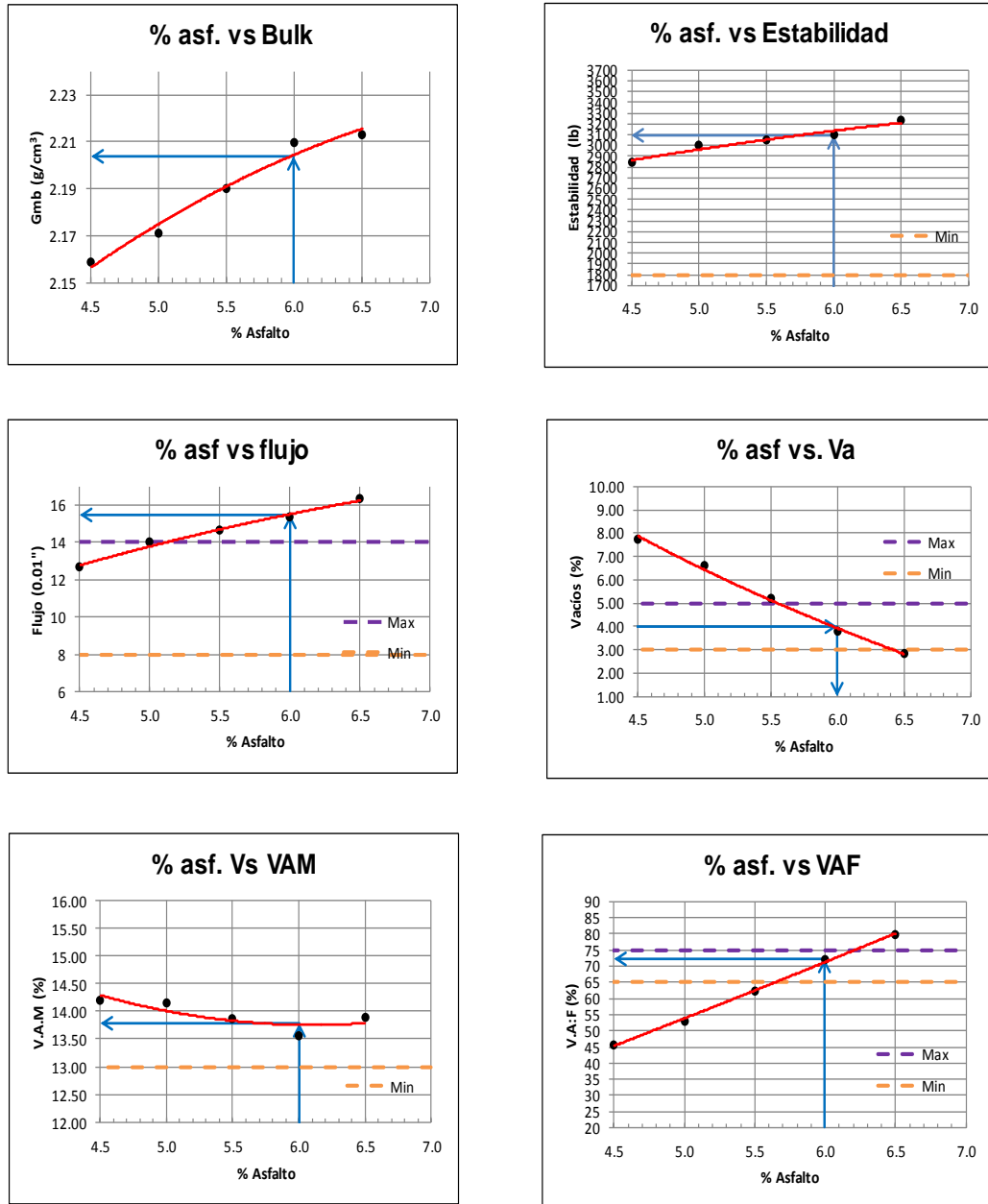


Figura. 91: Curvas de Diseño Marshall para MAT-2%

Porcentaje de vacíos: 4% → Porcentaje de asfalto óptimo: 6.0 %

Capítulo 6 : Análisis de resultados

En el presente capítulo se realiza un análisis de los resultados obtenidos con la mezcla convencional en caliente y las mezclas tibias al 1% y 2% de ACP como modificador. El presente capítulo se enfoca en los análisis de todos los resultados obtenidos en laboratorio como lo es la viscosidad y sus temperaturas de trabajo, los ensayos de control de calidad y el desempeño de las mezclas asfálticas.

Se va analizar en dos grandes grupos, el asfalto y sus ensayos que conllevan y el desempeño de las mezclas mediante el diseño Marshall.

6.1. Asfalto

Los ensayos realizados en el asfalto y su modificación para los contenidos de ACP, se analizan sus resultados a continuación:

6.1.1. Análisis de ensayos de viscosidad.

6.1.1.1. Variación de la viscosidad

La investigación en estudio hace necesario analizar la variación de la viscosidad, mediante un gráfico se analiza la manera que influye el ACP en la viscosidad, para los diferentes contenidos de modificación a la temperatura de ensayo realizada. En las Tablas 55, 56, 57 se presenta los resultados de los ensayos de viscosidad y el cálculo de la variación de la misma.

Tabla 55: Variación de la viscosidad a 80 °C

Temperatura de ensayo= 80 °C			
% ACP	Viscosidad (Cp)	Disminución (Cp)	% Disminución
ASFALTO AC-20	21400	0	0%
0.40%	19300	2100	10%
0.70%	18050	3350	16%
1%	17350	4050	19%
2%	14067	7333	34%

Tabla 56: Variación de la viscosidad a 120 °C

Temperatura de ensayo= 120 °C			
% ACP	Viscosidad (Cp)	Disminución (Cp)	% Disminución
ASFALTO AC-20	842.5	0.0	0%
0.40%	792.5	50.0	6%
0.70%	765.0	77.5	9%
1%	724.5	118.0	14%
2%	660.0	182.5	22%

Tabla 57: Variación de la viscosidad a 160°C

Temperatura de ensayo= 160 °C			
% ACP	Viscosidad (Cp)	Disminución (Cp)	% Disminución
ASFALTO AC-20	120.0	0.0	0%
0.40%	115.5	4.5	4%
0.70%	112.5	7.5	6%
1%	110.0	10.0	8%
2%	102.0	18.0	15%

A partir de las Tablas 55, 56 y 57 se genera la figura 92.

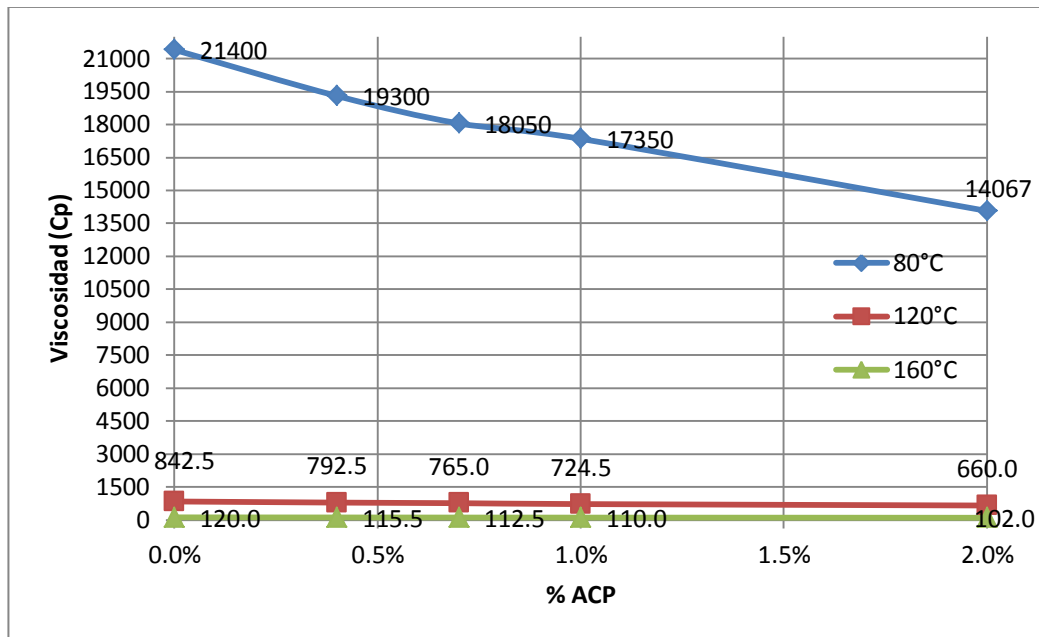


Figura. 92: Curva de viscosidad para cada temperatura y % de modificación de ACP.

En la Figura 92, se puede observar la disminución que se obtiene de manera general, en la viscosidad a las diferentes temperaturas de ensayo y con relación al contenido de ACP añadido al asfalto base. A 80 °C se disminuye de 21400 Cp (0% ACP) a 14067 Cp al 2% de ACP. A la temperatura de 120 °C se disminuye desde 842.5 Cp sin modificación, a 660 Cp al 2% de ACP. Y a 160 °C se disminuye desde 120 Cp sin modificación a 102 Cp al 2% ACP.

En las tablas 55, 56, y 57, se analiza la disminución de viscosidad de manera detallada, para a cada una de las temperaturas de ensayo.

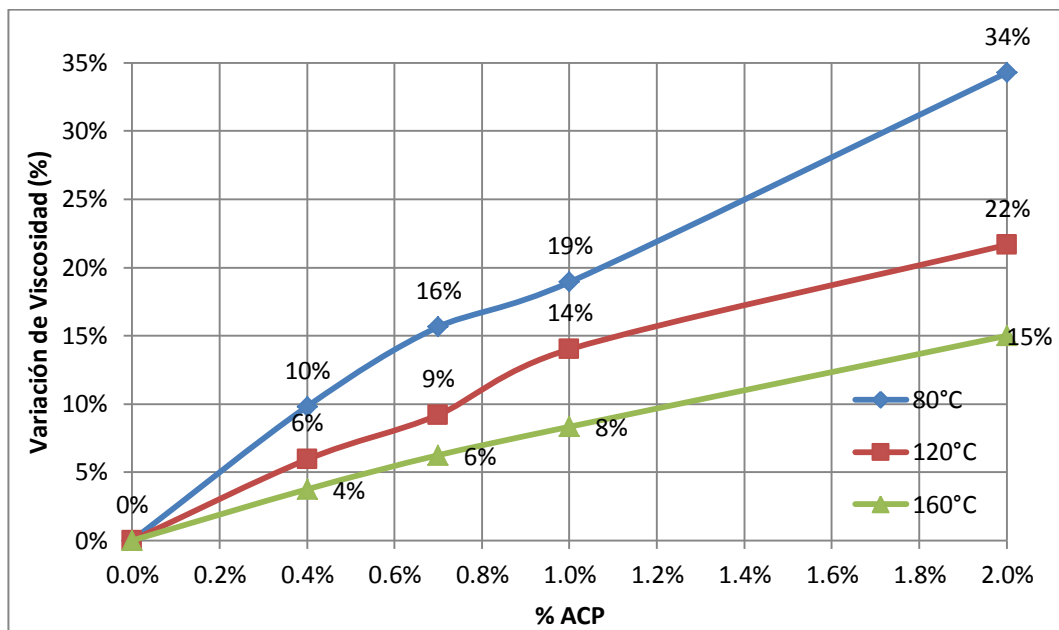


Figura. 93: Variación de la viscosidad para cada temperatura de ensayo según el % de ACP.

En la Figura 93, para la temperatura de ensayo de viscosidad rotacional a 80 °C la variación es mucho mayor que la variación a mayor temperatura como a 120 °C y 160 °C y se incrementa en función del incremento del contenido de ACP, de manera que a mayor temperatura hay menor disminución de la viscosidad pero a mayor contenido de ACP hay mayor disminución de la viscosidad. Por ejemplo tenemos que para el 1% de ACP se disminuye a 80°C un 19%, a 120 °C disminuye a 14% y a 160 °C disminuye la viscosidad un 8%. Al 2% de ACP se disminuye a 80°C un 34%, a 120 °C disminuye a 22% y a 160 °C disminuye la viscosidad un 15%.

6.1.1.2. Variación de la temperatura de mezcla y compactación

A partir de la variación de la viscosidad y de las gráficas de viscosidad en función de la temperatura se pueden obtener las temperaturas de mezcla y compactación y de esta manera analizar el comportamiento en cuanto a la variación de las temperaturas de trabajo a utilizarse y que es parte del desempeño del asfalto que se involucra en la mezcla tibia.

En las tablas 58 y 59 se resumen las temperaturas a utilizarse, con el cálculo de la disminución en °C y en porcentaje, en función de la temperatura inicial para mezcla en caliente comparada con la mezcla tibia a los diferentes porcentajes de ACP.

Tabla 58: Variación de las temperaturas de mezcla en función del contenido de ACP.

% ACP	Disminución de Temperaturas		
	Mezcla		
	Promedio Temperatura(°C)	°C	%
Asfalto AC-20	156	0	0.0
0.004	153.5	2.5	1.6
0.007	152.5	3.5	2.2
0.01	149	7	4.5
0.02	146	10	6.4

Tabla 59: Variación de las temperaturas de compactación en función del contenido de ACP.

% ACP	Disminución de Temperaturas		
	Compactación		
	Promedio	°C	%
Asfalto AC-20	143	0	0.0
0.004	141.5	1.5	1.0
0.007	140.5	2.5	1.7
0.01	137	6	4.2
0.02	134.5	8.5	5.9

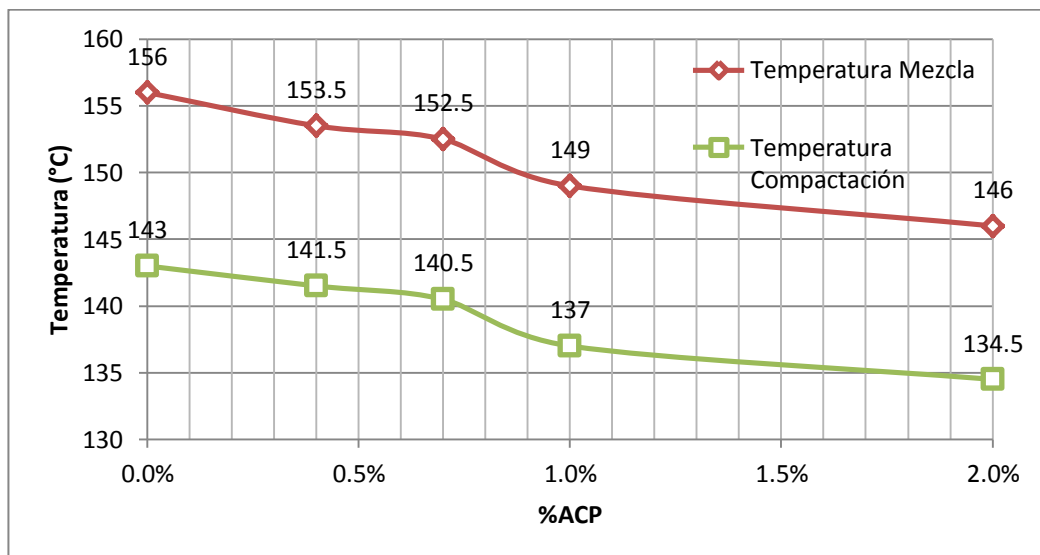


Figura. 94: Variación de las temperaturas de mezcla y compactación en °C

En la figura 94 se evidencia la disminución de las temperaturas, tanto en mezcla como en compactación de manera que de 156 °C sin modificación se disminuye hasta 146 al 2% de ACP, en la temperatura de mezcla, y en las temperaturas de compactación se disminuye desde 143 °C sin modificación hasta 134.5 al 2% de ACP.

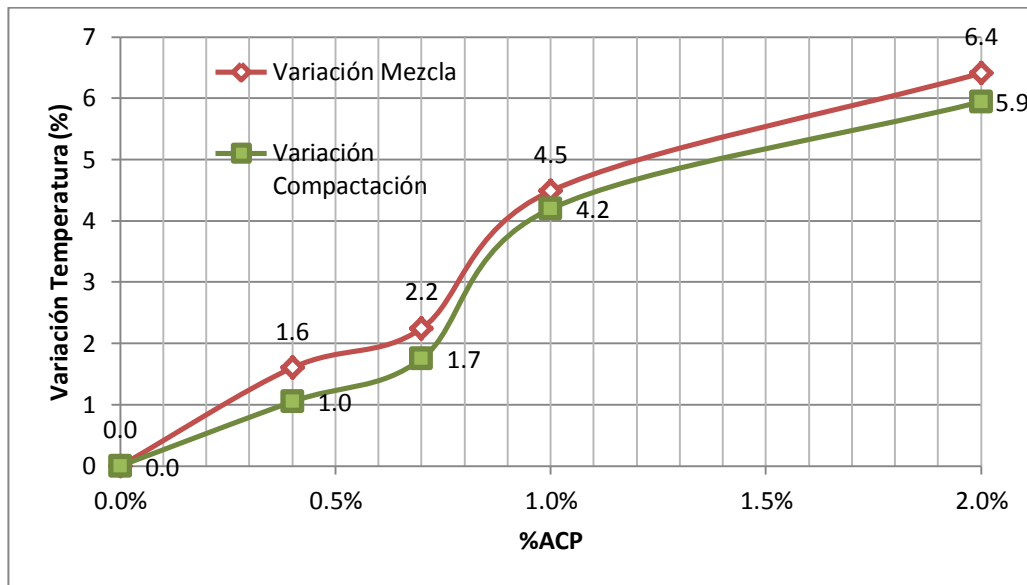


Figura. 95: Variación en función del mayor valor en porcentaje de las temperaturas de trabajo.

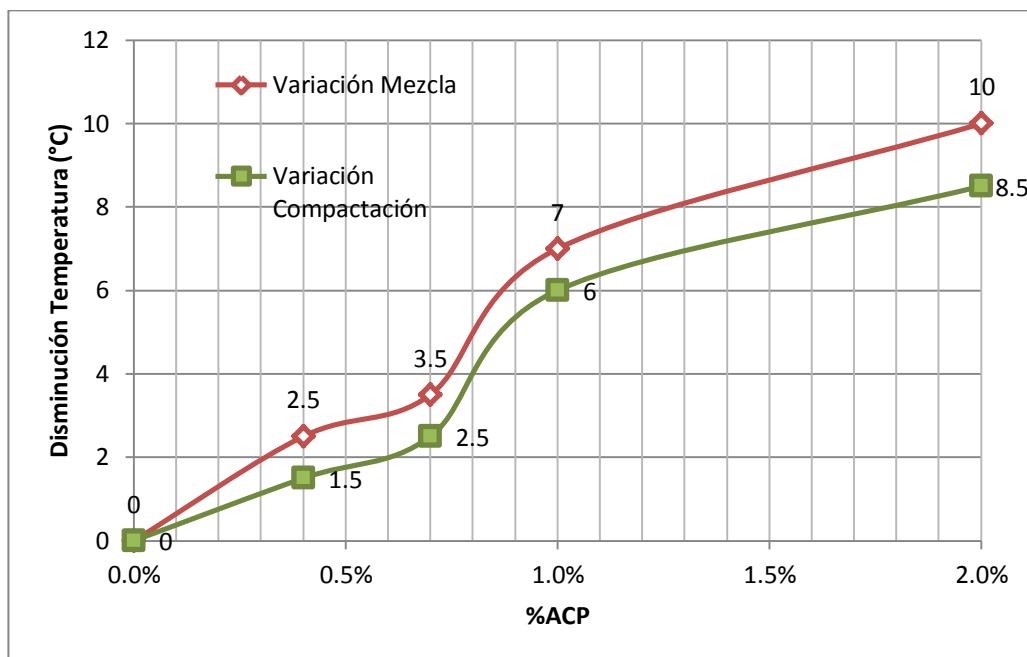


Figura. 96: Disminución de temperatura en función del mayor valor en porcentaje de las temperaturas de trabajo.

Según la Figura 95, la variación porcentual de la temperatura de mezcla incrementa en función del porcentaje de ACP, ya que para el 1% de ACP se tiene una variación del 4.5% en la temperatura de mezcla, hasta un 6.4 % al

2% de ACP. Para la temperatura de compactación se tiene que se incrementa desde un 4.2% al 1% de ACP, hasta un 5.9% al 2% de ACP. Con lo cual el incremento es mucho mayor hasta el 1% de ACP con un 4% pero para el 2% de ACP es un 6%, de manera que disminuye el incremento en función del porcentaje de ACP mayor.

Según la Figura 96, se comporta de la misma manera que el análisis de la Figura 90, pero en este análisis se lo realiza en función de la temperatura de disminución, para lo cual a medida que se incrementa en % de ACP, se incrementa la disminución de las temperaturas de mezcla y compactación.

A partir de los resultados obtenidos en el presente proyecto y según Lopera, (2011), podemos analizar las diferencias obtenidas en los resultados a partir del uso de ACP como modificador de viscosidad en el asfalto.

Lopera, utiliza dos proveedores de ACP, los mismos que son de dos lugares diferentes de Colombia, el primero de la empresa Dismaprin y el segundo de la empresa Palmagro, para lo cual se presentan los resultados en cuanto a las variaciones de las temperaturas de producción de la mezcla asfáltica presentadas en las Figuras 97 y 98 que se detallan a continuación:

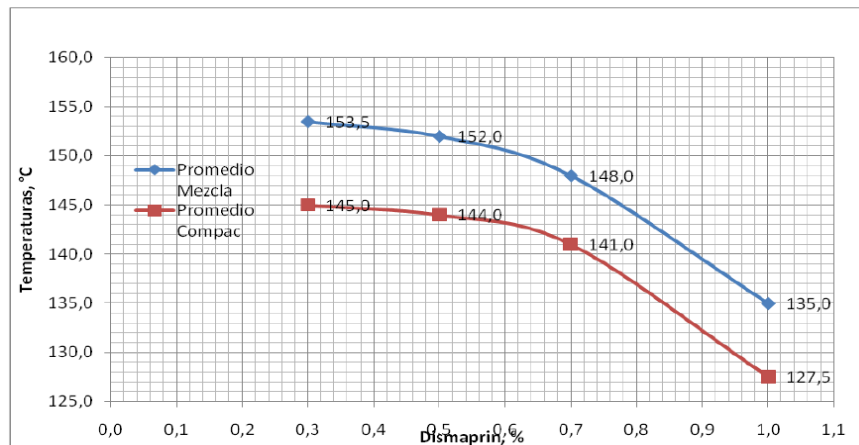


Figura. 97: Variación de la temperatura de producción en función del %ACP Dismaprin

Fuente: Lopera, (2011)

Para los resultados mostrados en la Figura 97, se puede ver que hay una mayor variación de las temperaturas en función del porcentaje de adición de ACP Dismaprin desde 152.5 °C hasta 135 °C, en relación a los resultados obtenidos por parte del presente proyecto de tesis en el cual hay una variación desde 156 °C hasta 146 °C.

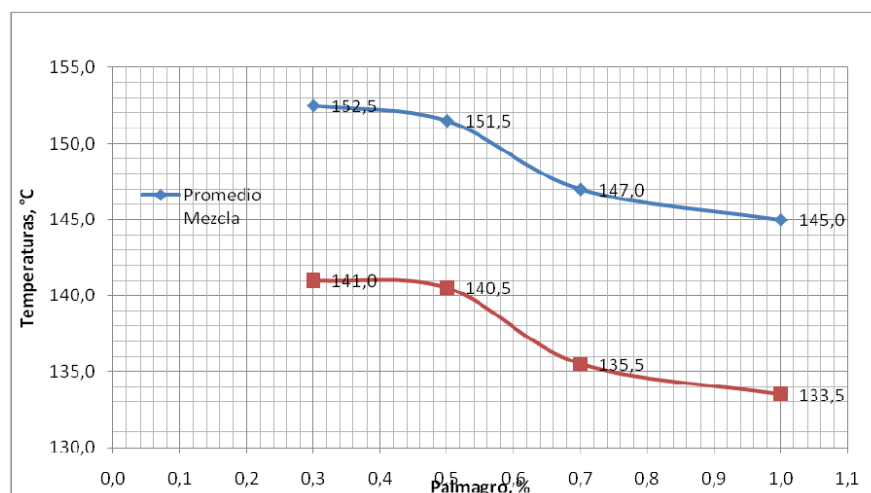


Figura. 98: Variación de la temperatura de producción en función del % ACP Palmagro

Fuente: Lopera, (2011)

Para los resultados mostrados en la Figura 98, se puede ver que hay una variación similar de las temperaturas en función del porcentaje de adición de ACP Palmagro desde 152.5 °C hasta 145 °C, en relación a los resultados obtenidos por parte del presente proyecto de tesis en el cual hay una variación desde 156 °C hasta 146 °C.

A partir del análisis anterior, se puede concluir que el proveedor del ACP puede influir en la disminución de las temperaturas de producción de mezcla asfáltica ya que la extracción del ACP a partir de la palma africana, puede variar en su calidad necesaria para este tipo de uso, por lo tanto se recomienda que para futuros proyectos en este ámbito, se realice varias pruebas en función de varios proveedores.

6.1.2. Análisis del control de calidad para asfalto AC-20 y modificado con ACP.

A continuación se analiza el comportamiento mediante ensayos que se utilizan para control de calidad de un asfalto.

6.1.2.1. Penetración

En la tabla 60, se muestran los resultados de los ensayos de penetración para el asfalto base y para 1% y 2% de ACP.

Tabla 60: Penetraciones en función del contenido de ACP.

Porcentaje ACP	Penetración(mm/10)
Asfalto AC-20	61
1.0%	71
2.0%	101

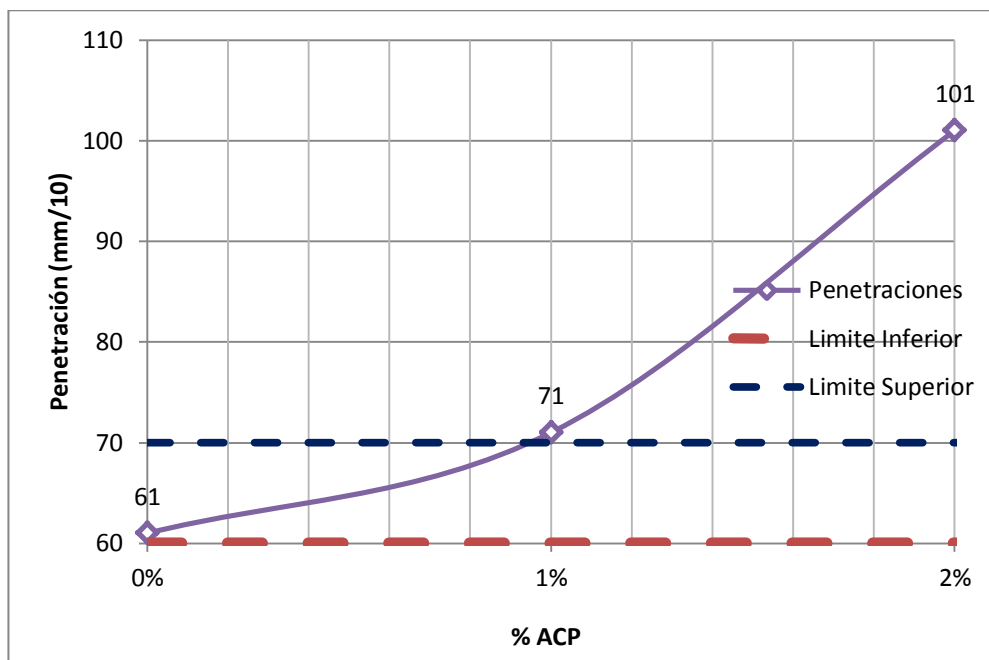


Figura. 99: Variación de la penetración en función del contenido de ACP.

En la Figura 99, se evidencia que a medida que se incrementa el porcentaje de ACP el asfalto se vuelve blando en este caso a temperatura de 25 °C.

El asfalto sin modificación en cuanto a su consistencia mediante el ensayo de penetración queda definido dentro del rango de asfalto tipo 60-70 mm/10 con un valor de 61 mm/10, siendo un asfalto con mayor consistencia.

En cuanto al asfalto modificado al 1% se obtuvo un valor de 71 mm/10 sin estar dentro del rango de penetración del asfalto tipo 60-70 mm/10 pero las especificaciones de la Tabla 17, lo consideran apto cuando está dentro del rango mínimo de 60 mm/10 y 100 mm/10, con lo cual se lo podría utilizar en una mezcla.

Para el 2% de ACP la penetración es de 101 mm/10 con lo cual es mucho más blando y sin cumplir con los límites establecidos para un asfalto 60-70 y tampoco para el rango hasta 100 mm/10.

6.1.2.2. Reblandecimiento

En la tabla 61 se presentan los resultados del ensayo de reblandecimiento efectuado en el asfalto base y los asfalto modificados al 1% y 2% de ACP.

Tabla 61: Punto de reblandecimiento en función del contenido de ACP.

Porcentaje ACP	Punto de Reblandecimiento(°C)
Asfalto AC-20	48.4
1.0%	44.0
2.0%	43.7

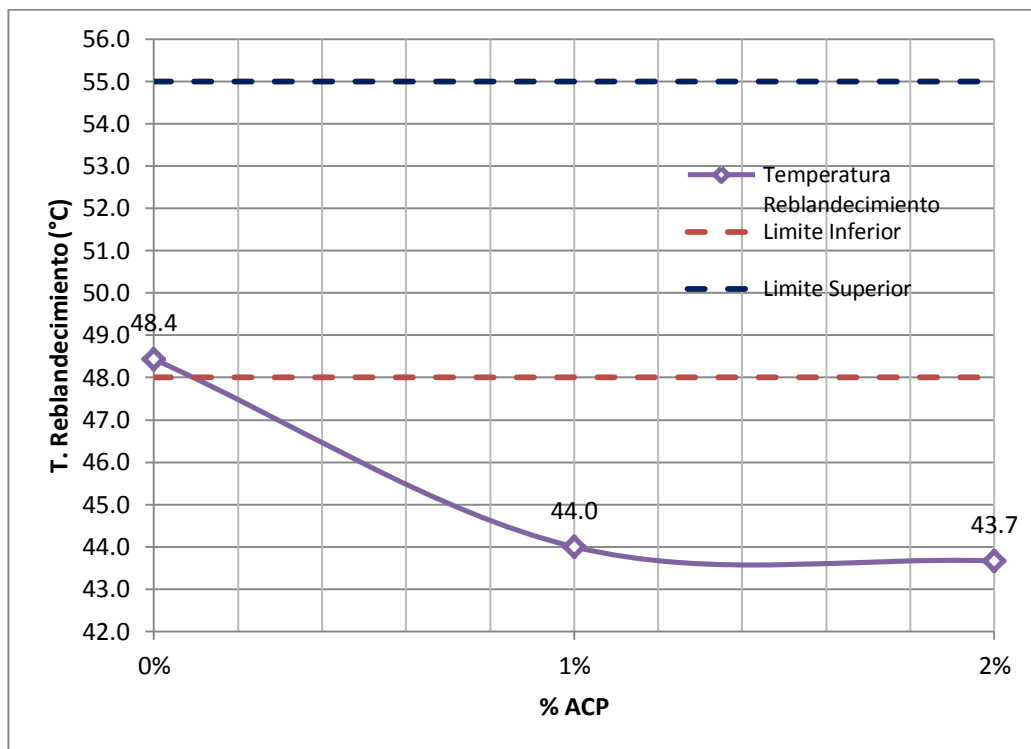


Figura. 100: Variación de la temperatura de reblandecimiento en función del contenido de ACP.

En la Figura 100, se representa la variación de la temperatura de reblandecimiento en función del contenido de ACP añadido con lo cual se evidencia que para el 1% y 2% de ACP no está dentro de los rangos de control de calidad, esto ocurre que el asfalto se vuelve más susceptible a los cambios de temperaturas que es la finalidad de este ensayo, solo cumpliendo para el asfalto base y disminuir esta temperatura desde 48.4 °C a 43,7 °C.

6.1.2.3. Índice de Penetración

A partir de los ensayos de penetración y reblandecimiento se puede deducir la susceptibilidad térmica que puede tener un asfalto, dicha susceptibilidad puede ser alta o baja.

En la tabla 52 se presenta los resultados de penetración, reblandecimiento y su cálculo del índice de penetración.

Tabla 62: Resultados del cálculo del índice de Penetración.

Porcentaje ACP	Penetración (mm/10)	Punto de Reblandecimiento(°C)	IP
Asfalto AC-20	61	48.4	-1.14
1.0%	71	44.0	-2.04
2.0%	101	43.7	-1.20

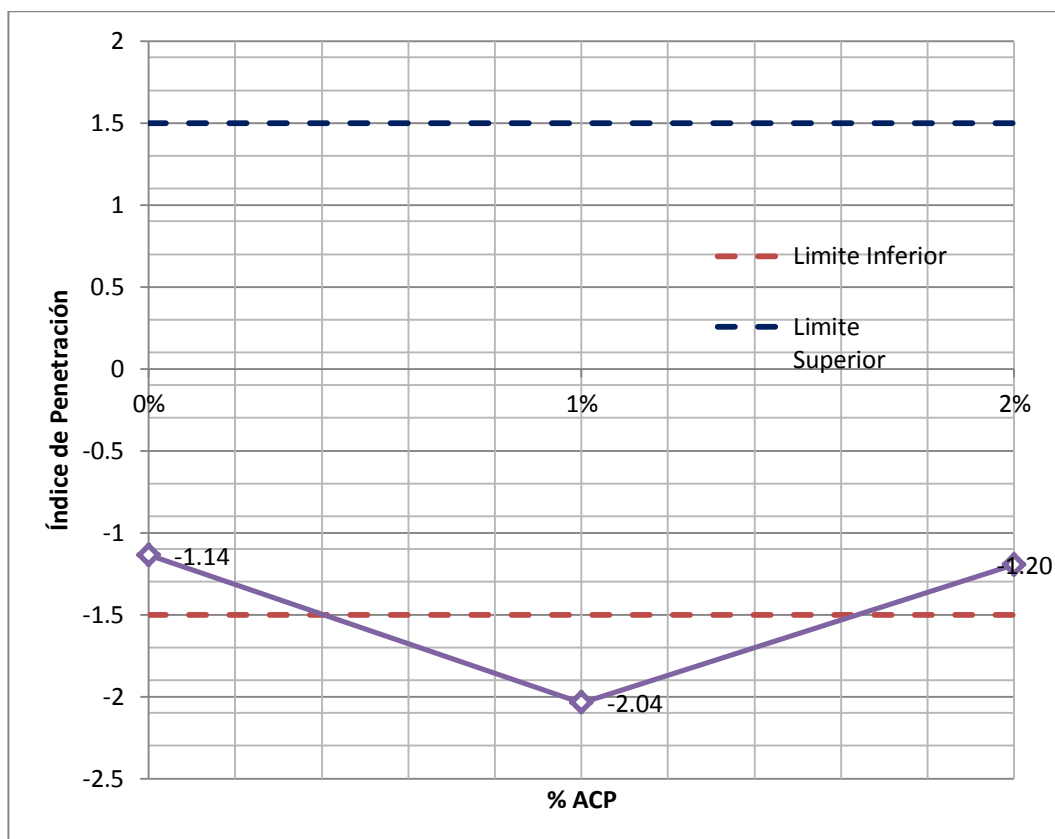


Figura. 101: Variación del IP en función del contenido de ACP.

Al analizar la Figura 101, se puede ver que para todos los asfaltos se tiene valores negativos en el Índice de penetración, con lo cual se explica que el asfalto es muy susceptible a los cambios de temperatura, pero el asfalto base se encuentra dentro del rango comprendido en las especificaciones que es de -1.5 a 1.5.

Para el 1% de ACP se evidencia que el asfalto sobrepasa los límites especificados y esto sucede porque tiene menor punto de reblandecimiento a 44 °C y una penetración que está a 1mm/10 fuera del rango 60-70, pero para el 2% se lo considera menos susceptible porque ya que es más blando, pero apenas disminuye con respecto al punto de reblandecimiento del 1% a 43.7°C.

6.1.2.4. Ductilidad

La ductilidad es la capacidad del asfalto para deformarse sin que se rompa a se genere grietas, para lo cual en los ensayos realizados se resume los resultados en la tabla 63

Tabla 63: Resultados de los ensayos de ductilidad en función del contenido de ACP.

Porcentaje ACP	Ductilidad(cm)
Asfalto AC-20	110
1.0%	110
2.0%	103

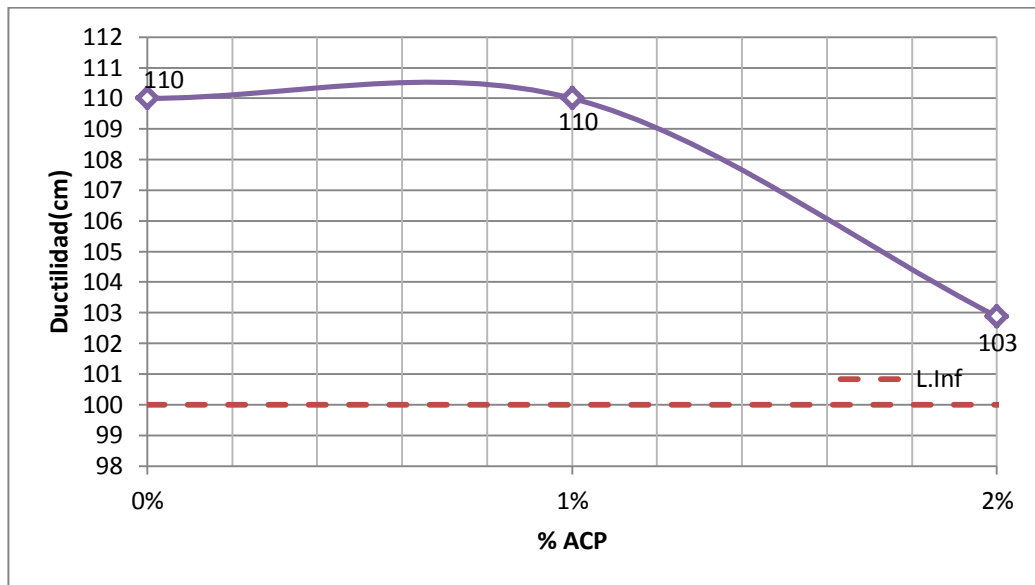


Figura. 102: Variación de la ductilidad en función del contenido de ACP.

Según la Figura 102, se puede ver que la variación de la ductilidad es decreciente desde el asfalto base hasta al aumento del contenido de ACP al 1% y 2%, pero en todos los casos se mantiene dentro del rango mínimo para ser utilizado, desde valores como 110 cm para el asfalto base y modificado al 1% hasta variar a 103 cm al 2% de ACP.

6.1.2.5. Inflamación y combustión

Es importante tener el conocimiento del punto inflamación y combustión del asfalto debido a que por seguridad, se debe conocer hasta la temperatura que se pueda calentar sin que se produzca una llama.

En la tabla 64 se expone los resultados del punto de inflamación y combustión realizados.

Tabla 64: Resultados del punto de inflamación y combustión en función del contenido de ACP.

Porcentaje ACP	Punto de Inflamación (°C)	Punto de Combustión (°C)
Asfalto AC-20	291	299
1%	290	298
2%	286	297

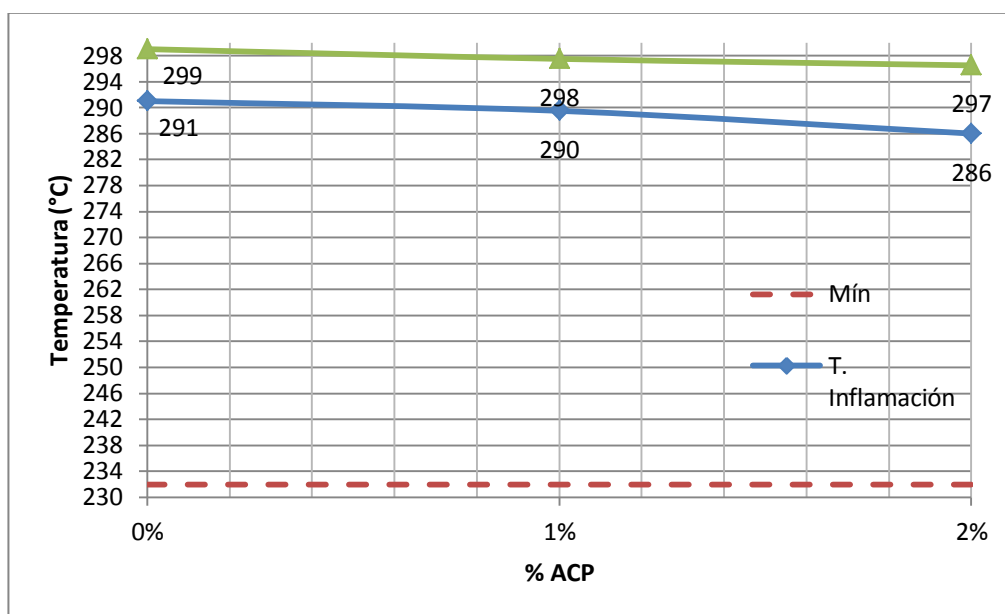


Figura. 103: Variación del Punto de inflamación y Combustión en función del contenido de ACP.

Mediante la Figura 103, se evidencia que el punto de inflamación no varía demasiado reduciéndose 5 °C al 2% de ACP con respecto al asfalto base que resultó en 291 °C.

En cuanto al punto de combustión se reduce a penas 2 °C al 2% de ACP con respecto al asfalto base que resultó en 297 °C. En los dos casos se cumple con el mínimo de seguridad que es 232 °C.

6.1.2.6. Densidad Relativa

En cuanto a la densidad del asfalto base y el modificado se tienen los siguientes resultados:

Tabla 65: Resultados de la densidad para los diferentes contenidos de ACP.

Porcentaje ACP	Densidad (g/cm ³)
Asfalto AC-20	1.011
1%	1.006
2%	1.004

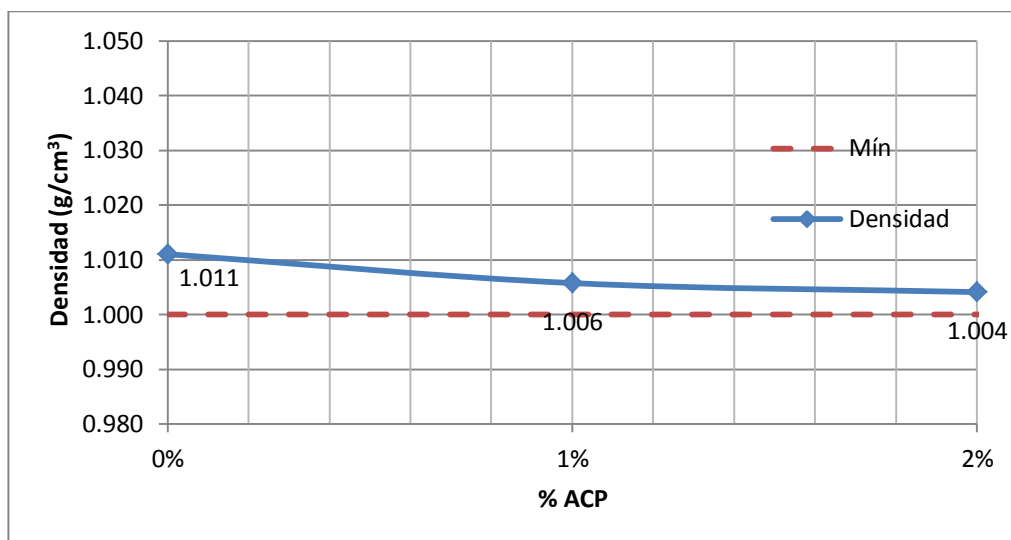


Figura. 104: Variación de la densidad en función del % de ACP.

En la Figura 104, se observa que la densidad se reduce desde 1.011 g/cm³ en el asfalto base pasando a 1.006 g/cm³ al 1% y a 1.004 g/cm³ al 2% de ACP, pero se mantiene dentro del mínimo que es 1.00 g/cm³. Pero la variación es mínima, es decir que varía en milésimas de g/cm³.

6.2. Diseño Marshall

A partir de los porcentajes tentativos para modificar a la mezcla en caliente y obtener una mezcla asfáltica tibia, que es el objeto de estudio, se procede a realizar el Diseño Marshall y por consiguiente evaluar el desempeño en cuanto a su resistencia y deformación que tiene estos dos tipos de mezclas.

A continuación se compara los resultados de tres tipos de mezclas asfálticas.

- Mezcla Asfáltica en Caliente (MAC).
- Mezcla Asfáltica Tibia (MAT-1%) al 1% de modificación con ACP.
- Mezcla Asfáltica Tibia (MAT-2%) al 2% de modificación con ACP.

6.2.1. Análisis del desempeño de la MAC y MAT-1%, MAT-2%.

Mediante el método Marshall y las pruebas de estabilidad y flujo en mezclas asfálticas realizados en los tres tipos de mezclas se generaron los siguientes resultados presentados en la tabla 66:

Tabla 66: Resultados del desempeño de los 3 tipos de mezclas.

Parámetro	TIPO DE MEZCLA		
	MAC	MAT-1%	MAT-2%
% Asfalto	6.1	6.0	6.0
Gmb(g/cm ³)	2.213	2.206	2.204
Estabilidad (lb)	3550	3170	3100
Flujo (0.01")	12.4	13.5	15.5
Va (%)	4	4	4
V.A.M (%)	13.5	13.7	13.8
V.A.F (%)	71	70	72

- **Porcentaje de Asfalto óptimo**

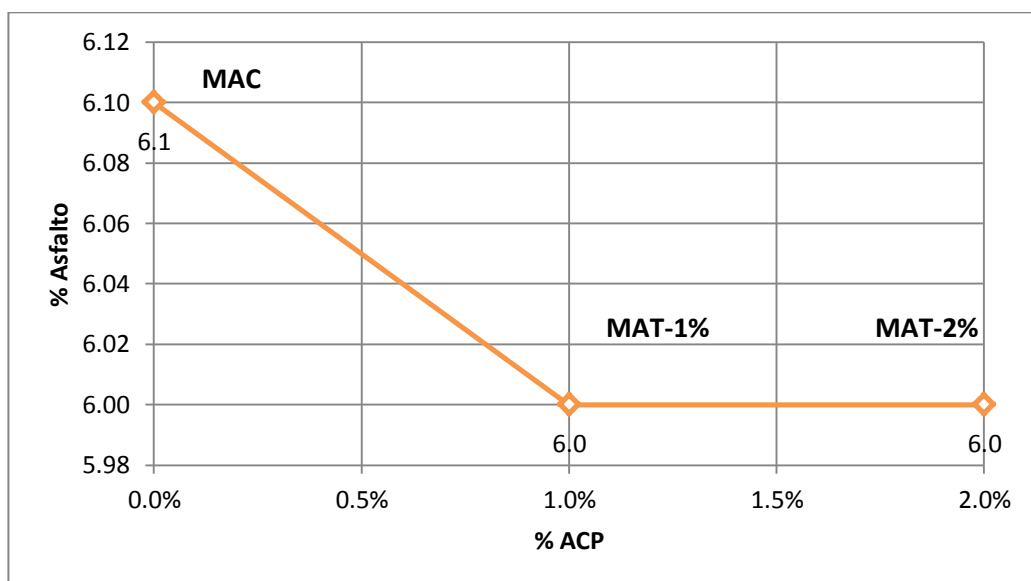


Figura. 105: Variación del contenido de asfalto óptimo.

Según la Figura 105, para la MAC se tiene un contenido de asfalto de 6.1% y se disminuye para los dos casos de MAT-1% y MAT-2% al 6.0% es decir 0.1% lo cual no varía significativamente, entonces el diseño en cuanto al contenido de asfalto óptimo, se genera principalmente por la

granulometría de la mezcla y en contenido de relleno mineral (Pasante del tamiz No 200), además que se generaría un ahorro de un 0.1% de asfalto al utilizar el ACP como modificador.

- **Gravedad específica bulk de briquetas compactadas**

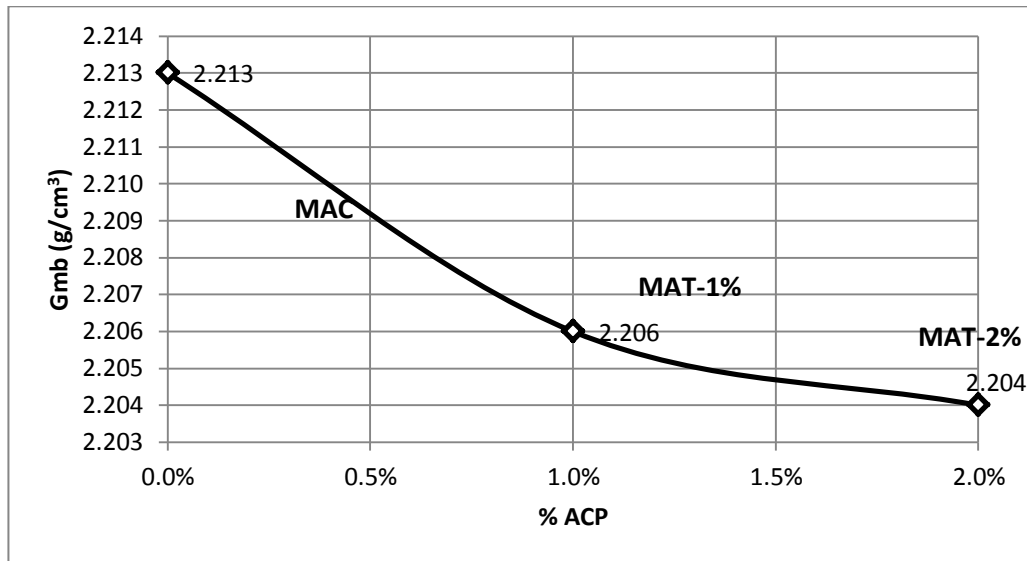


Figura. 106: Variación de la densidad de las briquetas en función del tipo de mezcla.

Según la Figura 106, se puede concluir que la densidad disminuyó en función del tipo de mezcla, así teniendo para la mezcla MAC una densidad de 2.213 g/cm^3 como el valor más alto y disminuye para la mezcla MAT-1% a un valor de 2.206 g/cm^3 y como el punto más bajo el valor de 2.204 g/cm^3 para la MAT-2%, este tipo de gráfica es similar al de estabilidad ya que al disminuir la densidad de la biqueta también disminuye la estabilidad, además que se disminuye la densidad en función también que el asfalto modificado es menos pesado de acuerdo a los ensayos de densidad relativa realizados.

- **Estabilidad Marshall**

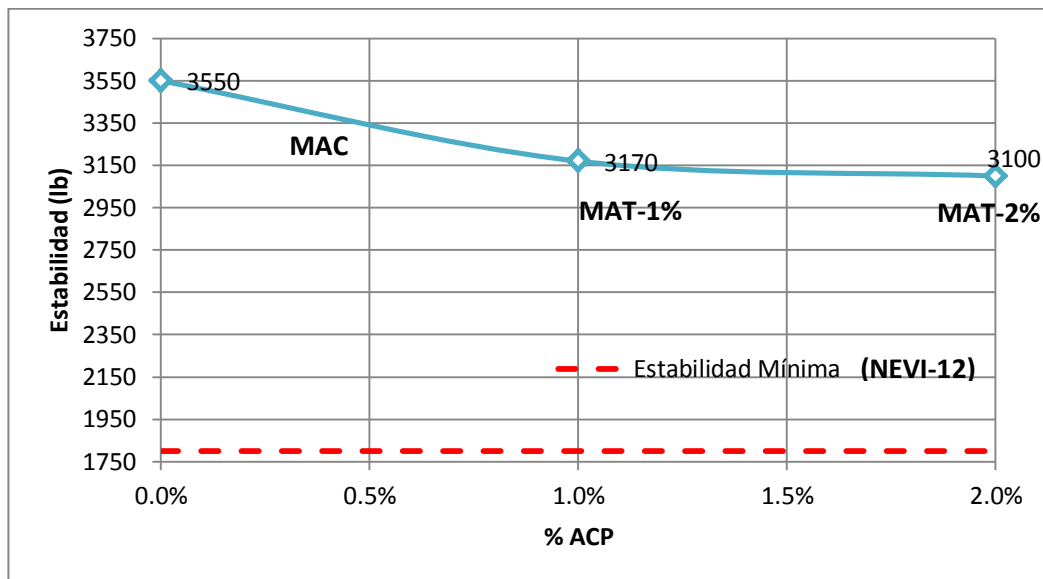


Figura. 107: Variación de la Estabilidad en función del tipo de mezcla.

Según la Figura 107, se puede establecer que todas las mezclas ensayadas cumplen el valor de estabilidad mínima que es 1800 lb, de manera que para la MAC se tiene el valor más alto con 3550 lb, siguiendo para la MAT-1% que disminuye a 3170 lb y para la MAT-2% disminuye hasta 3100 lb, pero estos valores altos de estabilidad pueden ser perjudiciales para el pavimento ya que puede generar un envejecimiento prematuro y por lo tanto una menor duración de la capa de rodadura debido al agrietamiento por fatiga (Padilla, 2008).

- **Flujo**

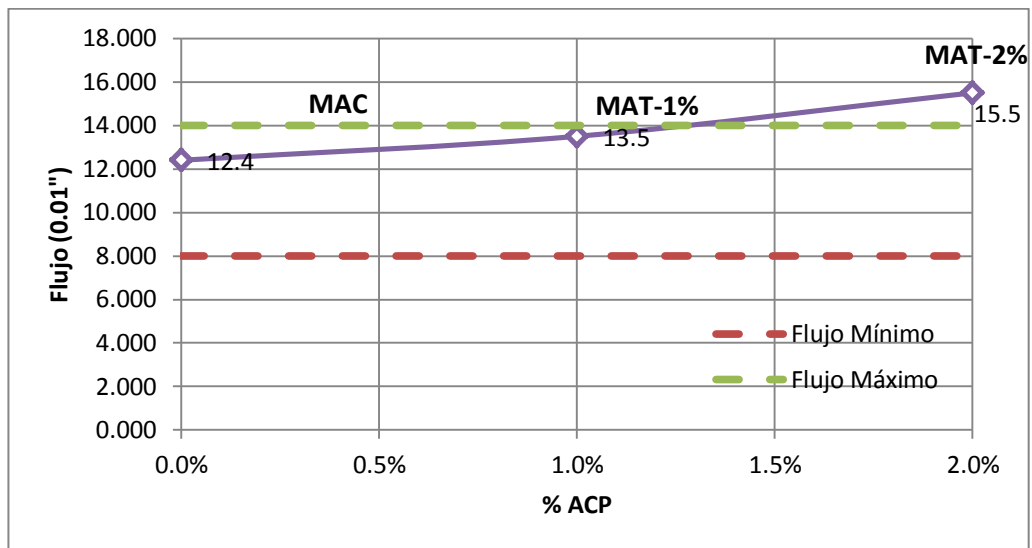


Figura. 108: Variación del flujo en función del tipo de mezcla.

Según la Figura 108, se puede evidenciar uno de los parámetros de desempeño que nos puede dar una idea del comportamiento del tipo de mezcla, en este caso como una base principal partimos del ensayo de penetración que nos mide la consistencia y de la misma manera este parámetro aumenta en función del incremento del porcentaje de ACP, de manera que para una mezcla MAC se tiene un flujo de 12.4 (0.01"), mientras que para una mezcla MAT-1% el flujo aumenta hasta 13.5 (0.01") y finalmente para una mezcla MAT-2%, se tiene un flujo de 15.5 (0.01"), de esta manera los que cumplen los límites entre 8 y 14 (0.01") son las mezclas MAC y MAT-1%.

- Vacíos de agregado mineral (V.A.M)

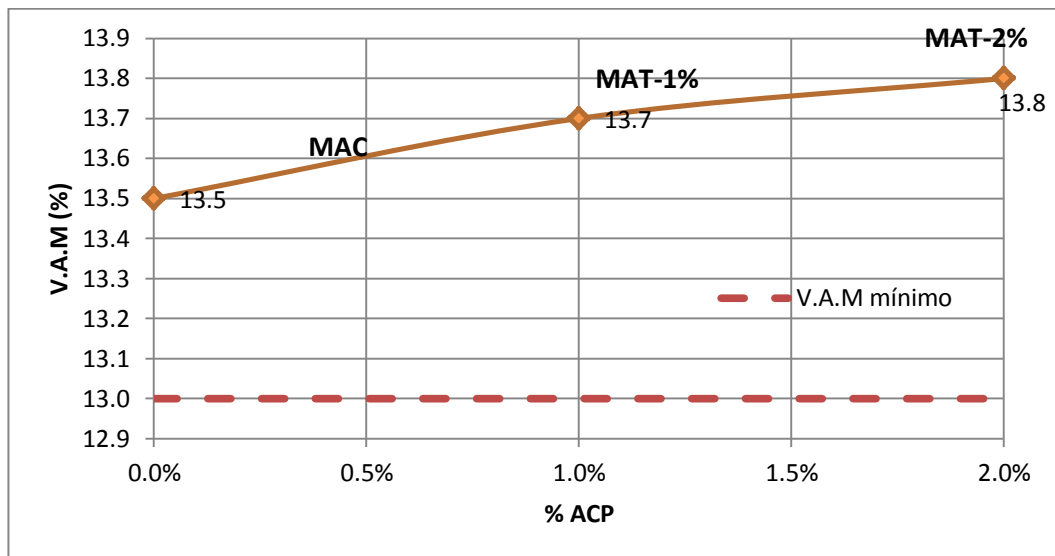


Figura. 109: Variación del porcentaje de VAM en función del tipo de mezcla.

Según la Figura 109, se puede ver la variación que se tiene en cuanto al porcentaje de vacíos de agregado mineral, el cual es la suma del volumen de vacíos de aire y del asfalto efectivo, en este caso se tiene que dicho porcentaje se incrementa, no significativamente pero va desde 13.5% para MAC siguiendo a 13.7 % de una MAT-1% hasta 13.8% para una MAT-2%. Este porcentaje es en función del porcentaje del volumen de la mezcla total. Cabe recalcar que el límite es 13% y esto está en función de la gravedad específica del agregado (G_{sb}), y de la gravedad bulk de las briquetas (G_{mb}), en este caso al disminuir la G_{mb} aumenta el VAM. Este parámetro debe ir aumentando y no bajar del mínimo para que el asfalto tenga espacio para la cohesión con el agregado.

- Vacíos llenos de asfalto (V.A.F)

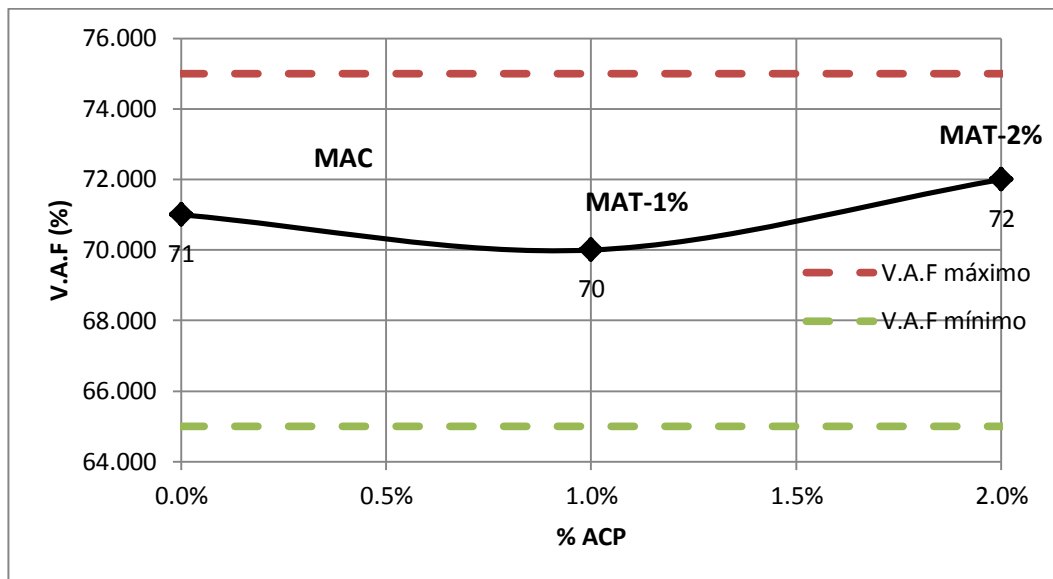


Figura. 110: Variación del porcentaje de VAF en función del tipo de mezcla.

Según la Figura 110, en relación al comportamiento de los vacíos llenos de asfalto, estos son un porcentaje respecto a los VAM, de tal manera que para una MAC se tiene un porcentaje de 71%, para una MAT-1% un 70% y para una MAT-2% un 72%. Este aumento se encuentra relacionado con la deformación o el flujo de la mezcla, de tal manera que al tener más vacíos llenos de asfalto la mezcla tiende a ser más deformable. Este parámetro al igual que el VAM, los Vacíos de aire, la densidad son parámetros volumétricos de la mezcla pero que a la final tienen influencia en el comportamiento en cuanto a la estabilidad y el flujo que generan las mezclas.

Capítulo 7 : Conclusiones y Recomendaciones

7.1. Conclusiones

7.1.1. Asfalto modificado

Viscosidad

- En la Figura 58, que se tiene la carta de viscosidad para los diferentes asfaltos modificados se concluye que a medida que se incrementa el contenido de ACP si tiene su influencia en reducir la viscosidad de manera que para el 1% de ACP se disminuyó 7 °C con respecto a la temperatura del asfalto base y para el 2% de ACP se disminuyó 10 °C.
- Se disminuye la temperatura de mezcla en 7°C a una dosificación al peso de 1% de ACP, consiguiendo de esta manera obtener una mezcla asfáltica tibia, considerando como mezcla tibia a cualquiera de las tecnologías o procedimientos que disminuyan las temperaturas de producción de una mezcla.
- El incremento del contenido de ACP genera un incremento de la variación de la viscosidad, pero a menores temperaturas, a partir de ello se puede considerar como porcentaje óptimo al 1% para evitar a bajas temperaturas se produzca ahuellamiento de la capa de rodadura por la baja consistencia del asfalto, de manera que el 2% disminuye en exceso la viscosidad lo cual puede ser contraproducente.

- A menores temperaturas el potencial reductor del ACP es mucho mayor que a las altas temperaturas, esto puede ocurrir debido a que el punto de fusión del ACP es bajo (alrededor de 30-40 °C) y esto genera que el asfalto tenga más contenido de resina y aceites lo cual lo hace más blando y que para lo cual a temperaturas de servicio el asfalto puede ser deformable en mayor manera. A altas temperaturas e concluye que su influencia es menor y a medida que aumentemos el contenido de ACP al final su comportamiento va a ser similar.

Control de calidad de asfalto

Tabla 67: Comparación de los parámetros realizados en el asfalto y sus diferentes contenidos de ACP.

Parámetro	% de Aceite Crudo de Palma		
	0%	1%	2%
Penetración	C	C	N
Reblandecimiento	C	N	N
Índice de Penetración	C	N	C
Ductilidad	C	C	C
Punto de Inflamación	C	C	C
Densidad relativa	C	C	C

C= cumple N= no cumple

- El asfalto AC-20 que se ha muestreado para el estudio, cumple las especificaciones estipuladas en el NEVI-12 de acuerdo a todos los parámetros analizados (ver tabla 67) de manera que se lo considera apto para ser modificado.
- Se ha obtenido el asfalto modificado con ACP y se ha elegido los porcentajes de ACP óptimos que cumplan la mayoría de las

especificaciones como se puede ver en la tabla 67 que para el 1% de ACP el asfalto no cumple en el ensayo de reblandecimiento y el índice de penetración y para el 2% no cumple en cuanto a la penetración y reblandecimiento con lo cual el porcentaje óptimo queda regido por los parámetros a evaluarse en el diseño Marshall.

- El ACP tiene bajo punto de fusión es decir de pasar de estado sólido a líquido a una baja temperatura, debido a esto a medida que se incrementa el porcentaje de adición del aditivo se evidencia en los ensayos de penetración que a 25°C se incrementa la penetración, lo cual no debería ser así ya que a temperaturas de servicio debería brindar el aditivo rigidez al asfalto.
- Los ensayos experimentales utilizados como la penetración, reblandecimiento e índice de penetración combinados con la medición de la viscosidad, pueden fallar a la hora de caracterizar el asfalto y pueden describir las propiedades visco elásticas necesarias para relacionar las propiedades físicas y su comportamiento de servicio pero estos ensayos no nos dan el comportamiento en el tiempo y como se podría comportar el asfalto.

7.1.2. Diseño Marshall

Tabla 68: Parámetros de evaluación del desempeño de las mezclas evaluadas.

Parámetro	Tipo de Mezcla		
	MAC	MAT-1%	MAT-2%
Estabilidad	C	C	C
Flujo	C	C	N

C= cumple N= no cumple

- Se realizó el diseño Marshall para la mezcla asfáltica en caliente y mezcla asfáltica tibia, de manera que se ha conseguido realizarlas en función de las viscosidades y temperaturas indicadas por el método en cuanto a la producción de dichas mezclas, especificando la granulometría dentro de los rangos de tipo densa y que para el caso de la mezcla MAC y MAT-1% cumple con las especificaciones estipuladas en la norma NEVI-12 y que en la Tabla 68 se evidencia que cumplen con los parámetros en cuanto a estabilidad y flujo.
- La mezcla asfáltica MAT-2% falló en cuanto al resultado obtenido en cuanto al valor del flujo con lo cual para estas circunstancias se lo excluye por no cumplir con este parámetro.
- De acuerdo a los parámetros de la Tabla 67 y 68 el porcentaje de adición óptimo para realizar una mezcla asfáltica tibia con una reducción de 7 °C en la temperatura de mezcla y de 6 °C en la temperatura de producción es de 1% de ACP.
- La disminución de las temperaturas de producción no es significativa pero considerando que productos terminados como las Ceras Fischer Tropsch tienen una reducción de entre 15 y 50 °C, para lo cual el resultado obtenido en el presente proyecto de investigación, es aproximadamente la mitad de lo que reduce dicho producto patentados por lo tanto es una base para emprender futuras investigaciones al respecto, considerando que es un avance en este tema debido a que en el país no se registra investigaciones de temas similares.

- El desempeño de la mezcla MAC y la MAT-1% es de similares características y que cumplen con las especificaciones de diseño Marshall, teniendo en cuenta que la MAT-1% el flujo es más alto, pero la estabilidad disminuye con lo cual los dos tipos de mezclas se las puede utilizar para capa de rodadura teniendo para la MAC un temperatura de mezcla de 156 °C y de compactación de 143 °C y para la mezcla MAT-1% una temperatura de mezcla de 149 °C y de compactación de 137 °C.
- A partir del estudio de Shell Bitumen en Florencia, Italia, sobre la exposición laboral al uso de mezclas asfálticas en caliente y su proceso de producción, se define que dichas mezclas, son perjudiciales para la salud y el medio ambiente por el nivel de emisiones de gases generadas.

7.2.Recomendaciones

- Se recomienda utilizar el 1% de ACP en relación al peso del asfalto, como modificador de la viscosidad para realizar el diseño de mezcla asfáltica tibia.
- Para el 1% de dosificación de ACP, es recomendable utilizar para el diseño por el método Marshall, la temperatura de mezcla: 149°C y para temperatura de compactación: 137°C.
- Se recomienda utilizar el Aceite Crudo de Palma, como reductor de viscosidad del asfalto, siempre y cuando cumpla dicho aceite con los

parámetros de calidad exigidos, de manera que pueda disminuir las temperaturas de producción de mezclas asfálticas y además investigar los resultados en cuanto a la realización en función de varios proveedores de ACP.

- Es importante tomar en cuenta que el ACP puede ser perjudicial a temperaturas de servicio ya que a menores temperaturas el potencial reductor es mayor y eso puede generar ahuellamientos en el pavimento, se recomienda realizar ensayos de deformación como el ensayo de la rueda cargada.
- Se recomienda realizar el ensayo de envejecimiento del asfalto por medio de horno de película delgada para tener una idea del cambio de las propiedades después del ensayo.
- Los ingenieros civiles podemos ayudar a la disminución de la contaminación del medio ambiente mediante proyectos que sean sustentables, de tal manera que debemos ser socialmente responsables en cuanto a las obras que se realizamos considerando que podemos ser más eficientes en los procesos realizados y sobre todo se destine recursos para emprender proyectos de investigación que ayuden como en este caso a la disminución de la contaminación, recomendando finalmente que se investigue en relación al tema y se difunda en el país para generar interés en el mismo.

7.3. Referencias bibliográficas

- ADVERA. (2012). *Adverawma*. Recuperado el Noviembre de 2013, de <http://www.adverawma.com/index.html>
- Al-Rawashdeh. (2008). Performance Assessment of Warm Mix Asphalt (WMA) Pavements. *Performance Assessment of Warm Mix Asphalt (WMA) Pavements*. Ohio, Ohio, USA: A Master of Science Thesis. Rus College of Engineering and Technology. Ohio University.
- Alvarado, A. (2011). Análisis de métodos para el estudio granulométrico de Áridos de mezclas asfálticas. *Análisis de métodos para el estudio granulométrico de Áridos de mezclas asfálticas*. Santiago de Chile, Chile: Memoria para optar al título de ingeniero civil.
- Amestoy Alonso, J. (2010). *El planeta tierra en peligro. Calentamiento global, cambio climático, solución*. Alicante, España: Editorial Club Universitario.
- ANCUPA. (2012). *Estadísticas Nacionales*. Recuperado el Jueves 14 de Noviembre de 2013, de Estadísticas Nacionales: www.ancupa.com
- Asphalt Institute. (1993). *Manual de Especificaciones del Instituto del Asfalto*. Estados Unidos de Norte América.
- ASPHAMIN. (2012). *ASPHAMIN*. Recuperado el Miércoles 13 de Noviembre de 2013, de ASPHAMIN: <http://www.aspha-min.com/effect-and-application.html>
- Bolzan, P., Balige, M., Bisio, A., & Gimenez, D. (2010). Mezclas asfálticas en caliente elaboradas y compactadas a menores temperaturas. *Mezclas asfálticas en caliente elaboradas y compactadas a menores temperaturas*. Buenos Aires, Argentina: XXXVI Reunión del Asfalto “Bicentenario de los Andes”.

Ceca Arkema Group. (2012). *Aditivo CECABASE RT para mezclas tibias de asfalto*. Recuperado el Lunes 11 de Noviembre de 2013, de Aditivo CECABASE RT para mezclas tibias de asfalto: http://www.cecachemicals.com/sites/ceca/en/business/bitumen_additives/warm_coated_material/warm_coated_material.page.

Comisión Permanente del Asfalto, CPA. (2008). *Especificaciones Técnicas de mezclas asfálticas*.

D'Angelo, J., Harm, E., Bartoszek, J., Baumgardner, G., Corrigan, M., Cowser, J., y otros. (2007). *Warm-Mix Asphalt: European Practice. European Tour FHWA*. American Trade Initiatives.

Don Brock, J. (1999). *Oxidación del Asfalto*. USA: ASTECINC.

Federal Highway Administration FHWA. (2008). *Warm Mix Asphalt: European Practice, Report FHWA-PL-08-007*. Washington D.C: United States Department of Transportation.

Gamica, P., Delgado, H., Gómez, J., Romero, S., & Alarcón, H. (2004). Aspectos del diseño volumétrico de mezclas asfálticas. *Aspectos del diseño volumétrico de mezclas asfálticas*. México: Instituto Mexicano del Transporte. Publicación Técnica N° 246. Sanfadila, Qro.

García, L. (2009). Reología de ligantes asfálticos mediante el viscosímetro Brookfield. *Reología de ligantes asfálticos mediante el viscosímetro Brookfield*. LEMaC, Centro de Investigaciones Viales.

González, W. (2007). Guía básica para el uso de emulsiones asfálticas en la estabilización de bases en caminos de baja intensidad en El Salvador. *Guía básica para el uso de emulsiones asfálticas en la estabilización de bases en caminos de baja intensidad en El Salvador*. El Salvador: Tesis de grado previo a la obtención del grado de Ingeniero Civil. Escuela de Ingeniería Civil, UES. El Salvador.

Hernández, H., Molina, E., & Reyes, C. (2008). Propuesta de elaboración de un manual práctico para el control de calidad en el mantenimiento de

pavimentos asfálticos. *Propuesta de elaboración de un manual práctico para el control de calidad en el mantenimiento de pavimentos asfálticos*. San Miguel, El Salvador: Universidad de Oriente.

HMAT. (2008). Hot Mix Asphalt. *HMAT*.

Labic. (2012). Investigación de nuevas mezclas de baja energía para la rehabilitación superficial. *Investigación de nuevas mezclas de baja energía para la rehabilitación superficial*. Granada, España: Laboratorio de ingeniería y construcción, Universidad de Granada.

Larsen, D., Daguerre, L., Williams, E., Asurmendi, A., & Ferrin, L. (2010). Aplicación de mezclas asfálticas tibias en la ciudad autónoma de Buenos Aires- Tramos experimentales. *Aplicación de mezclas asfálticas tibias en la ciudad autónoma de Buenos Aires- Tramos experimentales*. Laboratorio de Pavimentos e Ingeniería Vial. Departamento de Construcciones. Facultad de Ingeniería UNLP.

Lecomte, M., Deygout, F., & Menetti, A. (2008). Emission and occupational exposure at lower asphalt production and laying temperatures. *Emission and occupational exposure at lower asphalt production and laying temperatures*. Francia: Shell Bitumen.

Linares, L., Moran, R., & Peñate, R. (2010). Diseño de mezcla asfáltica semicaliente drenante en el Salvador. *Diseño de mezcla asfáltica semicaliente drenante en el Salvador*. Santa Ana, El Salvador: Tesis de grado previo a la obtención del grado de Ingeniero Civil. Universidad del Salvador. Santa Ana.

Lopera, C. (2011). Diseño y producción de mezclas asfálticas tibias, a partir de la mezcla de asfalto y aceite crudo de palma (*Elaeis Guineensis*). *Diseño y producción de mezclas asfálticas tibias, a partir de la mezcla de asfalto y aceite crudo de palma (Elaeis Guineensis)*. Medellín, Colombia: Informe final de investigación aplicada presentado como requisito para optar al título de Máster en Ingeniería Infraestructura y

Sistemas de Transporte. Universidad Nacional de Colombia - Facultad de Minas – Medellín.

MAGAP. (2012). *Informe Situacional de la cadena de Palma. Subsecretaría de comercialización*. MAGAP Ministerio de Agricultura Ganadería Acuacultura y Pesca.

Mamlouk, M., & Zaniewski, J. (2008). *Materiales para ingeniería civil*. Prentice Hall. 2da Edición.

Mcasphalt. (2012). *Mcasphalt*. Obtenido de Mcasphalt: <http://www.mcasphalt.com/en/products/view/1/2>

Ministerio de Transporte y Obras Públicas. (2012). *Norma Ecuatoriana Vial NEVI-12*. Quito, Ecuador: Dirección de estudios. Ecuador 2012.

National Cooperative Highway Research Program, N. (2011). *Mix Design Practices for Warm Mix Asphalt. Mix Design Practices for Warm Mix Asphalt*. Washington D.C., USA: Report 691, Transportation Research Board.

Oleofinos S.A de C.V. (2010). *Oleofinos S.A de C.V.* Recuperado el Martes 12 de Noviembre de 2013, de Oleofinos S.A de C.V: http://palma.aceitescomestibles.com/index.php?option=com_content&view=article&id=60:aceite-crudo-de-palma&catid=39:aceite-crudo-de-palma&Itemid=30

Ortega, R., & Córdova, M. (2008). *Costes económicos del cambio Climático. Costes económicos del cambio Climático*. Madrid, España: Artículo científico. Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales. Universidad San Pablo-CEU.

Pacheco, F. (2008). *Impacto ambiental de las plantas de asfalto*. Argentina: Universidad Nacional de Argentina.

Padilla, A. (2008). *Mezclas Asfálticas. Mezclas Asfálticas*. Cataluña, España: Universidad Politécnica de Cataluña.

- Ramirez, A., & Ulloa, C. (2008). Comportamiento de mezclas asfálticas tibias modificadas con ceras. *Comportamiento de mezclas asfálticas tibias modificadas con ceras*. Bogotá, Colombia: Universidad Militar de Nueva Granada.
- Red Institucional de Tecnologías Limpias, R. (2013). *Análisis Ambiental de Fabricación de Mezclas Asfalto – Agregado para la pavimentación, Fuentes Principales de Contaminación*. Recuperado el Miércoles 13 de Noviembre de 2013, de Análisis Ambiental de Fabricación de Mezclas Asfalto – Agregado para la pavimentación, Fuentes Principales de Contaminación: http://www.tecnologiaslimpias.org/html/central/354002/354002_fucon.htm
- Sasobit. (2012). *Sasobit*. Recuperado el Martes 5 de Noviembre de 2013, de Sasobit: <http://www.sasolwax.us.com/sasobit.html>
- Senior, V. (2013). Diseño de mezclas asfálticas drenantes tibias, a partir de cemento asfáltico AC 60-70 con LICOMONT BS-100 para diferentes niveles de precipitación. *Diseño de mezclas asfálticas drenantes tibias, a partir de cemento asfáltico AC 60-70 con LICOMONT BS-100 para diferentes niveles de precipitación*. Medellín, Colombia: Informe final de investigación aplicada presentado como requisito para optar al título de Máster en Ingeniería Infraestructura y Sistemas de Transporte. Universidad Nacional de Colombia - Facultad de Minas.
- Ulloa, A. (2011). *Mezclas asfálticas tibias (MAT)*. Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA), Boletín Técnico Volumen 2 No 15.