



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE INGENIERIA

TESIS PREVIA A LA OBTENCION DEL TÍTULO DE MAGÍSTER EN INGENIERIA  
VIAL

“USO DE LUBRICANTES DESECHADOS DE VEHICULOS COMO  
REJUVENECEDORES DE LIGANTES BITUMINOSOS Y SU APLICACIÓN EN  
MEZCLAS ASFALTICAS EN CALIENTE HMA”

POSTULANTES:

ALEXANDRA PATRICIA GUERRERO GODOY  
HERNÁN VLADIMIR PAZMIÑO CHILUIZA

DIRECTOR

ING. GUSTAVO YÁNEZ C.

DEDICATORIA:

A nuestra querida familia, presente siempre.

## AGRADECIMIENTO:

A Dios por sus bendiciones.

Al laboratorio de materiales de construcción de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador.

A las empresas IMPTEK y EMULDEC, por su colaboración.

Al Ing. Gustavo Yáñez Director de este estudio por su guía y soporte en el transcurso del proyecto.

## RESUMEN:

Según la composición química de los ligantes con respecto a su contenido de asfaltenos y maltenos, se puede anotar que los componentes más volátiles se pierden, en una parte debido a los gradientes de temperatura a los que se expone en los procesos de mezcla y construcción y por otra parte por las condiciones ambientales y de servicio en campo. El envejecimiento se traduce en pérdida de los componentes livianos del ligante, y el correspondiente aumento del porcentaje de asfaltenos dentro del bitumen. Considerando adicionalmente que los aceites lubricantes de motor de vehículos livianos tienen la misma naturaleza de las resinas y aromáticos que componen el bitumen, se estudia la factibilidad de su aplicación como rejuvenecedor de asfalto y su aplicación en mezclas asfálticas en caliente HMA.

## ABSTRACT

Depending on the chemical composition of the binders with respect to their content of asphaltenes and maltenos, it can be noted that the more volatile components are lost, in part because of the temperature gradients to which it is exposed in the mixing and construction processes and On the other hand by the environmental conditions and service in the field. Aging results in loss of the light components of the binder, and the corresponding increase in the percentage of asphaltenes within the bitumen. Considering additionally that motor lubricating oils of light vehicles have the same nature of the resins and aromatics that make up the bitumen, the feasibility of its application as an asphalt rejuvenator and its application in hot asphalt mixtures HMA is studied.

## CONTENIDO

CAPITULO 1 .....	1
1 Generalidades. ....	1
1.1 Introducción. ....	1
1.2 Objetivos. ....	3
1.2.1 Objetivo General. ....	3
1.2.2 Objetivos Específicos. ....	3
1.3 Prácticas en la disposición de residuos de lubricantes. ....	4
1.3.1 Definición de Aceites Lubricantes Usados. ....	4
1.3.2 Lubricación. ....	4
1.3.3 Funciones del Lubricante. ....	4
1.3.4 Composición de los Lubricantes. ....	4
1.3.5 Viscosidad de los Lubricantes. ....	5
1.3.6 Desechos de Lubricantes. ....	5
1.3.7 Fuentes de los Desechos de Lubricantes. ....	7
1.3.8 Uso de los Desechos de Lubricantes. ....	9
1.4 Ligantes Bituminosos. ....	10
1.4.1 Métodos de Fabricación. ....	10
a. Betunes de destilación directa. ....	10
b. Betunes sopladados. ....	11
c. Betunes sopladados y reconstituidos. ....	11
d. Betunes reconstituidos. ....	11
1.4.2 Composición Química. ....	12
a. Saturados. ....	14
b. Aromáticos. ....	14
c. Resinas. ....	14
d. Asfaltenos. ....	14
1.4.3 Caracterización. ....	16
a. Carácter Termoplástico. ....	16
b. Buena adhesividad. ....	17
c. Buen comportamiento mecánico y reológico. ....	17
d. Resistencia al envejecimiento. ....	18
1.4.4 Desempeño Superpave. ....	19
1.4.5 Comportamiento Reológico del Ligante Asfáltico. ....	20
a. Ensayos Reológicos Dinámicos. ....	22
b. Ensayos Reológicos Estáticos. ....	23
1.4.6 Envejecimiento del Ligante Bituminoso. ....	24
a. Envejecimiento a Corto Plazo. ....	25
b. Envejecimiento a Largo Plazo. ....	27
1.5 Rejuvenecedor de Ligantes. ....	28
1.6 Mezcla Asfáltica. ....	30
1.6.1 Tipos de Mezclas Asfálticas. ....	30
a. Mezclas asfálticas en frío. ....	31
b. Mezclas asfálticas tibias. ....	31
c. Mezclas asfálticas en caliente. ....	31
d. Mezclas asfálticas densas. ....	31
e. Mezclas asfálticas abiertas. ....	31

f.	Mezclas asfálticas discontinuas.....	31
1.7	Mezcla asfáltica Superpave. ....	32
1.7.1.	Selección de los Materiales. ....	33
a.	Propiedades de Consenso. ....	34
a.1.	Angularidad del Agregado Grueso. ....	34
a.2.	Angularidad del Agregado Fino. ....	35
a.3.	Partículas Planas y Alargadas. ....	36
a.4.	Equivalente de Arena. ....	36
b.	Propiedades de la Fuente de Origen. ....	37
b.1.	Tenacidad. ....	37
b.2.	Durabilidad. ....	38
b.3.	Materiales Deletéreos. ....	38
1.7.2.	Granulometría. ....	38
1.7.3.	Método Bailey - Selección del Esqueleto Mineral. ....	40
a.	Empaquetamiento del Agregado. ....	41
b.	Agregados Gruesos [AC] y Agregados Finos [AF]. ....	42
c.	Combinación de Agregados por Volumen – Pesos Unitarios RUW, LUW.....	42
d.	Relación CA - Relación del Agregado Grueso de la Mezcla Combinada. ....	43
e.	Relación FAc. - Porción Gruesa del Agregado Fino de la Mezcla Combinada. ....	43
f.	Relación FAf – Porción Fina del Agregado Fino de la Mezcla Combinada. ....	44
g.	Variaciones para Mezclas Densas Finas. ....	44
h.	Variaciones para Mezclas Densas Gruesas. ....	44
1.7.4.	Requerimientos Volumétricos de la Mezcla Superpave. ....	45
a.	Gravedad específica de los agregados. ....	45
b.	Absorción de asfalto. ....	48
c.	Contenido del asfalto efectivo. ....	49
d.	Vacíos de agregado mineral. ....	49
e.	Vacíos de Aire. ....	50
f.	Vacíos Llenos de Asfalto. ....	50
g.	Relación Filler – Ligante. ....	51
1.7.5.	Compactador Giratorio Superpave. ....	52
1.7.6.	Daño Inducido por Humedad. ....	58
CAPITULO 2.....		59
2	Estudios de Laboratorio. ....	59
2.1	Estudios en el Aceite Desechado. ....	59
2.1.1	Punto Inflamación y Combustión. ....	59
2.1.2	Viscosidad. ....	60
2.2	Simulación del Envejecimiento a Corto Plazo. ....	61
2.3	Simulación del Envejecimiento a Largo Plazo. ....	63
2.4	Mezcla de Ligante Envejecido con Rejuvenecedor. ....	64
2.5	Caracterización por Desempeño de los Ligantes. ....	67
2.6	Elaboración HMA de Referencia Método Superpave. ....	76
2.6.1.	Requisitos del Ligante. ....	76
2.6.2.	Requisitos del Agregado Combinado. ....	81
2.6.3.	Granulometría. ....	88

2.6.4.	Método Bailey para Diseño de la Mezcla Combinada .....	90
a.	CUW de cada agregado grueso. Paso 1.....	91
b.	Contribución de cada Agregado Grueso. Paso 2.....	92
c.	Vacíos en los Agregados Gruesos. Paso 3. ....	92
d.	Contribución de cada Agregado Fino. Paso 4.....	93
e.	Peso Unitario de la Mezcla. Paso 5.....	93
f.	Porcentaje Estimado % Inicial en Peso de cada Agregado. Paso 6.....	93
g.	Tamaño Máximo Nominal NMPS y Tamiz Control Primario PCS. Paso 7. ....	94
h.	Determinar el AF en cada depósito AC. Paso 8.....	95
i.	Suma de Agregado Finos en Todos los AC. Paso 9.....	95
j.	Determinar AC en cada Deposito de Agregado Fino. Paso 10.....	95
k.	Suma de Agregado Grueso en todos los AF. Paso 11.....	95
l.	Corregir las fracciones estimadas iniciales en % CA de la mezcla. Paso 12. ....	95
m.	Corregir las fracciones estimadas iniciales en % FA de la mezcla. Paso 13.....	96
n.	Determinar el pasante del #200 que contribuye cada agregado. Paso 14. ....	96
o.	Determinar la Cantidad de MF requerido. Paso 15.....	96
p.	Determinar los Porcentajes Finales de la Mezcla. Paso 16.....	97
q.	Determinar los Radio para el AC y AF. Paso 17. ....	98
2.6.5.	Requisitos Superpave para los agregados combinados.....	99
2.6.1.	Contenido Inicial de Ligante.....	101
2.6.2.	Carta de Viscosidad para el Ligante de Referencia.....	104
2.6.3.	Mezcla Asfáltica Superpave.....	105
2.6.4.	Evaluación Parámetros Volumétricos Mezcla de Referencia. ....	107
2.6.5.	Contenido de Ligante de Diseño Mezcla de Referencia. ....	113
2.7	Elaboración de HMA con Ligante Rejuvenecido.....	119
CAPITULO 3 .....		121
3	Análisis de Resultados. ....	121
3.1	Análisis de Propiedades del Ligante Virgen y Ligante Rejuvenecido. ....	123
3.2.1.	Punto de Chispa.....	123
3.2.2.	Composición Química.....	124
3.2.3.	Reómetro de Corte Dinámico en Condición Original.....	126
3.2.4.	Reómetro de Corte Dinámico en Condición Envejecida a Corto Plazo.....	131
3.2.5.	Cambio de Masa.....	137
3.2.6.	Reómetro de Corte Dinámico en Condición Envejecida a Largo Plazo. ....	138
3.2.7.	Evaluación de la Fluencia y Rigidez en Temperaturas Bajas. ....	142
3.2	Análisis de la HMA de referencia y la HMA con ligante Rejuvenecido. ....	146
3.2.1.	Análisis de la HMA de Referencia.....	147
3.2.2.	Análisis de la HMA con ligante Rejuvenecido. ....	148
3.2.1.	Comparación de HMA de Referencia y HMA con Ligante Rejuvenecido.....	149
CAPITULO 4.....		151
4	Conclusiones. ....	151
5	Recomendaciones.....	153
6	Bibliografía.....	154
7	Anexos.....	157

**ÍNDICE DE TABLAS:**

Tabla 1 Composición Media de un Aceite Lubricante Virgen de Base Mineral .....	4
Tabla 2 Composición Media de un Aceite Usado según su procedencia.....	5
Tabla 3 Composición del Aceite Usado en el Ecuador.....	6
Tabla 4 Porcentaje de Matriculación Vehicular por Provincia .....	8
Tabla 5 Componentes Químicos de un Ligante Bituminoso.....	13
Tabla 6 Fracciones SARA % en peso para un Ligante Bituminoso.....	14
Tabla 7 Fracciones SARA % Asfalto 60/70 Expuesto 1 año al ambiente .....	15
Tabla 8 Fracciones SARA % Asfalto 80/100 Expuesto 1 año al ambiente .....	15
Tabla 9 Relaciones SARA de Asfalto Colombiano Expuesto 1 año al ambiente .....	16
Tabla 10 Requisitos Superpave de Diseño para Mezclas Asfálticas en Caliente.....	51
Tabla 11 N° de Giros del Compactador Superpave en Función del Tráfico.....	53
Tabla 12 Requisitos Superpave para HMA.....	56
Tabla 13 Contenido de Aceite Desechado en las Mezclas con Ligante Envejecido .....	65
Tabla 14 Lista de Mezclas en Función del % Aceite Desechado.....	68
Tabla 15 Clasificación Superpave para un PG 64.....	68
Tabla 16 Tabulación de Temperaturas Altas T° XX.....	79
Tabla 17 Temperaturas Desempeño para Ligante Asfáltico. ....	79
Tabla 18 Tabulación de Temperaturas Bajas T° YY .....	80
Tabla 19 Selección del Ligante en Base de la Velocidad de Tráfico y el Nivel de Tráfico....	81
Tabla 20 Requisitos Superpave para las Propiedades de Consenso de Agregados.....	82
Tabla 21 Angulosidad del Agregado Grueso 3/8. ....	82
Tabla 22 Partículas Planas y Alargadas. ....	83
Tabla 23 Equivalente de Arena. ....	83
Tabla 24 Propiedades de Fuente usadas en Ecuador.....	84
Tabla 25 Dureza del Agregado Grueso 3/4. ....	84
Tabla 26 Dureza del Agregado Grueso 3/8. ....	85
Tabla 27 Firmeza de los Agregados (resistencia sulfatos).....	85
Tabla 28 Materiales Deletéreos – Contenido Orgánico del Agregado.....	86
Tabla 29 Materiales Deletéreos – Terrones de Arcilla Agregado Grueso 3/4” .....	86
Tabla 30 Materiales Deletéreos – Terrones de Arcilla Agregado Fino y Medio 3/8.....	87
Tabla 31 Puntos de Control PCS para mezcla Superpave.....	88
Tabla 32 Tamices de Control Primario. Norma Superpave. ....	89
Tabla 33 Agregado Grueso, Medio y Fino utilizado en la mezcla.....	90
Tabla 34: Denominación de los Depósitos de Materiales. ....	91
Tabla 35 Gravedad Especifica, Absorción y Densidades de los Agregados.....	91
Tabla 36: Proporciones en Volumen de Mezcla de Material Grueso y Fino .....	92
Tabla 37: Tamices de Control para el Método Bailey .....	94
Tabla 38 Combinación de Agregados para la Mezcla de Diseño .....	97
Tabla 39 Combinación de Agregados para la Mezcla Asfáltica de Diseño .....	98
Tabla 40 Rangos Recomendados para el Método Bailey.....	98
Tabla 41 Puntos de Control Superpave para la mezcla combinada de Agregados .....	100
Tabla 42 Puntos de Control Superpave para la mezcla combinada de Agregados .....	100
Tabla 43 Contenido de Inicial de Ligante Asfáltico .....	104
Tabla 44 Viscosidad Ligante de Referencia.....	104
Tabla 45 Proporciones % en peso de Agregados - Método Bailey.....	107
Tabla 46 Formulación de la Mezcla Inicial de Prueba.....	107
Tabla 47 Gravedad Especifica Máxima Gmm .....	108
Tabla 48 Compactación Giratoria SGC .....	109
Tabla 49 Gravedad especifica Bulk Especímenes Compactados.....	110

Tabla 50 Densidades Corregidas en la mezcla de referencia .....	112
Tabla 51 Gravedad Especifica Máxima Muestras al: Pbe-0.5%, Pbe, Pbe+0.5% y Pbe+1% .....	113
Tabla 52 Especímenes compactados al: Pbe y Pbe-0.5%. .....	114
Tabla 53 Especímenes compactados al: Pbe+0.5% y Pbe+1%. .....	114
Tabla 54 Gravedad Especifica Bulk al: Pbe-0.5%, Pbe, Pbe+0.5% y Pbe+1% .....	115
Tabla 55 Parámetros Volumétricos al: Pbe-0.5%, Pbe, Pbe+0.5% y Pbe+1% .....	115
Tabla 56 Densidad Relativa Corregida para: Pbe-0.5%, Pbe.....	117
Tabla 57 Densidad Relativa Corregida para: Pbe+0.5%, Pbe.+1% .....	118
Tabla 58 Gravedades Especificas para Espécimen Compactado al N máximo. ....	118
Tabla 59 Densidades Relativas de Espécimen Compactado al N máximo. ....	119
Tabla 60 Fórmula Maestra de la HMA de Referencia. ....	119
Tabla 61 Gravedades Específicas de la HMA con Ligante Rejuvenecido.....	120
Tabla 62 Densidades Relativas de la HMA con Ligante Rejuvenecido .....	120
Tabla 63 Parámetros Volumétricos de la HMA con Ligante Rejuvenecido .....	121
Tabla 64 Densidad a N máx. de la HMA con Ligante Rejuvenecido. ....	121
Tabla 65 Contenido de Aceite Desechado en Mezclas M1 – M6.....	122
Tabla 66 Comparación Punto de Chispa en °C.....	123
Tabla 67 % Asfaltenos y Maltenos en Asfalto Esmeraldas .....	124
Tabla 68 Escala de Temperaturas Altas para Desempeño Superpave .....	126
Tabla 69 Ensayos DSR, condición Original, en Ligantes Virgen y Ligante Envejecido.....	126
Tabla 70 Ensayos DSR, condición Original, en Ligantes: M1 y M2.....	127
Tabla 71 Ensayos DSR, condición Original, en Ligantes: M3 y M4.....	127
Tabla 72 Ensayos DSR, condición Original, en Ligantes: M5 .....	128
Tabla 73 Mezclas M1 a M5, Temperaturas para las cuales $G^*/\text{Sen}D=1.0\text{kPa}$ . ....	128
Tabla 74 Ensayo DSR en muestra M6, mezcla de 30% de aceite desechado. ....	130
Tabla 75 Resumen de Estadísticas del ensayo DSR Original sobre la Mezcla 6.....	130
Tabla 76 Ensayos DSR, condición Envejecida, en Ligantes Virgen y Ligante Envejecido. ....	132
Tabla 77 Ensayos DSR, condición Envejecida, en mezclas M1 y M2. ....	132
Tabla 78 Ensayos DSR, condición Envejecida, en mezclas M3 y M4. ....	133
Tabla 79 Ensayos DSR, condición Envejecida, en mezcla M5 .....	133
Tabla 80 Ensayos DSR, condición Envejecida, en mezcla M6 .....	134
Tabla 81 Resumen de Estadísticas del ensayo DSR en RTFOT sobre la Mezcla 6.....	135
Tabla 82 Escala de Temperaturas Altas para Desempeño Superpave .....	136
Tabla 83 Ensayo DSR en RTFOT, Temperaturas para la cual $G^*/\text{Sen}D = 2.2 \text{ kPa}$ .....	136
Tabla 84 Cambio de Masa en % .....	137
Tabla 85 Ensayo DSR sobre PAV, para Ligante de Referencia y Ligante Envejecido .....	139
Tabla 86 Ensayo DSR sobre PAV, para Ligantes M3 y M5.....	139
Tabla 87 Ensayo DSR sobre PAV, para Ligante M6.....	140
Tabla 88 Temperaturas a las cuales $G^*\text{Sen}D \leq 5000\text{kPa}$ .....	140
Tabla 89 Escala de Temperaturas Bajas Superpave para el grado PG64.....	141
Tabla 90 Valores de Rigidez de Fluencia “S” Evaluación a temperaturas bajas .....	143
Tabla 91 Valores de la pendiente “m” Evaluación a temperaturas bajas .....	143
Tabla 92 Tabla 1 norma AASHTO M 320 para grado PG 64.....	144
Tabla 93 Propiedades de la HMA de Referencia .....	147
Tabla 94 Fórmula Maestra de Trabajo para HMA de Referencia.....	148
Tabla 95 Propiedades de la HMA elaborada con ligante Rejuvenecido .....	148
Tabla 96 Propiedades de HMA con ligante de referencia y rejuvenecido. ....	149

**ÍNDICE DE ILUSTRACIONES:**

Ilustración 1 Vehículos Matriculados por Año .....	8
Ilustración 2 Vehículos Matriculados por Tipo.....	8
Ilustración 3 Ligante Bituminoso Fluidificado, Fluxado, y Emulsión de Betún.....	10
Ilustración 4 Esquema de obtención de productos bituminosos. ....	11
Ilustración 5 Ligante Bituminoso: Asfalto Esmeraldas PG64-22 / AC 20, Planta IMPTEK...	13
Ilustración 6 Equipo Ensayo Penetración en Asfalto: Laboratorio PUCE.....	18
Ilustración 7 Equipo Ensayo Viscosidad en Asfalto: Laboratorio PUCE.....	19
Ilustración 8 Equipo Fragilidad en Asfalto: Laboratorio PUCE.....	19
Ilustración 9 Reómetro de Corte Dinámico ‘DSR’: Laboratorio PUCE.....	23
Ilustración 10 Reómetro de Viga a Flexión ‘BBR’: Laboratorio PUCE.....	24
Ilustración 11 Horno de Película Fina Rotatoria ‘RTFOT’: Laboratorio PUCE .....	26
Ilustración 12 Vasija de Envejecimiento a Presión ‘PAV’: Laboratorio PUCE.....	28
Ilustración 13 Mezclas con Rejuvenecedor: Laboratorio de Asfaltos de EMULDEC.....	30
Ilustración 14 Mezcla Asfáltica en Caliente HMA, metodología Superpave .....	33
Ilustración 15 Lotes de Agregados Gruesos y Finos Empresa COVIPAL .....	33
Ilustración 16 Muestras y Reducción de la Muestras previo los ensayos .....	34
Ilustración 17 Angularidad del Agregado Grueso.....	35
Ilustración 18 Angularidad del Fino, Laboratorio de Ensayos de COVIPAL .....	35
Ilustración 19 Equivalente de Arena Laboratorio de Materiales de Construcción PUCE .....	37
Ilustración 20 Durabilidad de los Áridos: Laboratorio de Materiales de Construcción PUCE	38
Ilustración 21 Granulometría Serie Fina y Gruesa de los Agregados. ....	40
Ilustración 22 Ejemplo de Muestra de Empaquetamiento de Agregados en HMA .....	41
Ilustración 23 Principio 3D del empaquetamiento del Agregado .....	42
Ilustración 24 Determinación de Pesos Unitarios LUW-RUW, Agregado Grueso y Fino.....	43
Ilustración 25 Tipos de Mezcla en función del CUW.....	45
Ilustración 26 Condición SSS, para Gravedad Especifica Agregado Fino y Grueso.....	46
Ilustración 27 Gravedad Especifica del Ligante .....	48
Ilustración 28 Esquema Volumétrico de HMA, e Ilustración de las Gravedades Específicas.	49
Ilustración 29 Compactador Giratorio SUPERPAVE – Laboratorio PUCE.....	52
Ilustración 30 Determinación de la Gravedad Especifica Máxima Teórica Gmm. ....	54
Ilustración 31 Determinación de la Gravedad Especifica Bulk Gmb. ....	55
Ilustración 32 Ensayo de Tensión Directa.....	59
Ilustración 33 Punto de Inflamación .....	60
Ilustración 34 Determinación de la Viscosidad con Viscosímetro Brookfield .....	61
Ilustración 35 Envejecimiento en Horno RTFOT y Ensayo de Cambio de Masa .....	62
Ilustración 36 Envejecimiento en Vasija de Presión ‘PAV’ .....	64
Ilustración 37 Mezcla de Ligante Envejecido con Aceite Desechado Laboratorio PUCE .....	66
Ilustración 38 Mezcla Ligante con Aceite Desechado Laboratorio EMULDEC.....	67
Ilustración 39 Ensayo de Envejecimiento a Corto Plazo y Ensayo DSR.....	71
Ilustración 40 Ensayo DSR en condición Original y condición Envejecida RTFOT .....	72
Ilustración 41 Ensayo DSR en condición Envejecida a largo Plazo ‘PAV’ .....	74
Ilustración 42 Ensayo de Reómetro de Viga a Flexión ‘BBR’ .....	75
Ilustración 43 Ensayo ‘BBR’ curva Log(S) versus Log(t) Temperatura -6°C.....	76
Ilustración 44 Agregado para la mezcla combinada .....	88
Ilustración 45. Puntos de Control Superpave en Mezcla Combinada por el Método Bailey.	101
Ilustración 46 Carta de Viscosidad Ligante de Virgen AC 20 – Ligante de Control.....	105
Ilustración 47 Mezcla de Agregados y Ligante.....	107
Ilustración 48 Grafica % Optimo de Ligante – HMA de Referencia.....	116

Ilustración 49 Grafica de Contenido de VMA – HMA de Referencia.....	116
Ilustración 50 Grafica de Densidad Relativa – HMA de Referencia. ....	117
Ilustración 51 Grafica de VFA – HMA de Referencia.....	117
Ilustración 52 Contenido de Aceite Desechado, % en Ligante Rejuvenecido .....	122
Ilustración 53 Comparación: Punto de Chispa de los Ligantes.....	124
Ilustración 54 Composición Química, Contenido de Asfáltenos. ....	125
Ilustración 55 Composición Química, Contenido de Asfáltenos y Maltenos. ....	125
Ilustración 56 Proyección Ensayo DSR, en mezclas M1 hasta la M5 .....	129
Ilustración 57 Ensayo DSR, en mezclas M1 hasta la M6, Gráfica de Rejuvenecimiento. ....	131
Ilustración 58 Proyección Ensayo DSR Envejecido, en mezclas M1 hasta la M5 .....	134
Ilustración 59 Ensayo DSR Envejecido, en mezclas M1 hasta la M6 .....	137
Ilustración 60 Ensayo de Cambio de Masa en Ligantes.....	138
Ilustración 61 Ensayo DSR en PAV .....	142
Ilustración 62 Resultados la rigidez ‘S’ ensayo BBR .....	145
Ilustración 63 Resultados de la pendiente ‘m’ ensayo BBR .....	145
Ilustración 64 Esquema para Diseño de la Fórmula Maestra de la HMA de Referencia.....	146
Ilustración 65 Comparación de parámetros volumétricos en las HMA .....	150
Ilustración 66 Comparación de Densidades en las HMA .....	150
Ilustración 67 Comparación de Curvas de Compactación en las HMA.....	151

## TABLA DE ACRÓNIMOS Y SIGLAS

<b>AASHTO</b>	American Association of State Highway and Transportation Officials - Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transportes
<b>AC</b>	Coarse Aggregate - Agregado Grueso
<b>AF</b>	Fine Aggregate - Agregado Fino
<b>AFc</b>	Relación de la Porción Gruesa del Agregado Fino
<b>AFf</b>	Relación de la Porción Fina del Agregado Fino
<b>ASTM</b>	American Society of Testing Materials - Sociedad Americana de Ensayos en Materiales
<b>BBR</b>	Bending Beam Rheometer - Reómetro de Viga a Flexión AASHTO T 313
<b>C</b>	Factor de corrección de la gravedad específica bulk medida y estiamda
<b>CA</b>	Relación de Agregado Grueso
<b>COVIPAL</b>	Constructora Vial Oviedo Palacios
<b>CUW</b>	Chosen Unit Weight -Peso Unitario Escogido - Densidad Escogida
<b>Cx</b>	-1.0 si Va es menor que 4.0%; 2.0 si Va es mayor que 4.0% Va=vacios aire
<b>D</b>	Ángulo de Desfase del Ligante Bituminoso
<b>DpAC</b>	Depósito Agregado Grueso "StockPile"
<b>DpAC</b>	Depósito Agregado Fino "StockPile"
<b>DSR</b>	Dynamic Shear Rheometer - Reómetro de Corte Dinámico AASHTO T 315
<b>DSR Orig.</b>	Ensayo DSR en condición original (sin envejecer)
<b>DSR RTOFT</b>	Ensayo DSR en condición envejecida en Horno Película Fina Rotatoria
<b>E</b>	Deformación en una muestra de Ligante Bituminoso
<b>EMULDEC</b>	Empresa Emulsiones del Ecuador
<b>ESALs</b>	Equivalente Single Axle Load - Ejes de Carga Simple Equivalente a 80kN (18000lb)
<b>EXA</b>	Agencia Civil Espacial Ecuatoriana
<b>G'</b>	Módulo Elástico de Ligantes Bituminosos
<b>G''</b>	Módulo Viscoso de Ligantes Bituminosos
<b>G*</b>	Módulo Dinámico o Módulo Complejo de Ligantes Bituminosos
<b>Gb</b>	Gravedad específica del ligante
<b>Ge</b>	Gravedad Específica Efectiva
<b>Gm</b>	Peso Unitario del Agua 1 g/cm <sup>3</sup>
<b>Gmb</b>	Gravedad Específica bulk espécimen compactado
<b>Gmm</b>	Gravedad Específica Máxima mezcla suelta
<b>Gsa</b>	Gravedad Específica Aparente de la mezcla de Agregados
<b>Gsb</b>	Gravedad Específica Bulk de la mezcla de Agregados
<b>Gse</b>	Gravedad específica efectiva mezcla
<b>γw</b>	Densidad del agua = 1 g/cm <sup>3</sup> .
<b>HMA</b>	Hot Mix Asphalt - Mezcla Asfáltica en Caliente
<b>HS</b>	Medium Sieve - Tamiz Medio
<b>IMPTEK</b>	Empresa Impermeabilización Total - CHOVA del Ecuador
<b>ISO</b>	International Organization for Standardization - Organización Internacional de Estandarización
<b>Lat.</b>	Latitud en Grados
<b>LMC</b>	Laboratorio de Materiales de Construcción de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador.
<b>LUW</b>	Loose Unit Weight - Peso Unitario Suelto - Densidad Bulk Suelta

<b>m</b>	Pendiente de la Curva log(Rigidez) vs log(tiempo) ensayo AASHTO T 313 BBR
<b>Marshall</b>	Bruce G. Marshall Ingeniero de Caminos de Mississippi EEUU Método Diseño de HMA
<b>MF</b>	Mineral Filler - Relleno Mineral
<b>MPS</b>	Maximum Particle Size - Tamaño Máximo de Agregado Método Bailey
<b>N dis</b>	Número de Giros de Diseño en el Compactador Giratorio
<b>N ini</b>	Número de Giros Inicial en el Compactador Giratorio
<b>N máx</b>	Número de Giros Máximo en el Compactador Giratorio
<b>NCHRP</b>	National Cooperative Highway Research Program EEUU
<b>NMPS</b>	Nominal Maximum Particle Size - Tamaño Máximo Nominal de Agregado Método Bailey
<b>NQUIA</b>	Proyecto Nuevo Aeropuerto de Quito
<b>P</b>	Proporción en Peso de Agregados
<b>P0.075</b>	Contenido de agregado pasante del tamiz 0.075 mm, % en masa del agregado
<b>PAV</b>	Pressurized Aging Vessel - Vasija de Envejecimiento a Presión AASHTO R 28
<b>Pb</b>	Contenido de Asfalto
<b>Pba</b>	Contenido de asfalto absorbido
<b>Pbe</b>	Contenido de asfalto efectivo, % en masa del total de la mezcla.
<b>Pbe est</b>	Contenido de asfalto efectivo estimado, % en masa del total de la mezcla.
<b>Pbi</b>	Contenido inicial estimado ligante % en peso
<b>PC</b>	Puntos de Control - Graduación de Mezclas Metodología SUPERPAVE
<b>PCS</b>	Primary Control Sieve - Tamiz de Control Primario
<b>PG 64-18</b>	Performance-Graded "Grado de Desempeño del Ligante Bituminoso" ej.: 64°C Temperatura Alta; -18°C Temperatura Baja
<b>PG XX</b>	Temperatura Máxima para desempeño del Ligante Asfáltico en la HMA
<b>PG -YY</b>	Temperatura Mínima para desempeño del Ligante Asfáltico en la HMA
<b>Prm</b>	Promedio
<b>Ps</b>	Contenido en % de Agregados en la mezcla de diseño
<b>PUCE</b>	Pontificia Universidad Católica del Ecuador
<b>RTFOT</b>	Rolling Thin-Film Oven Test - Ensayo en Horno de Película Fina Rotativa AASHTO T 240
<b>RUW</b>	Rodded Unit Weight - Peso Unitario Compactado - Densidad Compactada
<b>S</b>	Módulo de Rigidez del Ligante Bituminoso AASHTO T 313 BBR
<b>SAE</b>	Society of Automotive Engineers - Sociedad de Ingenieros Automotrices
<b>SARA</b>	Saturados, Asfaltenos, Resinas, Aromáticos, componentes del asfalto.
<b>SCS</b>	Secondary Control Sieve - Tamiz de Control Secundario
<b>SGC</b>	Superpave Gyrotory Compactor - Compactador Giratorio Superpave
<b>SHRP</b>	Strategic Highway Research Program - Programa de Investigación Estratégica de Vías
<b>SMA</b>	Stone Mastic Asphalt - Masa Asfáltica de Piedras
<b>Sn</b>	Tamaño máximo nominal
<b>SSD</b>	Surface Saturated Dry
<b>SSS</b>	Saturado Superficialmente Seco,
<b>St</b>	Esfuerzo de Tensión Indirecta - Resistencia al Daño por Humedad AASHTO T 283
<b>STOA</b>	Short-Term Aging / periodo de acondicionamiento envejecimiento

<b>SUPERPAVE</b>	Superior Performing Asphalt Pavements - Desempeño Superior de Pavimentos Asfálticos AASHTO M320 Y M323
<b>T</b>	Tensión Aplicada a una muestra de Ligante Bituminoso
<b>t</b>	Tiempo ensayo 'BBR'
<b>Taire</b>	Temperatura del Aire °C
<b>TCS</b>	Tertiary Control Sieve - Tamiz de Control Terciario
<b>TM</b>	Tamaño Máximo Agregado SUPERPAVE
<b>TMN</b>	Tamaño Máximo Nominal Agregado SUPERPAVE
<b>TSR</b>	Relación del Esfuerzo de tensión - Resistencia al Daño por Humedad AASHTO T 283
<b>Txx</b>	Temperatura Máxima °C
<b>Tyy</b>	Temperatura Mínima °C
<b>UCE</b>	Universidad Central del Ecuador.
<b>Va</b>	Voids Air - vacíos de Aire
<b>Vba</b>	Volumen de ligante absorbido
<b>VFA</b>	Volumen Lleno de Asfalto
<b>VMA</b>	Voids Mineral Aggregate - Vacíos en el Agregado Mineral
<b>Vmx</b>	Volumen de compactación del molde, en función del Ø y la altura del espécimen.
<b>W</b>	Winter, Invierno, denominación de la viscosidad del aceite automotriz en invierno ej. SAE 10W30
<b>Wm</b>	Masa espécimen [g].
<b>Ws</b>	Masa del agregado en 1cm <sup>3</sup> de mezcla
<b>%Gmm@Ndis</b>	Densidad relativa corregida en N diseño.
<b>%Gmm@Nini</b>	Densidad relativa corregida en N inicial
<b>%Gmm@Nx</b>	Densidad relativa corregida en X giros de compactación
<b>%Gmmux</b>	Densidad relativa no corregida en el giro x durante la compactación

## CAPITULO 1

### 1 Generalidades.

#### 1.1 Introducción.

(Lesueur, 2008) manifiesta que:

A nivel mundial uno de los registros más antiguos de uso humano de ligantes bituminosos se registra en Siria, donde el bitumen era utilizado como material ligante para empuñaduras de varias herramientas, práctica común hasta finales del tiempo Neolítico. Al principio sus propiedades adhesivas y de impermeabilización eran apreciadas. Incluso en la Biblia se citan sus usos como la impermeabilización del Arca de Noé, en la Torre de Babel, o en la cuna de Moisés. Usos médicos se han reportado utilizando bitumen como remedio de varias enfermedades, como desinfectante, o como insecticida. Otra aplicación del bitumen se aprecia como embalsamiento de momias en Egipto. La primera mención de uso del bitumen en construcción de caminos se remonta a Babilonia alrededor del 625 A.C.: constaba de bitumen contenido en un mortero de cemento aplicado en la base de un cimiento hecho de tres o más capas de ladrillo quemado y losas de piedra colocadas en la parte superior. Posteriormente a inicios del siglo diez y nueve con el descubrimiento de minas de asfalto natural se llevó a cabo el desarrollo de las modernas aplicaciones de este material. El uso de bitumen en la construcción de caminos comienza en la década de 1910 con la llegada del proceso de destilación al vacío, que hace posible obtener bitumen artificial desde el petróleo. Actualmente hay una alta demanda de más de cien millones de toneladas métricas cada año de bitumen en el mundo del cual el 95%, son aplicadas en la industria de la pavimentación donde esencialmente el bitumen actúa como un ligante de agregados minerales, mezcla a la que se denomina: mezclas asfálticas, mezclas bituminosas, concreto asfáltico, o concreto bituminoso.

(Rubio, 1995)manifiestan que:

Con el nombre de ligante hidrocarbonado se denomina una amplia gama de materiales, de composición muy compleja y naturaleza hidrocarbonada, que posee propiedades adhesivas y aglomerantes, estos ligantes pueden ser naturales o manufacturados. Dentro de los naturales encontramos los asfaltos naturales y las rocas asfálticas. Los productos manufacturados son básicamente el alquitrán y los materiales bituminosos. Estos ligantes están compuestos por diferentes grupos de compuestos químicos que se clasifican como saturados, aromáticos, resinas, y asfáltenos, en una proporción tal que conforman un material viscoso, que constituye prácticamente el único ligante básico empleado en construcción de carreteras, ya que los alquitranes solamente se utilizan en aplicaciones especiales como son la pavimentación de algunas zonas de aeropuertos y estacionamientos.

Una mezcla asfáltica en caliente (HMA) por sus siglas en inglés, es la combinación de un ligante hidrocarbonado, áridos (incluye el polvo mineral), y eventualmente aditivos. Su proceso de fabricación implica calentar el ligante y los áridos, y su puesta en obra debe realizarse a una temperatura superior a los ciento treinta grados centígrados.

(Rubio, 1995) expresa que:

Las mezclas asfálticas en caliente (HMA) se emplean en la construcción de pavimentos ya sea en capas de rodadura o en capas inferiores y su función es proporcionar una superficie de rodamiento cómoda, segura y económica a los usuarios de las vías de comunicación facilitando la circulación de los vehículos aparte de transmitir adecuadamente las cargas debido al tránsito a la a sub rasante que lo soporta. Con el desarrollo industrial y comercial de las últimas décadas habido un proceso de crecimiento de la población, provocando un aumento en la demanda de materias primas, productos y energía, lo que genera un aumento en los residuos que no se manejan en forma adecuada debido a la gran informalidad y falta de alternativas técnicas para su tratamiento y disposición en lo especial referente a la generación de acetites usados de automotor.

La presente tesis aplica los actuales modelos desarrollados para simular el envejecimiento del ligante asfáltico debido a la volatilización de sus componentes livianos (aceites) en los procesos de mezclado, transporte, colocación, compactación y envejecimiento por oxidación debido a condiciones de servicio del bitumen en la mezcla asfáltica, buscando que con la aplicación de aceite desechado de automotor al ligante envejecido, se alcance un rejuvenecimiento del bitumen, presentando así una propuesta ambientalmente aceptable para la disposición de los residuos de lubricantes.

## **1.2 Objetivos.**

### **1.2.1 Objetivo General.**

Estimar las propiedades de un ligante bituminoso rejuvenecido mediante la aplicación de aceite desechado de vehículos livianos y obtener las características de su aplicación en la elaboración de una mezcla asfáltica en caliente HMA, como una propuesta amigable con el medio ambiente para la utilización y disposición de residuos de lubricantes para motores de vehículos.

### **1.2.2 Objetivos Específicos.**

**1.2.2.1** Establecer el porcentaje óptimo de mezcla de desechos de aceite automotriz como rejuvenecedor con el ligante envejecido y comparar sus propiedades físicas con las de un ligante estándar usado en la elaboración de mezclas asfálticas en caliente.

**1.2.2.2** Caracterizar la mezcla de ligante asfáltico rejuvenecido estableciendo las principales propiedades reológicas del mismo mediante la utilización del sistema SUPERPAVE.

**1.2.2.3** Realizar el cálculo y diseño de una mezcla asfáltica en caliente utilizando ligante rejuvenecido y comparar los resultados de estas mezclas con las propiedades físicas de una muestra característica de concreto asfáltico en caliente elaborada con ligante virgen.

**1.2.2.4** Proponer una alternativa amigable con el ambiente en la disposición de residuos de lubricantes para motores de vehículos dentro de la tecnología de elaboración de mezclas asfálticas.

### 1.3 Prácticas en la disposición de residuos de lubricantes.

#### 1.3.1 Definición de Aceites Lubricantes Usados.

Los aceites usados tienen su origen del cambio y reposición de lubricantes de máquinas, motores, piezas mecánicas que se hallan en constante fricción y generación de calor. Contienen residuos de limallas ferrosas, hollín, cenizas, agua y otros contaminantes.

#### 1.3.2 Lubricación.

(Gulf Oil, s.f.) indica que:

Los lubricantes refrigeran, evitan el desgaste de componentes mecánicos. El lubricante no elimina totalmente el rozamiento, aunque si lo disminuye notablemente. Esta disminución del rozamiento es la definición de lubricación. El rozamiento por contacto directo entre las superficies es sustituido por otro rozamiento interno mucho menor entre las moléculas del lubricante. A este rozamiento interno es lo que llamamos viscosidad.

#### 1.3.3 Funciones del Lubricante.

El objetivo de un lubricante es la de prevenir el deterioro de las partes en movimiento de un mecanismo, reduciendo su fricción y desgaste. El lubricante proporciona refrigeración a las piezas móviles y se encarga de la limpieza, arrastre y eliminación de residuos.

#### 1.3.4 Composición de los Lubricantes.

En la tabla siguiente se muestra una tabla con las propiedades de un lubricante.

Tabla 1

Composición Media de un Aceite Lubricante Virgen de Base Mineral

<b>Composición Media de Aceite Base Mineral</b>	
<b>Hidrocarburos Totales:</b>	<b>75%-85%</b>
<b>Aromáticos</b>	45 - 76%
<b>Alcanos</b>	13 - 45%
<b>Cicloalcanos</b>	10 - 30%
<b>Aditivos 5 - 20%</b>	
<b>Detergentes Sulfonatos, fosfonatos, fenolatos</b>	
<b>Anticorrosivos: Sulfonatos, Ditiolfosfatos de zinc y bario</b>	
<b>Antiespumantes: Siliconas, Polimeros, sintéticos</b>	
<b>Antioxidantes: Aminas, fenoles, Ditiolfosfatos</b>	

---

### **Antisépticos: Fenoles, Alcoholes, Compuestos clorados**

---

(Torres, 2014)

Las bases sintéticas son sustancias prácticamente puras que poseen ciertas características especiales que las diferencian de las bases minerales, como: mejor lubricación, viscosidad, fluidez, estabilidad térmica, estabilidad a la oxidación, menor volatilidad. (Gulf Oil, s.f.)

#### **1.3.5 Viscosidad de los Lubricantes.**

(Gulf Oil, s.f.) indica que:

La viscosidad es la propiedad fundamental y más importante de un lubricante líquido y se puede definir como su resistencia a fluir o la medida del rozamiento de sus moléculas. La viscosidad en un fluido depende de la presión y de la temperatura: al aumentar la temperatura disminuye la viscosidad, al aumentar la presión aumenta la viscosidad. Existen escalas para medir la viscosidad de un fluido, las más usadas son: la escala ISO desarrollada por la International Organization for Standardization usada para aceites hidráulicos o industriales, y la escala SAE desarrollada por la Society of Automotive Engineers para aceites a motor y aceites de engranajes, estableciendo una serie de números como por ej. SAE 20, 30, 5W40, 15W40, que relacionan las viscosidades máximas permitidas que garantizan una buena distribución de irrigación al motor conjuntamente con un buen comportamiento de la bomba de aceite al momento del arranque, adicionalmente la formación de una película mínima de lubricante en las zonas de altas temperaturas para evitar de este manera un desgaste prematuro y excesivo en las distintas partes del motor.

#### **1.3.6 Desechos de Lubricantes.**

Los desechos lubricantes tienen una estructura media como se muestra en la tabla que sigue a continuación:

Tabla 2

Composición Media de un Aceite Usado según su procedencia

---

**Composición Media de un Aceite Usado**

---

Contaminantes	Concentración (ppm)		
	Aceites de Automoción		Aceite de Procedencia Industrial
	Motor Gasolina	Motor Diésel	
<b>Cadmio</b>	1.7	1.1	6.1
<b>Cromo</b>	9.7	2.0	36.8
<b>Plomo</b>	2.2	29.0	217.7
<b>Zinc</b>	951.0	332.0	373.3
<b>Cloro Total</b>	3600.0	3600.0	6100.0
<b>PCB's (Bifelinos Policlorados)</b>	20.7	20.7	957.2

(Pantoja & Pilar, 1995).

En todos los casos como consecuencia de su utilización los aceites se degradan perdiendo las cualidades que los hacían operativos y se hace necesario la sustitución. Los aceites usados presentan una serie de compuestos sulfurados, compuestos orgánicos, compuestos clorados, y metales pesados. La naturaleza de estas sustancias varía según la aplicación de los aceites, el tipo de trabajo del mecanismo y la temperatura de operación. (Fundación Suiza Cooperación Desarrollo, 2000) .

Tabla 3

Composición del Aceite Usado en el Ecuador

Propiedades y Contenido	Quito (Swisscontact)		Cuenca (ETAPA)		
	Mínimo	Máximo	Aceite Usado 1	Aceite Usado 2	Aceite Usado 3
<b>API</b>	27.3	22.0	-	-	-
<b>Color ASTM D-1500</b>	-	-	> 8	> 8	> 8
<b>Gravedad Especifica</b>	0.891	0.922	0.8871 20/4°C	0.9062 20/4°C	0.9074 20/4°C
<b>Viscosidad a 100°C</b>	56.4 SSU 9.2 CST	71.2 SSU 13.1 CST	15.5 CST @100°C	16.2 CST @100°C	15.9 CST @100°C
<b>Índice de Viscosidad</b>	127.0	196.0	102.7	111.2	127.9
<b>Punto de Llama °C</b>	-	-	145	88	166
<b>Conradson Carbón Test</b>	3.86	5.2	0.6	1.6	1.2
<b>Pentane Insol % Wright</b>	-	-	0.42	0.24	0.97

<b>Toluene Insol % Wright</b>	-	-	1.3	1.4	0.22
<b>Neutralización No. Mg K Oh/g</b>	-	-	0.912	0.896	0.995
<b>Agua %</b>	0.05	4.0	0.0	0.006	0.006
<b>S (%)</b>	0.21	0.34	0.71	0.38	0.92
<b>Ba (ppm)</b>	100	100	-	-	-
<b>Ca (ppm)</b>	1000	1700	592	670	780
<b>P (ppm)</b>	550	1100	-	-	-
<b>Pb (ppm)</b>	700	22000	240	320	870
<b>Zn (ppm)</b>	350	980	-	-	-
<b>Fe (ppm)</b>	-	-	280	282	310
<b>Si (ppm)</b>	-	-	22	12	10
<b>Cu (ppm)</b>	-	-	43	70	68

(Fundación Suiza Cooperación Desarrollo, 2000).

### 1.3.7 Fuentes de los Desechos de Lubricantes.

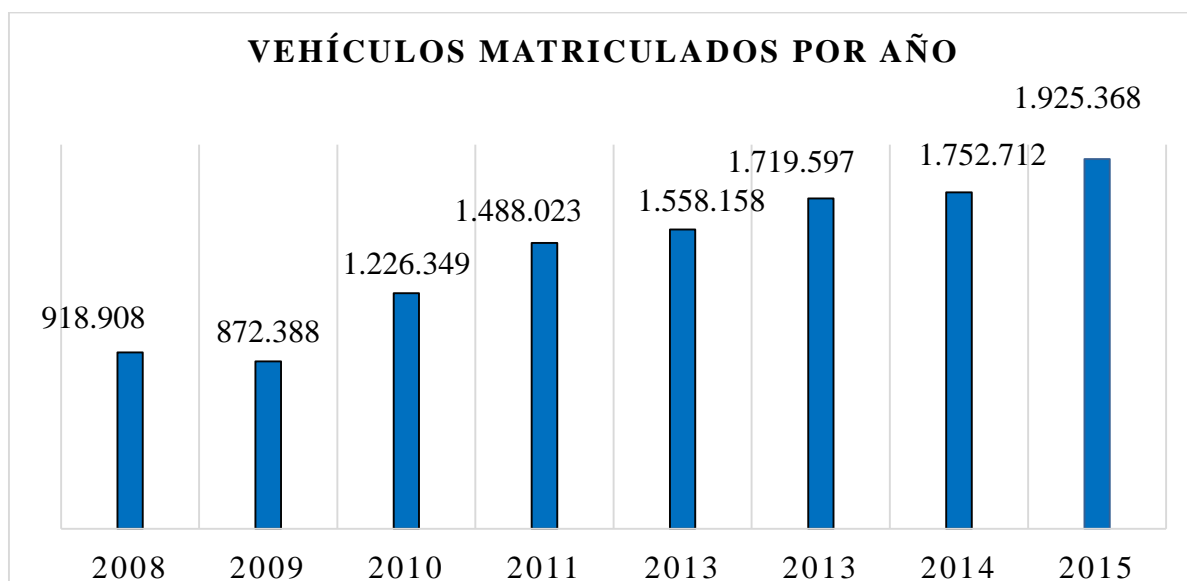
Para el año 2015, el movimiento hidrocarburífero de la empresa pública EP Petroecuador, resume el consumo interno de derivados de petróleo en 92.8 millones de barriles, de los cuales 2.81 millones de barriles corresponden a otros tipos de derivados como bases, lubricantes, asfaltos, etc. (PETROECUADOR, Informe Estadístico 2015, 2015)

El sesenta por ciento de los lubricantes se ocupa en vehículos y el cuarenta por ciento restante lo consumen las empresas marítimas e industrial, estos desechos aceitosos provenientes de la función lubricante, resultan ser un producto disperso en el medio ambiente, manejado por la ciudadanía en los diferentes componentes sociales y productivos: talleres mecánicos, lavadoras de automotores, servicios de cambio de aceite automotriz, concesionarios de vehículos, transporte marítimo, actividad pesquera, la industria en general, incluyendo la hidrocarburífera como uno de los componentes de mayor impacto y aún en los hogares donde se hace cambios de aceite de los vehículos. (Trujillo & Renato, 2009).

Como se aprecia en los datos que se presentan a continuación el crecimiento del parque automotor va en aumento, registrando un crecimiento anual superior del diez por ciento, lo que significa una importante fuente de lubricantes desechados:

## Ilustración 1

## Vehículos Matriculados por Año



(INEC, 2015).

## Tabla 4

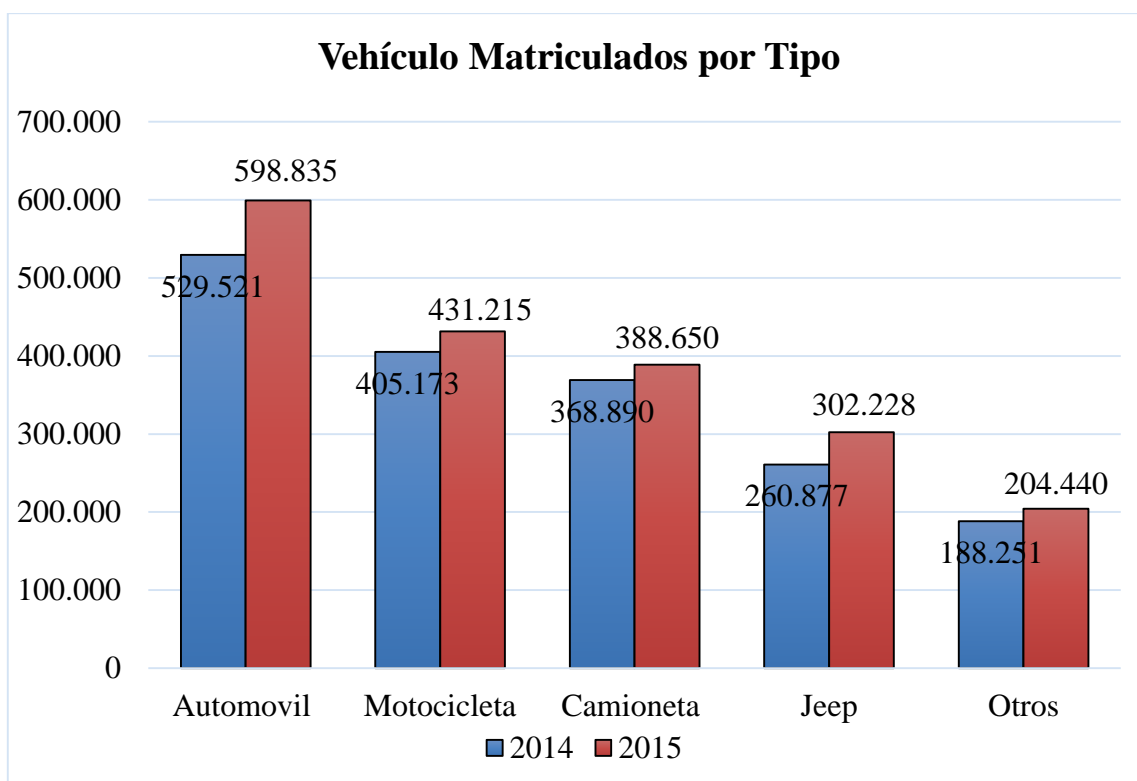
## Porcentaje de Matriculación Vehicular por Provincia

Provincia	% Vehículos Matriculados
<b>Pichincha</b>	25,6
<b>Guayas</b>	18,8
<b>Manabí</b>	7,9
<b>Azuay</b>	6,4
<b>Los Ríos</b>	5,8
<b>Tungurahua</b>	4,6
<b>El Oro</b>	4,7
<b>Loja</b>	3,3
<b>Santo Domingo</b>	3,2
<b>Chimborazo</b>	3,1
<b>Cotopaxi</b>	2,8
<b>Imbabura</b>	2,6
<b>Esmeraldas</b>	2,3
<b>Resto Provincias</b>	8,9

(INEC, 2015).

## Ilustración 2

## Vehículos Matriculados por Tipo



(INEC, 2015)

El mayor número de vehículos que aportan aceite desechado como proceso de su lubricación son los vehículos livianos.

### 1.3.8 Uso de los Desechos de Lubricantes.

(Universidad Central del Ecuador, s.f.) indica que:

Entre los usos a los desechos de lubricantes se puede anotar su aplicación en el sistema de transporte de crudo de proceso y crudo de exportación, puesto que el petróleo crudo es la matriz del aceite lubricante, este aceite usado, compatible con el crudo ya que la cantidad adicionada diariamente llegaría a niveles de uno a dos por ciento en relación al crudo transportado, siendo de viscosidad menor que el petróleo crudo facilita el flujo de transportación de este. Las plantas de cemento existentes en el país, utilizan bunker para sus procesos de combustión, el aceite usado, como combustible alternativo, tiene ventajas sobre el bunker para el co-procesamiento.

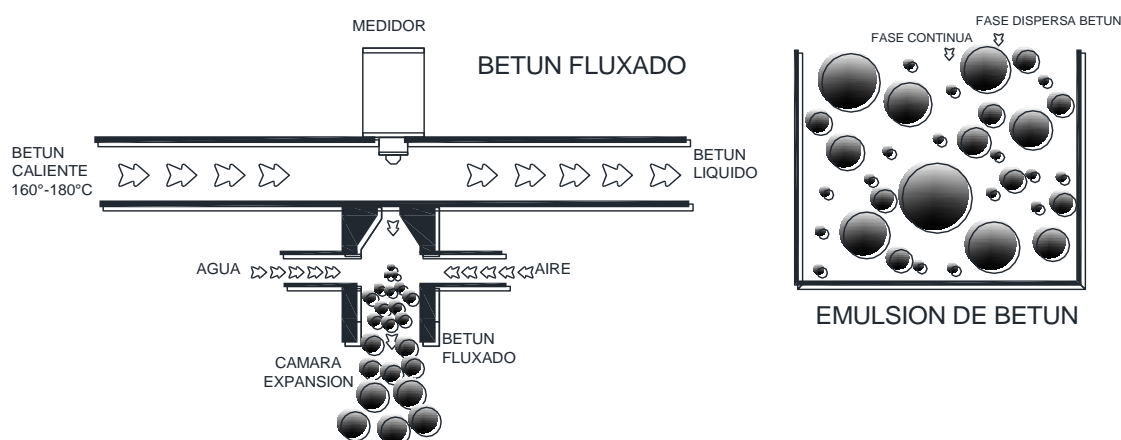
## 1.4 Ligantes Bituminosos.

(Rubio, 1995) indica que:

Se denomina ligante bituminoso a una amplia gama de materiales de composición muy compleja y naturaleza hidrocarbonada que poseen propiedades adhesivas y aglomerantes, manifestando además un comportamiento reológico en el que están basadas sus aplicaciones tecnológicas. Atendiendo a su procedencia los ligantes hidrocarbonados pueden ser naturales o manufacturados. Los productos naturales más importantes son los asfaltos naturales y las rocas asfálticas. Los productos manufacturados son básicamente el betún y el alquitrán, aunque se obtienen también ligantes derivados del betún como los betunes fluidificados, los betunes fluxados y las emulsiones de betún.

### Ilustración 3

Ligante Bituminoso Fluidificado, Fluxado, y Emulsión de Betún.



### 1.4.1 Métodos de Fabricación.

(Rubio, 1995) indica que:

De acuerdo con el proceso de refinado utilizado en su fabricación, los betunes se pueden clasificar en los siguientes grupos:

#### a. Betunes de destilación directa.

Se obtienen generalmente como residuo de la torre de destilación a vacío, que previamente ha sido alimentada por crudo reducido (residuo de una primera destilación a presión atmosférica). (Rubio, 1995)

#### **b. Betunes soplados.**

Se obtienen a partir del crudo reducido o del residuo de vacío, haciendo pasar una corriente de aire a través de su masa a elevada temperatura. (Rubio, 1995).

#### **c. Betunes soplados y reconstituidos.**

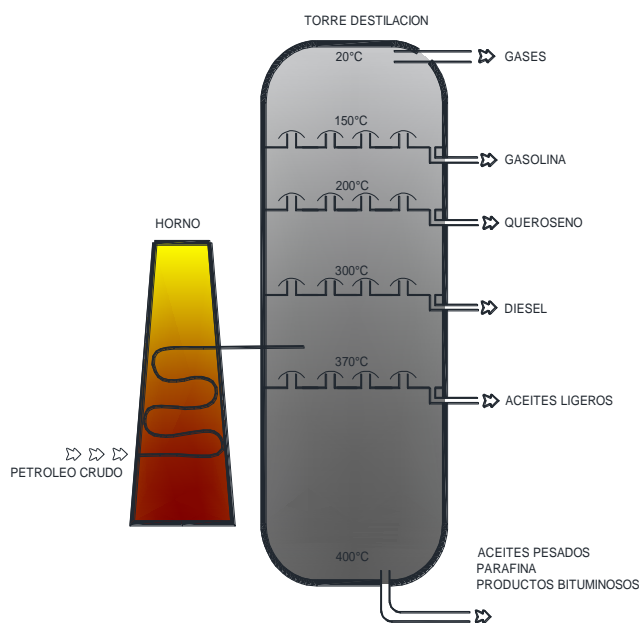
Este procedimiento consiste en soplar un residuo de destilación para conseguir un componente duro, con una penetración del orden de 10 unidades. (Rubio, 1995).

#### **d. Betunes reconstituidos.**

Se obtienen por mezcla del residuo del desasfaltado con propano con los extractos aromáticos procedentes del refino de los aceites lubricantes con disolventes selectivos o con los residuos pesados de destilación. (Rubio, 1995).

### Ilustración 4

Esquema de obtención de productos bituminosos.



### 1.4.2 Composición Química.

(Rubio, 1995) manifiesta que:

Los betunes asfálticos están constituidos fundamentalmente por una mezcla de hidrocarburos parafínicos, nafténicos y aromáticos, aunque contienen también pequeñas proporciones de azufre, oxígeno y nitrógeno, así como trazas de algunos metales pesados, aunque estos últimos apenas tienen influencia sobre su comportamiento y propiedades. La presencia de átomos de azufre, oxígeno y nitrógeno en sus moléculas bien en forma de heteroátomos o de agrupamientos polares indica la existencia de estructuras condensadas muy complejas de elevado peso molecular. El gran número de compuestos que constituyen los betunes asfálticos hace necesario su separación en grupos más homogéneos mediante técnicas de fraccionamiento para su identificación.

(Rubio, 1995) manifiesta que:

La mayoría de los procedimientos existentes hacen una primera separación de los betunes asfálticos mediante precipitación con hidrocarburos saturados de bajo peso molecular (pentano o heptano). A la fracción soluble se le denomina “máltenos” y a la insoluble “asfáltenos”. Los asfáltenos están constituidos fundamentalmente por hidrocarburos aromáticos fuertemente condensados con presencia relativamente alta de heteroátomos, lo que les confiere su alta polaridad. Son los componentes de mayor peso molecular que depende del origen del crudo de partida y del proceso de fabricación.; su peso molecular medio suele estar comprendido entre 1000 y 10000. Estos compuestos tienen una notable influencia sobre las características adhesivas y aglomerantes de los betunes asfálticos y juegan un papel determinante sobre su comportamiento reológico como se verá adelante.

## Ilustración 5

## Ligante Bituminoso: Asfalto Esmeraldas PG64-22 / AC 20, Planta IMPTEK



Los maltenos a su vez se separan en varias fracciones más homogéneas para determinar su composición química. Los métodos empleados para esta separación son muy diferentes, siendo uno de los más clásicos el de Hubbard y Stanfield, que separa los maltenos en dos fracciones mediante adsorción con alúmina y posterior elución. Los componentes más saturados denominados “aceites” son eludidos con pentano; mientras que los componentes más aromáticos y polares denominados “resinas” son eludidos con una mezcla de benceno y metanol. Aunque existen métodos para fraccionar los maltenos mucho más selectivos y complejos, se ha descrito este método más simple porque las fracciones obtenidas sirven de base para interpretar la estructura coloidal de los betunes y permiten relacionar su composición química con sus propiedades reológicas.

Tabla 5

Componentes Químicos de un Ligante Bituminoso

DESCRIPCION	Asfáltenos (% en peso)	Maltenos (% en peso)	Asfáltenos/Maltenos (%)
<b>Bitumen Original</b>	9.23	90.77	10.17

(Zagar, Ahmadinia, Asli, &amp; Rehan, 2012)

(Reyes, Daza, &amp; Rondon, 2012) indica que:

El ensayo de fraccionamiento SARA separa los componentes respectivos a los maltenos utilizando entre otros métodos uno determinado como cromatografía líquida en columna con alúmina CG-20 como fase estacionaria la cual consiste en la separación del bitumen en asfáltenos y maltenos por precipitación con n-heptano y posterior fraccionamiento de los maltenos a través de una columna de alúmina con solventes de polaridad creciente, separando las cuatro fracciones básicas del asfalto definidas a continuación:

**a. Saturados.**

Compuestos Químicos que en percolación con n-heptano no son adsorbidos por la fase estacionaria.

**b. Aromáticos.**

Compuestos Químicos que son adsorbidos por la fase estacionaria en presencia de n-heptano y eluidos con tolueno.

**c. Resinas.**

Compuestos Químicos eluidos de la fase estacionaria, luego que los saturados y los aromáticos se han removido usando tolueno y tricloroetileno.

**d. Asfaltenos.**

Compuestos Químicos insolubles en n-heptano que pueden ser separados mediante la digestión del asfalto.

Tabla 6

Fracciones SARA % en peso para un Ligante Bituminoso

<b>DESCRIPCION</b>	<b>Asfáltenos (% en peso)</b>	<b>Resinas (% en peso)</b>	<b>Aromáticos (% en peso)</b>	<b>Saturados (% en peso)</b>
<b>Bitumen Original</b>	10	39	37	15

(Lesueur, 2008).

Los valores que se muestran en la tabla anterior son valores promedios de los Asfáltenos medidos como porcentaje en peso, los cuales pueden variar en valores que van desde un 6%

hasta un 23%, y más dependiendo de la fuente de crudo que se procesa para su obtención. (Lesueur, 2008).

Para acercarnos más a nuestras condiciones particulares se toman las composiciones SARA de asfaltos colombianos expuestos un año al medio ambiente, como se expone a continuación: (Reyes, Daza, & Rondon, 2012)

Tabla 7

Fracciones SARA % Asfalto 60/70 Expuesto 1 año al ambiente

<b>Fracciones SARA correspondientes a un Asfalto Colombiano 60/70 PG 64-28</b>				
<b>Asfalto</b>	<b>Fracción %</b>			
	Saturados	Aromáticos	Resinas	Asfaltenos
<b>Original</b>	16,61	39,79	24,53	20,07
<b>1 mes</b>	16,20	39,79	24,42	20,48
<b>3 mes</b>	15,78	37,27	22,31	25,30
<b>6 mes</b>	14,98	35,00	21,70	28,60
<b>9 mes</b>	14,17	33,10	21,00	31,50
<b>12 mes</b>	13,60	31,00	20,40	34,20

(Reyes, Daza, & Rondon, 2012)

Tabla 8

Fracciones SARA % Asfalto 80/100 Expuesto 1 año al ambiente

<b>Fracciones SARA correspondientes a un Asfalto Colombiano 80/100 PG 58-28</b>				
<b>Asfalto</b>	<b>Fracción %</b>			
	Saturados	Aromáticos	Resinas	Asfaltenos
<b>Original</b>	16,61	44,46	29,69	9,24
<b>1 mes</b>	16,20	42,23	28,51	13,06
<b>3 mes</b>	15,78	38,97	26,95	18,30
<b>6 mes</b>	14,98	36,78	26,02	22,22
<b>9 mes</b>	14,17	35,91	25,21	24,71
<b>12 mes</b>	13,60	35,05	24,97	26,38

(Reyes, Daza, & Rondon, 2012)

Tabla 9

Relaciones SARA de Asfalto Colombiano Expuesto 1 año al ambiente

<b>Evolución de los Componentes Químicos de los Asfaltos Sometidos al Medio Ambiente</b>				
<b>Duración</b>	Asfalto 80/100 PG 58-28		Asfalto 60/70 PG 64-28	
	Aromático/Saturado	Resina/ Asfaltenos	Aromático/Saturado	Resina/ Asfaltenos
<b>Original</b>	2,542	3,213	2,550	1,222
<b>1 mes</b>	2,607	2,183	2,580	1,192
<b>3 mes</b>	2,470	1,473	2,460	0,882
<b>6 mes</b>	2,455	1,171	2,380	0,759
<b>9 mes</b>	2,534	1,020	2,300	0,667
<b>12 mes</b>	2,577	0,947	2,200	0,596

(Reyes, Daza, & Rondon, 2012)

Como se puede apreciar debido a la oxidación por exposición ambiental el componente S.A.R.A. que sufre mayor impacto son los aromáticos y las Resinas, que son los integrantes más volátiles del ligante bituminoso.

### 1.4.3 Caracterización.

(Rubio, 1995) indica que:

Las propiedades y características de los betunes asfálticos dependen de su estructura y composición química; pero dada su gran complejidad, estos materiales normalmente se caracterizan mediante ensayos empíricos o semiempíricos para valorar las propiedades que tienen que poseer para emplearse como ligantes en obras de carreteras y solamente se determina su composición en casos muy especiales o con fines de investigación.

Las propiedades fundamentales que tienen que poseer los betunes asfálticos y en general los ligantes hidrocarbonados. Para su empleo en carreteras son:

#### a. Carácter Termoplástico.

Por acción de la temperatura su consistencia debe disminuir de manera que sean capaces de mojar y envolver los áridos. Al enfriarse deben adquirir la consistencia primitiva y dar

cohesión a la mezcla. Para que el betún se adhiera a los áridos es necesario en primer lugar que haya un buen contacto entre la superficie del árido y el betún y en segundo lugar que existan fuerzas de atracción entre ambos. (Rubio, 1995)

**b. Buena adhesividad.**

A los áridos para poder cumplir su poder aglomerante. Los áridos utilizados en carreteras proceden de masas rocosas que han sido reducidas a tamaños más pequeños mediante fenómenos naturales o en procesos de machaqueo; al fracturarse las rocas los átomos existentes a uno y otro lado del plano de rotura son separados y sus enlaces rotos lo que provoca una atracción hacia su superficie de las sustancias que las rodean y especialmente del vapor de agua atmosféricos satisfaciendo las cargas superficiales por las moléculas polares del agua. La adhesividad árido-ligante es un fenómeno muy complejo que depende de la naturaleza tanto del árido como del betún asfáltico, así como de las condiciones específicas de estos materiales en la obra (limpieza y contenido de humedad del árido, temperatura del mezclado, etc.). En la práctica cuando se emplean ligantes de alta viscosidad áridos secos y de textura rugosa y se aporta una elevada energía durante el proceso de mezclado se consigue una buena envuelta y una adhesividad pasiva suficiente para resistir el desplazamiento del betún por los efectos combinados del agua y del tráfico. Si, a pesar de ello se presentan problemas de adhesividad existen una serie de productos denominados activantes que incorporados el betún en proporciones muy pequeñas permitan corregir estas deficiencias de adhesividad. (Rubio, 1995)

**c. Buen comportamiento mecánico y reológico.**

Para resistir las tensiones impuestas por el tráfico y poder mantener a las temperaturas de servicio la estructura de la mezcla bituminosa. (Rubio, 1995)

#### **d. Resistencia al envejecimiento.**

Frente a los agentes atmosféricos y condiciones ambientales para conservar sus propiedades con el tiempo. (Rubio, 1995).

Debido a que el asfalto es químicamente complejo, las especificaciones para su uso han sido desarrolladas alrededor de ensayos sobre sus propiedades físicas, másicas y mecánicas. Las especificaciones tradicionales usan ensayos como el de penetración, viscosidad y ductilidad, los cuales se desarrollan en temperaturas estándar. Hay limitaciones que los ensayos tradicionales no arrojan, ya que muchos de estos ensayos son empíricos, principalmente experiencias de campo, que no dan información para un rango de temperaturas típicas del pavimento. Aunque la viscosidad es una fundamental medida del flujo, esta únicamente provee información del comportamiento asfáltico en altas temperaturas. De forma parecida la penetración describe únicamente la consistencia asfáltica a una temperatura media (25°C). Las propiedades del ligante a temperaturas bajas no son directamente medidas usando estos ensayos tradicionales para la caracterización de ligantes asfálticos. Cuando se usa la viscosidad y penetración para caracterizar asfaltos con temperaturas muy diferentes los resultados pueden indicar el mismo comportamiento. (Asphalt Institute, 2001).

Ilustración 6

Equipo Ensayo Penetración en Asfalto: Laboratorio PUCE

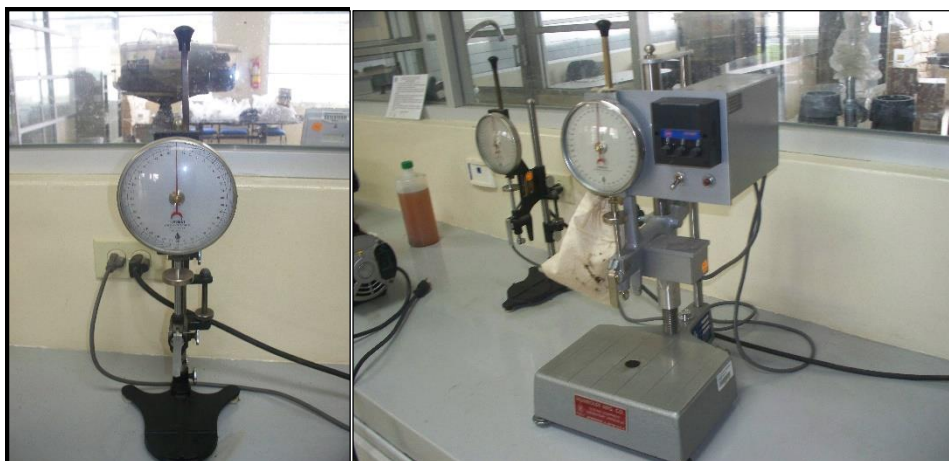


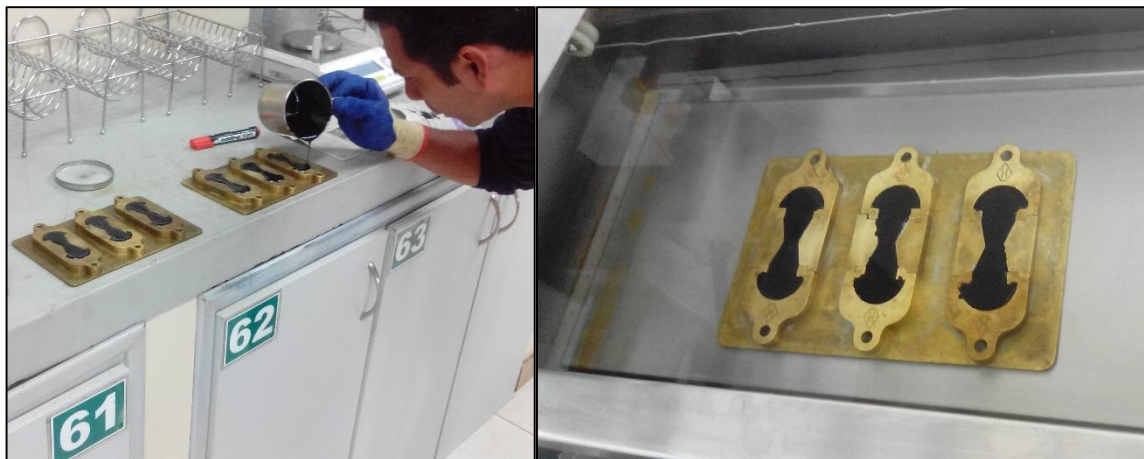
Ilustración 7

Equipo Ensayo Viscosidad en Asfalto: Laboratorio PUCE



Ilustración 8

Equipo Fragilidad en Asfalto: Laboratorio PUCE



#### 1.4.4 Desempeño Superpave.

The Strategic Highway Research Program “SHRP”, programa de investigación estratégica de vías, fue establecido por el congreso de los EEUU., en 1987 como un programa de 5 años y ciento cincuenta millones de dólares de presupuesto para desarrollar caminos más seguros para los usuarios y trabajadores. Cincuenta millones de dólares fueron usados para desarrollar especificaciones asfálticas basadas en el desempeño de los pavimentos, directamente relacionados con análisis de laboratorios y desempeño en campo. SUPERPAVE es un producto de la investigación del programa SHRP en asfaltos. Este

sistema incorpora la caracterización de materiales asfálticos dentro de condiciones ambientales para mejorar el desempeño y control del ahueamiento y fisuramiento por baja temperatura. Los tres grandes componentes de este sistema de especificaciones SUPERPAVE son la caracterización del ligante asfáltico, sistema de análisis y diseño de mezclas asfálticas y un programa de computación. (Asphalt Institute, 2001)

El sistema SUPERPAVE provee las herramientas para caracterizar el ligante bituminoso y mezclas tomando en cuenta los cambios del asfalto con la temperatura es decir considerando su comportamiento reológico.

Para la clasificación de ligantes asfálticos se aplica la normativa establecida en el procedimiento AASHTO M320 y AASHTO R 29, para el caso de mezclas asfálticas el procedimiento a seguir es el indicado en la normativa AASHTO M323 y AASHTO R 35.

#### **1.4.5 Comportamiento Reológico del Ligante Asfáltico.**

(Garnica, Gómez, & Delgado, 2003) manifiesta que:

El cemento asfáltico tiene tres características importantes en el desempeño de la mezcla asfáltica: susceptibilidad a la temperatura, visco elasticidad y envejecimiento. Por su parte las propiedades del asfalto son susceptibilidad a la temperatura; y su rigidez a bajas temperaturas. Esta es la razón de que la mayoría de los cementos asfálticos y pruebas en mezclas tienen que estar acompañados por una temperatura de prueba específica. Sin esta los resultados de la prueba no podrán ser interpretados efectivamente. El comportamiento del cemento asfáltico depende adicionalmente del tiempo de carga. Esa dependencia de temperatura y duración de la carga significa que ambos factores pueden ser usados intercambiablemente.

(Asphalt Institute, 2001) expresa que:

El cemento asfáltico tiene un comportamiento visco elástico porque simultáneamente muestra ambas características: viscoso y elástico. A altas temperaturas por ejemplo mayores

a cien grados centígrados, el cemento asfáltico actúa casi completamente como un fluido viscoso, presentando la consistencia de un lubricante como aceite de motor. A muy bajas temperaturas el cemento asfáltico se comporta en su mayor parte como un sólido elástico cambiando su forma original cuando se carga y descarga. En temperaturas intermedias correspondientes a la mayoría de los proyectos de pavimentación el ligante bituminoso se caracteriza por presentar ambos comportamientos fluido viscoso y sólido elástico.

(Garnica, Gómez, & Delgado, 2003) expresa que:

El asfalto se comporta a baja temperatura o bajo cargas repetidas como un sólido elástico o sea como bandas de goma que se deforman al ser cargados y retornan a su forma original al ser descargados. La deformación elástica se recupera completamente. Si se aplica una carga excesiva, el sólido elástico puede romperse. Aunque el asfalto es un sólido elástico a baja temperatura, puede volverse demasiado frágil y agrietarse bajo carga excesiva. Por esto el agrietamiento a baja temperatura a veces ocurre en pavimentos asfálticos en climas fríos, en tales casos las cargas se deben a esfuerzos internos que se desarrollan en el pavimento cuando el proceso de contracción se restringe. A altas temperaturas como climas desérticos o bajo cargas sostenidas como camiones a bajas velocidades, el cemento asfáltico actúa como un líquido viscoso y fluye. La viscosidad es la característica que describe la resistencia de los líquidos a fluir. Si pudiera observarse con un avanzado microscopio, un líquido como el asfalto fluir lentamente, se vería el movimiento relativo de las capas adyacentes del líquido, quizá del espesor de una molécula. La fuerza de fricción o resistente entre estas capas depende de la velocidad relativa a la que se desliza una sobre otra. La fuerza resistente entre las capas se debe a que fluyen a velocidades ligeramente diferentes. La capa superior trata de arrastrar a la inferior, mientras que esta última trata de frenar a aquella. La relación entre la fuerza resistente y la velocidad relativa puede ser muy diferente en la mayoría de los líquidos. Líquidos viscosos como el asfalto caliente son a veces llamados plásticos, porque

una vez que comienzan a fluir no regresan a su posición original. Por esto, en climas cálidos algunos pavimentos asfálticos fluyen bajo cargas repetidas y forman roderas. Sin embargo, las roderas de los pavimentos asfálticos en climas cálidos son también influenciadas por las propiedades de los agregados y es probablemente más correcto decir que es la mezcla asfáltica la que tiene un comportamiento plástico. (Garnica, Gómez, & Delgado, 2003)

**a. Ensayos Reológicos Dinámicos.**

(Rubio, 1995) afirma que:

Los métodos más adecuados para valorar el comportamiento visco elástico de los betunes asfálticos son los denominados ensayos dinámicos. En ellos se impone generalmente una deformación sinusoidal de amplitud constante y se mide el esfuerzo de reacción o tensión resultante, que es igualmente de forma sinusoidal, pero sin estar en fase con la deformación, sino que la precede en un cierto ángulo. Esto es debido a que la tensión es la resultante de dos componentes, una elástica en fase con la deformación y otra viscosa desplazada noventa grados. Por tanto, el módulo dinámico o módulo complejo  $G^*$  es la suma vectorial de un módulo elástico o de almacenamiento  $G'$  y de un módulo viscoso o de pérdidas  $G''$ . La variación del módulo complejo y de sus componentes elástica y viscosa con la temperatura, en el intervalo de frecuencias al que están sometidos los pavimentos por la acción del tráfico permite evaluar el comportamiento reológico del ligante en condiciones similares a las de servicio; sin embargo, la complejidad y elevado costo de los equipos dinámicos son posiblemente la causa de que estas propiedades no son de uso habitual en el proyecto de mezclas bituminosas. Estos ensayos son de uso cada vez más frecuente y se aplican en las especificaciones para ligantes elaborados en el programa "SHRP" Programa de Investigación Estratégica de Vías por sus siglas en inglés, en dicho programa se establece un equipo dinámico para ligantes. Denominado reómetro de corte dinámico (DSR), en el que se determina el módulo complejo ( $G^*$ ) y el ángulo de desfase ( $D$ ). En base a estas medidas

se exige para evitar las deformaciones plásticas que  $G^*/\text{sen}D$  del ligante original sea mayor a 1 KPa a la temperatura máxima del pavimento y que el mismo parámetro sea mayor de 2.2 KPa cuando el ligante sea envejecido mediante el método de película fina rotatoria. También se exige para evitar la figuración por fatiga de la mezcla bituminosa que el residuo de película fina y rotatoria se someta a un ensayo de envejecimiento acelerado mediante bomba de presión y que  $G^* \text{ seno } D$  sea menor a 5 MPa a la temperatura media del pavimento. (AASHTO, Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder using a Dynamic Shear Rheometer DSR, 2008).

#### Ilustración 9

Reómetro de Corte Dinámico 'DSR': Laboratorio PUCE



#### **b. Ensayos Reológicos Estáticos.**

(Rubio, 1995) indica que:

Con equipos menos sofisticados se determina una serie de ensayos estáticos que permiten caracterizar el comportamiento visco elástico de los ligantes asfálticos. Entre este tipo de ensayos se pueden citar aquellos en los que se mide la deformación a esfuerzo constante con el tiempo o ensayos de fluencia, así como la recuperación elástica que se produce después de eliminar el esfuerzo aplicado y otros como la relajación de tensiones en los que se mide el esfuerzo necesario para mantener una deformación determinada. Sin embargo, quizás el método más difundido sea el cálculo del denominado módulo de rigidez. Este parámetro es similar al módulo de Young definido para materiales totalmente elásticos; se define el módulo de rigidez ( $S$ ) como el coeficiente entre la tensión aplicada ( $T$ ) y la deformación

producida (E), y es función de la temperatura y del tiempo de aplicación de la carga. Para tiempo cortos y bajas temperaturas, el módulo de rigidez es elevado y prácticamente coincide con el módulo elástico, mientras que, para altas temperaturas y tiempos de carga prolongados, el módulo de rigidez decrece rápidamente siendo su comportamiento puramente viscoso. La formación de roderas en carriles lentos equivalentes a grandes tiempos de carga y en climas cálidos a elevada temperatura pueden tener su origen en la caída del módulo de rigidez mientras que la fragilidad de algunos pavimentos en invierno pueden ser consecuencia del excesivo módulo de rigidez a muy bajas temperaturas. En el programa SHRP se ha desarrollado un equipo de fluencia denominado reómetro de viga en flexión BBR por sus siglas en inglés, para determinar el módulo de rigidez de los ligantes bituminosos a bajas temperaturas. Este equipo se utiliza para prever la figuración por retracción termina y se exige en la especificación que el módulo de rigidez del ligante después de ser sometido a los ensayos de envejecimiento en película fina rotatoria y bomba de presión determinado a la temperatura mínima del pavimento más diez grados y aun tiempo de carga de 60 segundos sea inferior a 300MPa.

Ilustración 10

Reómetro de Viga a Flexión 'BBR': Laboratorio PUCE



#### 1.4.6 Envejecimiento del Ligante Bituminoso.

(Garnica, Gómez, & Delgado, 2003) manifiesta que:

Existe otra característica especial de los asfaltos. Debido a que los componen moléculas orgánicas, y reaccionan con el oxígeno del medio ambiente. Esta reacción se llama oxidación

y cambia la estructura y composición de las moléculas del asfalto; puede provocar que se haga más duro o frágil, dando origen al termino endurecimiento por oxidación o endurecimiento por envejecimiento. Este fenómeno ocurre en el pavimento a una velocidad relativamente baja, si bien es mucho más rápido en un clima cálido que en uno frío. Así, el endurecimiento por oxidación es estacional, siendo más marcado en el verano que en el invierno. Debido a este tipo de endurecimiento, los pavimentos asfálticos nuevos pueden ser propensos a este fenómeno si no se compactan adecuadamente. En este caso la falta de compactación origina un alto contenido de vacíos en la mezcla, lo que facilita el ingreso de una mayor cantidad de aire a la mezcla asfáltica e incrementar el endurecimiento por oxidación. La oxidación se produce más rápidamente a altas temperaturas. Es por ello que parte del endurecimiento ocurre durante el proceso de producción, cuando es necesario calentar el cemento asfáltico para permitir el mezclado y compactación. Volatilización es otro tipo de endurecimiento ocurre durante el mezclado en caliente y construcción. A altas temperaturas los componentes volátiles del asfalto se evaporan. Estos componentes volátiles livianos del tipo aceites ablandarían al asfalto, de permanecer dentro de él. Otro mecanismo de envejecimiento lo constituye la volatilización de aceites ligeros presentes en el asfalto debido a las altas temperaturas y al flujo de aire involucrado en el proceso de mezcla. (Garnica, Gómez, & Delgado, 2003)

El sistema SUPERPAVE por sus siglas en inglés, desarrollo métodos para simular el envejecimiento del pavimento bajo condiciones controladas en laboratorio, como son los ensayos: “RTFOT”, Horno De Película Fina Rotatoria y el ensayo “PAV” Vasija de Envejecimiento a Presión.

**a. Envejecimiento a Corto Plazo.**

(Garnica, Gómez, & Delgado, 2003) indica que:

El mezclado y la agitación de la mezcla en caliente en planta y el envejecimiento durante la puesta en obra son dos mecanismos que envejecen al asfalto, debido a las altas temperaturas y al flujo de aire involucrado en el proceso. Las especificaciones SUPERPAVE usan el Horno Rotatorio de Película Delgada “RTFO” como procedimiento para simular este tipo de envejecimiento. El procedimiento del RTFO se utiliza para dos propósitos. Uno es proveer un envejecimiento al cemento asfáltico que puede usarse en pruebas posteriores de propiedades físicas. La segunda es determinar la cantidad de masa de aceites volátiles perdida del asfalto durante el mezclado. La masa de aceites volátiles perdida, es una indicación de que el envejecimiento pudiera ocurrir en el asfalto durante las operaciones de mezclado y construcción.

(AASHTO, Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt, 2008) manifiesta que:

El ensayo consiste en una lámina de asfalto en movimiento calentada por ochenta y cinco minutos en un horno a ciento sesenta y tres grados centígrados con una inyección de aire de cuatro mil mililitros por minuto. Los efectos del calor y del aire son determinados para evaluar cambios físicos antes y después del tratamiento, ensayo realizado según norma AASHTO T 240.

Ilustración 11

Horno de Película Fina Rotatoria ‘RTFO’: Laboratorio PUCE



### **b. Envejecimiento a Largo Plazo.**

(Garnica, Gómez, & Delgado, 2003) indica que:

Como se describió, los efectos del envejecimiento del asfalto a largo plazo por condiciones de servicio no se habían incorporado en especificaciones para cementos asfálticos previo a las especificaciones SUPERPAVE. Estas especificaciones usan la Vasija de Envejecimiento a Presión “PAV” Pressurized Aging Vessel por sus siglas en inglés, usada por muchos años en investigaciones en asfaltos, siendo modificada por el programa SHRP para simular el envejecimiento en servicio. El PAV expone al asfalto a presiones y altas temperaturas durante un determinado tiempo para producir el efecto del envejeciendo a largo plazo. El asfalto que se expone al envejecimiento por condiciones de servicio tiene que haber pasado por el proceso de mezclado y construcción por lo que el envejecimiento PAV utiliza el residuo del ensayo RTFO. El ensayo cubre la simulación del envejecimiento (oxidación) de ligantes asfálticos por medio de aire a presión y elevada temperatura. El envejecimiento durante el período de servicio es influido por variables asociadas a la mezcla como las proporciones volumétricas, la permeabilidad, propiedades de los agregados y otros factores. Primero la muestra de ligante asfáltico es envejecida usando el procedimiento RTFOT. Un específico espesor de este residuo es colocado en pequeñas bandejas de acero inoxidable y sometido al PAV durante veinte horas dentro de una vasija presurizada con aire a una presión de 2.10MPa. (AASHTO, Effect of Head and Air on a Moving Film of Asphalt, 2008)

La simulación del envejecimiento a largo plazo debe ser complementada con el análisis del fenómeno de agrietamiento o fisuramiento por rigidez a bajas temperaturas, que se evalúa mediante el ensayo AASHTO T 313 para determinación de la flexión y fisuramiento por rigidez de Ligantes Asfáltico usando el Reómetro de Viga de Flexión “BBR” por sus siglas en inglés.

(AASHTO, Determining Flexural Creep Stiffness of Asphalt Binder Using Bendind Beam Rheometer, 2008) indica que el procediendo BBR mide la deflexión en el punto medio de

una viga de ligante asfáltico simplemente apoyada sometida a una carga constante aplicada en el punto medio de la viga, mientras se encuentra sumergida en un baño de temperatura constante y controlada por un tiempo de 240 segundos. La deflexión es monitoreada durante el tiempo del ensayo. El ensayo de temperatura para este ensayo es relacionado a la temperatura experimentada por el pavimento en el área geográfica para la cual el ligante asfáltico está aplicado. La rigidez de fisuramiento a flexión determinado por este método describe la respuesta de esfuerzo deformación en el tiempo a baja temperatura del ligante asfáltico dentro rango de respuesta lineal visco elástica.

Ilustración 12

Vasija de Envejecimiento a Presión 'PAV': Laboratorio PUCE



### 1.5 Rejuvenecedor de Ligantes.

Se plantea como rejuvenecedor al aceite desechado de la lubricación de motores de vehículos livianos, el cual ha sido sometido a un proceso de limpieza del tipo mecánica mediante la aplicación de una etapa de sedimentación y una etapa posterior de filtración, procesos que permiten separar los elementos ajenos a su naturaleza hidrocarbonada, separando elementos líquidos como son el agua resultante de la condensación de la humedad del aire debido a cambios de temperatura en el motor, adicionalmente separando partículas sólidas en suspensión como limallas ferrosas producto del desgaste de las piezas metálicas y otras partículas como el

hollín o cenizas resultantes de la combustión de los motores. Se considera como material rejuvenecedor a estos aceites desechados porque junto con el ligante asfáltico son productos del proceso de refinación del petróleo.

El material a rejuvenecer consiste en un ligante asfáltico envejecido en laboratorio simulando inicialmente el desgaste de sus componentes volátiles debido a la evaporación por el calor aplicado en los procesos de: calentamiento, mezclado, transporte, colocación y compactación mediante el ensayo RTFOT para posteriormente envejecerlo nuevamente mediante el proceso PAV que simula el envejecimiento correspondiente a la exposición del material a las condiciones ambientales y de puesta en servicio.

El proceso para rejuvenecimiento consiste en la difusión medida por medio de un porcentaje en peso, de una cantidad de aceite desechado en condición fluida (rejuvenecedor), en una masa de ligante asfáltico envejecido con viscosidad fluida mediante la aplicación de energía térmica transmitida por una estufa eléctrica de inducción, la dispersión se realiza mediante mezclado mecánico utilizando un taladro de velocidad regulable suspendido de un soporte que permite a las aspas de la paleta de mezclado mantenerse perpendiculares a la mezcla, se mantiene constante la temperatura de la mezcla vigilando que la viscosidad de la misma sea fluida.

Esta mezcla de un porcentaje en peso de rejuvenecedor sobre una masa de ligante asfáltico envejecido se considera una muestra rejuvenecida, a la cual se aplicará la especificación AASHTO M 320 y AASHTO R 29 para la caracterización de sus propiedades reológicas. Posteriormente se compara estos resultados con los obtenidos de la caracterización reológica de una muestra de ligante asfáltico no envejecida para determinar si la hipótesis cumple sus objetivos.

### Ilustración 13

#### Mezclas con Rejuvenecedor: Laboratorio de Asfaltos de EMULDEC



### 1.6 Mezcla Asfáltica.

Los proyectos de mezcla asfáltica no hacen referencia únicamente a los porcentajes en los que intervienen cada uno de los componentes que entran en la formulación de la mezcla. Las características que debe esperar una mezcla bituminosa pueden ser muy diferentes, para lograr esta adaptación el proyectista debe considerar los tres factores que inciden en el resultado final: las cualidades de los materiales tanto cada uno por separado como en su conjunto; las proporciones en las que estos materiales entran a forma parte de la mezcla y por último la fabricación, extensión y compactación de la mezcla bituminosa. Variando estos factores se puede lograr que prevalezcan unas y otras propiedades; se obtendrán pues resultados muy diferentes al varía el contenido de ligante y la granulometría de los áridos o dicho de otro modo las proporciones de los áridos grueso fino y mástico (polvo mineral mas ligante). (Del Val, 1995).

#### 1.6.1. Tipos de Mezclas Asfálticas.

La elección del tipo de mezcla bituminosa debe hacerse en consideraciones tales como la función de la capa a la que vaya destinada, el espesor de la misma, el tráfico que ha de soportar y el tipo de sección estructural del firme. (Del Val, 1995).

(Segovia, 2014) indica que:

Se pueden clasificar de acuerdo a: la temperatura, granulometría de los agregados y en función de su utilidad.

**a. Mezclas asfálticas en frío.**

Son mezclas que usan emulsión asfáltica como ligante, con estas mezclas se trabaja a temperatura ambiente y se diseñan principalmente para proyectos con nivel de tráfico medio y bajo.

**b. Mezclas asfálticas tibias.**

Para estas mezclas se usan distintas tecnologías que permiten reducir la temperatura de mezclado y compactación, reduciendo la viscosidad y ganando trabajabilidad durante el mezclado y compactación. Los rangos de temperaturas de trabajo están entre 65 y 140°C

**c. Mezclas asfálticas en caliente.**

Es la más habitual, emplea temperaturas de mezclado y compactación del rango 100 a 190°C. La temperatura para la mezcla depende de la viscosidad del asfalto, y será la que logre una mezcla uniforme. La temperatura de la compactación será la que logre cumplir con parámetros estructurales y de duración de la mezcla.

**d. Mezclas asfálticas densas.**

Estas mezclas se contienen agregados con granulometría continua. Según el tamaño de sus partículas estas mezclas pueden clasificarse como gruesas y finas, teniendo las finas un mayor consumo de ligante por contar con mayor superficie de partículas

**e. Mezclas asfálticas abiertas.**

Son aquellas mezclas cuyos agregados tienen una granulometría continua, pero crean una estructura con mayor cantidad de vacíos. Se recomienda su uso principalmente en capas base e intermedias.

**f. Mezclas asfálticas discontinuas.**

En la granulometría de estas mezclas predominan las partículas gruesas que producen el contacto de partícula a partícula reduciendo las deformaciones permanentes. También se componen de partículas de tamaños intermedios y con partículas finas, las cuales llenan los espacios dejados por las partículas gruesas. Pertenecen a este grupo las mezclas abiertas con características de permeabilidad y fricción, y las mezclas conocidas como Stone mastic asphalt (SMA). (Segovia, 2014)

### **1.7 Mezcla asfáltica Superpave.**

The Strategic Highway Research Program, programa de investigación estratégica de vías, fue establecido por el congreso de los EEUU., en 1987 como un programa de 5 años y ciento cincuenta millones de dólares de presupuesto para desarrollar caminos más seguros para los usuarios y trabajadores. Cincuenta millones de dólares fueron usados para desarrollar especificaciones asfálticas basadas en el desempeño de los pavimentos, directamente relacionados con análisis de laboratorios y desempeño en campo. (Asphalt Institute, 2001). SUPERPAVE es un producto de la investigación del programa SHRP en asfaltos. Este sistema incorpora la caracterización de materiales asfálticos dentro de condiciones ambientales para mejorar el desempeño y control del ahuellamiento y fisuramiento por baja temperatura. Los tres grandes componentes de este sistema de especificaciones SUPERPAVE son la caracterización del ligante asfáltico, sistema de análisis y diseño de mezclas asfálticas y un programa de computación. (Asphalt Institute, 2001)

Ilustración 14

Mezcla Asfáltica en Caliente HMA, metodología Superpave



### 1.7.1. Selección de los Materiales.

Las propiedades del ligante bituminoso se abordaron en los párrafos anteriores, para el presente estudio se usará el ligante asfáltico AC 20, proveniente de la refinería Esmeraldas, que corresponde al único actualmente comercializado en el medio y utilizado para las mezclas asfálticas calientes.

Ilustración 15

Lotes de Agregados Gruesos y Finos Empresa COVIPAL



(Garnica, Gómez, & Delgado, 2003) expresa que:

Las propiedades del agregado mineral son obviamente importantes para el desempeño de las mezclas asfálticas. De cualquier modo, los métodos de diseño de Mezclas Marshall y Hveem no incorporan criterios sobre agregados en sus procedimientos. A la inversa el criterio de

agregados está directamente incorporado dentro del procedimiento SUPERPAVE. Al respecto dos tipos de propiedades de agregados son especificados en el sistema: Propiedades de Consenso y Propiedades de Origen:

(Garnica, Gómez, & Delgado, 2003) indica que:

Ilustración 16

Muestras y Reducción de la Muestras previo los ensayos



#### **a. Propiedades de Consenso.**

Las propiedades de consenso son: Angularidad del Agregado Grueso, Angularidad del Agregado Fino, Partículas Alargadas - Aplanadas, y Equivalente de Arena.

##### **a.1. Angularidad del Agregado Grueso.**

Estas propiedades aseguran un alto grado de fricción interna y alta fuerza al corte para resistencia a las roderas. Es definido como el porcentaje por peso de agregados más grandes de 4.75mm, con una o más caras fracturadas. Las caras fracturadas generan una mayor trabazón, empaquetamiento por fricción mejorando el esqueleto del agregado mineral.

## Ilustración 17

### Angularidad del Agregado Grueso



#### a.2. Angularidad del Agregado Fino.

Estas propiedades aseguran un alto grado de fricción interna y alta fuerza al corte para resistencia a las roderas. Se define como el porcentaje de vacíos de aire presentes en agregados sueltos, con tamaños menores de 2.36mm norma AASHTO TP 33 “método de prueba para la determinación del porcentaje de vacíos en agregado fino levemente compactado” así como la influencia de la forma de la partícula, textura de la superficie y la graduación. Altos porcentajes de vacíos significan más caras fracturadas. Los factores que influyen en la angularidad de los agregados son el espesor de la capa superficial y el tráfico.

## Ilustración 18

### Angularidad del Fino, Laboratorio de Ensayos de COVIPAL



**a.3.Partículas Planas y Alargadas.**

Es el porcentaje en peso del agregado grueso cuya relación entre las dimensiones máxima y mínima es mayor de 5, las partículas alargadas son indeseables por que tienden a romperse durante la construcción y el tránsito. (Garnica, Gómez, & Delgado, 2003).

El ensayo para la determinación de partículas planas y alargadas es visual y usa un dispositivo que comprueba las relaciones entre las dimensiones notables de la partícula: largo, ancho y espesor. El criterio de consenso es limitar el porcentaje de partículas planas y alargadas, ya que estas tienden a partirse bajo cargas durante la construcción y servicio, además de impedir un correcto acomodo del resto de las partículas en la compactación de la mezcla. Se usa la norma ASTM D4791, con una relación de forma 5:1 (es decir, se determina el porcentaje por masa de las partículas cuya relación entre la dimensión máxima a mínima es mayor que 5). (Segovia, 2014).

**a.4.Equivalente de Arena.**

Es el porcentaje de arena presente en la fracción del agregado menor de 4.75mm. En este ensayo una muestra de agregado fino se vierte en un cilindro graduado que contienen una solución que los separa. El cilindro se agita para separar los finos de la arcilla presentes en el agregado. Después de un periodo la sedimentación que permite medir la altura de arcilla suspendida y la de arena sedimentada. La relación entre ellas es el equivalente de arena. Limitando el contenido de arcilla se realiza la relación e de adherencia entere el cemento asfáltico y el agregado. (Garnica, Gómez, & Delgado, 2003).

## Ilustración 19

### Equivalente de Arena Laboratorio de Materiales de Construcción PUCE



#### **b. Propiedades de la Fuente de Origen.**

Además de las propiedades de consenso los expertos viales pensaron que había otras características críticas del agregado. No obstante, no pudieron acordar valores críticos para estas propiedades pues son específicos de cada fuente de origen. Consecuentemente un grupo de propiedades fue recomendado. Valores específicos han sido establecidos por las agencias locales. Aun cuando estas propiedades son relevantes durante el proceso de diseño de la mezcla podrían también ser usadas como un control de aceptación de la fuente de origen, estas son: (Garnica, Gómez, & Delgado, 2003)

##### **b.1. Tenacidad.**

La tenacidad es el porcentaje de pérdida del material en una mezcla de agregados durante el ensayo de Abrasión de los Ángeles ASTM D131. Este ensayo estima la resistencia del agregado grueso a la abrasión y degradación mecánica durante el manipuleo construcción y servicio. Se realiza sometiendo al agregado grueso mayor de 2.36mm a trituración y abrasión por medio de esferas de acero y bajo el procedimiento ya especificado. (Garnica, Gómez, & Delgado, 2003).

## **b.2. Durabilidad.**

Es el porcentaje de pérdida de material en una mezcla de agregados durante el ensayo de durabilidad de áridos sometidos al ataque con sulfatos de sodio o magnesio. La norma es la ASTM C88. Este ensayo estima la resistencia del agregado al deterioro por la acción de los agentes climáticos durante la vida útil del pavimento. Puede aplicarse tanto a agregados gruesos como finos. (Garnica, Gómez, & Delgado, 2003).

Ilustración 20

Durabilidad de los Áridos: Laboratorio de Materiales de Construcción PUCE



## **b.3. Materiales Deletéreos.**

Los materiales deletéreos se definen como el porcentaje en peso de los contaminantes como esquistos, madera, mica, carbón mezclados con agregados. Puede aplicarse a agregados finos como gruesos. (Garnica, Gómez, & Delgado, 2003)

### **1.7.2. Granulometría.**

(Garnica, Gómez, & Delgado, 2003) indican que:

El sistema SUPERPAVE ha modificado el enfoque de la granulometría Marshall. Emplea el exponente 0.45 en la carta de granulometría permitida (Gráfica de Fuller). Esta carta usa una técnica gráfica única para juzgar la distribución de tamaños acumulados de partículas de una mezcla de agregados. Las ordenadas de la carta son los porcentajes que pasan; las abscisas en escala aritmética representan las aberturas de los tamices en mm, elevadas a la potencia 0,45. Un rango importante de esta carta es la granulometría de máxima densidad;

corresponde a una línea recta extendida desde la abscisa de tamaño máximo de agregado y ordenada 100%, hasta el origen (0%, 0 mm). La granulometría de máxima densidad representa la graduación para la cual las partículas de agregado se acomodan entre si conformando el arreglo volumétrico más compacto posible. Evidentemente esta granulometría debe evitarse por que habría muy poco espacio entre los agregados como para permitir el desarrollo de una película de asfalto lo suficientemente gruesa como para obtener una mezcla durable. Para especificar la granulometría del agregado se emplean dos conceptos adicionales: puntos de control y una zona restringida. Los puntos de control son puntos de paso obligado por la curva granulométrica y corresponden al tamaño máximo nominal, un tamaño intermedio 2.36mm y un tamaño de finos 0.075mm. Por su parte la zona restringida se ubica entre los tamaños intermedios (4.75 o 2.36 mm) y 0.3mm. Forma una banda por la cual la curvatura granulométrica no deberá pasa. Granulometrías que pasan a través de la zona de restricción desde abajo se llaman ‘humped graduations’ graduaciones con joroba por la forma característica de joroba que se forma en la curva al pasar por aquella zona. En la mayoría de los casos estas curvas indican una mezcla con mucha arena fina en relación con el total de la arena. Las granulometrías que violan la zona restringida poseen un esqueleto granular débil que depende demasiado de la rigidez del cemento asfaltico para alcanzar una mezcla con resistencia al corte. Un diseño de la estructura del agregado que pase entre los puntos de control y evite la zona de restricción satisface los requerimientos granulométricos de SUPERPAVE. (Garnica, Gómez, & Delgado, 2003)

## Ilustración 21

### Granulometría Serie Fina y Gruesa de los Agregados.

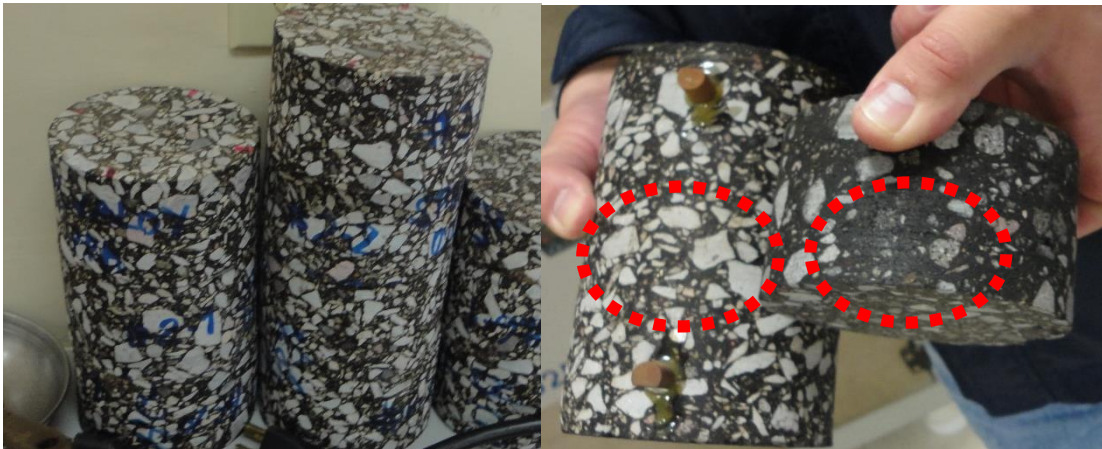


#### 1.7.3. Método Bailey - Selección del Esqueleto Mineral.

Las mezclas asfálticas están compuestas de material consistente de partículas de agregado mineral como partes de roca dura, de diferentes tamaños, un ligante asfáltico y vacíos de aire. La respuesta de una mezcla asfáltica a las cargas de tráfico y a las condiciones ambientales depende de los constituyentes y proporciones (por volumen) de cada componente. La manera en como una mezcla asfáltica responde al ahuellamiento, agrietamiento, y durabilidad es directamente relacionada con la respuesta de la mezcla a las cargas. El método Bailey para la selección de las proporciones de los agregados considera el empaquetamiento de los agregados optimizando su trabazón y suministrando adecuadas propiedades volumétricas a la mezcla. Los parámetros de graduación de la mezcla combinada están directamente relacionados con los vacíos en el agregado mineral [VMA], vacíos de aire [Va], y las propiedades de compactación. (Vavrik, Huber, Pine, Carpenter, & Bailey, 2002).

## Ilustración 22

### Ejemplo de Muestra de Empaquetamiento de Agregados en HMA



El método Bailey usa dos principios que son la base de las correlaciones entre la graduación de los agregados y las propiedades volumétricas de la mezcla. Estos son: el empaquetamiento de los agregados y la definición de agregados gruesos [AC] y agregados finos [AF] de la mezcla resultante. Con estos principios se procede a combinar los agregados por volumen y analizar la mezcla combinada. (Vavrik, Pine, & Carpenter, Aggregate Blending for Asphalt Mix Design Bailey Method, 2002)

#### **a. Empaquetamiento del Agregado.**

Para el empaquetamiento de las partículas influye: la cantidad de la energía de compactación, la forma de las partículas, la textura superficial de los agregados, la distribución de tamaños, y la dureza. Estas propiedades se pueden caracterizar para gruesos y finos. (Vavrik, Huber, Pine, Carpenter, & Bailey, 2002)

## Ilustración 23

## Principio 3D del empaquetamiento del Agregado



**b. Agregados Gruesos [AC] y Agregados Finos [AF].**

Para el método Bailey el Agregado Grueso [AC] son las partículas largas de agregado que cuando se colocan en un volumen crean vacíos. El Agregado Fino [AF] son partículas que pueden llenar los vacíos creados por el agregado grueso en la mezcla. De esto se define el control Tamaño de Partícula Máximo Nominal NMPS como un tamiz más grande que el primer tamiz que retiene más del 15% y 10% en densas gruesas. Se define al Tamiz Primario de control PCS como  $PCS = 0.22 \text{ NMPS}$ . (Vavrik, Huber, Pine, Carpenter, & Bailey, 2002)

**c. Combinación de Agregados por Volumen – Pesos Unitarios RUW, LUW.**

Para evaluar el grado de trabazón del agregado en una mezcla el diseñador necesita evaluar una mezcla basada en volumen, la información necesaria para cada depósito de agregado [stockpile], es necesario conocer el peso unitario suelto [LUW], el peso unitario compactado con barra [RUW], estos datos volumétricos especifican la estructura de vacíos requerida para evaluar el empaquetamiento de la mezcla. Para el determinar el peso unitario LUW se utiliza el procediendo AASHTO T 19 mediante paleado [shoveling]. Para determinar el peso unitario RUW se procede con la norma AASHTO T 19 mediante compactación con barra [rodding]. Otro parámetro necesario para las propiedades volumétricas es el peso unitario

[CUW] del agregado grueso [AC] que se lo toma como un porcentaje del peso unitario LUW. Para mezclas densas finas [CUW AC] está entre 60% - 85% del [LUW]. Para mezclas densas gruesas [CUW AC] está entre 95% - 105% del [LUW]. Para mezclas pesadas [SMA - STONE MASTIC ASPHALT] el peso unitario del agregado grueso se toma dentro de 110% a 125% del peso unitario compactado [RUW]. Para el agregado fino [AF] se necesita determinar el peso unitario compactado [RUW] utilizando para este efecto un molde pequeño como el molde para el ensayo proctor, y siguiendo el procedimiento AASHTO T 19. (Vavrik, Huber, Pine, Carpenter, & Bailey, 2002).

#### Ilustración 24

Determinación de Pesos Unitarios LUW-RUW, Agregado Grueso y Fino



#### d. Relación CA - Relación del Agregado Grueso de la Mezcla Combinada.

Este parámetro evalúa el empaquetamiento de la porción gruesa del agregado. Para el cálculo de este parámetro se determina el tamiz medio PHS como  $PHS = 0.5 \times NMPS$ , entonces: (Vavrik, Huber, Pine, Carpenter, & Bailey, 2002):

$$CA = \frac{\% \text{ pasa PHS} - \% \text{ pasa PCS}}{100\% - \% \text{ pasa PHS}}$$

#### e. Relación FAc. - Porción Gruesa del Agregado Fino de la Mezcla Combinada.

Todo el agregado fino debajo del PCS puede ser visto como una mezcla que contiene agregado grueso y fino. La porción gruesa del agregado fino crea vacíos que serán llenados

con el apropiado volumen de la porción fina del agregado fino. Para determinar este factor de porción gruesa del agregado fino es necesario definir otro punto de quiebre como es el tamiz de control secundario SCS, en función del tamiz de control primario.  $SCS = 0.22 PCS$ . (Vavrik, Huber, Pine, Carpenter, & Bailey, 2002):

$$FAc = \frac{\%pasa\ SCS}{\%pasa\ PCS}$$

**f. Relación FAf – Porción Fina del Agregado Fino de la Mezcla Combinada.**

La porción fina del agregado fina llena los vacíos creados por la porción gruesa del agregado fino. Esta relación muestra como la porción fina del agregado fino crea el empaquetamiento. Es necesario definir un punto de quiebre más, conocido como tamiz terciario de control TCS, en función del tamiz secundario de control SCS. Para esto el  $TCS = 0.22 SCS$ . (Vavrik, Huber, Pine, Carpenter, & Bailey, 2002):

$$FAf = \frac{\%pasa\ TCS}{\%pasa\ SCS}$$

En función de estos parámetros los investigadores han establecido correlaciones entre las propiedades volumétricas de las mezclas asfálticas y los parámetros que caracterizan el comportamiento del esqueleto mineral.

**g. Variaciones para Mezclas Densas Finas.**

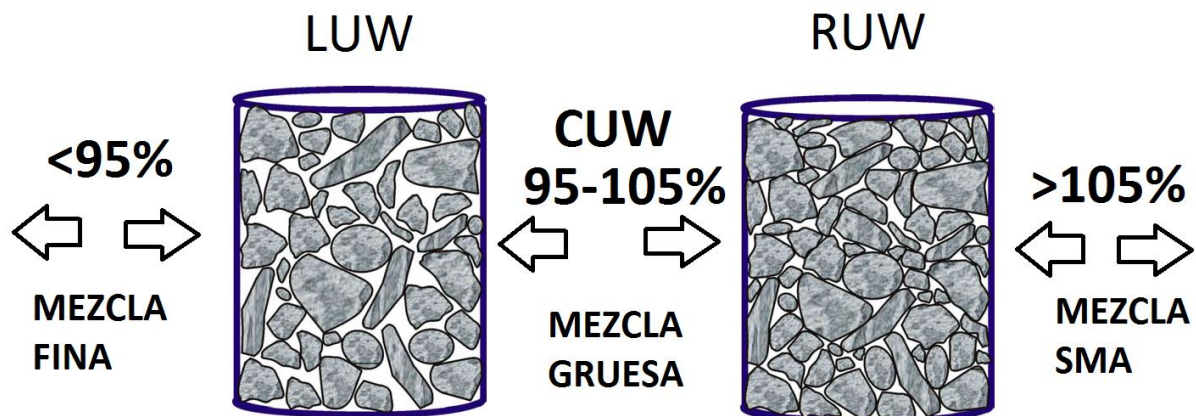
Para mezclas finas el CUW debe estar entre 60-85% del LUW, valores cercanos a 85% producen un bajo VMA, valores superiores a 85% son inestables por falta de agregados gruesos. Al reducir el CUW, aumenta VMA, las porciones finas reorientan los vacíos, las partículas gruesas flotan, la columna vertebral del esqueleto mineral lo compone la fracción fina quien toma el control y la carga aplicada. Es ideal para capas delgadas superficiales. Un cambio de 6% en PCS es similar a un cambio de 1% en VMA o Va. Para aumentar el VMA aumentar % pasa PCS, disminuir CUW. (Segovia, 2014)

**h. Variaciones para Mezclas Densas Gruesas.**

Para mezclas densas gruesas el CUW debe estar entre 95% y 105% del LUW. Cuando el valor es cercano al 95% la mezcla es más compactable, disminuye VMA, puede ser inestable por falta de trabazón en los agregados gruesos. Valores cercanos 105% presentan un mejor contacto de gruesos, la mezcla puede ser difícil de compactar en campo. Un cambio de 4% en PCS es similar a un cambio de 1% VMA en un rango del 3-5%. Si aumenta CUW mantener una altura mínima para compactación. Si se requiere aumentar el VMA y ayudar a la compactación utilizar finos triturados.

Ilustración 25

Tipos de Mezcla en función del CUW



#### 1.7.4. Requerimientos Volumétricos de la Mezcla Superpave.

Una mezcla asfáltica puede caracterizarse de acuerdo a las relaciones de volumen de sus componentes (típicamente agregados, asfalto y aire). Debido a que en la práctica resulta más útil usar medidas de masa para dosificar los ingredientes, también se hace uso de las relaciones relativas entre masa y volumen (gravedades específicas) para ejecutar las conversiones. (Segovia, 2014).

##### a. Gravedad específica de los agregados.

La gravedad específica de los agregados se define como la relación entre la masa en aire de un volumen unitario de material a una temperatura establecida, con respecto a la masa en

aire de un volumen igual de agua destilada libre de gas a una temperatura establecida. En los cálculos volumétricos se usan tres tipos de gravedades específicas para los agregados: *bulk*, *aparente* y *efectiva*. La determinación de la gravedad específica bulk y aparente en los agregados se consigue con los procedimientos de los estándares AASHTO T 84 para agregados finos y AASHTO T 85 para agregados gruesos. La gravedad específica bulk, considera el volumen permeable de las partículas de los agregados, es decir los poros permeables al asfalto y al agua. La gravedad específica aparente, por el contrario, no incluye el volumen de poros permeables al agua y al asfalto. La gravedad específica de los agregados no incluye los vacíos entre partículas. Debido al hecho que las mezclas asfálticas se construyen usando una mezcla de dos o más fracciones de agregados, la gravedad específica bulk de la mezcla de agregados se calcula con la siguiente expresión. (Segovia, 2014).

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

Donde:

$G_{sb}$  = gravedad específica bulk de la mezcla de agregados

$P_1, P_2, \dots, P_n$  = porcentajes individuales por masa de los agregados

$G_1, G_2, \dots, G_n$  = gravedades específicas individuales de los agregados. (Asphalt Institute, 2001).

Ilustración 26

Condición SSS, para Gravedad Especifica Agregado Fino y Grueso



Una expresión igual se usa para el cálculo de la gravedad específica aparente de la mezcla de agregados. La gravedad específica máxima teórica considera el volumen de agregados y asfalto, sin incluir vacíos de aire y se calcula con el procedimiento de la normativa ASTM D2041. Otro parámetro importante para los cálculos volumétricos, es el conocido como gravedad específica efectiva. El volumen usado en estos cálculos excluye los poros permeables al asfalto, es decir excluye el volumen de agregado que permite la absorción de asfalto y se calcula con la siguiente expresión. (Segovia, 2014).

$$Gse = \frac{100 - Pb}{\frac{100}{Gmm} - \frac{Pb}{Gb}}$$

Gse = gravedad específica efectiva del agregado

Gmm = gravedad específica máxima teórica

Pb = porcentaje de asfalto con el que se determino Gmm (de la masa total de la mezcla)

Gb = gravedad específica del asfalto. (Asphalt Institute, 2001)

Para el proceso de diseño, es necesario determinar la gravedad específica máxima teórica a diferentes contenidos de asfalto. Si no se ejecuta el ensayo directamente a otros contenidos, se puede estimar su valor con la siguiente expresión. (Asphalt Institute, 2001).

$$Gmm = \frac{100}{\frac{Ps}{Gse} + \frac{Pb}{Gb}}$$

Donde

Ps = contenido de agregado, en porcentaje de la masa total de la mezcla. (Asphalt Institute, 2001).

## Ilustración 27

## Gravedad Especifica del Ligante



Una vez determinadas las gravedades específicas se procede a evaluar la mezcla compactada mediante los parámetros volumétricos de la mezcla que son: vacíos de aire, vacíos del agregado mineral, y vacíos llenos de asfalto. El contenido de aire es una propiedad importante que se utiliza como base para la selección del contenido del cemento asfáltico. Superpave define los vacíos del agregado mineral (VAM), como la suma del volumen de vacíos de aire y de asfalto efectivo en una muestra compactada. Representa los vacíos entre las partículas del agregado. Los vacíos llenos de asfalto (VAF) son el porcentaje de (VAM) que contiene cemento asfáltico. Consecuentemente (VFA) es el volumen de cemento asfáltico efectivo expresado como el porcentaje de (VAM). (Garnica, Gómez, & Delgado, 2003)

**b. Absorción de asfalto.**

La absorción de asfalto se define como el porcentaje de asfalto respecto a la masa total del agregado, calculada como se indica a continuación. (Asphalt Institute, 2001)

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

Donde

Pba = asfalto absorbido, como porcentaje de la masa de agregado. (Asphalt Institute, 2001)

### c. Contenido del asfalto efectivo.

Considerando que una parte del asfalto añadido al agregado es absorbido por sus poros permeables al asfalto, es necesario calcular el contenido restante, que es el que formará la película alrededor de las partículas de agregado. Este porcentaje de asfalto se conoce como asfalto efectivo y se calcula con la fórmula siguiente. (Segovia, 2014).

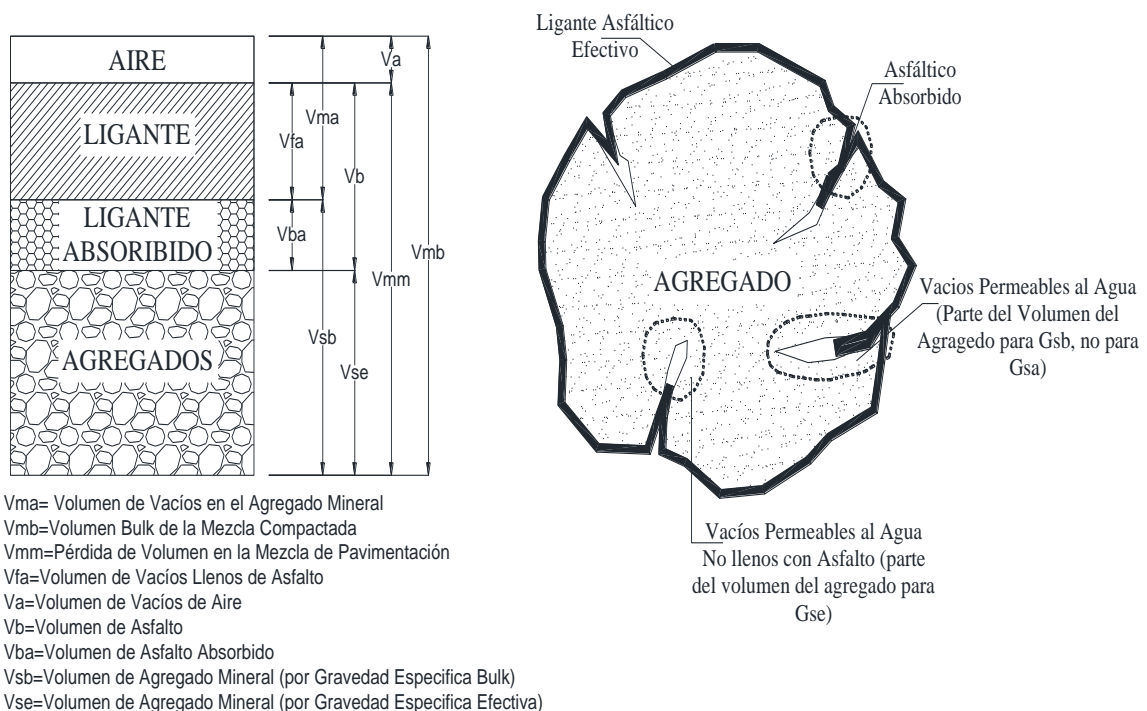
$$P_{be} = P_b - \frac{P_{ba}}{100} \cdot P_s$$

Donde

$P_{be}$  = contenido de asfalto efectivo, como porcentaje de la masa de la mezcla. (Asphalt Institute, 2001).

#### Ilustración 28

Esquema Volumétrico de HMA, e Ilustración de las Gravedades Específicas



(NCHRP, 2011)

### d. Vacíos de agregado mineral.

Los vacíos de agregado mineral, como se ha definido anteriormente, son el porcentaje respecto al volumen total de la mezcla compactada, no ocupado por las partículas de

agregado. Los técnicos que trabajaron realizando las especificaciones Superpave, decidieron que el cálculo de VMA debe hacerse de acuerdo a la definición del manual MS-2 del Instituto del Asfalto, es decir, usando la gravedad específica de la mezcla de agregados, como se indica a continuación. (Segovia, 2014).

$$VMA = 100 - \frac{Gmb \cdot Ps}{Gsb}$$

Donde

VMA = vacíos de agregado mineral como porcentaje del volumen de la mezcla

Gmb = gravedad específica bulk de la mezcla compactada conforme. (Asphalt Institute, 2001).

#### **e. Vacíos de Aire.**

La especificación AASHTO M323 define a los vacíos de aire como pequeños paquetes de aire entre las partículas de agregado cubiertas en una mezcla compactada, expresados como un porcentaje del volumen bulk de la mezcla compactada, expresados como un porcentaje del volumen bulk de la mezcla compactado. Los vacíos de aire se calculan, de acuerdo a los técnicos usando la gravedad específica bulk de la mezcla compactada y la gravedad específica máxima teórica, de acuerdo a la siguiente expresión. (Segovia, 2014)

$$Va = 100 \cdot \frac{Gmm - Gmb}{Gmm}$$

Donde

Va = vacíos de aire, como porcentaje del volumen total de la mezcla. (Asphalt Institute, 2001).

#### **f. Vacíos Llenos de Asfalto.**

Los vacíos llenos de asfalto son el porcentaje de VMA que contiene ligante, es decir, el volumen de asfalto efectivo dividido entre el VMA. Establecieron que el cálculo de los

vacíos llenos de asfalto se realice con los parámetros VMA y Va como se define a continuación. (Segovia, 2014)

$$VFA = 100 \cdot \frac{VMA - Va}{VMA}$$

Donde

VFA = vacíos llenos de asfalto. (Asphalt Institute, 2001).

### g. Relación Filler – Ligante.

Este indicador se define como la razón por masa del porcentaje de agregado pasante del tamiz de 75 µm y el contenido de ligante efectivo ( $P_{be}$ ) y se utiliza para un control de la cantidad de filler en la mezcla. El filler puede ser una fracción natural de los agregados o una fracción más el proceso de mezcla. Como resultado del análisis de los expertos, la sección de la norma AASHTO M323 que controla los parámetros volumétricos es la que se presenta en la Tabla. (Segovia, 2014).

Tabla 10

Requisitos Superpave de Diseño para Mezclas Asfálticas en Caliente

ESALs <sup>a</sup>	Densidad Relativa requerida, % Gmm			VMA, porcentaje mínimo TMN, mm						VFA <sup>b</sup> rango, %	Relación filler - ligante, rango <sup>c</sup>
	Nini	Ndes	Nmax	37,5	25	19	12,5	9,5	4,75		
<0,30	= < 91,5	96,0	= < 98,0	11,0	12,0	13,0	14,0	15,0	16,0	70-80 <sup>d</sup>	0,6-1,2
0,3a <3	= < 90,5	96,0	= < 98,0	11,0	12,0	13,0	14,0	15,0	16,0	65-78	0,6-1,2
3a <10	= < 89,0	96,0	= < 98,0	11,0	12,0	13,0	14,0	15,0	16,0	65-75 <sup>e</sup>	0,6-1,2
10a <30	= < 89,0	96,0	= < 98,0	11,0	12,0	13,0	14,0	15,0	16,0	65-75 <sup>e</sup>	0,6-1,2
>= 30	= < 89,0	96,0	= < 98,0	11,0	12,0	13,0	14,0	15,0	16,0	65-75 <sup>e</sup>	0,6-1,2

<sup>a</sup> calculado con una proyección de tráfico de 20 años

<sup>b</sup> Para un TMN de 37,5 mm, el VFA puede tener un mínimo de 64% para todo nivel de tráfico

<sup>c</sup> Para un TMN de 4,75 mm la relación filler - ligante será de 0,9 a 2,0

<sup>d</sup> Para TMN de 25,0 mm, el límite inferior de VFA será 67% para un nivel de tráfico de < 0,3 mill. ESAL

<sup>e</sup> Para un TMN de 9,5 mm y un nivel de tráfico > 3 mill. ESAL, el rango de VFA será 73 a 76%, mientras que para TMN de 4,75 mm el rango será de 75 a 78 %

Tomado y editado de AASHTO M 323

(AASHTO, Superpave Volumetric Mix Design, 2007) Tomado y Editado.

La norma menciona que, para mezclas finas de agregados, la relación filler-ligante puede ser incrementada a un rango de 0.8 a 1.6. Con respecto a los límites superiores de VMA, que como se ha explicado, sostienen un criterio de durabilidad para la mezcla, la especificación sugiere que se mantengan como máximo 2% más alto del límite inferior, para evitar ahuellamiento. (Segovia, 2014).

### 1.7.5. Compactador Giratorio Superpave.

Las investigaciones del programa SHRP, tienen algunos objetivos referentes al método de compactación, el más importante es lograr una compactación realística en el laboratorio de las muestras de ensayo, que sea representativa de las condiciones de clima y de carga, de manera que se puedan identificar los potenciales problemas en el comportamiento de la mezcla tendida, con este fin se desarrolló el SGC, “Superpave Gyrotory Compactor”, Compactador Giratorio Superpave.

Ilustración 29

Compactador Giratorio SUPERPAVE – Laboratorio PUCE



Los parámetros a evaluar en el compactador giratorio son el número de giros, el esfuerzo vertical, la velocidad de rotación, y el ángulo de giro; Los parámetros son: Numero de Giros,

Esfuerzo Vertical, Velocidad de Rotación, Angulo de Giro. (Garnica, Gómez, & Delgado, 2003).

Los componentes del compactador SGC son: (1) Marco de Carga, Base Rotatoria y Motor, (2) Sistema de Carga, Pistón de Carga, y Medidor de Presión, (3) Sistema de Medida y Registro de Altura del Espécimen, (4) Molde y Plato de la Base, (5) Sistema de extrusión del espécimen compactado. El mecanismo de carga aplica una presión de compactación de 600 kPa., sobre el espécimen. El dispositivo de medida mantiene constante la presión durante la compactación. El molde tiene un diámetro interior de 150 mm manteniendo al espécimen confinado durante el proceso. La base gira a una tasa constante de 30 revoluciones por minuto durante la compactación, con el molde posicionado a un ángulo de compactación de 1.25 grados. La medida de la altura del espécimen es una importante función del SGC. La densidad puede ser estimada durante la compactación conociendo la masa del material colocado en el molde, con el diámetro del molde y la altura del espécimen. La altura es medida continuamente por registro de la posición del pistón de carga a lo largo del ensayo y gravada, con esos datos las características de compactación del espécimen son determinadas. Como sucede con otros métodos, la mezcla asfáltica es diseñada para un nivel de esfuerzo de compactación. En Superpave este esfuerzo es una función del número de giros de diseño, que a su vez es una función del nivel de tráfico representado por los Ejes Equivalente de Carga ESALs. (Asphalt Institute, 2001)

Tabla 11

Nº de Giros del Compactador Superpave en Función del Tráfico

<b>Esfuerzo de Compactación Giratorio Superpave</b>				<b>Aplicaciones Típicas del Pavimento <sup>b</sup></b>
<b>ESALs <sup>a</sup> de Diseño [millones]</b>	<b>Parámetro de Compactación</b>			
	<b>N</b>	<b>N</b>	<b>N</b>	
	<b>inici.</b>	<b>diseño</b>	<b>máximo</b>	
<b>&lt; 0,3</b>	6	50	75	Pavimentos con tráfico liviano, con tráfico de camiones prohibido o nivel mínimo. Tráfico

				de nivel local, no regional intra estatal o interestatal. Vías de uso recreacional.
<b>0,3 a &lt; 3</b>	7	75	115	Aplicaciones incluyen vías colectoras o calles de acceso. Trafico Medio, calles de ciudad, pavimentos de una provincia
<b>3 a &lt; 30</b>	8	100	160	Incluye calzadas con dos carriles, o multi carriles con accesos controlados. Tráficos medios y altos, calles de ciudad, vías estatales, autovías.
<b>&gt;= 30</b>	9	125	205	Incluye la mayoría del sistema inter estatal. Alto Tráfico de camiones, o carriles para rebasamiento de camiones, vías de dos carriles.

<sup>a</sup> Determinar los ESALs para 20 años para el nivel de trafico anticipado del proyecto sobre el carril de diseño y un periodo de 20 años independiente mente de la actual vida de diseño.

<sup>b</sup> Como se define por la norma de diseño geométrico de autopistas y vías AASHTO 1994

(AASHTO, Superpave Volumetric Design for Hot Mix Asphalt (HMA), 2004)

El parámetro N inicial permite identificar las muestras que podrían ser difíciles de compactar en el campo, no es recomendable alcanzar un alto grado de compactación a un bajo número de giros. N diseño corresponde al número de giros con el cual se diseña la mezcla asfáltica. N final garantiza un grado de estabilidad de la muestra cuando sea puesta en servicio y transitada por vehículos pesados, no se recomienda que la mezcla tenga un porcentaje de huecos menor al 2% para N de diseño ya que puede producirse exudación e inestabilidad. (Segovia, 2014).

### Ilustración 30

Determinación de la Gravedad Especifica Máxima Teórica Gmm.



(Asphalt Institute, 2001) indica que:

La gravedad específica bulk  $G_{mb}$  del espécimen compactado y la gravedad específica máxima  $G_{mm}$  de la mezcla suelta son medidos, un valor estimado del  $G_{mb}$ , a cualquier valor de giro “N” es calculado dividiendo la masa de la mezcla por el volumen del molde de compactación:

$$G_{mb \text{ (estimado)}} = \frac{W_m / V_{mx}}{\gamma_w}$$

Donde:

$G_{mb \text{ (estimado)}}$  = Gravedad específica bulk estimada del espécimen durante la compactación.

$W_m$  = masa espécimen [g].

$\gamma_w$  = densidad del agua = 1 g/cm<sup>3</sup>.

$V_{mx}$  = volumen de compactación del molde, en función del  $\emptyset$  y la altura del espécimen.

Ilustración 31

Determinación de la Gravedad Específica Bulk  $G_{mb}$ .



Este  $G_{mb}$  estimado es diferente del  $G_{mb}$  medido al N diseño de compactación, por lo tanto, se corrige con el siguiente factor:

$$C = \frac{G_{mb \text{ (medido)}}}{G_{mb \text{ (estimado)}}$$

$G_{mb \text{ (medida)}}$  = Gravedad específica bulk medida después de N diseño

$G_{mb \text{ (estimada)}}$  = Gravedad específica bulk estimada en N diseño

De esta forma se puede determinar la gravedad específica bulk del espécimen en cualquier número de giros de compactación así:

$$Gmb \text{ (corregida)} = C \times Gmb \text{ (estimada)}$$

El porcentaje [%] de la gravedad específica máxima Gmm en cualquier nivel de compactación es calculada como la relación del Gmb (corregido) al Gmm (medido) y un porcentaje promedio de Gmm es calculado para una pareja de especímenes. Usando los diferentes niveles de compactación N inicial, N diseño y N máximo, son establecidos los valores de VMA, VFA, relación de polvo, sobre un porcentaje de 4% de Va en N diseño.

Tabla 12

## Requisitos Superpave para HMA

Criterio densidad de las mezclas											
ESALs de Diseño <sup>a</sup> [millones]	Requisitos de la densidad Relativa % Gmm			VMA % mínimo Tamaño Máximo nominal, mm						VFA % rango <sup>b</sup>	polvo- Ligante Rango <sup>c</sup>
	N <sub>inicial</sub>	N <sub>diseño</sub>	N <sub>maximo</sub>	38	25,0	19,0	12,5	9,5	4,75		
<0,3	≤91,5	96,0	≤98,0	11	12	13	14	15	16	70-80 <sup>d</sup>	0,6-1,2
0,3a<3	≤90,5	96,0	≤98,0	11	12	13	14	15	16	65-78	0,6-1,2
3a<10	≤89,0	96,0	≤98,0	11	12	13	14	15	16	65-75 <sup>e</sup>	0,6-1,2
10a<30	≤89,0	96,0	≤98,0	11	12	13	14	15	16	65-75 <sup>e</sup>	0,6-1,2
≥30	≤89,0	96,0	≤98,0	11	12	13	14	15	16	65-75 <sup>e</sup>	0,6-1,2

<sup>a</sup> Determinar los ESALs para 20 años para el nivel de tráfico anticipado del proyecto sobre el carril de diseño y un periodo de 20 años independiente mente de la actual vida de diseño.

<sup>b</sup> Para 37,5 mm TMN el límite inferior de VFA puede ser 64 para todos los niveles de tráfico

<sup>c</sup> Para 4,75 mm TMN la relación polvo - ligante puede ser 0,9 - 2,0

<sup>d</sup> Para 25,0 mm TMN el límite inferior VFA puede ser 67 para ESALs < 0,3 millones

<sup>e</sup> Para ESALs > 3 millones; 9,5 mm TMN el rango VFA puede ser 73 a 76% y para TMN de 4,75 mm puede ser 75 a 78%

(AASHTO, Superpave Volumetric Mix Design, 2007)

(Asphalt Institute, 2001) indica que:

El porcentaje de vacíos de aire en N diseño es determinado con la ecuación:

$$Va = 100 - \%Gmm@Ndis$$

El porcentaje de vacíos en el agregado mineral es calculado usando:

$$\%VMA = 100 - \left( \frac{\%Gmm@Ndis \times Gmm \times Ps}{Gsb} \right)$$

Donde:

Va = vacíos de aire en N diseño, % del volumen total.

VMA = vacíos en el agregado mineral, % del volumen bulk.

%Gmm@Ndis = gravedad específica máxima teórica en N diseño.

Gmm = gravedad específica máxima teórica.

Gsb = gravedad específica bulk del agregado total.

Ps = contenido de agregado  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ , por la masa total de la mezcla.

El contenido de asfalto estimado para N diseño ósea para cuatro por ciento de vacíos de aire es calculado usando la ecuación:

$$Pb \text{ estimado} = Pbi - (0.4 \times (4 - Va))$$

Pb estimado = contenido de asfalto estimado, % en masa de la mezcla.

Pbi = contenido de asfalto inicial % en más a de la mezcla

Va = porcentaje de vacíos de aire en N diseño

Los volumétricos VMA y VFA en N diseño y la densidad de la mezcla en N inicial son entonces estimados en este contenido de ligante asfáltico usando las ecuaciones:

$$\%VMA \text{ estimado} = \%VMA \text{ inicial} + Cx \cdot (4 - Va)$$

Cx = 1.0 si Va es menor que 4.0%;

Cx = 2.0 si Va es mayor que 4.0%

$$\%VFA \text{ estimado} = 100 \times \frac{(\%VMA \text{ estimado} - 4.0)}{\%VMA \text{ estimado}}$$

Para %Gmm en N inicial se tiene que:

$$\%Gmm \text{ estimado@Nini} = \%Gmm \text{ prueba@Nini} - (4.0 - Va)$$

Finalmente, el contenido de ligante asfáltico efectivo se calcula como sigue:

$$Pbe = -(Ps \times Gb) \times \left( \frac{Gse - Gsb}{Gse \times Gsb} \right) + Pb, \text{ estimado}$$

Donde:

$P_{be}$  = contenido de asfalto efectivo, % en masa del total de la mezcla.

$P_s$  = contenido de agregado, % en masa de la mezcla

$G_b$  = Gravedad específica del asfalto

$G_{se}$  = gravedad específica efectiva del agregado

$G_{sb}$  = Gravedad específica bulk del agregado

$P_b$  = contenido asfalto, % en masa de la mezcla

La Proporción del Polvo es calculada como:

$$DP = \frac{P_{0.075}}{P_{be}}$$

Donde:

$P_{0.075}$  = contenido de agregado pasante del tamiz 0.075 mm, % en masa del agregado

$P_{be}$  = contenido de asfalto efectivo, % en masa del total de la mezcla.

#### **1.7.6. Daño Inducido por Humedad.**

El ensayo de susceptibilidad a la humedad para evaluar una HMA al desprendimiento es la norma AASHTO T 283. Este ensayo que no se basa en el desempeño sirve para dos propósitos; primero, identificar si una combinación de cemento asfáltico y agregado es susceptible a la acción del agua, segundo, mide la efectividad de los aditivos anti desprendimiento o de mejora de adherencia. (Garnica, Gómez, & Delgado, 2003)

El ensayo consiste en preparar seis muestras de mezcla asfáltica en caliente usando la metodología Marshall, con un contenido de vacíos entre 6% - 8%. El alto contenido de vacíos acelera el daño inducido por humedad. Las muestras son divididas en dos grupos, uno (1) denominado grupo de control y otro (2) llamado grupo acondicionado. Las muestras pertenecientes al grupo acondicionado son saturadas de agua al vacío en un porcentaje del 70% al 88% según la norma del año 2003, y después colocadas en una nevera a -17°C durante un periodo que va de 16 a 18 horas. Después estos especímenes acondicionados son colocados en un baño de agua a 60°C durante 24 horas, una vez que se ha dado la

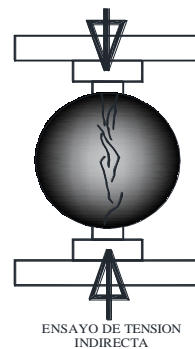
congelación/descongelación se mide el esfuerzo de tensión indirecta  $St$ , en todas las muestras con una carga de deformación de 2plg/min, determinando la relación del Esfuerzo de Tensión TSR como sigue:

$$TSR = \frac{St \text{ acondicionadas}}{St \text{ control}}$$

Una estimación visual de la peladura de las muestras acondicionadas completa el procedimiento. Para cumplir los requisitos de diseño Superpave para HMA el valor de TSR debe ser mayor al 80%. (Liang, 2008)

Ilustración 32

Ensayo de Tensión Directa



## CAPITULO 2

### 2 Estudios de Laboratorio.

#### 2.1 Estudios en el Aceite Desechado.

##### 2.1.1 Punto Inflamación y Combustión.

Para efectos de seguridad en los procedimientos aplicados en el laboratorio es necesario conocer el punto de llama que caracteriza al aceite desechado que se va utilizar como rejuvenecedor para lo cual se sigue el procedimiento establecido en la normativa AASHTO T 48 descrita para el punto de Inflamación y Combustión por la copa abierta de Cleveland.

Según (ASTM, 2005), estos puntos son la condición donde el vapor sobre el espécimen de ensayo y el espécimen de ensayo, no están en equilibrio al tiempo que la fuente de ignición se aplica, causado primariamente por el calentamiento del espécimen a una velocidad

constante de 5 a 6 °C/min.. El Punto de Combustión se da cuando las igniciones de los vapores enciendan por un mínimo de 5 segundos. El Punto de Inflamación se da cuando la ignición de los vapores provoca llama continua. (ASTM, 2005)

Los resultados obtenidos arrojan un valor promedio de 205°C, como punto de Inflamación.

Ilustración 33

Punto de Inflamación



### 2.1.2 Viscosidad.

La viscosidad se determina como la razón entre el esfuerzo de corte aplicado y la tasa de corte expresado como un coeficiente que expresa una medida de la resistencia a fluir de un líquido. El ensayo consiste en proveer un torque requerido para mantener una velocidad rotacional constante de un eje mientras gira sumergido en la muestra a una temperatura constante midiendo la resistencia relativa a la rotación. El torque y la velocidad son usados para determinar la viscosidad (AASHTO, Viscosity Determination of Asphalt Binder Using Rotational Viscometer, 2003).

## Ilustración 34

## Determinación de la Viscosidad con Viscosímetro Brookfield



## 2.2 Simulación del Envejecimiento a Corto Plazo.

El sistema SUPERPAVE por sus siglas en inglés, desarrollo métodos para simular el envejecimiento del pavimento bajo condiciones controladas en laboratorio. El proceso que se sigue es el normado por la especificación ASSHTO T 240 y denominado Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test), es decir efecto del Calor y del Aire sobre una Lámina Asfáltica en Movimiento. La muestra que va hacer envejecida simulando la perdida de sus componentes volátiles por causa de los procesos de mezcla y construcción consiste en asfalto con clasificación tradicional AC-20 de uso comercial producido por la refinería de Esmeraldas y facilitado por la empresa IMPTEK.

(AASHTO, Effect of Head and Air on a Moving Film of Asphalt, 2008) indica que:

La muestra debe estar libre de agua, con la ayuda de una estufa programable se acondiciona la muestra hasta que se halle completamente fluida, el tiempo necesario para este calentamiento es de 30 a 45 minutos dependiendo del tamaño de la muestra. Se acondiciona el horno RTFOT a 163°C el tiempo requerido para alcanzar esta temperatura es de  $\pm 30$  minutos. Se coloca alrededor de  $35 \pm 0.5$  g., de ligante original en cada contenedor de cristal disponible, después de verter el ligante rolar el frasco sobre una franela limpia de manera muy cuidadosa distribuyendo uniformemente el ligante en el interior del frasco de manera

que se cubra toda su superficie interna. Con la ayuda de un asistente instalar los contenedores de cristal en sus módulos dentro del carrito giratorio procurando que la temperatura del horno no varíe drásticamente. Calibrar el flujo de aire a  $4000 \pm 300$  mL/min., y realizar el proceso de envejecimiento en el horno durante el tiempo de 85 min. La capacidad de cada frasco de cristal es de 35 g., el carrito giratorio del horno dispone de 8 plazas para colocar los contenedores, no siempre es posible llenar el carrito debido a la disponibilidad de frascos para las muestras. En el presente estudio se han ocupado en cada proceso seis frascos para realizar el procedimiento. El producto del RTFOT se extrae y deposita en frascos metálicos nuevos y limpios de capacidad un litro, se acumula el ligante envejecido hasta una almacenar una cantidad aproximada a 500 g., dado que es necesario calentar estas muestras para los procesos posteriores de envejecimiento PAV, mezcla, y clasificación PG, entre otros ensayos. Tomando en consideración que el ligante envejecido por el proceso RTFOT tiene un tiempo máximo de 72 horas para ser usado en otros ensayos, considerando el cronograma del laboratorio y del personal se procede inmediatamente a realizar el envejecimiento del ligante a largo plazo.

#### Ilustración 35

#### Envejecimiento en Horno RTFOT y Ensayo de Cambio de Masa



### 2.3 Simulación del Envejecimiento a Largo Plazo.

EL residuo del proceso RTFOT se utiliza como muestra para el proceso de envejecimiento a largo plazo. Los efectos del envejecimiento del asfalto por condiciones ambientales y de servicio no se habían incorporado en especificaciones para cementos asfálticos previo a las especificaciones SUPERPAVE. Estas especificaciones usan la Vasija de Envejecimiento a Presión “PAV” Pressurized Aging Vessel por sus siglas en inglés, usada por muchos años en investigaciones en asfaltos, siendo modificada por el programa SHRP para estimar las propiedades físicas o químicas del ligante asfáltico después de cinco a diez años de envejecimiento por servicio en el campo.

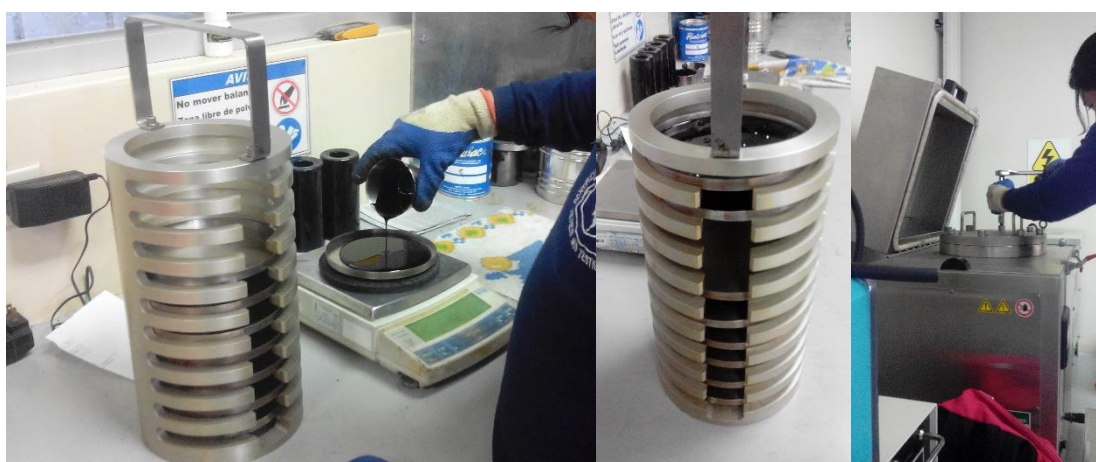
(AASHTO, Accelerated Aging of Asphalt Binder using a Pressurized Aging Vessel (PAV), 2006) manifiesta que:

La muestra para esta práctica es el residuo del RTFOT. Pre calentar las vasijas con una temperatura de 10°C a 15°C sobre la temperatura de acondicionamiento para reducir la caída de temperatura el momento de transferencia de la muestra a la vasija y evitar pérdidas de tiempo en la estabilización del sistema. Colocar las bandejas en el interior de la vasija de presión, seleccionar la temperatura de envejecimiento de acuerdo a las condiciones climáticas anotando que temperaturas sobre los 115°C pueden cambiar la química del ligante asfáltico envejecido por lo que debe ser evitada. Colocar con la ayuda de una balanza una cantidad de  $50 \pm 0.5$  g., de asfalto en cada charola lo que equivale a una lámina delgada de 3.2 mm de ligante asfáltico. Realizar las actividades de la manera más rápida posible para evitar enfriamientos de la vasija y de la torre que contiene las charolas. Esperar hasta que la temperatura de la vasija este dentro de los 20°C de la temperatura de envejecimiento para aplicar una presión de aire de  $2.1 \pm 0.1$  MPa, y entonces comenzar el tiempo de prueba. Mantener la temperatura y la presión del aire dentro de la vasija durante 20 horas  $\pm$  10 minutos. Después de las veinte horas comenzar a disminuir lentamente la presión en la vasija

usando la válvula de sangrado de manera que en  $9\pm 1$  minutos se iguale la presión interna y externa sobre el PAV. En el caso de que la temperatura registrada en el dispositivo falle por encima o debajo de la temperatura objetivo de envejecimiento en  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$  por más de 60 minutos durante las 20 horas de ensayo declare el ensayo invalido y descarte el material. Remover la torre de charolas y colocarlas en el horno TFOT a  $163^{\circ}\text{C}$  por  $15\pm 1$  minutos hasta que esta suficiente mente fluido para poder verterlo. Remover con suavidad para eliminar las burbujas de aire. Precalear el equipo de horno de vacío hasta estabilizar en  $170 \pm 5^{\circ}\text{C}$ , mantener la presión en el horno a  $15 \pm 2.5$  kPa, por  $30 \pm 1$  minuto. Al final de los 30 minutos liberar el vacío y remover el contenido. Si alguna burbuja es visible en la superficie removerla con la punta de un cuchillo. El producto del PAV se extrae y deposita en frascos metálicos nuevos y limpios de capacidad un litro, se acumula el ligante envejecido hasta una almacenar una cantidad aproximada a 500 g., dado que es necesario calentar estas muestras para los procesos posteriores de: mezcla con rejuvenecedor, clasificación PG, mezcla asfáltica, entre otros ensayos.

#### Ilustración 36

#### Envejecimiento en Vasija de Presión ‘PAV’



#### 2.4 Mezcla de Ligante Envejecido con Rejuvenecedor.

El material a emplear como rejuvenecedor es el aceite desechado de la lubricación de motores de vehículos livianos, el cual se ha sometido a un proceso de limpieza del tipo mecánica

mediante la aplicación de una periodo de sedimentación de cinco días y una etapa posterior de filtración con la utilización de papel filtro, procesos que permiten separar los elementos ajenos a su naturaleza hidrocarbonada, separando elementos líquidos como son el agua resultante de la condensación de la humedad del aire debido a cambios de temperatura en el motor, adicionalmente separando partículas sólidas en suspensión como limallas ferrosas producto del desgaste de las piezas metálicas y otras partículas como el hollín o cenizas resultantes de la combustión de los motores. Se considera como material rejuvenecedor a estos aceites desechados porque junto con el ligante asfáltico son productos del proceso de refinación del petróleo.

El material a rejuvenecer consiste en un ligante asfáltico envejecido en laboratorio simulando inicialmente el desgaste de sus componentes volátiles debido a la evaporación por el calor aplicado en los procesos de: calentamiento, mezclado, transporte, colocación y compactación mediante el ensayo RTFOT para posteriormente envejecerlo nuevamente mediante el proceso PAV que simula el envejecimiento correspondiente a la exposición del material a las condiciones ambientales y de puesta en servicio.

La mezcla del ligante envejecido con el rejuvenecedor se ha realizado con la colaboración de la empresa EMULDEC Emulsiones del Ecuador, donde se facilitó el equipo para el mezclado. Una primera fase de mezclas se realizó probando los siguientes porcentajes en peso de aceite desechado:

Tabla 13

Contenido de Aceite Desechado en las Mezclas con Ligante Envejecido

<b>Descripción</b>	<b>% en Peso de Aceite Desechado en la Mezcla</b>
Mezcla 1	1,0%
Mezcla 2	2,0%
Mezcla 3	3,5%
Mezcla 4	5,0%
Mezcla 5	7,0%
Mezcla 6	30,0%

La mezcla 1 a la mezcla 5 corresponden a la primera fase de las mezclas que se caracterizaron. Como se detalla adelante la mezcla 6, corresponde a la segunda fase de mezclas y corresponde a la que mejor clasificación por desempeño obtuvo con respecto al ligante de referencia.

#### Ilustración 37

#### Mezcla de Ligante Envejecido con Aceite Desechado Laboratorio PUCE



El procedimiento realizado es similar al utilizado en el proceso de aditivar cemento asfáltico y consiste en tomar una muestra de alrededor de 500 gr de ligante envejecido almacenando en un recipiente metálico que disponga tapa a presión, acondicionar la muestra en una estufa digital de temperatura regulable a 150°C, una vez que la muestra presenta características de fluidez uniforme en toda su masa se procede a colocar el recipiente con la muestra en un mufla de inducción eléctrica con control de temperatura para mantener constante la misma, e inmediatamente agregar la cantidad de rejuvenecedor al ligante envejecido, la mezcla se logra con la ayuda de un equipo que consta de un soporte metálico al cual se suspende de manera vertical un taladro de velocidad regulable provisto de un aspa que gira de manera constante evitando salpicaduras o derrame de material. Cabe anotar que el recipiente metálico utilizado para almacenar el ligante envejecido de capacidad 1 litro representa el tamaño apropiado para el proceso de mezclado toda vez que permite el acondicionamiento de la muestra de forma rápida, y permite que las aspás del equipo mecánico para mezclado giren con facilidad. Una

vez realizadas las mezclas están se dejaron acondicionar a temperatura ambiente para posterior ser transportadas al Laboratorio de Materiales de Construcción de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, para continuar con el proceso de caracterización de estas mezclas por la metodología SUPERPAVE.

### Ilustración 38

#### Mezcla Ligante con Aceite Desechado Laboratorio EMULDEC



### 2.5 Caracterización por Desempeño de los Ligantes.

El proceso de caracterización por desempeño corresponde a la metodología SUPERPAVE que se ha detallado anteriormente. Se van a caracterizar tres tipos de ligantes. El primero es el ligante bituminoso que va a servir de punto de referencia para los análisis y ensayos posteriores, es un asfalto facilitado por la empresa IMPTEK, al cual en adelante denominaremos ligante virgen, ya que en el transcurso de este estudio este ha sido envejecido y posteriormente rejuvenecido. El segundo tipo de ligante que se va a caracterizar es el ligante virgen envejecido mediante los procesos AASHTO T 240 - RTFOT y por el proceso AASHTO R 28 – PAV. El tercer tipo de ligante que se va a caracterizar es el ligante rejuvenecido, es decir la mezcla en peso de diversos porcentajes de aceite desechado con el ligante envejecido. La siguiente tabla muestra un resumen de estos ligantes que van a ser caracterizados en este estudio:

Tabla 14

Lista de Mezclas en Función del % Aceite Desechado

<b>DESCRIPCION DEL LIGANTE</b>	<b>CARACTERISTICAS</b>
<b>Ligante Virgen</b>	Asfalto AC-20 refinería de esmeraldas – muestra tomada de las instalaciones de la empresa IMPTEK
<b>Ligante Envejecido</b>	Ensayos RTFOT y PAV en Ligante Virgen
<b>Ligante Mezcla 1</b>	1,0% Peso Aceite Desechado +Ligante Envejecido
<b>Ligante Mezcla 2</b>	2,0% Peso Aceite Desechado +Ligante Envejecido
<b>Ligante Mezcla 3</b>	3,5% Peso Aceite Desechado +Ligante Envejecido
<b>Ligante Mezcla 4</b>	5,0% Peso Aceite Desechado +Ligante Envejecido
<b>Ligante Mezcla 5</b>	7,0% Peso Aceite Desechado +Ligante Envejecido
<b>Ligante Mezcla 6</b>	30,0% Peso Aceite Desechado +Ligante Envejecido

Para la caracterización por desempeño se utiliza la tabla 1 de la norma AASHTO M320 para la clasificación del asfalto el cual será el punto de referencia para las posteriores caracterizaciones de las mezclas, un resumen de esta norma se muestra en el siguiente cuadro.

Tabla 15

Clasificación Superpave para un PG 64

<b>PROPIEDAD</b>	<b>GRADO DEL LIGANTE</b>		<b>PG 64</b>					
	<b>NORMA AASHTO</b>	<b>REQUISITO</b>	<b>10</b>	<b>16</b>	<b>22</b>	<b>28</b>	<b>34</b>	<b>40</b>
			<b>Temperatura de Ensayo °C</b>					
<b>LIGANTE ORIGINAL</b>								
<b>Punto de Inflamación °C</b>	T 48	230,00						
<b>Viscosidad Máxima Pa·s @135°C</b>	T 316	3,00				135°		
<b>Corte Dinámico Mínimo G*/senD kPa a la temperatura de ensayo @ 10rad/s</b>	T 315	1,00				64°		
<b>RESIDUO DEL HORNO DE PELICULA DELGADA ROTATORIA AASHTO T 240 "RTFOT"</b>								
<b>Cambio de Masa Máximo %</b>	T 240	1,00						
<b>Corte Dinámico Mínimo G*/senD kPa a la temperatura de ensayo @ 10rad/s</b>	T 315	2,20				64°		
<b>RESIDUO DE LA VASIJA DE ENVEJECIMIENTO PAV AASHTO R 28 Temperatura ensayo 100°C</b>								

<b>Corte Dinámico Máximo G*senD kPa a la temperatura de ensayo @ 10rad/s</b>	T 315	5000,00	31°	28°	25°	22°	19°	16°
<b>Rigidez Creep Máxima, S MPa a la temperatura de ensayo @60s °C</b>	T 313	300,00	0°	-6°	-12°	-18°	-24°	-30°
<b>Valor m mínimo, a la temperatura De ensayo @ 60s</b>	T 313	0,300	0°	-6°	-12°	-18°	-24°	-30°

(AASHTO, Performance Graded Asphalt Binder, 2005)

La tabla anterior indica los requisitos que debe reunir un ligante bituminoso para una temperatura máxima del pavimento de 64°C, esta temperatura corresponde al ligante de uso comercial en nuestro medio, el AC-20. La normativa específica intervalos de temperatura máxima del pavimento que van desde los 46°C hasta los 82°C como se especifica en la tabla 1 de la norma AASHTO M 320. Según el procedimiento (AASHTO, Grading or Verifying the Performance grade PG of an Asphalt Binder, 2008) para la caracterización del ligante asfáltico se indica que:

En el caso de que los ensayos comiencen en la mañana de un día de trabajo todos los ensayos y análisis deben ser completados durante la tarde del siguiente día. Este horario proporciona las 20 horas necesarias para el acondicionamiento del PAV. Para determinar el grado de desempeño de un ligante asfáltico de clasificación desconocida se requiere alrededor de 400 g de muestra. Comenzar acondicionando el ligante asfáltico (calentar en el horno). Efectuar el procedimiento de Reómetro de Corte Dinámico ‘DSR’ AASHTO T 315 sobre el ligante asfáltico a 58°C e incrementar o disminuir la temperatura en intervalos de 6°C hasta que el valor de ‘G\*/sen D’ sea menor igual a 1.00 KPa., como se aprecia en la tabla anterior. La temperatura más alta a la cual se alcance este valor determina el punto de partida del grado PG. Determinar el Punto de Chispa usando el procedimiento AASHTO T 48, este debe ser mayor a 230 para cumplir con lo expuesto en la tabla anterior. Determinar la viscosidad del ligante original a 135°C usando el ensayo AASHTO T 316, el valor de esta viscosidad no

debe exceder el valor de 3 Pa·s para reunir los requerimientos de la clasificación AASHTO M320. Acondicionar la muestra y el horno RTFOT a 163°C, colocar alrededor de 35 ±0.5 g., de ligante original en cada contenedor de cristal disponible y rolar sobre una franela limpia de manera muy cuidadosa el contenedor para distribuir uniformemente el ligante en el interior, registrar el peso inicial en una balanza de precisión, instalar los contenedores de cristal en el carrete giratorio del horno, calibrar el flujo de aire a 4000 ± 300 mL/min y realizar el proceso de envejecimiento en el horno durante el tiempo de 85 minutos. Una vez terminado el proceso para la determinación del cambio de masa sacar los contenedores de cristal del carrete verificando que cada uno no presente derrame de ligante asfáltico en cuyo caso se debe desechar el producto y proceder a realizar nuevamente el proceso. Una vez verificado que no haya derrame de ligante se procede a registrar la masa del contenedor y se calcula el cambio de masa como sigue. (AASHTO, Grading or Verifying the Performance grade PG of an Asphalt Binder, 2008).

$$\text{Cambio de Masa} = \frac{\text{Masa Final}}{\text{Masa Inicial}} \times 100$$

El cambio de masa debe ser menor que 1% para cumplir los requisitos del AASHTO M 320. Si el ligante no reúne los requerimientos de: corte dinámico, punto de llama, viscosidad, cambio de masa, la muestra ensayada no satisface la especificación para ningún grado de desempeño PG y no se requieren más pruebas. Tomar en consideración que el residuo del RTFO tiene un tiempo máximo de hasta 72 horas para ser ensayado. (AASHTO, Grading or Verifying the Performance grade PG of an Asphalt Binder, 2008).

## Ilustración 39

## Ensayo de Envejecimiento a Corto Plazo y Ensayo DSR



Ensayar el corte dinámico 'DSR' AASHTO T 315 con el residuo del horno RTFOT a la temperatura determinada en el ensayo 'DSR' anterior, para confirmar que el grado de temperatura escogido sea correcto. Para este ensayo el valor de  $G^*/\sin D$  evaluado en el residuo del RTFOT debe ser mayor que 2.2 kPa. Escoger el más bajo grado de desempeño en caso de que los valores del ensayo tengan conflictos. Envejecer una suficiente cantidad de residuo de RTFO en la vasija de envejecimiento a presión PAV mediante el procedimiento AASHTO R 28, tomar en consideración que la temperatura que utiliza este equipo es de 90°C para grados PG desde 46° hasta los 52°, la temperatura es de 100°C para grados PG mayores a 58°C, una temperatura de la vasija de presión de 110°C se utiliza para simular condiciones desérticas. Tomar en consideración que este ensayo toma veinte horas netas sin contar el tiempo de acondicionamiento de la muestra o equipo que puede tomar desde 1 a 2 horas dependiendo de la temperatura ambiente del laboratorio, por lo que los siguientes ensayos que se describen se deben realizar hasta la tarde del segundo día de operaciones, aspecto fundamental en la programación de un horario que contemple dos días seguidos en la disponibilidad del equipo y personal técnico. (AASHTO, Grading or Verifying the Performance grade PG of an Asphalt Binder, 2008)

## Ilustración 40

## Ensayo DSR en condición Original y condición Envejecida RTFOT



El proceso 'PAV' AASHTO R 28 está diseñado para simular el envejecimiento por oxidación en la etapa de servicio que ocurre en el ligante asfáltico durante su vida útil. El residuo de esta práctica debe ser usado para estimar las propiedades físicas o químicas del ligante asfáltico después de cinco a diez años de envejecimiento por servicio en el campo. Para ligantes asfálticos de diferentes grados o diferentes fuentes, no hay una correlación única entre el tiempo de envejecimiento, la temperatura de esta práctica y la experiencia de campo del pavimento. Por lo tanto, para una condición climática de servicio no es posible seleccionar un tiempo de envejecimiento PAV que prediga las propiedades del ligante después unas condiciones de servicio establecidas. El relativo grado de endurecimiento de diferentes ligantes asfálticos varían a diferentes temperaturas de envejecimiento en el PAV. Por lo tanto, dos ligantes pueden envejecer similarmente a una temperatura, pero la edad ser diferente en otra temperatura. (AASHTO, Grading or Verifying the Performance grade PG of an Asphalt Binder, 2008)

Combinar el residuo del RTFOT dentro de un contenedor y revolver la mezcla. Pre calentar las vasijas con una temperatura de 10°C a 15°C sobre la temperatura de acondicionamiento para reducir la caída de temperatura el momento de transferencia de la muestra a la vasija y evitar pérdidas de tiempo en la estabilización del sistema. Colocar las bandejas en el interior

de la vasija de presión, seleccionar la temperatura de envejecimiento de acuerdo a las condiciones climáticas anotando que temperaturas sobre los  $115^{\circ}\text{C}$  pueden cambiar la química del ligante asfáltico envejecido por lo que debe ser evitada. Colocar con la ayuda de una balanza una cantidad de  $50\pm 0.5$  g., de asfalto en cada charola que equivale a una lámina delgada de 3.2 mm de ligante asfáltico. En este proceso no se requiere computo del cambio de masa toda vez que se absorbe aire como resultado de la presurización. Realizar las actividades de la manera más rápida posible para evitar enfriamientos de la vasija y de la torre que contiene las charolas. Esperar hasta que la temperatura de la vasija este dentro de los  $20^{\circ}\text{C}$  de la temperatura de envejecimiento para aplicar una presión de aire de  $2.1 \pm 0.1$  MPa, y entonces comenzar el tiempo de prueba. Mantener la temperatura y la presión del aire dentro de la vasija durante 20 horas  $\pm$  10 minutos. Después de las veinte horas comenzar a disminuir lentamente la presión en la vasija usando la válvula de sangrado de manera que en  $9 \pm 1$  minutos se iguale la presión interna y externa sobre el PAV. En el caso de que la temperatura registrada en el dispositivo falle por encima o debajo de la temperatura objetivo de envejecimiento en  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$  por más de 60 minutos durante las 20 horas de ensayo declare el ensayo invalido y descarte el material. (AASHTO, Grading or Verifying the Performance grade PG of an Asphalt Binder, 2008)

Remover la torre de charolas y colocarlas en el horno TFOT a  $163^{\circ}\text{C}$  por  $15 \pm 1$  minutos hasta que esta suficiente mente fluido para poder verterlo. Remover con suavidad para eliminar las burbujas de aire. Precalentar el horno de vacío hasta estabilizar en  $170 \pm 5^{\circ}\text{C}$  mantener la presión en el horno a  $15 \pm 2.5$  kPa por  $30 \pm 1$  minuto. Al final de los 30 minutos liberar el vacío y remover el contenido. Si alguna burbuja es visible en la superficie removerla con la punta de un cuchillo. (AASHTO, Grading or Verifying the Performance grade PG of an Asphalt Binder, 2008)

Realizar el ensayo DSR AASHTO T 315 sobre el residuo del PAV, empezando a una temperatura de 16 y 19°C para grados PG 52 al 58, de 22°C para grados PG 64, y 28°C para grados PG 70 y mayores, incrementar o decremento la temperatura en 3°C hasta alcanzar el valor de  $G^* \sin D$  mayor a 5000 kPa., para que cumpla la norma AASHTO M 320. (AASHTO, Grading or Verifying the Performance grade PG of an Asphalt Binder, 2008)

#### Ilustración 41

Ensayo DSR en condición Envejecida a largo Plazo 'PAV'

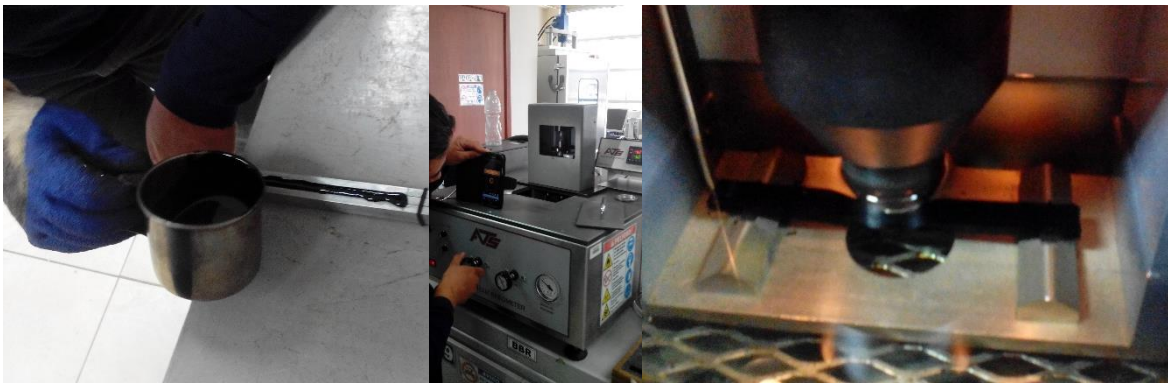


Determinar la temperatura inicial del ensayo BBR AASHTO T 313, tomando de la norma AASHTO M 320 la temperatura negativa correspondiente a la temperatura que cumple el requisito  $G^* \sin D < 5000$  kPa. Previo a la elaboración de la viga BBR, se debe acondicionar el equipo a la temperatura de ensayo y controlar que el baño líquido se mantenga estable en dicha temperatura. Prepara los moldes proporcionando una fina capa delgada de grasa basada en petróleo como desmoldante y una lámina de aluminio o mica en el interior de las caras en contacto con el ligante, esto con objeto de que el momento de desmoldar la muestra la viga no sufra ninguna alteración en su forma. Calentar el material hasta que se halla suficientemente fluido para verter en el molde tomando como referencia un valor de 135°C, considerando que el horno debe programarse desde unos 135° a 180°C. Como referencia para el vertido del ligante en el molde se debe verificar que este tenga la consistencia de un

aceite tipo SAE 10W30. Algunos ligantes modificados son resistentes a fluir por lo que se recomienda no exceder de  $163^{\circ}\text{C}$  su calentamiento. Una vez Vertido el ligante en el molde se enrasa la superficie de la manera más rápida posible y se debe procurar mantener el molde a temperatura ambiente por un lapso de 45 a 60 minutos para que se acondicione la viga. Preparar un recipiente con hielo controlando la temperatura en  $-5^{\circ}\text{C} \pm 7^{\circ}\text{C}$  para recibir la muestra en el molde durante unos 5 a 10 minutos, tiempo suficiente para endurecer la viga y facilitar su manipulación y desmolde. El proceso de desmolde de la viga lo debe ejecutar personal calificado con objeto de no alterar su forma.

#### Ilustración 42

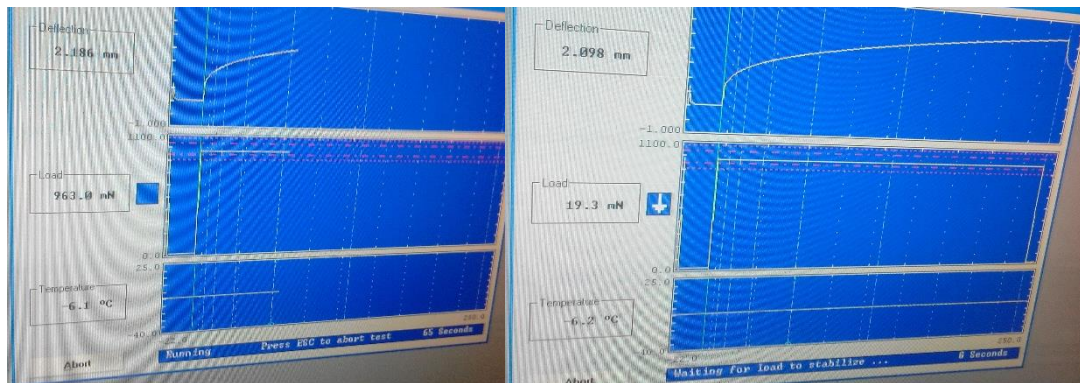
#### Ensayo de Reómetro de Viga a Flexión ‘BBR’



Una vez endurecida la viga se la debe acondicionar durante un tiempo de  $60 \pm 5$  minutos sumergida en el baño líquido a la temperatura determinada para el ensayo, transcurrido este tiempo una persona calificada debe realizar el ensayo debido a la precisión que requiere el equipo para su calibración. El software correspondiente genera la curva respectiva de esfuerzo deformación y entrega los valores de “S” (creep stiffness) rigidez de fluencia y de “m” que es la pendiente de la curva de rigidez versus tiempo.

### Ilustración 43

Ensayo 'BBR' curva Log(S) versus Log(t) Temperatura -6°C.



Para cumplir la clasificación por grado de desempeño los valores de 'S' deben ser máximo 300 MPa y los de 'm' ser mínimo 0.300, la norma requiere que se cumplan ambos parámetros. En caso de que la rigidez 'S' este entre 300 MPa y 600 MPa, se debe realizar el ensayo AASHTO T 314 denominado Tracción Directa. (AASHTO, Grading or Verifying the Performance grade PG of an Asphalt Binder, 2008)

## 2.6 Elaboración HMA de Referencia Método Superpave.

El concreto asfáltico llamado también mezcla asfálticas o simplemente HMA es un material de pavimentación que consiste de ligante asfáltico y agregado mineral. El Ligante asfáltico actúa como un aglutinante de partículas dentro de una masa densa e impermeable denominada mezcla. Cuando se confinan conjuntamente los agregados minerales actúan como un armazón de piedra generando fuerza y dureza al sistema. El desempeño de las mezclas es afectado por el comportamiento de ambos componentes y por la reacción combinada de los mismos. (Asphalt Institute, 2001).

### 2.6.1. Requisitos del Ligante.

El método de diseño de la mezcla Superpave trabaja con un nuevo sistema de clasificación del ligante: El diseñador debe elegir el grado de ligante que cumpla los requisitos de desempeño exigidos para el ligante, a una temperatura acorde con las condiciones de operación del proyecto de pavimentación. El proceso contempla recabar estadísticas de

temperaturas altas y bajas del pavimento, y son el promedio anual de las máximas temperaturas en periodos de 7 días. Las temperaturas bajas representan el promedio anual de las temperaturas mínimas diarias. Las expresiones para el calcula de la temperatura de diseño son las siguientes. (Segovia, 2014).

$$T_{20mm} = (T_{air} - 0.00618 \cdot Lat^2 + 0.2289 \cdot Lat + 42.2)(0.9545) - 17.78$$

Donde:

$T_{20mm}$  = temperatura alta de diseño a una profundidad de 20 mm, °C., = $T^{\circ xx}$ .

$T_{air}$ . = temperatura máxima promedio de periodos de 7 días, °C

$Lat$ . = latitud geográfica del proyecto, grados. (Segovia, 2014)

Para las temperaturas bajas se tiene:

$$T_{yy} = -1,56 + 0,72 \cdot T_{minair} - 0,004 \cdot Lat^2 + 6,26 \cdot \log_{10}(H + 25) - z(4,4 + 0,52\sigma_{air})^{1/2}$$

Donde:

$T_{yy}$ . = temperatura baja de ligante bajo la superficie. °C.

$T_{minair}$ . = temperatura mínima promedio anual. °C.

$H$  = profundidad de la superficie.

$\sigma_{air}$  = desviación estándar media baja del aire.

$z$  = parámetro de la desviación normal estándar.

$Lat$ . = latitud geográfica del proyecto, grados. (Segovia, 2014).

Como alternativa se puede optar por la siguiente formulación para la temperatura baja del pavimento.

$$T_{yy} = 0,859T_{min air} + 1,7^{\circ}C. \text{ (Asphalt Institute, 2001).}$$

Se puede usar la confiabilidad de las medidas de temperatura altas y bajas del pavimento, Una alta confiabilidad significa menos riesgo. Por ejemplo, considerando un periodo muy caluroso con una media de 32°C y una desviación estándar de 2°C, en un año promedio hay

la probabilidad de un 50 por ciento que la temperatura exceda los 32°C, sin embargo, asumiendo una distribución normal hay únicamente un 2 por ciento de que exceda los 36°C, por lo tanto, el diseño con una temperatura del aire provee un 98% de confiabilidad. Para aplicar este criterio se deberán tomar en cuenta estaciones con más de 20 años de registros. (Asphalt Institute, 2001).

De manera similar se puede seguir para las temperaturas bajas. Para el caso de la temperatura máxima y mínima se ha consultado a la Agencia Espacial Civil Ecuatoriana de siglas EXA, y se tiene para la capital valores anual máximo registrado de 25.1°C, y un valor anual mínimo 8.2°C. Otras estaciones pueden ser verificadas como el caso de Guayaquil y Cuenca. (Agencia Espacial Civil Ecuatoriana, 2016).

(Serrano, y otros, 2012) indican que la temperatura mínima para el distrito metropolitano de quito puede alcanzar los 0.3°C, y en días soleados un valor 25°C para la temperatura máxima.

Según datos del proyecto para el nuevo aeropuerto de Quito, proyecto NQUIA, la temperatura máxima promedio de la estación llego a los 32°C. (Segovia, 2014).

Aplicando las formulaciones se determina la máxima temperatura a la que se deberá desempeñar el ligante asfáltico  $T_{xx}$ , y la mínima temperatura  $T_{yy}$ , en el proyecto de mezcla asfáltica, estas temperaturas establecen el criterio para la selección del grado de desempeño del ligante asfáltico requerido. Con la ayuda de una hoja de cálculo, e introduciendo los valores, desde 0°C de temperatura máxima del aire en adelante se tabulan las temperaturas altas  $T_{xx}$ , usando como valor de la latitud  $Lat. = 0,23^\circ$  correspondiente al Distrito Metropolitano de Quito.

Tabla 16

Tabulación de Temperaturas Altas T° XX

T aire max °C	Txx °C	T aire max °C	Txx °C	T aire max °C	Txx °C	T aire max °C	Txx °C
0,00	22,55	11,00	33,05	21,00	42,59	31,00	52,14
1,00	23,50	12,00	34,00	22,00	43,55	<b>32,00</b>	<b>53,09</b>
2,00	24,46	13,00	34,96	23,00	44,50	33,00	54,05
3,00	25,41	14,00	35,91	24,00	45,46	34,00	55,00
4,00	26,37	15,00	36,87	25,00	46,41	35,00	55,96
5,00	27,32	16,00	37,82	26,00	47,37	36,00	56,91
6,00	28,28	17,00	38,78	27,00	48,32	37,00	57,87
7,00	29,23	18,00	39,73	28,00	49,28	38,00	58,82
8,00	30,19	19,00	40,69	29,00	50,23	39,00	59,78
9,00	31,14	20,00	41,64	30,00	51,18	40,00	60,73
10,00	32,09						

Se establece que para una temperatura máxima del aire de 32°, la temperatura alta para el pavimento y desempeño del ligante asfáltico tendrá que ser: T pav = 53,09°. A continuación, se define la Txx en función de la metodología Superpave para el grado alto de desempeño.

Tabla 17

Temperaturas Desempeño para Ligante Asfáltico.

Grado Desempeño	PG58					PG64					
	16	22	28	34	40	10	16	22	28	34	40
Temperatura °C Promedio Máxima Pavimento			<58					<64			
Temperatura °C Mínima Diseño Pavimento	>-16	>-22	>-28	>-34	>-40	>-10	>-16	>-22	>-28	>-34	>-40

(AASHTO, Performance Graded Asphalt Binder, 2005).

Los Grados Altos de la metodología Superpave van desde el PG46 hasta el PG82 y tienen saltos de 6°C. Para este caso T máxima pavimento = 53,09° es menor a Txx = 58°, por lo cual se adopta este valor de temperatura como requisito para desempeño del ligante asfáltico en la mezcla.

Tabla 18

Tabulación de Temperaturas Bajas T° YY

<b>T mínima aire °C</b>	<b>T<sub>yy</sub> °C</b>	<b>T mínima aire °C</b>	<b>T<sub>yy</sub> °C</b>	<b>T mínima aire °C</b>	<b>T<sub>yy</sub> °C</b>
<b>0,00</b>	<b>1,70</b>	-11,00	-7,75	-22,00	-17,20
-1,00	0,84	-12,00	-8,61	-23,00	-18,06
-2,00	-0,02	-13,00	-9,47	-24,00	-18,92
-3,00	-0,88	-14,00	-10,33	-25,00	-19,78
-4,00	-1,74	-15,00	-11,19	-26,00	-20,63
-5,00	-2,60	-16,00	-12,04	-27,00	-21,49
-6,00	-3,45	-17,00	-12,90	-28,00	-22,35
-7,00	-4,31	-18,00	-13,76	-29,00	-23,21
-8,00	-5,17	-19,00	-14,62	-30,00	-24,07
-9,00	-6,03	-20,00	-15,48	-31,00	-24,93
-10,00	-6,89	-21,00	-16,34	-32,00	-25,79

Para el caso de la temperatura baja se toma como mínima temperatura del aire  $T = 0^{\circ}\text{C}$ , por lo que usando la formulación del Asphalt Institute, se tiene que  $T_{\text{min pav}} = 1.7^{\circ}\text{C}$ . La escala Superpave indica valores desde  $-10^{\circ}\text{C}$  hasta los  $-40^{\circ}\text{C}$ , para este caso se toma  $T_{yy} = -16^{\circ}$  como temperatura baja requerida para el desempeño del ligante en el pavimento, este valor debe ser verificado mediante el ensayo AASHTO T 313 'BBR'. Con esto se determina que el grado PG necesario para las condiciones indicadas es PG 58-22. Para la metodología por desempeño Superpave es necesario ajustar el grado de desempeño del ligante asfáltico con referencia a su temperatura máxima, por consideraciones de nivel de tráfico y velocidad de tráfico. El pavimento está sometido a número de diseño de ejes equivalente de carga, que responden a velocidades muy bajas (menores a 20 km/h), velocidades lentas (20-70 km/h) y velocidades estándar (mayores a 70km/h) para lo cual se utiliza la siguiente tabla que permite el ajuste de temperatura requerido para el ligante asfáltico según las consideraciones indicadas.

Tabla 19

Selección del Ligante en Base de la Velocidad de Tráfico y el Nivel de Tráfico

Selección del Ligante en Base de la Velocidad de Tráfico y el Nivel de Tráfico			
ESALs <sup>1</sup> (millones)	Ajuste del Grado PG del Ligante Bituminoso <sup>5</sup>		
	Standing <sup>2</sup>	Slow <sup>3</sup>	Standard <sup>4</sup>
0,3	-( <sup>6</sup> )		
0,3 a < 3	2	1	
3 a < 10	2	1	
10 a < 30	2	1	-( <sup>6</sup> )
>=30	2	1	1

<sup>1</sup> ESALs son la proyección esperada del nivel de tráfico anticipado sobre el carril de diseño en un periodo de 20 años.

<sup>2</sup> Tráfico Standing: cuando el promedio de la velocidad de tráfico es menos que 20km/h.

<sup>3</sup> Tráfico Slow: cuando el promedio de la velocidad de tráfico esta 20km/h a 70 km/h.

<sup>4</sup> Tráfico Standard: cuando el promedio de la velocidad de tráfico es mas de 70km/h.

<sup>5</sup> Incrementar el grado de temperatura alta por el número de grados equivalentes indicados (1 grado equivale a 6°C) No se ajusta la temperatura baja.

<sup>6</sup> Debería darse un incremento de la temperatura alta por un grado de temperatura equivalente.

Prácticamente el desempeño de los ligantes más rígidos que PG82-YY debe evitarse. Si el agrado ajustado es mayor a 82, considerar incrementar los ESALs.

(AASHTO, Superpave Volumetric Mix Design, 2007).

Para el presente caso de estudio se adopta un volumen de tráfico de 3 a 10 millones de ejes equivalentes a 8.2 toneladas, que corresponde en promedio a un tráfico máximo proyectado a 20 años de 650 vehículos pesados diarios en el carril de análisis, tomando en consideración la reglamentación nacional de velocidad máxima en vías periféricas urbanas que es de 70 km/h, se tiene que hacer un ajuste correspondiente a un salto de 1 grado en la temperatura alta PG XX del grado PG., tomando en cuenta que un salto en el grado PG equivale a 6° de temperatura el nuevo requerimiento pasa de un PG 58-22 a un **PG 64-22**, no se ajusta la temperatura baja.

### 2.6.2. Requisitos del Agregado Combinado.

Varios expertos también fueron consultados, y establecieron dos categorías de propiedades para generar la especificación: propiedades de consenso y propiedades de fuente. Las propiedades de consenso, recibieron esta denominación, ya que, en el procedimiento utilizado para arribar a un acuerdo, se consiguió una alta coincidencia sobre utilidad y los

valores de especificación. Estas propiedades son: la angulosidad del agregado grueso, la angulosidad del agregado fino, las partículas planas y alargadas, y el equivalente de arena. Los límites establecidos para el sistema Superpave se encuentran en la siguiente Tabla. (Segovia, 2014).

Tabla 20

Requisitos Superpave para las Propiedades de Consenso de Agregados

ESALs <sup>a</sup>	Caras fracturadas, <sup>c</sup> agregado grueso, % min.		Contenidos de vacíos no compactados, ag. fino, % min.		Equivalente de Arena, % mín.	Partículas planas y alargadas, <sup>c</sup> % máx.
	Profundidad desde la superficie		Profundidad desde la superficie			
	<=100mm	>100mm	<=100mm	>100mm		
<b>&lt;0,30</b>	55/_	_/_	_	_	40	_
<b>0,3a &lt;3</b>	75/_	50/_	40	40	40	10
<b>3a&lt;10</b>	85/80 <sup>b</sup>	60/_	45	40	45	10
<b>10a&lt;30</b>	95/90	80/75	45	40	45	10
<b>&gt;= 30</b>	100/100	10/100	45	45	50	10

<sup>a</sup> Calculado con una proyección e tráfico de 20 años

<sup>b</sup> 85/80 denota que 85% del agregado tiene una cara fracturada y el 80% tiene dos o mas

<sup>c</sup> Este criterio no aplica para mezclas con TMN de 4.75 mm

(AASHTO, Superpave Volumetric Mix Design, 2007)

Los agregados caracterizados para este trabajo son extraídos de un río y pasan por el proceso de trituración mecánica, resultando tres tipos de agregados para sus componentes denominados: grueso (3/4’’), gravilla (3/8’’) y polvo de piedra (finos). Con referencia a la angulosidad del agregado grueso se tienen los siguientes resultados:

Tabla 21

Angulosidad del Agregado Grueso 3/8.

No. Del Tamiz		% Retenido Parcial Agregado	Masa Partículas Cada Fracción Antes Ensayo	Masa Partículas Fracturadas	% de Partículas Fracturadas
Pasa	Retiene				
1/2"	3/8"	28,19	555,5	549,3	<b>98,88</b>

El valor de angulosidad se halla dentro de los requerido por la norma. Por la indisponibilidad del equipo para el ensayo, se adopta como contenido de vacíos no compactados un valor mayor al cuarenta y cinco por ciento, para la angulosidad del agregado fino.

Los resultados de los ensayos para partículas planas y alargadas se muestran en el siguiente cuadro de resumen:

Tabla 22

Partículas Planas y Alargadas.

<b>Partículas Alargadas</b>						
<b>No. Del Tamiz</b>		<b>% Retenido Parcial Agregado</b>	<b># Partículas Cada Fracción Antes Ensayo</b>	<b># Partículas Alargadas Cada Fracción</b>	<b>% de Partículas Alargadas Cada Fracción</b>	<b>% de Partículas Alargadas</b>
<b>Pasa</b>	<b>Retiene</b>					
1/2"	3/8"	28,19	555,5	100	18,00	5,07
<b>Partículas Planas</b>						
<b>No. Del Tamiz</b>		<b>% Retenido Parcial Agregado</b>	<b># Partículas Cada Fracción Antes Ensayo</b>	<b># Partículas Planas Cada Fracción</b>	<b>% de Partículas Planas Cada Fracción</b>	<b>% de Partículas Planas</b>
<b>Pasa</b>	<b>Retiene</b>					
1/2"	3/8"	28,19	555,5	100	18,00	5,07
<b>Partículas Alargadas y Planas</b>						<b>10.14</b>

El presente material presenta partículas planas y alargadas a la vez, este valor de 5% está dentro de la norma. Para el ensayo de equivalente de arena se tiene el siguiente valor:

Tabla 23

Equivalente de Arena.

<b>Agregado Fino</b>			
<b>Lectura Inicial</b>	A=	7,4	"
<b>Lectura Final</b>	B=	3,4	"
<b>Equivalente de Arena</b>	C=	46	%

Las propiedades de fuente, se han definido como las propiedades particulares que están ligadas a la fuente del material y sobre las cuales no se puede elaborar una especificación general como la AASHTO M323, aunque se reconoce su importancia e influencia en el desempeño de las mezclas asfálticas. En el caso de estas propiedades, las especificaciones son de carácter local, como por ejemplo las especificaciones generales para caminos y puentes del Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador. Las propiedades de fuente consideradas en el sistema Superpave son dureza, firmeza y materiales deletéreos. (Segovia, 2014).

Tabla 24

Propiedades de Fuente usadas en Ecuador.

<b>Propiedad de Fuente</b>	<b>Especificación</b>
Desgaste a la abrasión, máquina de Los Ángeles, máx.	40%
Pérdida luego de cinco ciclos de sulfato de sodio, máx.	12%
Terrones de Arcilla y partículas deleznable, máx.	1%

(Segovia, 2014).

Para el caso de las propiedades de fuente el agregado utilizado presenta los siguientes resultados con respecto al ensayo de Dureza, evaluado por la abrasión en la máquina de los ángeles:

Tabla 25

Dureza del Agregado Grueso 3/4.

<b>Agregado Grueso 3/4"</b>	
Masa Inicial de la Muestra = $[C/A] \times 100$	
Masa que pasa el tamiz N°12 = $[A-B]$	
Masa Inicial de la Muestra	A= 5003 gr
Masa Retenida en el Tamiz N°12 después de 500 Revoluciones	B= 4102 gr
Masa que pasa el tamiz N°12	C= 901 gr
Porcentaje de Desgaste	D= 18 %

Tabla 26

Dureza del Agregado Grueso 3/8.

<b>Agregado Medio 3/8''</b>	
Masa Inicial de la Muestra = $[C/A] \times 100$	
Masa que pasa el tamiz N°12 = $[A-B]$	
Masa Inicial de la Muestra	A= 5000 gr
Masa Retenida en el Tamiz N°12 después de 500 Revoluciones	B= 4210 gr
Masa que pasa el tamiz N°12	C= 790 gr
Porcentaje de Desgaste	D= 16 %

Las propiedades de firmeza están relacionadas con la resistencia del agregado al sulfato, para simular ciclos de congelamiento e intemperismo del material.

Tabla 27

Firmeza de los Agregados (resistencia sulfatos).

<b>Agregado Fino</b>							
Fracción N°	N° del Tamiz		% Retenido Parcial Agregado	Masa Fracciones Antes Ensayo	Masa Fracciones Después Ensayo	% Pasa Después Ensayo	% Desgaste Parcial
	Pasa	Retiene					
	3/8"	N°4	2,55	100,00	95,80	4,20	0,11
<b>1</b>	N°4	N°8	26,22	100,00	96,60	3,40	0,89
<b>2</b>	N°8	N°16	21,84	100,00	97,80	2,20	0,48
<b>3</b>	N°16	N°30	15,31	100,00	98,40	1,60	0,24
<b>4</b>	N°30	N°50	13,04	100,00	99,00	1,00	0,13
<b>Porcentaje de Desgaste Total</b>							1,85

<b>Agregado Medio 3/8''</b>							
Fracción N°	N° del Tamiz		% Retenido Parcial Agregado	Masa Fracciones Antes Ensayo	Masa Fracciones Después Ensayo	% Pasa Después Ensayo	% Desgaste Parcial
	Pasa	Retiene					
	3/8"	N°4	14,30	100,00	96,30	3,70	0,53
<b>1</b>	N°4	N°8	20,85	100,00	94,00	6,00	1,25
<b>2</b>	N°8	N°16	18,40	100,00	96,00	4,00	0,74
<b>3</b>	N°16	N°30	16,84	100,00	95,80	4,20	0,71

<b>4</b>	N°30	N°50	14,54	100,00	96,70	3,30	0,48
<b>Porcentaje de Desgaste Total</b>							3,70
<b>Agregado Grueso 3/4''</b>							
<b>Fracción N°</b>	<b>N° del Tamiz</b>		<b>% Retenido Parcial Agregado</b>	<b>Masa Fracciones Antes Ensayo</b>	<b>Masa Fracciones Después Ensayo</b>	<b>% Pasa Después Ensayo</b>	<b>% Desgaste Parcial</b>
	<b>Pasa</b>	<b>Retiene</b>					
<b>2</b>	1/2"	3/8"	30,87	330,60	326,10	1,36	0,42
<b>3</b>	3/8"	N°4	68,01	300,30	294,90	1,80	1,22
<b>Porcentaje de Desgaste Total</b>							1,64

Los valores se hallan dentro de las propiedades de fuente requeridas para la localidad. Los materiales deletéreos o nocivos son materias adheridas como terrones de arcilla, esquistos, madera, mica, carbón, que pueden afectar la adherencia del asfalto y la piedra. (Segovia, 2014).

Tabla 28

Materiales Deletéreos – Contenido Orgánico del Agregado

<b>Agregado Medio 3/8''</b>			
<b>Color de la Muestra</b>	Mayor A	0	Menor A 5
<b>Contenido orgánico Aceptable</b>		si	X
		no	
<b>Valor en la Escala</b>		N°	0
<b>Agregado Fino</b>			
<b>Color de la Muestra</b>	Mayor A	0	Menor A 5
<b>Contenido orgánico Aceptable</b>		si	X
		no	
<b>Valor en la Escala</b>		N°	0

Tabla 29

Materiales Deletéreos – Terrones de Arcilla Agregado Grueso 3/4''

<b>% Retenido Parcial = Masa Parcial / Masa Total × 100</b>
<b>% que Pasa = Masa Inicial - Masa Retenida del Ensayo / Masa Inicial × 100</b>
<b>% Parcial de Arcilla = % Retenido Parcial × % que Pasa / 100</b>

N° Tamiz Pasa	N° Tamiz Retiene	% Retenido Parcial del Agregado	Masa Fracciones Antes ensayo	Masa Fracciones Después ensayo	% Pasa Tamiz Más Fino Después Ensayo	% Parcial de Arcilla
3/4"	3/8"	19,46	2218,3	2218	0,014	0,003
3/8"	N°4	12,81	1033,7	1032,2	0,145	0,019
<b>Porcentaje Total</b>						0,021

Tabla 30

Materiales Deletéreos – Terrones de Arcilla Agregado Fino y Medio 3/8

<b>Agregado Fino</b>	
<b><math>P=[M-R]/M \times 100</math></b>	
<b>Masa Inicial de la Muestra</b>	M= 204,9 gr
<b>Masa Retenida en Tamiz N°20 Después del Ensayo</b>	R= 203,4 gr
<b>Porcentaje de Arcilla</b>	P= 0,73 %
<b>Agregado Medio 3/8''</b>	
<b><math>P=[M-R]/M \times 100</math></b>	
<b>Masa Inicial de la Muestra</b>	M= 200,3 gr
<b>Masa Retenida en Tamiz N°20 Después del Ensayo</b>	R= 199,1 gr
<b>Porcentaje de Arcilla</b>	P= 0,60 %

Los Valores de los agregados cumplen con el requisito para las propiedades de fuente.

## Ilustración 44

## Agregado para la mezcla combinada



## 2.6.3. Granulometría.

La estructura del agregado especificada en el sistema Superpave, se basa en definiciones particulares respecto al tamaño máximo de las partículas. El tamaño máximo nominal (TMN), es un tamaño de malla mayor al primer tamiz que retiene más del 10% (Método Superpave) de partículas; el tamaño máximo TM de un agregado, es un tamaño de malla mayor al TMN. La especificación AASHTO M 323 [Diseño de Mezclas Superpave] indica que las mezclas asfálticas de superficie deberán tener TMN entre 4.75 y 19.0 mm para capas de superficie, mientras que las capas inferiores podrán tener un TMN de hasta 37.5 mm. La norma fija puntos de control que varían según el TMN, a través de los cuales debe pasar la curva de distribución de tamaños, según la tabla. (Segovia, 2014).

Tabla 31

Puntos de Control PCS para mezcla Superpave

Tamaño de Tamiz	Tamaño Máximo Nominal del Agregado TMN - Puntos de control (porcentaje que % pasa)											
	37,5 mm		25,0 mm		19,0 mm		12,5 mm		9,5 mm		4,75 mm	
	min	máx.	min	máx.	min	máx.	min	máx.	min	máx.	min	máx.
<b>50,0 mm</b>	100											
<b>37,5 mm</b>	90	100	100									
<b>25,0 mm</b>		90	90	100	100							
<b>19,0 mm</b>				90	90	100	100					

<b>12,5 mm</b>						90	90	100	100		100	
<b>9,5 mm</b>								90	90	100	95	100
<b>4,75 mm</b>										90	90	100
<b>2,36 mm</b>	15	41	19	45	23	49	28	58	32	67		
<b>1,18 mm</b>											30	60
<b>0,075 mm</b>	0	6	1	7	2	8	2	10	2	10	6	12

(AASHTO, Superpave Volumetric Mix Design, 2007)

La forma de presentación de la granulometría, es un gráfico en cuyas ordenadas se representa el porcentaje que pasa y en las abscisas se representa el tamaño de la partícula, en una escala donde el tamaño en milímetros es elevado a la potencia 0.45. Además, se usa el tamiz de control primario PCS, que define el límite, para cada TMN entre una granulometría gruesa y una fina. Los PCS de la especificación según se encuentra en la siguiente tabla. (Segovia, 2014).

Tabla 32

Tamices de Control Primario. Norma Superpave.

<b>Tamices de Control Primario de la Mezcla PCS % Pasa</b>					
<b>TMN</b>	37,5 mm	25,0 mm	19,0 mm	12,5 mm	9,5 mm
<b>PCS</b>	9,5 mm	4,75 mm	4,75 mm	2,36 mm	2,36 mm
<b>Punto de control PCS (%pasa)</b>	47	40	47	39	47

(AASHTO, Superpave Volumetric Mix Design, 2007)

Inicialmente, la especificación incluía la denominada zona de restricción, ubicada sobre la línea de máxima densidad, que buscaba evitar excesos de arena natural (y potenciales problemas de ahuellamiento) forzando a las mezclas a pasar por la parte gruesa en la región de los finos (entre 0.3 mm y 4.75 mm). Sin embargo, estudios posteriores brindaron el sustento necesario para prescindir de esta restricción, al probar que la especificación de angulosidad de los finos era suficiente para controlar la calidad de estos materiales. (Segovia, 2014).

El agregado grueso ¾” y 3/8” que se utiliza en este trabajo tiene como fuente material proveniente de río, y el proceso posterior es de trituración. El agregado fino corresponde a polvo

de piedra producto de la trituración. Las granulometrías son los que se indican en el cuadro siguiente:

Tabla 33

Agregado Grueso, Medio y Fino utilizado en la mezcla.

<b>Granulometrías Individuales de los Agregados</b>					
		<b>MAT 3/4</b>	<b>MAT 3/8</b>	<b>MAT Arena</b>	<b>MAT Polvo</b>
<b>Denominación</b>		<b>AC1</b>	<b>AC2</b>	<b>AF1</b>	<b>MF</b>
<b>Tamiz</b>		<b>% Pasa</b>	<b>% Pasa</b>	<b>% Pasa</b>	<b>% Pasa</b>
	<b>mm</b>				
<b>1</b>	<b>25</b>	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
<b>3/4</b>	<b>19</b>	85,8%	100,0%	100,0%	100,0%
<b>1/2</b>	<b>12</b>	28,5%	99,9%	99,9%	100,0%
<b>3/8</b>	<b>9,5</b>	8,2%	97,7%	99,5%	100,0%
<b>4</b>	<b>4,75</b>	3,0%	73,7%	98,8%	100,0%
<b>8</b>	<b>2,36</b>	2,6%	55,2%	74,8%	100,0%
<b>16</b>	<b>1,18</b>	2,5%	36,9%	54,2%	100,0%
<b>30</b>	<b>0,6</b>	2,3%	21,1%	39,6%	100,0%
<b>50</b>	<b>0,3</b>	1,9%	11,3%	26,4%	100,0%
<b>100</b>	<b>0,15</b>	1,2%	5,5%	13,3%	98,0%
<b>200</b>	<b>0,075</b>	0,4%	1,6%	2,1%	90,0%

El siguiente paso es determinar la granulometría de la mezcla combinada de agregados para la mezcla asfáltica.

#### **2.6.4. Método Bailey para Diseño de la Mezcla Combinada.**

(Vavrik, Huber, Pine, Carpenter, & Bailey, 2002) indican que:

Para el presente diseño de la granulometría combinada, para la mezcla asfáltica, se usarán dos agregados gruesos [AC1] y [AC2], un agregado fino [AF], y opcionalmente un relleno mineral [MF], en caso de ser requerido. Este diseño usa agregados de diferentes gravedades específicas y son mezclados en fracciones por volumen, que luego se transforman a porcentajes por peso. El diseño requiere recolectar información que incluye: granulometría de cada depósito de material [stockpile], la gravedad específica bulk, la gravedad específica aparente; % de absorción; peso unitario suelto [LUW] según: procedimiento (AASHTO T-19), y peso unitario compactado con barra [RUW] según procedimiento (AASHTO T-19).

Tabla 34:

Denominación de los Depósitos de Materiales.

<b>Tipo de Depósito Agregado Grueso</b>		
AC1	AC2	AC3
3/4''	3/8''	n/a

<b>Tipo de Depósito Agregado Fino</b>		
AF1	AF2	AF3
<b>Arena Triturada.</b>	n/a	n/a

Adicionalmente el diseño requiere tomar varias decisiones que determinaran las fracciones a utilizar de cada depósito de material, para esto se necesita: Seleccionar un Peso Unitario [CUW] definido como un % del Peso Unitario Suelto [LUW]; Porcentaje % que pasa tamiz #200 [0.075mm] especificación entre [3.5-6%]; Mezcla en Volumen del Agregado Grueso; y Mezcla en Volumen del Agregado Fino.

Tabla 35

Gravedad Especifica, Absorción y Densidades de los Agregados.

<b>Tipo de Material</b>	<b>AC1</b>	<b>AC2</b>	<b>AF1</b>	<b>MF</b>
Gravedad Especifica Bulk	2,73	2,57	2,56	2,806
Gravedad Especifica Aparente	2,78	2,74	2,76	2,806
% Absorción	1,75	3,01	3,72	-
Densidad Suelta LUW kg/m <sup>3</sup>	1390	1669	-	-
Densidad Compactada RUW Kg/m <sup>3</sup>	1567	1877	1869	-

#### a. CUW de cada agregado grueso. Paso 1.

Determinar el [CUW] de cada agregado grueso [AC1, AC2] en función del [LUW] de cada agregado grueso y del [CUW<sub>MAC</sub>] de la mezcla de agregados gruesos para la granulometría combinada. Multiplicar el LUW de cada agregado grueso por el CUW de la mezcla de agregados grueso.

$$CUW_{MAC} = \%LUW \rightarrow CUW_{MAC} = 100\%; \text{ Mezcla Densa Gruesa: } 95\text{-}105\% \text{ LUW}$$

$$CUW_{AC1} = LUW_{AC1} * CUW_{MAC} = 1390 \text{ kg/m}^3 * 100\% = 1390 \text{ kg/m}^3$$

$$CUW_{AC2} = LUW_{AC2} * CUW_{MAC} = 1669 \text{ kg/m}^3 * 100\% = 1669 \text{ kg/m}^3$$

**b. Contribución de cada Agregado Grueso. Paso 2.**

Determinar el peso unitario que aporta cada porción de agregado grueso de acuerdo a las proporciones por volumen deseadas del agregado grueso. Multiplicar el porcentaje de la mezcla de agregado grueso por el CUW de cada agregado.

Tabla 36:

Proporciones en Volumen de Mezcla de Material Grueso y Fino

<b>Mezcla de Agregado Grueso % en Volumen</b>		
AC1	AC2	AC3
48,0	52,0	n/a
Debe Sumar 100%		

<b>Mezcla de Agregado Fino % en Volumen</b>		
AF1	AF2	AF3
100,0	n/a	n/a
Debe Sumar 100%		

Contribución = Proporción % en Volumen del Agregado Grueso  $\times$   $CUW_{AC}$

$$\text{Contribución AC1} = V_{AC1} \times CUW_{AC1} = 48\% \times 1390 \text{ kg/m}^3 = 667.2 \text{ kg/m}^3.$$

$$\text{Contribución AC2} = V_{AC2} \times CUW_{AC2} = 52\% \times 1669 \text{ kg/m}^3 = 867.88 \text{ kg/m}^3.$$

**c. Vacíos en los Agregados Gruesos. Paso 3.**

Determinar los Vacíos en cada agregado grueso según su  $CUW_{CA}$  y su contribución en Volumen. Lo primero es calcular uno menos el CUW dividido entre la gravedad específica bulk  $G_{sb}$  por la densidad del agua. Multiplicar el resultado por el porcentaje de cada agregado grueso en la mezcla de gruesos. Luego sumar la contribución de cada agregado grueso.

$$\text{Vacíos en el AC} = \left\{ 1 - \frac{CUW_{AC}}{G_{sb} * 1000} \right\} \cdot \text{Mezcla \%}$$

$$V_{AC1} = \left\{ 1 - \frac{1390}{2.73 * 1000} \right\} \cdot 48\% = 23.56\%$$

$$V_{AC2} = \left\{ 1 - \frac{1669}{2.57 * 1000} \right\} \cdot 52\% = 18.23\%$$

$$V_{AC} = V_{AC1} + V_{AC2} = 23.56\% + 18.23\% = 41.79\%$$

Este valor de volumen de vacíos de agregado grueso en la mezcla combinada es llenado por los agregados finos AF.

**d. Contribución de cada Agregado Fino. Paso 4.**

Determinar el CUW para cada agregado fino de acuerdo al volumen deseado de mezcla de agregados finos. Este es el peso unitario que llena los vacíos en el agregado grueso. Multiplicar el CUW del agregado fino por el porcentaje en volumen de este agregado en la mezcla de agregados finos y multiplicar este por el porcentaje de vacíos en los agregados gruesos.

$$\text{Contribución del Agregado Fino} = \text{CUW}_{AF} \times \text{Proporción \% Volumen Fino} \times V_{AC}$$

$$\text{Contribución AF}_1 = \text{CUW}_{AF1} \times \text{Proporción \% Volumen Fino AF1} \times V_{AC}$$

$$\text{Se toma } \text{CUW}_{AF1} = \text{RUW}_{AF1} = 1869 \text{ kg/m}^3.$$

$$\text{Proporción \% Volumen Fino} = 100\% \text{ [solo se ocupa un depósito de agregado fino]}$$

$$\text{Contribución AF}_1 = 1869 \text{ kg/m}^3 \times 100\% \times 41.79\% = 781.07 \text{ kg/m}^3.$$

Nota: Si hay más que un agregado fino el cálculo se repite para cada agregado fino.

**e. Peso Unitario de la Mezcla. Paso 5.**

Determinar el peso unitario para la mezcla total de agregados [mezcla combinada]. Para esto sumar el peso unitario de cada agregado (sumar la contribución de cada agregado).

$$\text{Peso Unitario de la Mezcla} = \text{Contribución del AC1+AC2+AF1}$$

$$\text{Peso Unitario de Mezcla} = 667.2 \text{ kg/m}^3 + 867.88 \text{ kg/m}^3 + 781.07 \text{ kg/m}^3 = 2316.15 \text{ kg/m}^3.$$

**f. Porcentaje Estimado % Inicial en Peso de cada Agregado. Paso 6.**

Dividir el peso unitario de cada agregado por el peso unitario del total de la mezcla de agregado.

$$\text{Proporción \% en peso} = \text{Peso Unitario de Agregado} / \text{Peso Unitario de la Mezcla}$$

$$\text{Proporción\%AC1} = [667.2 \text{ kg/m}^3] / [2316.15 \text{ kg/m}^3] = 0.2881 = 28.81\% \text{ en peso [\%CA1]}$$

$$\text{Proporción\%AC2} = [867.88 \text{ kg/m}^3] / [2316.15 \text{ kg/m}^3] = 0.3747 = 37.47\% \text{ en peso [\%CA2]}$$

$$\text{Proporción\%AF1} = [781.07 \text{ kg/m}^3] / [2316.15 \text{ kg/m}^3] = 0.3372 = 33.72\% \text{ en peso. [\%FA1=\%FA]}$$

$$\text{Suma} = \text{AC1} + \text{AC2} + \text{AF1} = 28.81\% + 37.47\% + 33.72\% = 100\%$$

Estas fracciones iniciales estimadas están basadas en la elección de cuanto agregado grueso tiene la mezcla. Las fracciones iniciales estimadas serán ajustadas posteriormente para conocer las partículas de agregado fino en el depósito de agregado grueso [stockpile], y las partículas de agregado grueso en los depósitos de agregado fino.

**g. Tamaño Máximo Nominal NMPS y Tamiz Control Primario PCS. Paso 7.**

Para los depósitos de agregado grueso determinar el porcentaje pasante de PCS. Para los depósitos de agregado fino determinar el porcentaje retenido sobre el PCS.

Tabla 37:

Tamices de Control para el Método Bailey

<b>Tamices de Control para Varios NMPS de Mezclas Asfálticas</b>						
<b>Tamaño mm</b>	<b>37,5</b>	<b>25,0</b>	<b>19,0</b>	<b>12,5</b>	<b>9,5</b>	<b>4,8</b>
<b>Half Sieve</b>	19,00	12,50	9,50	**	4,75	2,36
<b>PCS</b>	9,50	4,75	4,75	2,36	2,36	1,18
<b>SCS</b>	2,36	1,18	1,18	0,60	0,60	0,30
<b>TCS</b>	0,60	0,30	0,30	0,15	0,15	0,075

\*\* El más cercano 'típico' tamiz medio para un TMN 12,5mm es el tamiz 4,75mm. Sin embargo, el 6,25 mm actualmente sirve como punto de quiebre. Interpolando el valor el % que pasa para el tamiz 6,25 mm para uso en el radio CA proveerá un valor más representativo del radio.

(Vavrik, Huber, Pine, Carpenter, & Bailey, 2002) Tomado y Editado.

El agregado combinado tendrá un tamaño de agregado máximo nominal entre 4.75 mm a 19.0mm para mezclas asfálticas en caliente HMA en carpetas superficiales, y no mayor que 37.5mm para HMA en capas sub superficiales. (AASHTO, Superpave Volumetric Mix Design, 2007)

Se asume una mezcla combinada de NMPS=19.0 mm, para la cual el tamiz PCS es 4.75mm. Al final de la determinación de los porcentajes de la mezcla combinada se comprueba el TMN.

% de agregado fino en  $D_p\text{AC1} = 3.00\%$  [AC1 % pasa PCS]

% de agregado fino en  $D_p\text{AC2} = 73.7\%$  [AC2 % pasa PCS]

$$\% \text{ de agregado grueso en DpAF1} = 100.0\% - 98.8\% = 1.2\% \quad [\text{AF1}\% \text{retenido PCS}]$$

**h. Determinar el AF en cada depósito AC. Paso 8.**

Para cada depósito de agregado grueso determinar el porcentaje pasante del PCS como un porcentaje del total de la mezcla de agregados.

El % AF en la Mezcla = % Estimado Inicial de cada AC en la Mezcla  $\times$  % Agregado Fino en cada Deposito AC.

$$\% \text{ Agregado Fino en AC1} = 28.81\% \times 3.00\% = 0.86\% \quad [\text{FA en CA1}]$$

$$\% \text{ Agregado Fino en AC2} = 37.47\% \times 73.7\% = 27.62\% \quad [\text{FA en CA2}]$$

**i. Suma de Agregado Finos en Todos los AC. Paso 9.**

$$\% \text{ Finos en CAs} = \% \text{AF en AC1} + \% \text{AF en AC2} = 0.86\% + 27.62\% = 28.48\% \quad [\text{FA en CA}]$$

**j. Determinar AC en cada Deposito de Agregado Fino. Paso 10.**

Se calcula el agregado grueso en cada depósito de agregado fino de acuerdo a su porcentaje en la mezcla. Para cada depósito de agregado fino determinar el porcentaje retenido sobre el PCS como porcentaje de la mezcla total de agregados.

% Agregado Grueso en la Mezcla = % Estimada Inicial de cada AF en la Mezcla  $\times$  % de Agregado Grueso en el Dp AF.

$$\% \text{ Agregado Grueso F1} = 33.72\% \times 1.2\% = 0.40\% \quad [\text{CA en FA1}]$$

**k. Suma de Agregado Grueso en todos los AF. Paso 11.**

$$\% \text{ Gruesos en AF} = \% \text{AC en AF1} + \% \text{AC en AF2} + \% \text{AC en AF3}$$

$$\text{Suma \% de Agregado Grueso en la Mezcla} = \% \text{ AC en AF1} = 0.40\% \quad [\text{CA en FA}]$$

**l. Corregir las fracciones estimadas iniciales en % CA de la mezcla. Paso 12.**

Corregir los porcentajes iniciales estimados de la mezcla de cada agregado grueso para calcular la cantidad de agregado fino contenido y la contribución de agregado grueso por los depósitos de agregado fino.

$$\text{Ajuste CA\% Mezcla} = \text{CA\%}_{\text{inicial}} + (\text{FA en CA}) - \left( \frac{\text{CA\%}_{\text{inicial}} \times \text{SUMA CA EN FA}}{\text{Total \% CA}} \right)$$

$$\% CA1 \text{ en Mezcla} = 28.81\% + 0.86\% - \left( \frac{28.81\% \times 0.4\%}{28.81\% + 37.56\%} \right) = 29.49\% \quad [CA1]Ajust.$$

$$\% CA2 \text{ en Mezcla} = 37.47\% + 27.62\% - \left( \frac{37.47\% \times 0.4\%}{28.81\% + 37.47\%} \right) = 64.86\% \quad [CA2]Ajust.$$

**m. Corregir las fracciones estimadas iniciales en % FA de la mezcla. Paso 13.**

Corregir las fracciones estimadas iniciales de cada agregado fino para calcular la cantidad de agregado grueso contenido y la contribución de agregado fino por los depósitos de agregado grueso.

$$Ajuste FA\% Mezcla = FA\%_{inicial} + (CA \text{ en FA}) - \left( \frac{FA\%_{inicial} \times SUMA FA EN CA}{Total \% FA} \right)$$

$$\% FA1 \text{ en Mezcla} = 33.72\% + 0.4\% - \left( \frac{33.72\% \times 28.48\%}{33.72\%} \right) = 5.65\% \quad [AF1]Ajust.$$

Se ajustan los valores para AF1, AF2, etc.

Se suman los nuevos porcentajes ajustados:  $AC1+AC2+AF1 = 29.49+64.86+5.65 = 100\%$

El siguiente paso es determinar si se requiere relleno mineral [MF] para alcanzar el nivel deseado del porcentaje pasante del tamiz #200.

**n. Determinar el pasante del #200 que contribuye cada agregado. Paso 14.**

Determinar la cantidad de pasante del #200 que contribuye cada agregado usando el ajuste de porcentaje por depósitos. Para esto multiplicar el porcentaje pasante del tamiz #200 [0.0075mm] para cada agregado por el porcentaje ajustado de cada agregado.

% Contribución del #200 para cada deposito = % corregido × % pasante #200

MF en %CA1 = %CA1 × % pasa # 200 en CA1 = 29.49% × 0.4% = 0.12%

MF en %CA2 = %CA2 × % pasa # 200 en CA2 = 64.86% × 1.6% = 1.02%

MF en %FA1 = %FA1 × % pasa # 200 en FA1 = 5.65% × 2.1% = 0.12%

% MF en Mezcla = MF en %CA1+ MF en %CA2+ MF en %FA1=0.12+1.02+0.12=1.26%

**o. Determinar la Cantidad de MF requerido. Paso 15.**

Determinar la cantidad de MF requerido, para traer el % pasante del #200 al nivel deseado. Para esta mezcla la cantidad deseada de pasante de tamiz #200 es 3.5%, el rango de este valor de filler es de: [3.5% – 6%]

$$\%MF = \left( \frac{\% \text{ deseado} - \% \text{ en Mezcla}}{\% \text{ en } DpMF} \right)$$

$$\%MF = \left( \frac{3.5\% - 1.26\%}{90\%} \right) = 2.49\%$$

$$[MF] = 2.5\%$$

**p. Determinar los Porcentajes Finales de la Mezcla. Paso 16.**

Determinar los porcentajes finales de la mezcla de los depósitos por incorporación de Relleno Mineral a el agregado fino. En este paso el porcentaje de mezcla de agregados gruesos no cambia. El porcentaje de finos es ajustado para conocer el relleno mineral.

$$\%FA_{corr} = \%FA_{ini} - \left\{ \frac{\%FA_{ini} \times \%MF}{TOTAL \% FA} \right\}$$

$$\%FA_{corr} = 5.65\% - \left\{ \frac{5.65\% \times 2.49\%}{5.65\%} \right\} = 3.16\% \quad [AF1] \text{ Ajust.} \times \text{ Filler}$$

Se suma los Porcentajes en Peso:

$$AC1+AC2+AF1+MF=29.49\%+64.86\%+3.16\%+2.49\%=100\%$$

Resultados:

Tabla 38

Combinación de Agregados para la Mezcla de Diseño

MATERIAL[STOCKPILE]	NOMBRE	RESULTADO % PESO
MATERIAL 3/4	AC1	29.49
MATERIAL 3/8	AC2	64.86
ARENA TRITURADA	AF1	3.16
RELLENO MINERAL	MF	2.49
SUMA		100.00

Usando estos porcentajes son determinados la fórmula de mezcla de trabajo y las proporciones de los agregados como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 39

Combinación de Agregados para la Mezcla Asfáltica de Diseño

<b>Mezcla Combinada</b>			
<b>Tamiz</b>		<b>% Pasa</b>	<b>% Retenido</b>
	<b>mm</b>		
<b>1</b>	25	100.00	0.00
<b>3/4</b>	19	95.82	4.18
<b>1/2</b>	12,5	78.84	16.97
<b>3/8</b>	9,5	71.41	7.43
<b>4</b>	4,75	53.28	17.13
<b>8</b>	2,36	41.44	12.84
<b>16</b>	1,18	28.85	12.59
<b>30</b>	0,6	18.11	10.74
<b>50</b>	0,3	11.22	6.90
<b>100</b>	0,15	6.81	4.41
<b>200</b>	0,075	3.45	3.36
<b>Pasa 200</b>	Pasa		3.45

Una vez que se tiene la mezcla combinada se procede a verificar que los tamaños asumidos para el NMPS coincidan con los de la mezcla combinada. Para el método Bailey el tamiz mayor al tamiz que retenga más del 10% se denomina NMPS. Para el presente caso el tamiz 9.5mm retiene 19.93%, mayor al 10%, de esto se tiene que NMPS = 19.0mm, que concuerda con lo asumido. Adicionalmente el tamaño máximo del agregado 19.0mm coincide al que se tiene en el agregado AC1 que es de ¾".

**q. Determinar los Radio para el AC y AF. Paso 17.**

Los rangos recomendados para las relaciones de agregados son:

Tabla 40

Rangos Recomendados para el Método Bailey

<b>Rangos Recomendados de Relación de Agregados</b>						
<b>TMN mm</b>						
<b>Tamiz mm</b>	<b>37,5</b>	<b>25,0</b>	<b>19,0</b>	<b>12,5</b>	<b>9,5</b>	<b>4,75</b>

<b>CA Ratio</b>	0,80-0,95	0,70-0,85	0,60-0,75	0,50-0,65	0,40-0,55	0,30-0,45
<b>FAc Ratio</b>	0,35-0,50	0,35-0,50	0,35-0,50	0,35-0,50	0,35-0,50	0,35-0,50
<b>FAf Ratio</b>	0,35-0,50	0,35-0,50	0,35-0,50	0,35-0,50	0,35-0,50	0,35-0,50

Fac = Grueso del Agregado Fino; Faf = Fino del Agregado Fino; Estos rangos proveen un punto de partida donde no existe experiencia anterior para un conjunto de agregados. Si el diseñador tiene un diseño existente aceptable, debería ser evaluado para determinar los rangos más cercanos para lograr futuros diseños.

(Vavrik, Huber, Pine, Carpenter, & Bailey, 2002)

$$Radio CA = \left\{ \frac{\% Pasa Half Sieve - \% Pasa PCS}{100\% - \% Pasa Half Sieve} \right\}$$

% Pasa Tamiz Medio = 71.41%. % Pasa PCS = 54.28%

Relación CA =  $(71.41-54.28) / (100-71.41) = 0.60 \rightarrow$  Cumple Rango Recomendado

$$Radio FA_c = \frac{\% Pasa SCS}{\% Pasa PCS}$$

Relación FAc. =  $28.85\% / 54.28\% = 0.53 \rightarrow$  Cerca Rango Recomendado 0.35 – 0.50

$$Radio FA_f = \frac{\% Pasa TCS}{\% Pasa SCS}$$

Relación FAF. =  $11.22\% / 28.85\% = 0.39 \rightarrow$  Cumple Rango Recomendado

Los valores para la mezcla combinada se hallan dentro de los rangos recomendados. El valor de FAc, es ligeramente mayor al recomendado, de los expuesto en el método, los limites superiores de este valor indican mayor cantidad de finos en el Agregado Fino, en consecuencia, disminuye los Vacíos en el Agregado Mineral.

### 2.6.5. Requisitos Superpave para los agregados combinados.

Para la metodología SUPERPAVE, el tamaño máximo nominal del agregado TMN será entre 4.75mm – 19.0mm para carpetas HMA superficiales, y 37.5mm para otras capas. La mezcla combinada de agregados debe cumplir los requisitos expuestos en la siguiente tabla. (AASHTO, Superpave Volumetric Mix Design, 2007).

Tabla 41

Puntos de Control Superpave para la mezcla combinada de Agregados

Tamaño Tamiz mm	TAMAÑO MAXIMO NOMINAL DEL AGREGADO - PUNTOS DE CONTROL (% PASA)																	
	37,5 mm	25,0 mm	19,0 mm	12,5 mm	9,5 mm	4,75 mm	2,36 mm	1,18 mm	0,075 mm	37,5 mm	25,0 mm	19,0 mm	12,5 mm	9,5 mm	4,75 mm	2,36 mm	1,18 mm	0,075 mm
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
50,0	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
37,5	90	100	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
25,0	-	90	90	100	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19,0	-	-	-	90	90	100	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12,5	-	-	-	-	-	90	90	100	100	-	100	-	100	-	100	-	100	-
9,5	-	-	-	-	-	-	-	90	90	100	95	100	-	100	-	100	-	100
4,75	-	-	-	-	-	-	-	-	-	90	90	100	-	100	-	100	-	100
2,36	15	41	19	45	23	49	28	58	32	67	-	-	-	-	-	-	-	-
1,18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	30	60	-	-	-	-	-	-
0,075	0	6	1	7	2	8	2	10	2	10	6	12	-	-	-	-	-	-

(AASHTO, Superpave Volumetric Mix Design, 2007)

El agregado combinado será clasificado como agregado grueso cuando pase abajo del tamiz de control primario PCS, según el punto de control especificado en la siguiente tabla.

Tabla 42

Puntos de Control Superpave para la mezcla combinada de Agregados

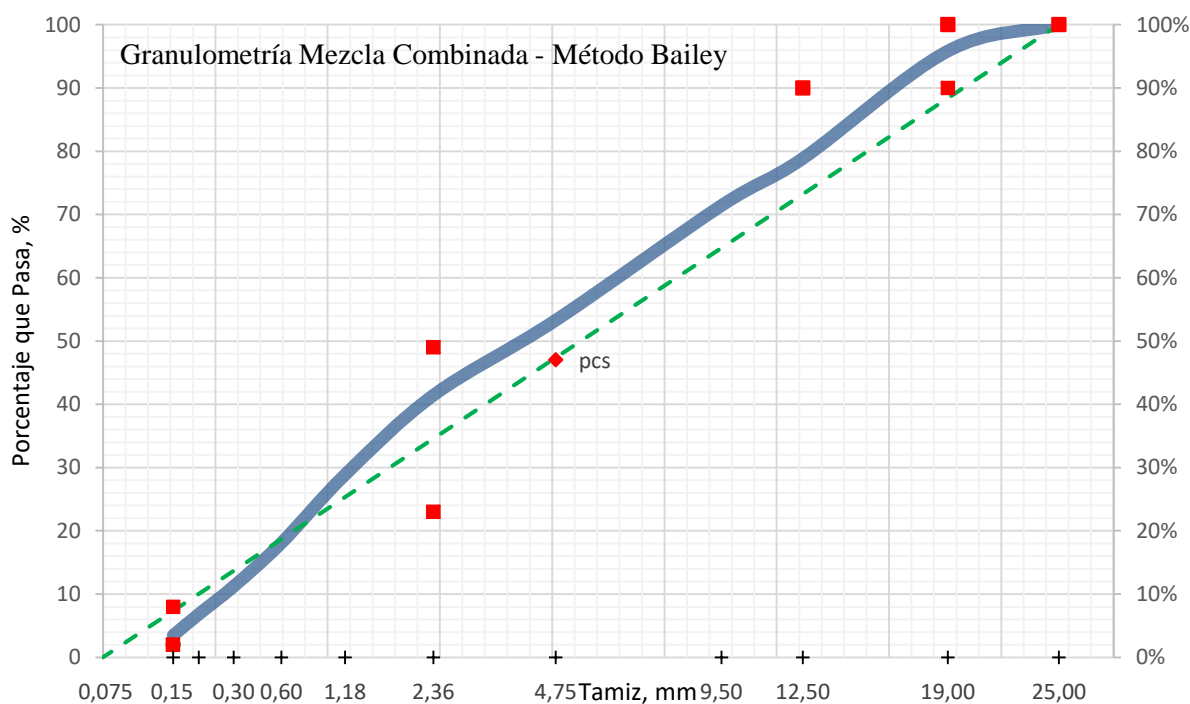
% Pasa el Tamiz Primario de Control PCS para mezclas Combinadas					
Tamaño Máximo Nominal TMN	37,5	25,0	19,0	12,5	9,5
Tamiz de Control Primario PCS	9,5	4,75	4,75	2,36	2,36
% Pasa PCS	47	40	47	39	47

(AASHTO, Superpave Volumetric Mix Design, 2007)

En el caso del agregado combinado de este estudio, se tiene que %Pasa PCS = 53.84% mayor al 47% indicado en la norma, por lo que la mezcla es una clasificada como graduación fina.

## Ilustración 45.

Puntos de Control Superpave en Mezcla Combinada por el Método Bailey.



La gráfica presenta en las abscisas los valores de la abertura del tamiz en milímetros elevada a la potencia 0.45 y en las ordenadas los valores del % que pasa de la mezcla combinada de agregados determinados mediante el método Bailey, los puntos rojos determinan los requisitos de la normativa Superpave, la línea verde es la mezcla teórica de máxima densidad. A partir de este gráfico se determina que el método Bailey es efectivo, pues la combinación de agregados cumple los requisitos de la norma.

### 2.6.1. Contenido Inicial de Ligante.

(AASHTO, Superpave Volumetric Mix Design, 2007) indica que:

Se determina la Gravedad Especifica Bulk de la Mezcla Combinada:

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

$P_1, P_2, \dots$ , son el porcentaje por masa de los agregados 1, 2, n.

$G_1, G_2, \dots$ , son las gravedades especificas bulk de los agregados.

$$Gsb = \frac{29.49 + 64.86 + 3.16 + 2.49}{\frac{29.49}{2.73} + \frac{64.86}{2.57} + \frac{3.16}{2.56} + \frac{2.49}{2.806}} = 2.620$$

Se determina la Gravedad Especifica Aparente de la Mezcla Combinada:

$$Gsa = \frac{P1 + P2 + \dots + Pn}{\frac{P1}{G1} + \frac{P2}{G2} + \dots + \frac{Pn}{Gn}}$$

$$Gsa = \frac{29.49 + 64.86 + 3.16 + 2.49}{\frac{29.49}{2.78} + \frac{64.86}{2.74} + \frac{3.16}{2.76} + \frac{2.49}{2.806}} = 2.754$$

G1, G2, etc., son las gravedades especificas aparente de los agregados.

Estimar la Gravedad Especifica Efectiva del Agregado Combinado en la Mezcla usando la siguiente ecuación:

$$Gse = Gsb + 0.8(Gsa - Gsb)$$

El factor 0.8 puede ser cambio a criterio del diseñador. La absorción de los agregados puede requerir valores más cercanos a 0,6 o 0,5. El sistema de diseño de mezcla Superpave, incluye un acondicionamiento previo a la compactación. Esto permite generalmente la absorción del ligante, además la gravedad especifica efectiva de la mezcla Superpave tiende a estar cerca de la gravedad especifica aparente en contraste con otros métodos de diseño donde la gravedad especifica efectiva generalmente se encuentra cerca del punto medio entre la gravedad especifica bulk y la aparente.

$$Gse = 2.62 + 0.8(2.754 - 2.62) = 2.727$$

Estimar el volumen de ligante absorbido por el agregado Vba, usando las siguientes ecuaciones:

$$Vba = Ws \left( \frac{1}{Gsb} - \frac{1}{Gse} \right)$$

Donde Ws, la masa de agregado en 1 cm<sup>3</sup> de mezcla es calculado como:

$$W_s = \frac{P_s(1 - V_a)}{\frac{P_b}{G_b} + \frac{P_s}{G_{se}}}$$

Y donde:

$P_b$  = % en masa de ligante, en equivalente decimal, asumido 0,05.

$P_s$  = % en masa de agregado, en equivalente decimal, asumido 0,95.

$G_b$  = gravedad específica del ligante.

$V_a$  = Volumen de vacíos de aire, asumido  $0.04\text{cm}^3$  en  $1\text{ cm}^3$  de mezcla.

$$W_s = \frac{0.95 \times (1 - 0.04)}{\frac{0.05}{1.025} + \frac{0.95}{2.727}} = 2.296$$

$$V_{ba} = 2.296 \left( \frac{1}{2.62} - \frac{1}{2.727} \right) = 0.0343$$

Este cálculo estimado del volumen de ligante absorbido en el agregado  $V_{ba}$ , y el subsecuente contenido inicial de ligante tiene el objetivo de lograr un contenido de vacíos de aire de 4.0%. Estimar el volumen de ligante efectivo usando la ecuación

$$V_{be} = 0.176 - [0.0675 \log(S_n)]$$

Donde:

$V_{be}$  = volumen efectivo de ligante en  $\text{cm}^3$ .

$S_n$  = tamaño de tamiz máximo nominal del mayor agregado en la mezcla en mm.

$S_n = 19.0$  mm para la mezcla de agregados combinada.

$$V_{be} = 0.176 - [0.0675 \log(19.0)] = 0.08968$$

Calcular el contenido inicial estimado de ligante  $P_{bi}$ , para la mezcla de agregados usando la ecuación:

$$P_{bi} = 100 \times \left[ \frac{G_b(V_{be} + V_{ba})}{(G_b(V_{be} + V_{ba})) + W_s} \right]$$

Donde

$P_{bi}$  = contenido estimado inicial de ligante, % en peso del total de la mezcla.

$$Pbi = 100 \times \left[ \frac{1.025(0.08968 + 0.0384)}{(1.025(0.08968 + 0.0384)) + 2.294} \right] = 5.24\%$$

(Asphalt Institute, 2001) manifiesta que:

En lugar de calcular el contenido estimado inicial de ligante, muchos diseñadores prefieren usar el valor inicial en base a su experiencia u otra información. Los siguientes valores son típicos de mezclas de agregados que tienen valores de Gsb para los agregados combinados aproximadamente de 2,65. Combinación de agregados con valores significativamente más altos pueden necesitar menos ligante y aquellos con bajo Gsb pueden necesitar más asfalto.

Tabla 43

Contenido de Inicial de Ligante Asfáltico

TMN, mm	Contenido Ligante Asfáltico de Prueba, %
37,5	3,5
25,0	4,0
19,0	4,5
12,5	5,0
9,5	5,5

(Asphalt Institute, 2001)

La mezcla combinada tiene un TMN de 19,0 mm, se toma como contenido inicial de ligante el valor de 4,5% correspondiente a la estimación recomendada por el Instituto del Asfalto, luego se promedia con el valor calculado de 5.24%, dando como resultado un promedio similar a 5,0% que se adopta como contenido inicial de ligante de prueba.

### 2.6.2. Carta de Viscosidad para el Ligante de Referencia.

El resultado de la viscosidad para el ligante de control para la HMA tiene los siguientes valores:

Tabla 44

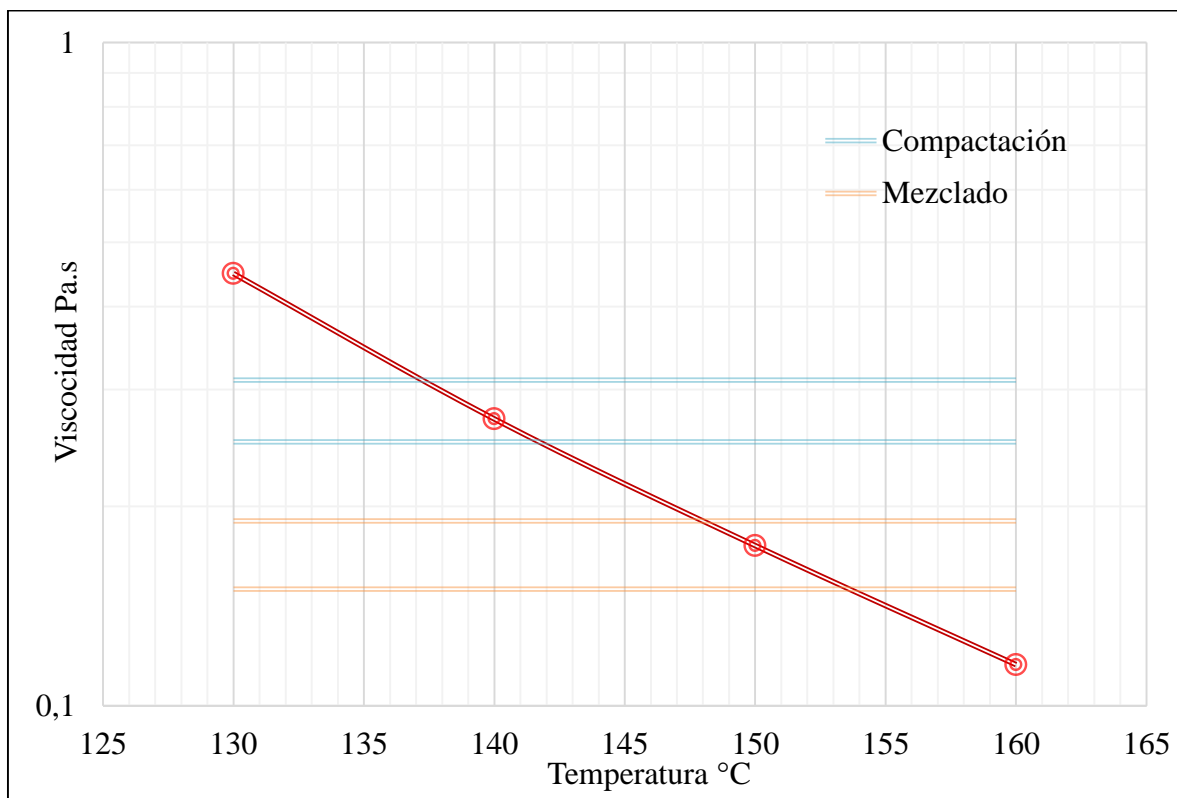
Viscosidad Ligante de Referencia

	Temperatura °C	Viscosidad Pa.s
<b>1</b>	130	0,44897
<b>2</b>	140	0,27092

<b>3</b>	150	0,17451
<b>4</b>	160	0,11539

Ilustración 46

Carta de Viscosidad Ligante de Virgen AC 20 – Ligante de Control



### 2.6.3. Mezcla Asfáltica Superpave.

Para elaborar lo que se conoce como envuelta, se lleva los materiales a una temperatura de mezclado de (146.5 – 149.5) °C temperaturas determinadas en base a la carta de viscosidad del ligante PG 64-22 / AC20 asfalto de control; y para el agregado una temperatura mayor que la del asfalto, pero sin exceder de 28°C la temperatura de mezclado, al igual que el asfalto a utilizar, no debe ser calentado a la temperatura de mezclado. Cuando los materiales alcanzan las temperaturas deseadas, se prepara el agregado para recibir el cemento asfáltico, haciendo una especie de cráter en donde se coloca el asfalto y se mezcla hasta que todas las partículas de agregado estén cubiertas de asfalto. De igual forma el molde debe de ser

calentado para que alcance la temperatura de compactación (136 – 138.5) °C. (Garnica, Gómez, & Delgado, 2003).

Cuando se ha terminado la preparación de la mezcla se requiere colocar la muestra esparciéndola en una charola y acondicionarla en un horno durante dos horas a una temperatura igual a la temperatura de compactación especificada, este proceso se puede abreviar como STA por sus siglas en ingles “Short-Term Aged” correspondiente a la norma AASHTO R 30. (Asphalt Institute, 2001)

Se saca la muestra del horno, se coloca el papel filtro en la parte inferior interna del molde y se vacía la mezcla asfáltica; con una espátula o cuchara caliente se golpea 15 veces el perímetro del molde y diez veces en el interior; después se coloca el molde en el compactador giratorio. Previamente se colocaron los parámetros a evaluar para la densificación de la muestra asfáltica en el compactador giratorio. Antes de iniciar la compactación se asegura el molde este asegurado en el compactador giratorio y después se inicia el proceso. Durante la compactación el software presenta graficas de numero de giros versus diferentes parámetros como la variación del ángulo de giro esfuerzo de corte, densidad volumen de vacíos. El compactador giratorio cuenta con un sistema de extracción que es un gato hidráulico que expulsa la muestra del molde. Para extraerla se deja enfriar la muestra por lo menos una hora para no ocasionarle daño alguno; esto porque altas temperaturas la mezcla asfáltica compactada no tiene cohesión suficiente y podría afectarse su volumetría. El compactador giratorio proporciona los valores de diámetro y altura de la mezcla asfáltica compactada. (Garnica, Gómez, & Delgado, 2003).

## Ilustración 47

## Mezcla de Agregados y Ligante



#### 2.6.4. Evaluación Parámetros Volumétricos Mezcla de Referencia.

Las proporciones en peso para la mezcla combinada de agregados que cumplen las relaciones de empaquetamiento de agregados finos y agregados gruesos según el método Bailey son las siguientes:

Tabla 45

Proporciones % en peso de Agregados - Método Bailey

Combinación de Agregados % en Peso				
AC1 3/4"	AC2 3/8"	AF1 Arena Triturada	MF Relleno Mineral	Total
29,49	64.86	3.16	2,49	100,00

El contenido inicial de ligante asfáltico se toma 5%, promedio entre el valor calculado mediante norma AASHTO R 35 y el sugerido por el instituto del asfalto, con esto se procede a realizar la fórmula de trabajo de los especímenes de prueba iniciales:

Tabla 46

Formulación de la Mezcla Inicial de Prueba

Mezcla	Agregados					Ligante	Total de la Mezcla gr	% Agregado en la	% Ligante en la
	AC1 3/4"	AC2 3/8"	AF1 Arena Triturada	MF Relleno	Total Agregados	PG 64-22 AC20			

		Minera l							Mezc la	Mez cla
A1	Peso (g)	1288, 3	2833, 5	138,1	108,8	4368,7	229,94	4598,6 4	95%	5%
	%	29,5	64,9	3,2	2,4	100,00	5,00			
A2	Peso (g)	1316	2894, 3	141	111,1	4462,4	234,91	4697,3 1	95%	5%
	%	29,5	64,9	3,2	2,4	100,00	5,00			

Se estima un nivel de tráfico en un rango de 3 a 10 millones de ejes equivalentes ESALs, para lo cual se determinan los valores de N inicial = 7; N diseño = 75; N máx. = 115, valores que pueden adoptarse a criterio del diseñador, según nota # 10 de la norma AASHTO R 35.

La mezcla de muestra en condición seca suelta es colocada en una vasija de vacío tarada, se añade agua a 25°C para sumergirla completamente, se añade una presión de 4kPa., durante 15 minutos, acabado este lapso se libera gradualmente la presión. Se determinan los pesos de la mezcla seca, del contenedor lleno de agua, y del contenedor con muestra y con agua para determinar la gravedad específica máxima Gmm. (LMC-PUCE, 2013).

Tabla 47

## Gravedad Especifica Máxima Gmm

Gravedad Especifica Máxima Teórica (Gmm)			
Espécimen	[A1]	[A2]	Prm.
Masa de la Muestra Seca en Aire [A], g	2156,47	1987,45	
Masa de contenedor y tapa con agua 25°C [D], g	8830,74	8137,61	
Masa de contenedor , tapa, muestra y agua a 25° [E], g	10133,25	9337,04	
<b>Gravedad Especifica máxima Teórica (Gmm)</b>	<b>2,525</b>	<b>2,522</b>	<b>2,520</b>

Si los especímenes se utilizaran para la determinación de las propiedades volumétricas el peso del lote será ajustado para dar lugar a un espécimen compactado que tenga un diámetro de  $\varnothing=150\text{mm}$  y  $115\pm 5\text{mm}$  en altura al final del número de giros de diseño. (AASHTO,

Preparing and Determining of Hot Mix Asphalt (HMA) Specimens by Means of the Superpave Gyrotory Compactor, 2008)

Se compactan dos especímenes de Prueba [A1] y [A2], en base al esqueleto mineral cuyas proporciones fueron determinadas en base al cumplimiento de las relaciones de empaquetamiento indicadas por el método Bailey.

Tabla 48

Compactación Giratoria SGC

Especímen [A1]			Especímen [A2]		
Giros	H mm	%Gmmux	Giros	H mm	%Gmmux
7	131,5	78,4	7	130,9	80,5
8	128,4	80,3	8	128,3	82,1
10	126,3	81,6	10	127,1	82,9
15	124,7	82,6	15	124,9	84,4
20	123,8	83,2	20	123,1	85,6
30	121,6	84,8	30	120,8	87,2
40	119,9	86,0	40	119,7	88,1
50	119,1	86,5	50	119,0	88,6
60	118,1	87,3	60	118,3	89,1
75	117,3	87,9	75	117,6	89,7

La densidad relativa sin corregir denominada %Gmmux, se calcula mediante la expresión:

$$\%G_{mmux} = \frac{W_m}{\left(\frac{\pi \phi^2 h_x}{4 * 1000}\right) G_{mm} \cdot G_m}$$

En donde:

$W_m$  = masa del espécimen en gramos

$G_{mm}$  = gravedad específica máxima teórica

$h_x$  = altura espécimen en cm

$G_m$  = peso unitario del agua = 1 g/cm<sup>3</sup>.

Para la gravedad específica bulk  $G_{mb}$ , las muestras compactadas son sumergidas en agua 25°C y se determina su peso, posteriormente se las saca del agua, se las seca y pesa. La diferencia entre las dos masas es usada para medir la masa de un igual volumen de agua.

Posteriormente se determina la masa del espécimen seco en horno. La  $G_{mb}$ , se determina dividiendo la masa seca para la masa de igual volumen de agua a 25°C. Con este procedimiento se calcula igualmente la densidad y absorción del espécimen. Si la absorción es mayor al 2%, se debe realizar el proceso ASTM D 1188 método mediante el recubrimiento del espécimen en parafina. (ASTM, Bulk Specific Gravity and Density of Non-Absorptive Compacted Bituminous Mixtures, 2014).

Tabla 49

## Gravedad específica Bulk Especímenes Compactados

<b>Gravedad Especifica Bulk (<math>G_{mb}</math>)</b>			
<b>Especímen</b>	<b>[A1]</b>	<b>[A2]</b>	<b>Prm.</b>
Masa Seca en Aire (A), g	4598,64	4697,31	
Masa en Agua (C), g	2701,90	2764,74	
Masa saturada con superficie seca en aire (B), g	4646,92	4748,04	
<b>Gravedad Especifica Bulk a 25°C (<math>G_{mb}</math>)</b>	<b>2,364</b>	<b>2,368</b>	<b>2,37</b>
<b>Densidad a 25°C, kg/m<sup>3</sup></b>	<b>2347,2</b>	<b>2361,3</b>	
<b>Porcentaje de Agua Absorbida por Volumen %</b>	<b>2,48</b>	<b>2,55</b>	

Los siguientes cálculos corresponden a la evaluación de prueba para determinar el cumplimiento de los parámetros volumétricos de la mezcla combinada y determinar en caso de que se cumpla estos parámetros un contenido estimado de ligante asfáltico.

(AASHTO, Superpave Volumetric Design for Hot Mix Asphalt (HMA), 2004) indica que:

Se calcula el volumen de vacíos  $V_a$  y vacíos en el agregado mineral VMA para los especímenes [A1] y [A2] de la mezcla de ensayo según las siguientes expresiones:

$$V_a = 100 \left( 1 - \frac{G_{mb}}{G_{mm}} \right)$$

$$[A1] \rightarrow V_a = 100 \left( 1 - \frac{2.364}{2.525} \right) = 6.376\%$$

$$[A2] \rightarrow Va = 100 \left( 1 - \frac{2.368}{2.522} \right) = 6.106\%$$

$$VMA = 100 \times \left( 1 - \frac{Gmb \cdot Ps}{Gsb} \right)$$

$$[A1] \rightarrow VMA = 100 \times \left( 1 - \frac{2.364 \times 0.95}{2.62} \right) = 14.282\%$$

$$[A2] \rightarrow VMA = 100 \times \left( 1 - \frac{2.368 \times 0.95}{2.62} \right) = 14.137\%$$

$$\Delta Va = 4.0 - Va$$

$$\Delta Va = 4.0 - 6.241 = -2.241$$

$$\Delta Pb = -0.4(\Delta Va)$$

$$\Delta Pb = -0.4(-2.241) = 0.8964$$

$$\Delta VMA = C\Delta Va;$$

$$C = 0.2 \text{ si } Va > 4.0; C = -0.1 \text{ si } Va < 4.0$$

$$\Delta VMA = 0.2 \times (-2.241) = -0.4482$$

$$VMA_{diseño} = VMA_{prueba} + \Delta VMA$$

$$VMA_{diseño} = 14.209 - 0.4482 = 13.76\%$$

Se determina la densidad relativa inicial %Gmm ini., corregida como sigue en la siguiente expresión:

$$\%Gmm_{inicial} = 100 \times \left( \frac{Gmb \cdot h_d}{Gmm \cdot h_i} \right) - \Delta Va$$

$$[A1] \rightarrow \%Gmm_{inicial} = 100 \times \left( \frac{2.364 \times 117.3}{2.525 \times 131.5} \right) - (-2.241) = 85.74$$

$$[A2] \rightarrow \%Gmm_{inicial} = 100 \times \left( \frac{2.368 \times 117.6}{2.522 \times 130.9} \right) - (-2.241) = 86.56$$

Se estima la gravedad específica Gse y posteriormente se determina el contenido estimado de ligante de diseño Pbe est.:

$$Gse = Gsb + 0.8(Gsa - Gsb)$$

$$Gse = 2.62 + 0.8(2.754 - 2.62) = 2.727$$

$$Pbe_{est} = -(Ps \times Gb) \frac{(Gse - Gsb)}{(Gse \times Gsb)} + Pbe_{est\ ini}$$

$$Pbe_{est} = -(0.95 \times 1.025) \frac{(2.727 - 2.62)}{(2.727 \times 2.62)} + 5\% = 4.9\% \approx 5\%$$

$$\frac{P_{0.075}}{Pb_e} = \frac{P_{0.075}}{Pbe_{ini}}$$

$$\frac{P_{0.075}}{Pb_e} = \frac{3.5\%}{4.98\%} = 0.7$$

Se corrige las densidades en cada número de giros del compactador giratorio utilizando la expresión:

$$\%G_{mmx} = \frac{Gmb \cdot h_m}{Gmm \cdot h_x} \times 100$$

Donde:

%Gmmx = densidad relativa corregida

hm = altura del espécimen a N diseño

hx = altura del espécimen a x giros

Tabla 50

Densidades Corregidas en la mezcla de referencia

Espécimen A1			Espécimen A2		
Giros	H mm	%Gmmx	Giros	H mm	%Gmmx
7	131,5	83,5	7	130,9	84,3
8	128,4	85,5	8	128,3	86,0
10	126,3	86,9	10	127,1	86,8
15	124,7	88,0	15	124,9	88,4
20	123,8	88,7	20	123,1	89,7
30	121,6	90,3	30	120,8	91,4
40	119,9	91,6	40	119,7	92,2
50	119,1	92,2	50	119	92,7
60	118,1	93,0	60	118,3	93,3
75	117,3	93,6	75	117,6	93,9

Como los parámetros volumétricos de la mezcla cumplen los requisitos se procede a determinar el contenido óptimo de ligante.

### 2.6.5. Contenido de Ligante de Diseño Mezcla de Referencia.

Una vez que la estructura del agregado cumple con los parámetros volumétricos de la mezcla de prueba y se ha calculado un porcentaje estimado de contenido de ligante bituminosos  $P_b$  estimado  $P_{be} = 5\%$ , se elaboran especímenes para compactarlos a diferentes contenidos de ligante asfáltico, y evaluar sus propiedades para determinar el contenido de ligante asfáltico de diseño. Mínimo dos muestras son compactadas en cada uno de los siguientes contenidos de ligante asfáltico: (1) Contenido de ligante estimado, (2) contenido estimado  $\pm 0.5\%$ , (3) contenido estimado  $+1.0\%$ . El número de giros de diseño  $N_{dis} = 75$ , para el compactador giratorio. Se acondiciona el espécimen como en la etapa previa y se realizan los especímenes y gravedades específicas. (AASHTO, Superpave Volumetric Design for Hot Mix Asphalt (HMA), 2004):

Tabla 51

Gravedad Especifica Máxima Muestras al:  $P_{be}-0.5\%$ ,  $P_{be}$ ,  $P_{be}+0.5\%$  y  $P_{be}+1\%$

<b>% Ligante</b>	<b>4,50%</b>	<b>4,50%</b>	<b>5,00%</b>	<b>5,00%</b>	<b>5,50%</b>	<b>5,50%</b>	<b>6,00%</b>	<b>6,00%</b>
<b>Espécimen</b>	<b>[01]</b>	<b>[02]</b>	<b>[01]</b>	<b>[02]</b>	<b>[01]</b>	<b>[02]</b>	<b>[01]</b>	<b>[02]</b>
Masa Seca en Aire [A], g	1597,4 5	1827,3 1	1742,8 4	1647,1 1	1893,6 6	1925,4 7	1599,4 1	1856,4 2
Masa contenedor y tapa con agua 25°C [D], g	6541,5 6	7482,8 3	7136,9 3	6745,7 4	7754,5 4	7884,8 0	6549,5 8	7602,0 4
Masa contenedor, tapa, muestra y agua a 25° [E], g	7509,6 1	8590,1 8	8189,6 1	7739,7 7	8894,5 2	9043,1 6	7510,8 3	8717,7 5
<b>Gravedad Especifica Máxima Teórica (Gmm)</b>	2,538	2,538	2,525	2,522	2,513	2,510	2,506	2,506
Agregado Ps	0,955	0,955	0,950	0,950	0,945	0,945	0,940	0,940

Los resultados para los especímenes compactados mediante el SGC, son los siguientes:

Tabla 52

Especímenes compactados al: Pbe y Pbe-0.5%.

Pbe	4,50 %		4,50 %		5,00 %		5,00 %	
	Giros	[01]	%Gmmu x	[02]	%Gmmu x	[01]	%Gmmu x	[02]
7	131,6	78,4	131,8	77,8	130,9	78,5	130,9	79,4
8	128,9	80,0	129,3	79,3	128,3	80,1	128,2	81,1
10	127,6	80,8	127,3	80,5	126,7	81,1	127,1	81,8
15	125,5	82,2	125,4	81,8	124,9	82,3	124,9	83,2
20	124,1	83,1	124,3	82,5	123,4	83,3	123,1	84,5
30	122,2	84,4	122,4	83,8	121,3	84,7	120,8	86,1
40	121,0	85,2	121,1	84,7	120,1	85,6	119,7	86,9
50	119,8	86,1	119,7	85,7	119,0	86,4	119,0	87,4
60	119,1	86,6	119,0	86,2	118,3	86,9	118,3	87,9
75	117,4	87,9	117,8	87,0	117,0	87,8	117,4	88,6

Tabla 53

Especímenes compactados al: Pbe+0.5% y Pbe+1%.

Pbe	5,50 %		5,50 %		6,00 %		6,00 %	
	Giros	[01]	%Gmmu x	[02]	%Gmmu x	[01]	%Gmmu x	[02]
7	130,5	79,5	130,5	79,5	130,7	80,7	130,8	79,4
8	128,2	80,9	128,2	80,9	128,5	82,1	128,5	80,8
10	126,8	81,8	126,8	81,8	127,5	82,7	127,1	81,7
15	124,8	83,1	124,8	83,1	125,2	84,2	124,4	83,5
20	123,1	84,3	123,1	84,2	123,3	85,5	123,1	84,3
30	120,9	85,8	120,9	85,8	120,9	87,2	120,6	86,1
40	119,5	86,8	119,5	86,8	119,9	88,0	119,2	87,1
50	118,4	87,6	118,4	87,6	118,6	88,9	118,3	87,8
60	117,8	88,0	117,8	88,0	118,0	89,4	117,3	88,5
75	116,9	88,7	116,9	88,7	116,8	90,3	116,5	89,1

La gravedad específica bulk de cada espécimen compactado es:

Tabla 54

Gravedad Especifica Bulk al: Pbe-0.5%, Pbe, Pbe+0.5% y Pbe+1%

<b>% Ligante</b>	<b>4,50%</b>	<b>4,50%</b>	<b>5,00%</b>	<b>5,00%</b>	<b>5,50%</b>	<b>5,50%</b>	<b>6,00%</b>	<b>6,00%</b>
<b>Espécimen</b>	<b>[01]</b>	<b>[02]</b>	<b>[01]</b>	<b>[02]</b>	<b>[01]</b>	<b>[02]</b>	<b>[01]</b>	<b>[02]</b>
Masa Seca	4625,8	4598,7	4586,1	4633,7	4605,2	4599,5	4671,6	4598,6
Aire (A), g	3	4	1	8	4	6	5	4
Masa Agua	2664,6	2649,0	2685,0	2706,6	2749,4	2743,0	2831,3	2785,3
©, g	5	4	8	5	0	6	0	7
Masa SSS	4660,5	4634,1	4620,0	4669,0	4639,7	4632,6	4707,6	4634,0
aire (B), g	2	5	5	0	8	8	2	5
<b>Gravedad Especifica Bulk a 25°C (Gmb)</b>	2,318	2,317	2,370	2,361	2,436	2,434	2,490	2,488
Densidad a 25°C, kg/m <sup>3</sup>	2311	2310	2363	2354	2429	2427	2482	2480
Porcentaje Agua Absorbida por Volumen %	1,74	1,78	1,75	1,79	1,83	1,75	1,92	1,92
Agregado Ps	0.955	0.955	0.95	0.95	0.945	0.945	0.94	0.94

La formulación para determinar los vacíos en el agregado mineral es la siguiente, y el cuadro de resumen de los parámetros volumétricos se presenta en el cuadro a continuación:

$$VFA = 100 \times \left( \frac{VMA - Va}{VMA} \right)$$

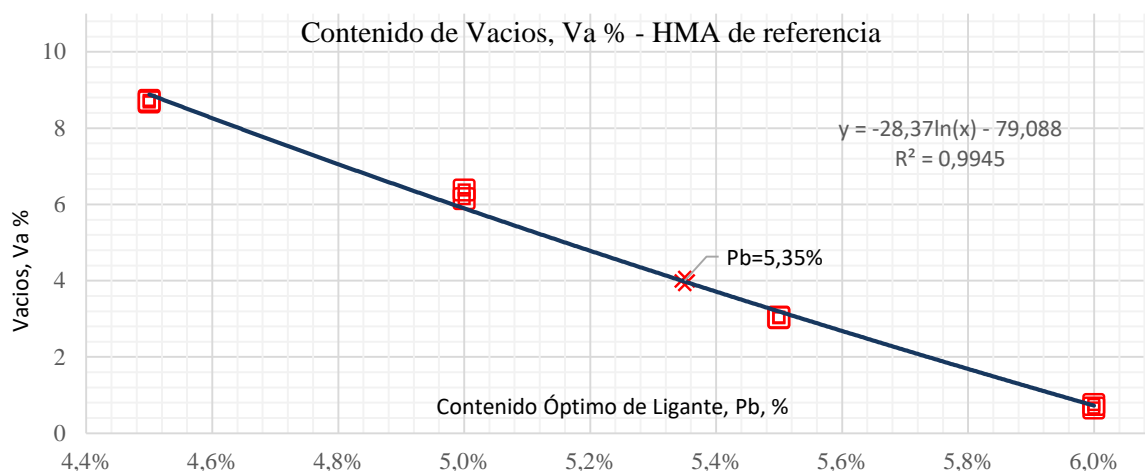
Tabla 55

Parámetros Volumétricos al: Pbe-0.5%, Pbe, Pbe+0.5% y Pbe+1%

<b>Ligante</b>	<b>4.5%</b>	<b>4.5%</b>	<b>5.0%</b>	<b>5.0%</b>	<b>5.5%</b>	<b>5.5%</b>	<b>6.0%</b>	<b>6.0%</b>
<b>Espécimen</b>	<b>[01]</b>	<b>[02]</b>	<b>[01]</b>	<b>[02]</b>	<b>[01]</b>	<b>[02]</b>	<b>[01]</b>	<b>[02]</b>
<b>Va</b>	8,683	8,725	6,143	6,373	3,042	3,025	0,657	0,748
<b>VMA</b>	15,519	15,558	14,061	14,379	12,132	12,204	10,671	10,753
<b>VFA</b>	44,049	43,92	56,312	55,678	74,926	75,213	93,843	93,044
<b>Relación</b>	0,778	0,778	0,7	0,7	0,636	0,636	0,583	0,583

## Ilustración 48

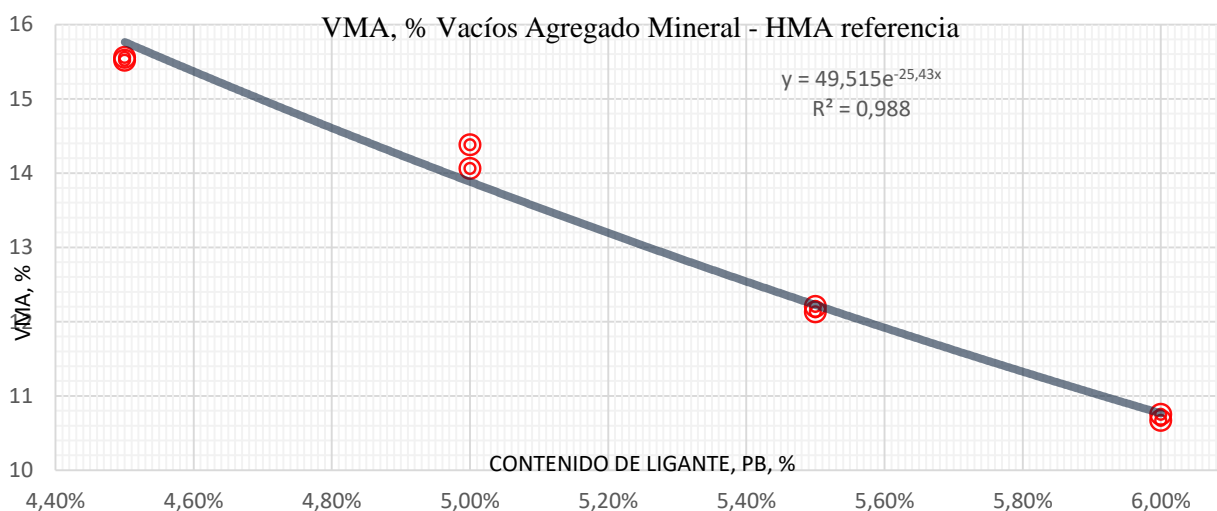
Gráfica % Óptimo de Ligante – HMA de Referencia.



A partir de la gráfica anterior se determina que el contenido de ligante de diseño se halla en el 5.35%, con este valor se procede a verificar la condición de vacíos en el agregado mineral usando la siguiente grafica que muestra un VMA cercano al 13% para el contenido de asfalto óptimo.

## Ilustración 49

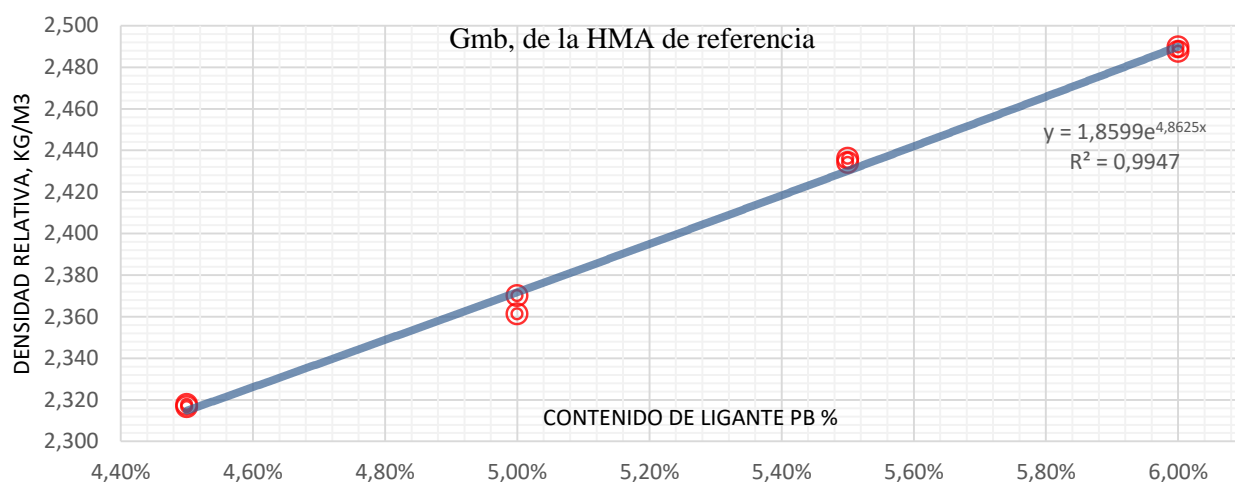
Gráfica de Contenido de VMA – HMA de Referencia.



Se determina la Densidad Relativa con respecto al contenido de ligante y el contenido de vacíos llenos de asfalto VFA, como se aprecia en las gráficas siguientes:

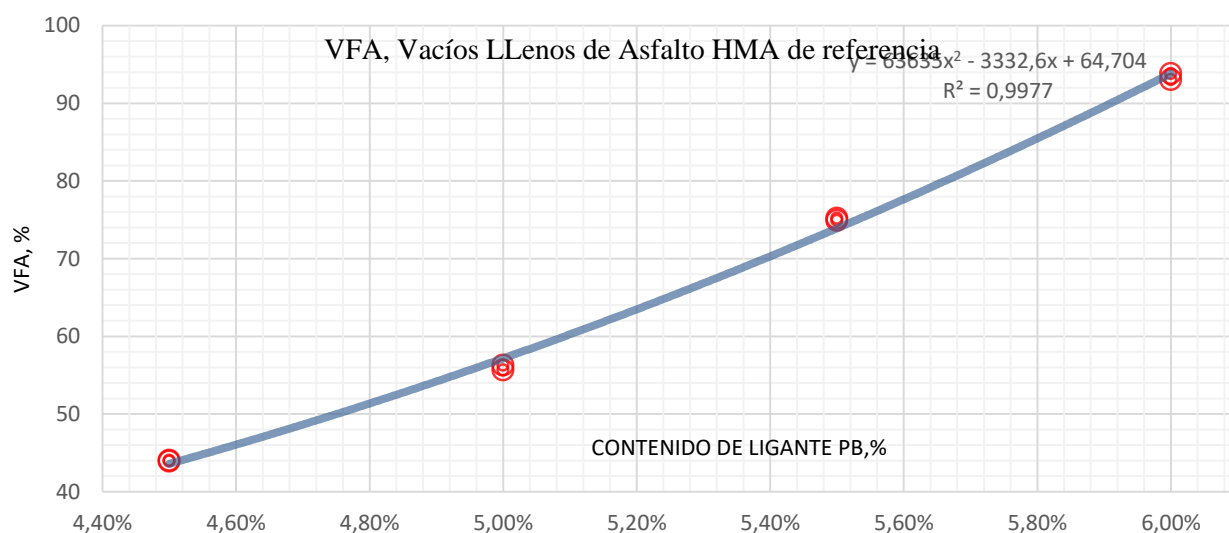
## Ilustración 50

Grafica de Densidad Relativa – HMA de Referencia.



## Ilustración 51

Grafica de VFA – HMA de Referencia.



Se corrigen los valores de la densidad relativa para las mezclas para verificar los requisitos al número de giros inicial y al número de giros de diseño.

Tabla 56

Densidad Relativa Corregida para: Pbe-0.5%, Pbe.

	4,50%		4,50%		5,00%		5,00%	
<b>Giros</b>	[01]	%Gmm	[02]	%Gmm	[01]	%Gmm	[02]	%Gmm
<b>7</b>	131,6	81,5	131,8	81,6	130,9	83,9	130,9	84,0
<b>8</b>	128,9	83,2	129,3	83,2	128,3	85,6	128,2	85,7

<b>10</b>	127,6	84,0	127,3	84,5	126,7	86,7	127,1	86,5
<b>15</b>	125,5	85,4	125,4	85,7	124,9	87,9	124,9	88,0
<b>20</b>	124,1	86,4	124,3	86,5	123,4	89,0	123,1	89,3
<b>30</b>	122,2	87,7	122,4	87,8	121,3	90,5	120,8	91,0
<b>40</b>	121,0	88,6	121,1	88,8	120,1	91,4	119,7	91,8
<b>50</b>	119,8	89,5	119,7	89,8	119,0	92,3	119,0	92,4
<b>60</b>	119,1	90,0	119,0	90,4	118,3	92,8	118,3	92,9
<b>75</b>	117,4	91,3	117,8	91,3	117,0	93,9	117,4	93,6

Tabla 57

Densidad Relativa Corregida para: Pbe+0.5%, Pbe.+1%

<b>Giros</b>	<b>5,50%</b>		<b>5,50%</b>		<b>6,00%</b>		<b>6,00%</b>	
	[01]	%Gmm	[02]	%Gmm	[01]	%Gmm	[02]	%Gmm
<b>7</b>	130,5	86,9	130,5	86,9	130,7	88,8	130,8	88,4
<b>8</b>	128,2	88,4	128,2	88,4	128,5	90,3	128,5	90,0
<b>10</b>	126,8	89,4	126,8	89,4	127,5	91,0	127,1	91,0
<b>15</b>	124,8	90,8	124,8	90,8	125,2	92,7	124,4	92,9
<b>20</b>	123,1	92,1	123,1	92,1	123,3	94,1	123,1	93,9
<b>30</b>	120,9	93,8	120,9	93,8	120,9	96,0	120,6	95,9
<b>40</b>	119,5	94,8	119,5	94,9	119,9	96,8	119,2	97,0
<b>50</b>	118,4	95,7	118,4	95,7	118,6	97,8	118,3	97,7
<b>60</b>	117,8	96,2	117,8	96,2	118,0	98,3	117,3	98,6
<b>75</b>	116,9	97,0	116,9	97,0	116,8	99,3	116,5	99,3

Se procede a compactar un nuevo espécimen elaborado con el contenido de ligante de diseño

Pb =5.35%, para determinar la densidad relativa al máximo número de giros.

Tabla 58

Gravedades Especificas para Especimen Compactado al N máximo.

Contenido de Ligante	5,35%
Especimen	[GMX]
Masa Seca en Aire (A), g	4682,14
Masa en Agua (C), g	2795,31
Masa saturada con superficie seca en aire (B), g	4724,05
Gravedad Especifica Bulk a 25°C ( <b>Gmb</b> )	2,428
Gravedad Especifica Máxima ( <b>Gmm</b> )	2.518

Tabla 59

Densidades Relativas de Espécimen Compactado al N máximo.

<b>Giros</b>	<b>[GMX]</b>	<b>%Gmmux</b>	<b>%Gmm</b>
<b>7</b>	130,8	80,5	85,3
<b>8</b>	128,2	82,1	87,0
<b>10</b>	127,1	82,8	87,8
<b>15</b>	124,6	84,5	89,5
<b>20</b>	123,1	85,5	90,6
<b>30</b>	120,5	87,3	92,6
<b>40</b>	119,4	88,1	93,4
<b>50</b>	118,2	89,0	94,4
<b>60</b>	117,6	89,5	94,9
<b>75</b>	116,9	90,0	95,4
<b>80</b>	116,5	90,3	95,8
<b>100</b>	116,0	90,7	96,2
<b>115</b>	115,7	91,0	96,4

La mezcla asfáltica HMA de referencia cumple con los requisitos de la metodología Superpave, el resumen de la fórmula de trabajo se presenta en el siguiente cuadro

Tabla 60

Fórmula Maestra de la HMA de Referencia.

<b>Total de la Mezcla g.</b>	<b>Agregados</b>				<b>Ligante</b>		<b>% Agregado en la Mezcla</b>	<b>% Ligante en la Mezcla</b>	<b>% Total de la Mezcla</b>
	<b>AC 1 3/4"</b>	<b>AC 2 3/8"</b>	<b>AF1 Arena Triturada</b>	<b>MF Relleno Mineral</b>	<b>Total Agregados</b>	<b>PG 64-22 AC20</b>			
<b>10000,00</b>	2791,2	6139,0	299,1	235,7	9465,0	535,0	94,65%	5,35%	100%
	29,5%	64,9%	3,2%	2,4%	100,0%	5,35%			

## 2.7 Elaboración de HMA con Ligante Rejuvenecido.

Toda vez que se ha determinado la fórmula de trabajo para la mezcla asfáltica, se elaboran dos especímenes con el contenido de ligante de diseño de la HMA de referencia, para determinar

las propiedades volumétricas de la mezcla mediante la metodología Superpave, y determinar si sus características son similares a las determinadas para la HMA patrón.

Tabla 61

## Gravedades Específicas de la HMA con Ligante Rejuvenecido

Contenido de Ligante Rejuvenecido en la HMA	5,35%	5,35%
Espécimen	[01]	[02]
<b>Gmb, Gravedad Especifica Bulk HMA con Ligante Rejuvenecido</b>		
Masa Seca en Aire (A), g	4601,28	4598,6
Masa en Agua (C), g	2739,67	2737,10
Masa saturada con superficie seca en aire (B), g	4641,08	4638,15
Gravedad Especifica Bulk a 25°C ( <b>Gmb</b> )	2,420	2,419
Densidad a 25°C, kg/m <sup>3</sup>	2413	2412
Porcentaje de Agua Absorbida por Volumen %	2,09	2,08
<b>Gmm, Gravedad Especifica Máxima HMA con Ligante Rejuvenecido</b>		
Masa de la Muestra Seca en Aire [A], g	2347,16	2139,85
Masa de contenedor y tapa con agua 25°C [D], g	9611,62	8763,54
Masa de contenedor , tapa, muestra y agua a 25° [E], g	11026,96	10054,09
Gravedad Especifica Máxima Teórica ( <b>Gmm</b> )	2,519	2,520

El procedimiento de compactación y determinación de las propiedades de la mezcla HMA con ligante rejuvenecido es similar al utilizado en el descrito para la HMA de referencia, en los cuadros siguientes se exponen los datos correspondientes a los especímenes compactados, para determinar si se cumplen los requisitos establecidos por la metodología Superpave.

Tabla 62

## Densidades Relativas de la HMA con Ligante Rejuvenecido

Giros	FF 1	%Gmmux	%Gmm	FF2	%Gmmux	%Gmm
7	130,7	79,1	85,9	130,8	79,0	85,8
8	128,2	80,6	87,5	128,1	80,6	87,6
10	127,0	81,4	88,4	127,1	81,3	88,3
15	124,6	83,0	90,1	124,5	83,0	90,1
20	123,0	84,0	91,2	123,1	83,9	91,2
30	120,5	85,8	93,1	120,4	85,8	93,2
40	119,3	86,6	94,1	119,4	86,5	94,0
50	118,1	87,5	95,0	118,2	87,4	95,0
60	117,6	87,9	95,4	117,6	87,8	95,4
75	116,8	88,5	96,1	116,9	88,4	96,0

Tabla 63

Parámetros Volumétricos de la HMA con Ligante Rejuvenecido

<b>Ligante</b>	<b>5,35%</b>	<b>5,35%</b>
<b>Espécimen</b>	[01]	[02]
<b>% Va</b>	3,929	3,991
<b>% VMA</b>	12,58	12,61
<b>% VFA</b>	68,73	68,36
<b>Relación Polvo/Ligante</b>	0,65	0,65

Se realiza un espécimen compactado al Numero de Giros Maximo para determinar la densidad alcanzada y verificar su cumplimiento con la normativa.

Tabla 64

Densidad a N máx. de la HMA con Ligante Rejuvenecido.

<b>Giros</b>	<b>GMX</b>	<b>%Gmmux</b>	<b>%Gmm</b>
7	131	79,0	85,3
8	128,1	80,8	87,2
10	127	81,5	88,0
15	124,3	83,2	89,9
20	122,8	84,2	91,0
30	120,2	86,1	92,9
40	119,1	86,9	93,8
50	118,1	87,6	94,6
60	117,2	88,3	95,3
75	116,4	88,9	96,0
80	116,2	89,0	96,1
100	115,8	89,3	96,5
115	115,7	89,4	96,5

La máxima densidad %Gmm @ Nmáx., cumple la normativa.

### CAPITULO 3

#### 3 Análisis de Resultados.

El primer grupo de análisis se enfoca en comparar el comportamiento del ligante de referencia o ligante virgen con las características del ligante rejuvenecido utilizando la metodología

SUPERPAVE. Para el ligante de referencia se caracteriza el bitumen usado comercialmente en nuestro medio denominado AC 20, y clasificado por la metodología Superpave como PG64-22, este es el patrón de referencia para comparar y analizar los resultados obtenidos para los demás ligantes. El ligante rejuvenecido lo constituye el mejor representante de un grupo de seis mezclas en diferentes porcentajes de aceite desechado con ligante envejecido por el método RTFOT + PAV, como se detalla en la tabla a continuación:

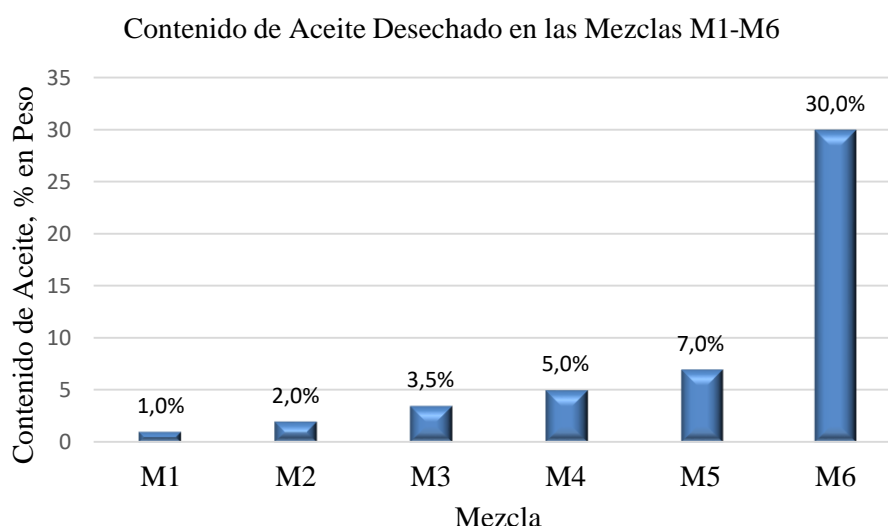
Tabla 65

Contenido de Aceite Desechado en Mezclas M1 – M6

Nombre	Descripción	% en Peso de Aceite Desechado en la Mezcla
<b>M 1</b>	Mezcla 1	1,0 % + ligante envejecido
<b>M 2</b>	Mezcla 2	2,0 % + ligante envejecido
<b>M 3</b>	Mezcla 3	3,5 % + ligante envejecido
<b>M 4</b>	Mezcla 4	5,0 % + ligante envejecido
<b>M 5</b>	Mezcla 5	7,0 % + ligante envejecido
<b>M 6</b>	Mezcla 6	30,0% + ligante envejecido

Ilustración 52

Contenido de Aceite Desechado, % en Ligante Rejuvenecido



Un segundo grupo de análisis se enfoca en el comportamiento volumétrico de Mezclas Asfálticas en Caliente HMA utilizando la metodología Superpave para determinar sus

propiedades. La muestra patrón utilizada como referencia es una HMA diseñada con el ligante virgen AC20/PG64-22, de la cual se obtiene una fórmula de trabajo que es aplicada a una HMA utilizando el ligante rejuvenecido, determinando cuales son las propiedades más cercanas a las características del ligante patrón. Se compara de esta manera dos tipos de HMA, una elaborada con ligante virgen y otra HMA echo con ligante rejuvenecido.

### 3.1 Análisis de Propiedades del Ligante Virgen y Ligante Rejuvenecido.

Las propiedades de los ligantes, se abordan desde el aspecto químico mediante el análisis de composición de asfáltenos/maltenos, y desde el aspecto reológico mediante la caracterización por desempeño del ligante a temperaturas altas y bajas Superpave.

#### 3.2.1. Punto de Chispa.

El ensayo realizado corresponde a la norma AASHTO T 48, ensayo que aporta datos sobre los rangos de temperatura de seguridad para manipulación del ligante bituminoso.

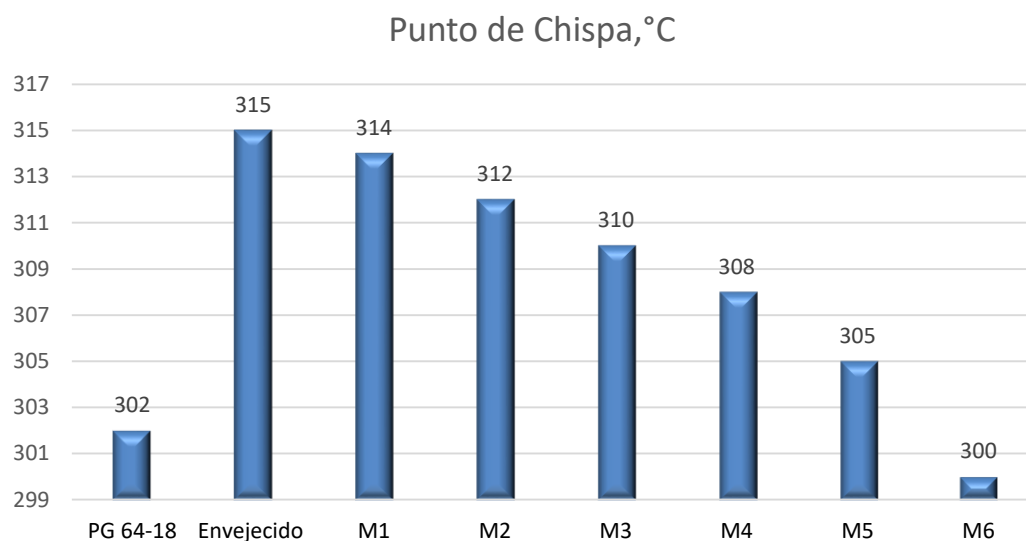
Tabla 66

Comparación Punto de Chispa en °C

<b>Descripción del Ligante</b>	<b>Temperatura en °C</b>
Ligante Virgen	302
Ligante Envejecido	315
Ligante mezcla 1	314
Ligante mezcla 2	312
Ligante mezcla 3	310
Ligante mezcla 4	308
Ligante mezcla 5	305
Ligante mezcla 6	300

## Ilustración 53

Comparación: Punto de Chispa de los Ligantes



De los datos obtenidos se desprende que todos los ligantes comparados cumplen con la normativa AASHTO M 320 para clasificación por desempeño, e indican que son seguros para su manipulación dentro de los rangos de temperatura de trabajo en laboratorio y campo.

### 3.2.2. Composición Química.

Las muestras analizadas comprenden tres tipos: (1) Ligante Virgen, Asfalto de Esmeraldas AC20 de clasificación Superpave PG64-22, (2) Ligante Envejecido, mediante procesos RTOFT+PAV, grado mayor a un PG 82; (3) Ligante Rejuvenecido Mezcla M6. Se analizó el contenido de asfaltenos de cada muestra, en el laboratorio de petróleos de la Universidad Central del Ecuador, y los resultados son los que se muestran en la tabla a continuación:

Tabla 67

% Asfaltenos y Maltenos en Asfalto Esmeraldas

<b>Caracterización Química del Ligante Bituminosos</b>	
Descripción	
<b>Muestra # 1:</b> Ligante PG 64-22/AC-20, refinería Esmeraldas. Muestreado IMPTEK	
<b>Muestra # 2:</b> Ligante >PG82/AC-20 envejecido por métodos: RTFOT+PAV	
<b>Muestra # 3:</b> Ligante Envejecido + 30% Aceite Desechado, grado final PG 64-0	
<b>%Asfaltenos</b>	<b>%Maltenos</b>

<b>Ligante de Referencia</b>	18,00	82,00
<b>Ligante Envejecido</b>	23,60	76,40
<b>Ligante Rejuvenecido</b>	19,50	80,50

Ilustración 54

Composición Química, Contenido de Asfáltenos.

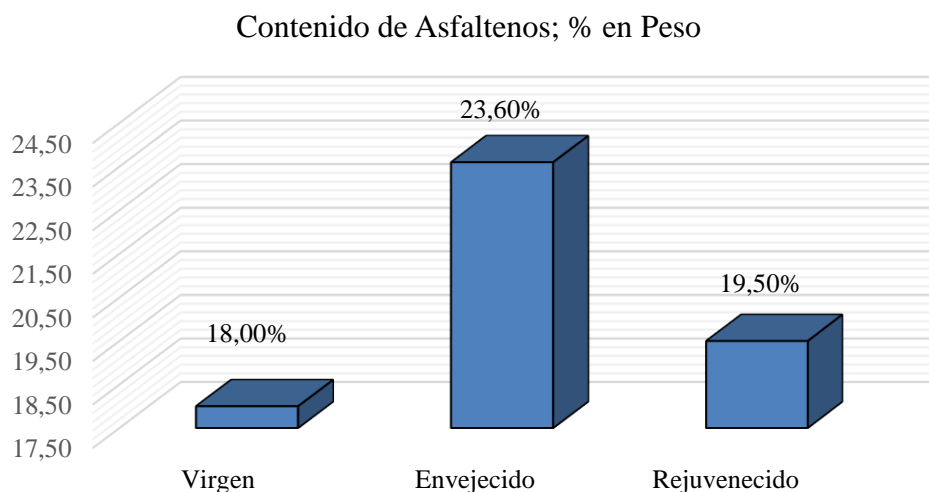
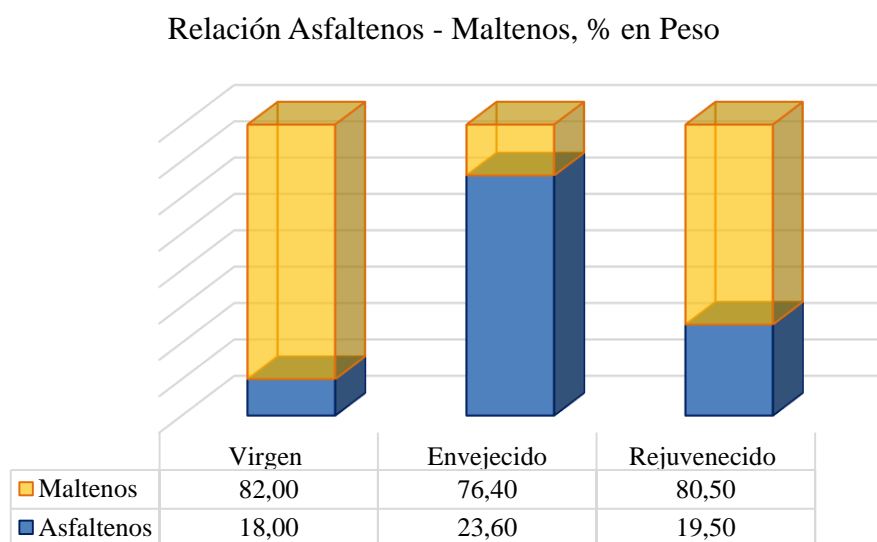


Ilustración 55

Composición Química, Contenido de Asfáltenos y Maltenos.



De la composición química, se aprecia que la mezcla M6, rejuvenecida presenta características similares a la muestra patrón.

### 3.2.3. Reómetro de Corte Dinámico en Condición Original.

De conformidad a la metodología Superpave, un ligante bituminoso se desempeña de manera óptima en una determinada temperatura alta PG “XX” en °C, cuando el parámetro  $G^*/\text{SenD} = 1.0\text{kPa}$ , al realizar el ensayo reométrico en esa temperatura alta, las escalas utilizadas por la metodología Superpave para definir las temperaturas altas en las cuales se desempeña un ligante bituminoso son las indicadas en la normativa AASHTO M 320, y varían desde los 46°C hasta los 82°C, en intervalos de seis unidades, temperaturas superiores corresponden a climas desérticos, las temperaturas bajas se denominan ‘YY’ y se expresan en grados centígrados.

Tabla 68

Escala de Temperaturas Altas para Desempeño Superpave

Grado Desempeño “PG”	PG 46 -YY	PG 52 -YY	PG 58 -YY	PG 64 -YY	PG 70 -YY	PG 76 -YY	PG 82 -YY
----------------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------

Para la condición original del ligante bituminoso los valores de  $G^*/\text{Sen D}$  deben ser mayores iguales a 1,00 kPa, de aquí que la temperatura para la cual el ligante cumpla con esta condición definirá la temperatura máxima para el mejor desempeño del ligante asfáltico. En el cuadro siguiente se exponen los resultados obtenidos de aplicar la especificación AASHTO T 315 correspondiente al Reómetro de Corte Dinámico ‘DSR’, a los diversos ligantes en condición original. (Asphalt Institute, 2001)

Tabla 69

Ensayos DSR, condición Original, en Ligantes Virgen y Ligante Envejecido

<b>Ligante Virgen: PG64-22/AC20</b>			<b>Ligante Envejecido: RTFOT+PAV</b>		
<b>Condición Original</b>		Observaciones	<b>Condición Original</b>		Observaciones
<b>DSR <math>\geq 1,00</math> kPa</b>			<b>DSR <math>\geq 1,00</math> kPa</b>		
T°	G*/SE N D kPa		T°	G*/SE N D kPa	
64,0	1,30		64,0	21,4	
64,0	1,27		64,0	22,3	
<b>66,1</b>	<b>1,00</b>	T° Limite	70,0	10,8	

70,0	0,62	70,0	11,4	
		76,0	5,77	
		<b>91,5</b>	<b>1,00</b>	T° Limite

Se aprecia que al simular el envejecimiento del ligante PG64-22/AC 20, se degrada su condición al pasar de un valor de 64°C a un valor de 91.5°C, es decir que se grado alto sería PG 88, valor que está fuera de la escala Superpave.

Tabla 70

Ensayos DSR, condición Original, en Ligantes: M1 y M2

<b>Ligante Mezcla 1</b>		Observaciones	<b>Ligante Mezcla 2</b>		Observaciones
<b>Condición Original DSR <math>\geq 1,00</math> kPa</b>			<b>Condición Original DSR <math>\geq 1,00</math> kPa</b>		
T°	G*/SEN D kPa		T°	G*/SEN D kPa	
64,0	19,00		64,0	16,80	
70,0	9,73		70,0	8,57	
82,0	2,46		76,0	4,30	
88,0	1,25		82,0	2,17	
<b>90,0</b>	<b>1,00</b>	T° Limite	88,0	1,11	
94,0	0,64		<b>88,9</b>	<b>1,00</b>	T° Limite
			94,0	0,57	

El ensayo DSR sobre el ligante envejecido mediante RTFOT+PAV muestra valores de G\*/SenD = 1.0kPa a temperaturas de 91.5°C, las mezclas M1 y M2 entregan valores menores, esto quiere decir existe rejuvenecimiento.

Tabla 71

Ensayos DSR, condición Original, en Ligantes: M3 y M4

<b>Ligante Mezcla 3</b>		<b>Ligante Mezcla 4</b>		Observaciones
<b>Condición Original DSR <math>\geq 1,00</math> kPa</b>		<b>Condición Original DSR <math>\geq 1,00</math> kPa</b>		
T°	G*/SEN D kPa	T°	G*/SEN D kPa	
64,0	13,9	70,0	5,43	
70,0	7,05	76,0	2,73	
76,0	3,56	82,0	1,38	
82,0	1,80	<b>84,8</b>	<b>1,00</b>	T° Limite

<b>87,2</b>	<b>1,00</b>	T° Limite	88,0	0,70
88,0	0,92			

Al seguir bajando las temperaturas se comprueba que el aceite como la función de rejuvenecedor del ligante envejecido.

Tabla 72

Ensayos DSR, condición Original, en Ligantes: M5

<b>Ligante Mezcla 5</b>		
<b>Condición Original DSR <math>\geq 1,00</math> kPa</b>		
T°	G*/SEN D kPa	
64,0	8,97	
70,0	4,52	
76,0	2,25	
82,0	1,13	
<b>83,1</b>	<b>1,00</b>	T° Limite
88,0	0,58	

Para resumir estas propiedades en la siguiente tabla se expone los valores que cumplen con la condición establecida en la norma AASHTO M320 para clasificación de ligantes:

Tabla 73

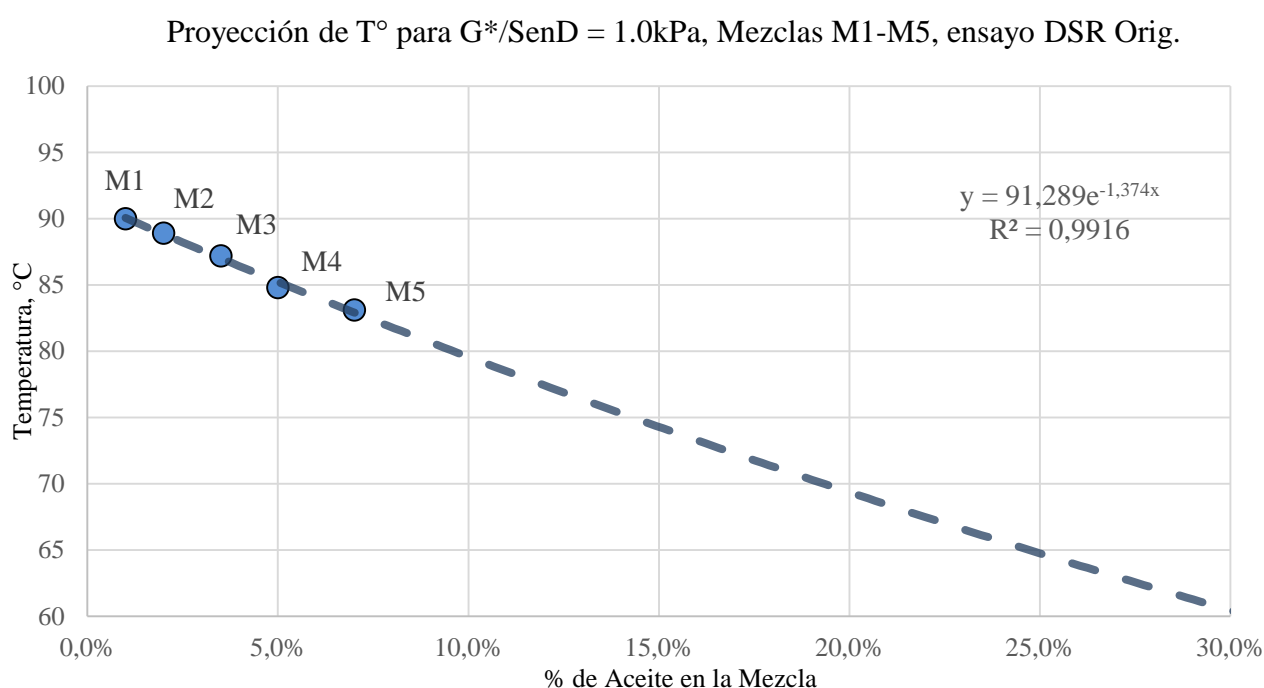
Mezclas M1 a M5, Temperaturas para las cuales G\*/SenD=1.0kPa.

<b>Descripción del Ligante</b>	<b>Temperatura Máxima °C</b>	<b>Valor G*/Sen D en kPa</b>	<b>Temperatura Alta °C Superpave</b>
<b>Ligante Virgen PG64-22</b>	66.1	1.00	PG 64
<b>Ligante Envejecido RTFOT+PAV</b>	91.5	1.00	>82 PG 88
<b>Ligante Mezcla 1</b>	90.0	1.00	>82 PG 88
<b>Ligante Mezcla 2</b>	88.9	1.00	>82 PG 88
<b>Ligante Mezcla 3</b>	87.20	1.00	PG 82
<b>Ligante mezcla 4</b>	84.8	1.00	PG 82
<b>Ligante mezcla 5</b>	83.1	1.00	PG 82

Mientras se añade más aceite desechado a la muestra, existe la tendencia de regresar a las características de la muestra patrón PG64-22/AC20. Con los resultados obtenidos desde la mezcla M1 hasta la M5, se genera una curva con objeto de proyectar la cantidad de aceite necesaria para que el valor  $G^*/\text{SenD}$  tenga un valor de 1,00 kPa a los 64°C, propiedad característica del ligante de referencia PG64-22.

#### Ilustración 56

Proyección Ensayo DSR, en mezclas M1 hasta la M5



La proyección permite identificar que una cantidad mayor al 25% de aceite desechado como rejuvenecedor en la mezcla permite alcanzar una temperatura de 64°C, para que se cumpla el valor  $G^*/\text{SenD} = 1.00\text{kPa}$ , establecido por la normativa AASHTO M 320 para el ligante patrón PG 64. La mezcla M6 se realiza añadiendo una cantidad de 30% en peso de aceite desechado al ligante envejecido, y se ensaya en el reómetro de corte dinámico DSR, obteniendo los siguientes valores:

Tabla 74

Ensayo DSR en muestra M6, mezcla de 30% de aceite desechado.

<b>Ligante Mezcla 6</b>		
<b>Condición Original DSR <math>\geq 1,00</math> kPa</b>		
T°	G*/SEN D kPa	Observaciones
58,0	1,97	
58,0	2,14	
63,1	1,0	
63,7	1,0	
<b>64,0</b>	<b>1,23</b>	T° Limite
<b>64,0</b>	<b>0,97</b>	T° Limite
<b>64,0</b>	<b>1,03</b>	T° Limite
<b>64,1</b>	<b>1,0</b>	T° Limite
<b>64,3</b>	<b>1,0</b>	T° Limite
65,8	1,0	T° Limite
70,0	0,53	
70,0	0,5	
70,0	0,62	

La Mezcla M6, ratifica la proyección de las mezclas M1 hasta la M5, con la cantidad de 30% de aceite desechado el valor de  $G^*/SenD = 1.00kPa$ , se cumple para un **valor promedio de temperatura de 64°C con una desviación estándar de 0,766**.

Tabla 75

Resumen de Estadísticas del ensayo DSR Original sobre la Mezcla 6

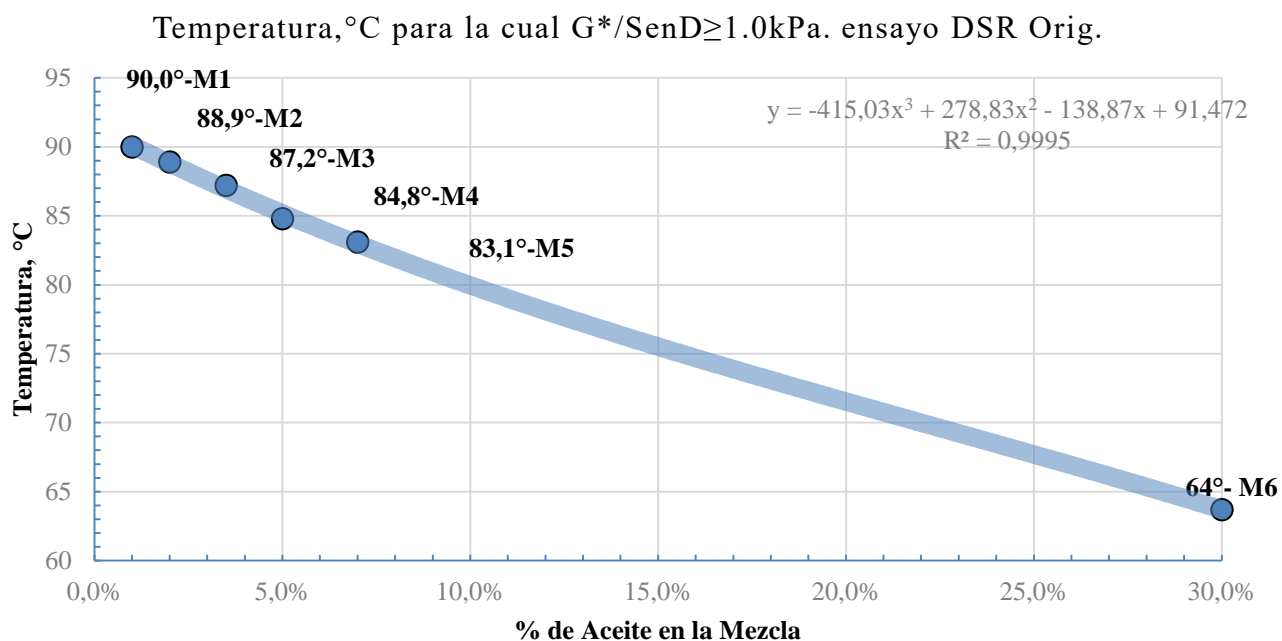
Valor Kpa Requerido para G*/Sen D Superpav e	Valor kPa Promedio Obtenido para G*/SenD	Desviación Estándar G*/SenD en M6	Temperatura Requerida de Ligante Patrón °C Superpave	Temperatura Promedio Obtenida en °C	Desviación Estándar °T en M6	Tipo de Ensayo
<b><math>\geq 1.00</math></b>	<b>1.02</b>	<b>0.082</b>	<b>64°</b>	<b>64.1°</b>	<b>0.76</b>	<b>DSR Original</b>

Toda vez que la temperatura máxima para desempeño que el ligante puede admitir debe acercarse a la menor establecida en la escala de la normativa, se puede comprobar que el ligante envejecido, la mezcla 1 y la mezcla 2, no cumplen con la clasificación por desempeño ya que sus valores están fuera de los especificados en la normativa AASHTO M 320, la cual solo

contempla valores máximos de temperatura de PG 82°C, correspondientes a casos extremadamente inusuales como es el caso de clima desérticos. Se verifica adicionalmente que existe respuesta positiva del ligante envejecido con respecto a la adición del material propuesto como rejuvenecedor puesto que mientras se va aumentando su porcentaje de participación en la mezcla esta muestra una tendencia a volver al estado que presenta el ligante virgen, en este caso la mezcla M6 presenta los valores de 64°C para temperatura máxima que son similares a los que caracterizan al ligante virgen.

#### Ilustración 57

Ensayo DSR, en mezclas M1 hasta la M6, Gráfica de Rejuvenecimiento.



#### 3.2.4. Reómetro de Corte Dinámico en Condición Envejecida a Corto Plazo.

Conforme a la especificación Superpave se requiere que el ligante sea envejecido mediante el procedimiento AASHTO T 240 ensayo RTFOT, con objeto de verificar el comportamiento del ligante después de envejecer por motivos de mezcla y construcción, la normativa específica que el valor del ensayo de corte dinámico  $G^*/\text{Sen} D$  debe ser mayor igual a 2.2 kPa., para la

temperatura alta de análisis. En el cuadro a continuación se presentan los valores obtenidos durante los ensayos:

Tabla 76

Ensayos DSR, condición Envejecida, en Ligantes Virgen y Ligante Envejecido.

Ligante Virgen PG64-22/AC20			Ligante Envejecido RTFOT+PAV		
Condición RTFOT DSR $\geq 2,20$ kPa		Observaciones	Condición RTFOT DSR $\geq 2,20$ kPa		Observaciones
T°	G*/SEN D kPa		T°	G*/SEN D kPa	
64,0	3,51		64,0	45,4	
64,0	3,78		70,0	24,8	
<b>67,8</b>	<b>2,20</b>	T° Limite	76,0	13,3	
70,0	1,68		82,0	6,99	
			88,0	3,67	
			<b>92,8</b>	<b>2,20</b>	T° Limite
			94,0	1,93	

Se aprecia que el valor G\*/SenD es mayor igual a 2.2 kPa, para 67.8°C en el ligante virgen y 92.8°C en el ligante envejecido, es decir que el ligante después de envejecer pasa de un grado PG64-22 a un grado mayor a PG88.

Tabla 77

Ensayos DSR, condición Envejecida, en mezclas M1 y M2.

Ligante Mezcla 1			Ligante Mezcla 2		
Condición RTFOT DSR $\geq 2,20$ kPa		Observaciones	Condición RTFOT DSR $\geq 2,20$ kPa		Observaciones
T°	G*/SEN D kPa		T°	G*/SEN D kPa	
82,00	5,57		64,00	35,10	
88,00	2,90		70,00	19,00	
<b>90,50</b>	<b>2,20</b>	T° Limite	76,00	10,10	
94,00	1,51		88,00	2,74	
			82,00	5,26	
			<b>90,00</b>	<b>2,20</b>	T° Limite
			94,00	1,42	

Se aprecia que el valor  $G^*/\text{SenD}$  es mayor igual a 2.2 kPa, para 90.5°C en el ligante M1 y 90°C en el ligante M2, es decir que el aceite propuesto como rejuvenecedor está mejorando el comportamiento del ligante envejecido.

Tabla 78

Ensayos DSR, condición Envejecida, en mezclas M3 y M4.

Ligante Mezcla 3			Ligante Mezcla 4		
Condición RTFOT DSR $\geq 2,20$ kPa		Observaciones	Condición RTFOT DSR $\geq 2,20$ kPa		Observaciones
T°	G*/SEN D kPa		T°	G*/SEN D kPa	
76,00	7,35		64,00	21,90	
82,00	3,85		70,00	11,70	
<b>87,20</b>	<b>2,20</b>	<b>T° Limite</b>	76,00	6,12	
88,00	2,01		82,00	3,16	
			<b>85,30</b>	<b>2,20</b>	<b>T° Limite</b>
			88,00	1,63	

Se aprecia que el valor  $G^*/\text{SenD}$  es mayor igual a 2.2 kPa, para 87.2°C en el ligante M3 y 85.3°C en el ligante M4, es decir que el aceite propuesto como rejuvenecedor está mejorando el comportamiento del ligante envejecido.

Tabla 79

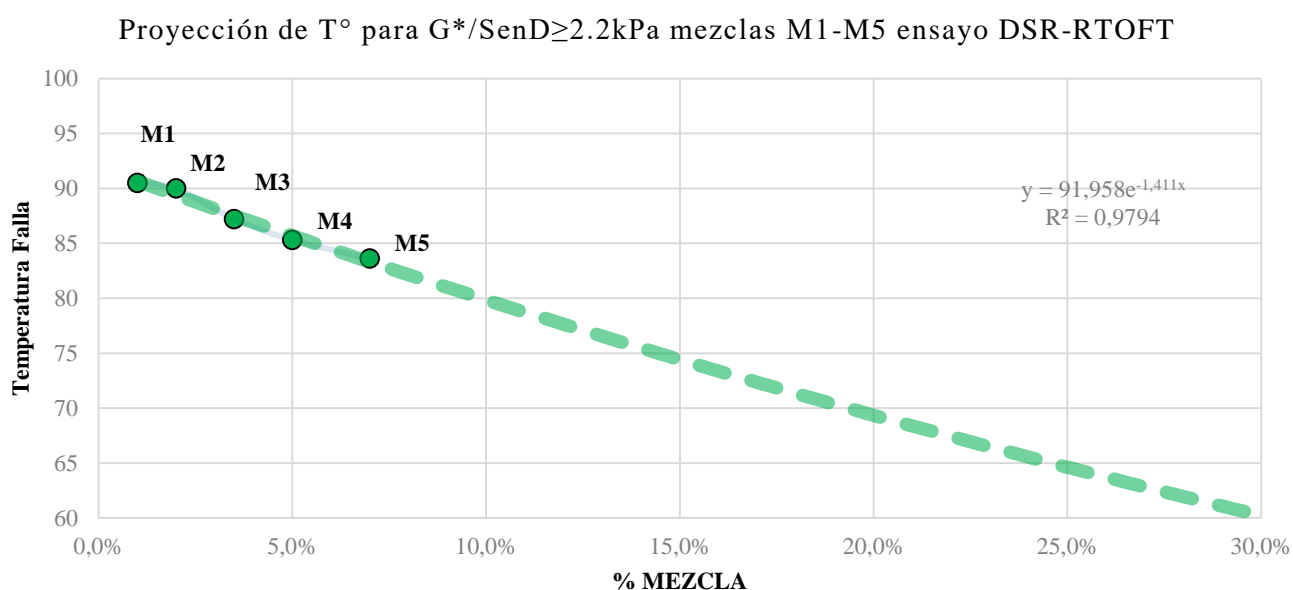
Ensayos DSR, condición Envejecida, en mezcla M5

Ligante Mezcla 5		
Condición RTFOT DSR $\geq 2,20$ kPa		Observaciones
T°	G*/SEN D kPa	
64,00	18,40	
70,00	9,79	
76,00	5,11	
82,00	2,63	
<b>83,60</b>	<b>2,20</b>	<b>T° Limite</b>
88,00	1,35	

Mientras se añade más aceite desechado a la muestra, existe la tendencia de regresar a las características de la muestra patrón PG64-22/AC20. Con los resultados obtenidos desde la mezcla M1 hasta la M5, se genera una curva con objeto de proyectar la cantidad de aceite necesaria para que el valor  $G^*/\text{SenD}$  tenga un valor de 2.20 kPa a los 64°C, propiedad característica del ligante de referencia PG64-22.

#### Ilustración 58

Proyección Ensayo DSR Envejecido, en mezclas M1 hasta la M5



Para que el ligante envejecido regrese a las condiciones del ligante de referencia PG64-22, el valor de  $G^*/\text{SenD}$  debe ser mayor o igual a 2.2 kPa, para la temperatura alta de análisis de 64°C, con la ayuda de la gráfica se puede proyectar que este valor se alcanza en un porcentaje de mezcla de aceite desechado mayor al 25%, por lo que la Mezcla número M6, se realizara con un porcentaje de 30% para sus análisis reométrico, los resultados obtenidos son los siguientes:

#### Tabla 80

Ensayos DSR, condición Envejecida, en mezcla M6

Ligante Mezcla 6	
Condición RTFOT	Observaciones
DSR $\geq 2,20$ kPa	

T°	G*/SEN D kPa	
64,00	3,10	
64,00	3,46	
64,00	3,29	
67,20	2,20	
67,80	2,20	
68,40	2,20	T° Limite
70,00	1,63	
70,00	1,87	
70,00	1,76	

La Mezcla M6, ratifica la proyección de las mezclas M1 hasta la M5, con la cantidad de 30% de aceite desechado el valor de  $G^*/SenD \geq 2.20kPa$ , se cumple para un **valor promedio de temperatura de 65.9°C con una desviación estándar de 2,11.**

Tabla 81

Resumen de Estadísticas del ensayo DSR en RTFOT sobre la Mezcla 6

Valor kPa Requerido para G*/Sen D Superpav e	Valor Kpa Promedi o Obtenido para G*/SenD	Desviació n Estándar G*/SenD en M6	Temperatur a Requerida de Ligante Patrón °C Superpave	Temperatur a Promedio Obtenida en °C	Desviació n Estándar °T en M6	Tipo de Ensayo
<b>≥2.2</b>	<b>2,74</b>	<b>0,604</b>	<b>64°</b>	<b>65,9°</b>	<b>2,11</b>	<b>DSR en RTFOT</b>

La temperatura máxima para desempeño que el ligante puede admitir debe acercarse a la menor T°, establecida en la escala de la normativa superpave, se puede comprobar que el ligante envejecido, la mezcla 1 y la mezcla 2, no cumplen con la clasificación por desempeño ya que sus valores están fuera de los especificados en la normativa AASHTO M 320, la cual solo contempla valores máximos de temperatura de PG 82°C, correspondientes a casos extremadamente inusuales como es el caso de clima desérticos. Se verifica adicionalmente que existe respuesta positiva del ligante envejecido con respecto a la adición del material propuesto como rejuvenecedor puesto que mientras se va aumentando su porcentaje de participación en

la mezcla esta muestra una tendencia a volver al estado que presenta el ligante virgen, en este caso la mezcla M6 presenta los valores de 65.9°C, que ubicados en la escala normativa se deben acerca al valor más bajo de temperatura máxima, en este caso PG 64°.

Tabla 82

Escala de Temperaturas Altas para Desempeño Superpave

Grado Desempeño “PG” °C	PG 46 -YY	PG 52 -YY	PG 58 -YY	PG 64 -YY	PG 70 -YY	PG 76 -YY	PG 82 -YY
-------------------------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------

Para resumir estas condiciones en la siguiente tabla se expone los valores que cumplen con la condición establecida en la norma AASHTO M320 para clasificación de ligantes:

Tabla 83

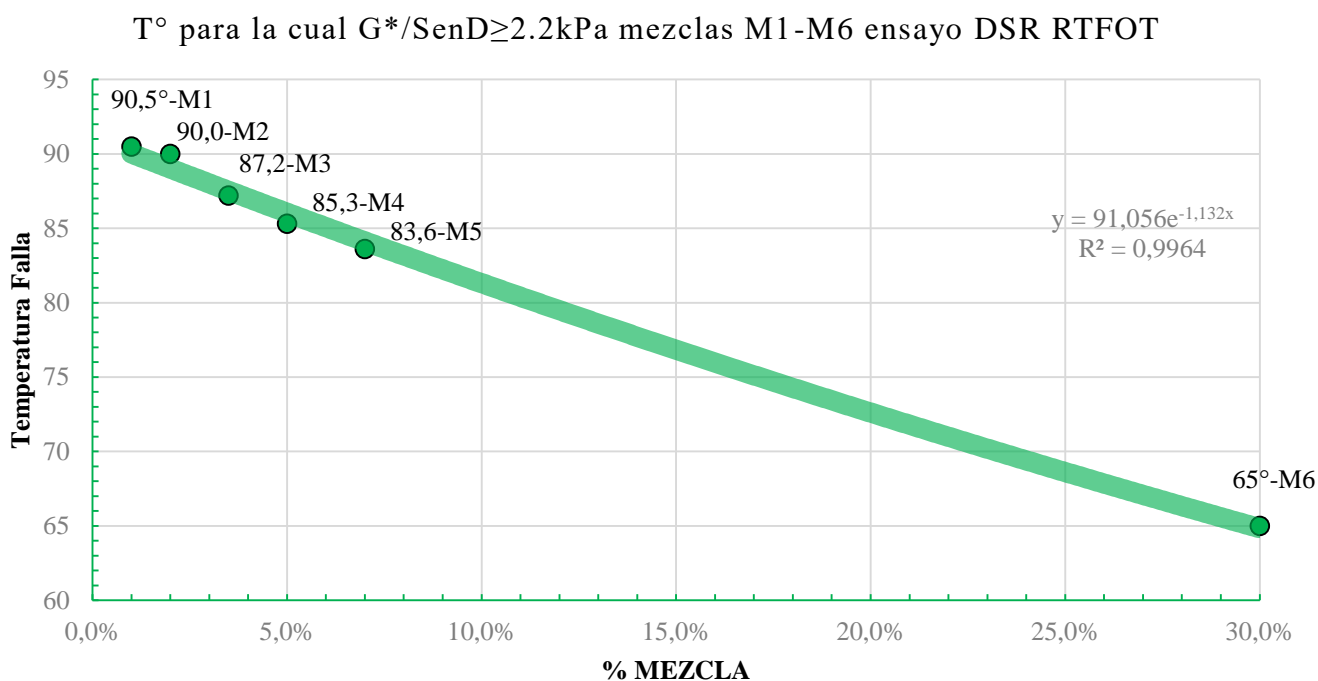
Ensayo DSR en RTFOT, Temperaturas para la cual  $G^*/\text{Sen D} = 2.2 \text{ kPa}$

Descripción del Ligante	Temperatura Máxima °C	Valor $G^*/\text{Sen D}$ en kPa	Temperatura °C escala SUPERPAVE
<b>Ligante Virgen</b>	67.8	2.2	PG 64
<b>ligante Envejecido</b>	92.80	2.2	>82 PG88
<b>Ligante Mezcla 1</b>	90.5	2.2	>82 PG 88
<b>Ligante Mezcla 2</b>	90.0	2.2	>82 PG 88
<b>Ligante Mezcla 3</b>	87.2	2.2	PG 82
<b>Ligante mezcla 4</b>	85.3	2.2	PG 82
<b>Ligante mezcla 5</b>	83.6	2.2	PG 82
<b>Ligante mezcla 6</b>	65.9	2.2	PG 64

La grafica del comportamiento se muestra en la siguiente ilustración:

## Ilustración 59

Ensayo DSR Envejecido, en mezclas M1 hasta la M6



### 3.2.5. Cambio de Masa.

El análisis del cambio de masa para ligante asfáltico muestra que ninguno de los ligantes tuvo una pérdida de sus componentes volátiles como se muestra en el cuadro siguiente:

Tabla 84

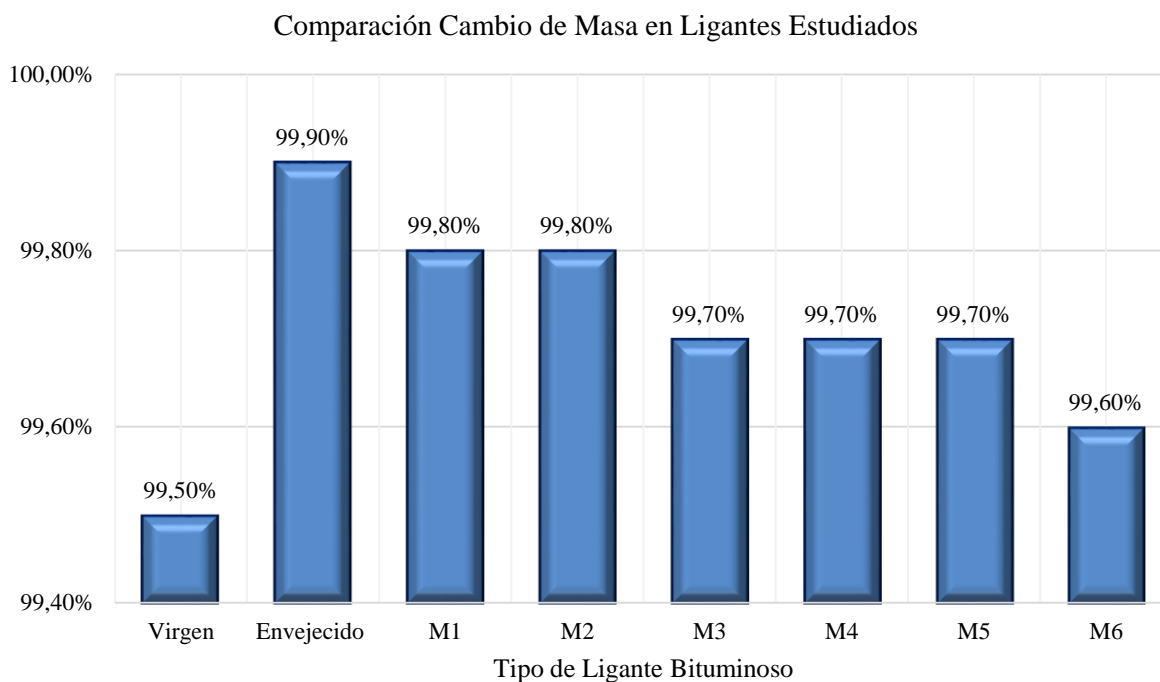
Cambio de Masa en %

Descripción del Ligante	Cambio de Masa en %
Ligante Virgen	0.995
ligante Envejecido	0.999
Ligante Mezcla 1	0.998
Ligante Mezcla 2	0.998
Ligante Mezcla 3	0.997
Ligante mezcla 4	0.997
Ligante mezcla 5	0.997
Ligante mezcla 6	0.996

En todos los casos los ligantes estudiados cumple la normativa que especifica un cambio de masa menor a 1%.

## Ilustración 60

## Ensayo de Cambio de Masa en Ligantes



De conformidad con la especificación AASHTO M 320, para que un ligante cumpla la condición para desempeño Superpave, es necesario que después de realizar el procedimiento AASHTO T 240 para simulación del envejecimiento a corto plazo RTFOT, el cambio de masa del ligante no sea superior a 1%. En el presente estudio se muestra que los ligantes analizados correspondientes a las mezclas rejuvenecidas cumplen con la normativa indicada, la alta pérdida de masa en el ligante de referencia se debe a la pérdida de sus componentes volátiles durante el ensayo.

### 3.2.6. Reómetro de Corte Dinámico en Condición Envejecida a Largo Plazo.

Como se expuso anteriormente la especificación requiere que el ligante sea envejecido mediante el procedimiento AASHTO R 28 ensayo PAV a 100°C, con objeto de verificar el comportamiento del ligante después de envejecer por condiciones climáticas y de servicio en campo, la normativa indica que el valor del ensayo de corte dinámico  $G^* \text{Sen D}$  debe ser menor igual a 5000 kPa, este procedimiento está relacionado con el fisuramiento o agrietamiento por

fatiga del ligante asfáltico al final de su periodo de diseño. En el cuadro a continuación se presentan los valores obtenidos durante los ensayos realizados:

Tabla 85

Ensayo DSR sobre PAV, para Ligante de Referencia y Ligante Envejecido

<b>Ligante Virgen: PG64-22/AC20</b>			<b>Ligante Envejecido: RTFOT+PAV</b>		
<b>DSR en PAV</b>		<b>Observaciones</b>	<b>DSR en PAV</b>		<b>Observaciones</b>
T°	G*/SEN D kPa≤5000kPa		T°	G*/SEN D kPa≤5000 kPa	
13,0	5790,0		19,0	5650,0	
<b>14,4</b>	<b>5000,0</b>	<b>T° Limite</b>	<b>20,3</b>	<b>5000,0</b>	<b>T° Limite</b>
16,0	4230,0		22,0	4300,0	
19,0	3040,0		25,0	3230,0	
25,0	1500,0				
25,0	1900,0				

Se verifica que el ligante de referencia presenta un valor de  $G^*SenD=5000,0kPa$ , a una temperatura de  $14.4^{\circ}C$ , y para el ligante envejecido la temperatura aumenta a  $20.3^{\circ}C$ , esto indica que el ligante envejecido se hace más susceptible de agrietarse a temperaturas normales de trabajo del pavimento.

Tabla 86

Ensayo DSR sobre PAV, para Ligantes M3 y M5

<b>Ligante Mezcla 3</b>			<b>Ligante Mezcla 5</b>		
<b>DSR en PAV</b>		<b>Observaciones</b>	<b>DSR en PAV</b>		<b>Observaciones</b>
T°	G*/SEN D ≤5000 kPa		T°	G*/SEN D ≤5000 kPa	
13,0	6340,00		19,0	6070,00	
<b>15,80</b>	<b>5000,00</b>	<b>T° Limite</b>	21,2	5000,00	No concuerda

16,0 0	4900,00	22,0 0	4650,00
19,0 0	3770,00	25,0 0	3510,00
22,0 0	2860,00		
25,0 0	2140,00		

Los resultados correspondientes a la mezcla M5, se descartan por no guardar proporcionalidad con los demás resultados.

Tabla 87

Ensayo DSR sobre PAV, para Ligante M6

<b>Ligante Mezcla 6</b>	
<b>DSR PAV</b>	
T°	G*/SEN D kPa $\leq 5000$
10	841
13	661
16	518
19	403
22	310
25	233

Debido a que el equipo entro en periodo de mantenimiento y calibración no se pudieron efectuar más ensayos del reómetro de corte dinámico 'DSR' sobre el residuo 'PAV' de los ligantes, el resumen de los ensayos realizados se muestra en la tabla a continuación:

Tabla 88

Temperaturas a las cuales  $G^*SenD \leq 5000kPa$ .

<b>Descripción del Ligante</b>	<b>Temperatura Mínima, °C</b>	<b>Valor Parámetro G*SenD a la temperatura indicada en kPa.</b>	<b>Rango adoptado de Temperatura Mínima T°C para ensayo de BBR</b>
<b>Ligante Virgen</b>	14.4	5.000,00	0° a -18°C
<b>Ligante Envejecido</b>	20.3	5.000,00	0° a -18°C
<b>Ligante Mezcla 1</b>	-	-	0° a -18°C
<b>Ligante Mezcla 2</b>	-	-	0° a -18°C
<b>Ligante Mezcla 3</b>	15.8	5.000,00	0° a -18°C

<b>Ligante mezcla 4</b>	-	-	0° a -18°C
<b>Ligante mezcla 5</b>	21.2	5.000,00	0° a -18°C
<b>Ligante mezcla 6</b>	-	-	0° a -18°C

Con el rango de escalas que se presenta en la tabla a continuación se verifica la temperatura baja en la cual puede desempeñarse el ligante bituminoso para el grado PG64.

Tabla 89

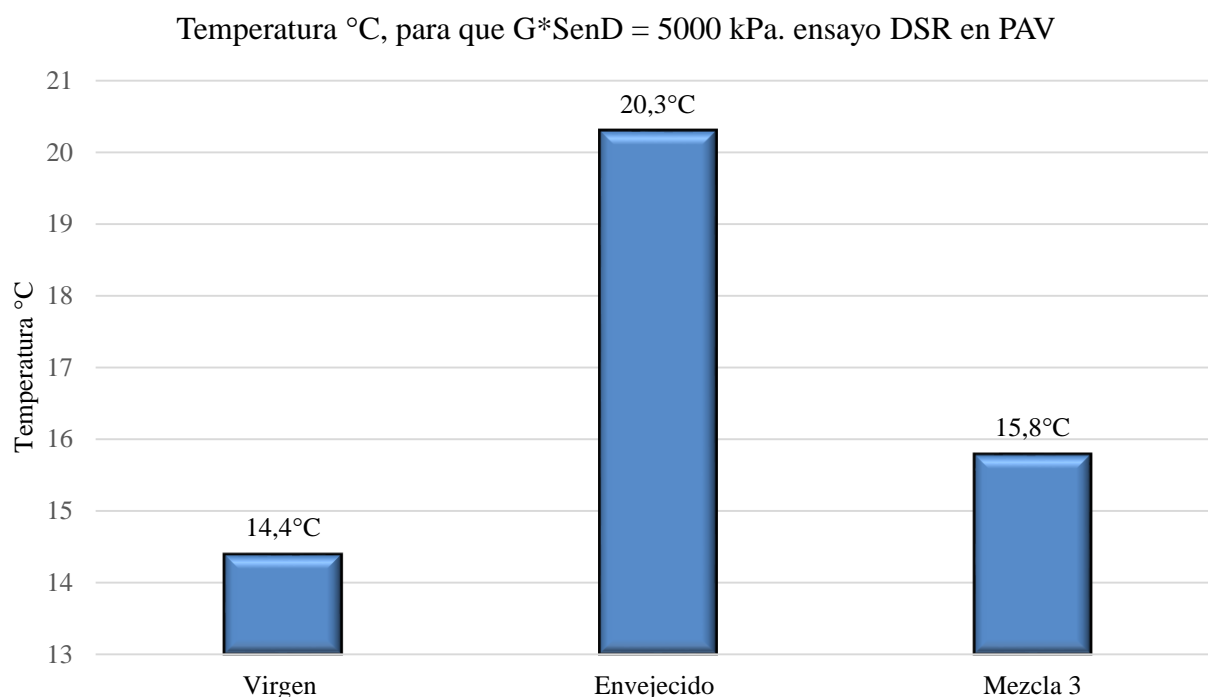
Escala de Temperaturas Bajas Superpave para el grado PG64

<b>Grado Desempeño</b>	<b>PG64</b>					
Temperatura Mínima para Diseño de Pavimento; °C	10	16	22	28	34	40
Temperatura en la cual G*Sen D ≤ 5000 kPa ensayo DSR AASHTO T 315 en PAV	31	28	25	22	19	16
Temperatura en la cual 'S' máximo 300MPa y 'm' mínimo 0,300 ensayo BBR AASHTO T313	0	-6	-12	-18	-24	-30

Para el ligante de referencia PG64-22/AC20, el valor de  $G^*SenD=5000,00kPa$ , se da a una temperatura de  $14.4^{\circ}C$ , utilizando la escala Superpave, la temperatura más cercana es  $16^{\circ}C$ , la cual indica que la temperatura baja de ensayo para el procedimiento BBR debe ser  $-30^{\circ}C$ . Tomando en consideración que nuestro país está situado en la zona ecuatorial del globo terráqueo, donde no se presentan periodos corridos de inviernos donde las temperaturas lleguen a  $-30^{\circ}C$ , en base a la tabulación de la temperatura mínima del pavimento, se toma como temperatura baja de ensayo para el ensayo de reómetro de viga a flexión 'BBR' el rango de valores de  $-6^{\circ}C$  a  $-18^{\circ}C$ .

## Ilustración 61

## Ensayo DSR en PAV



Dado que al momento de los ensayos el equipo entro en proceso de mantenimiento y calibración no se ensayaron otros especímenes, por lo cual se adopta el mismo rango de temperaturas bajas para el ensayo 'BBR'.

### 3.2.7. Evaluación de la Fluencia y Rigidez en Temperaturas Bajas.

El agrietamiento térmico por bajas temperaturas de mezclas para pavimentación está relacionado con el ensayo de rigidez AASHTO T313 'BBR' denominado Reómetro de Viga a Flexión, el equipo 'BBR' por su precisión requiere de personal calificado para su operación y mantenimiento, los resultados del ensayo presentados son los que se han obtenido durante la vigencia de calibración del equipo. Los valores que caracterizan este ensayo son el denominado 'Creep Stiffness', Rigidez de Fluencia representado con la letra 'S' cuyos valores se deben hallar menores a 300 MPa y el valor de 'm' que representa la pendiente de la curva de rigidez versus el tiempo, valor que debe ser mayor que 0.300, ambas condiciones se deben cumplir

para satisfacer la normativa AASHTO M 320, los valores que se han obtenido son los siguientes:

Tabla 90

Valores de Rigidez de Fluencia "S" Evaluación a temperaturas bajas

<b>Valores de la Rigidez de Fluencia 'S' en MPa.</b>						
<b>Temperatura Mínima °C</b>						
	<b>0,00</b>	<b>-6,00</b>	<b>-12,00</b>	<b>-18,00</b>	<b>-24,00</b>	<b>-30,00</b>
<b>Ligante Virgen</b>	42,741	53,1040	109,0200	208,8680	301.251	n/a
<b>Ligante Envejecido</b>	40,7707	77,0970	136,6911	221.958	325.359	n/a
<b>Ligante Mezcla 5</b>	16,8059	40,8498	67,1225	95.861	123.854	159.23

De los resultados se aprecia que mientras más baja es la temperatura aumenta el valor de la rigidez, por lo tanto, el material se torna más quebradizo y menos flexible. El ligante envejecido tiene poca capacidad de mantenerse dentro del campo elástico en temperaturas bajas, pierde flexibilidad y se quiebra.

Tabla 91

Valores de la pendiente "m" Evaluación a temperaturas bajas

<b>Valores de la Rigidez de Pendiente 'm'</b>						
<b>Temperatura Mínima T°C</b>						
	<b>0,00</b>	<b>-6,00</b>	<b>-12,00</b>	<b>-18,00</b>	<b>-24,00</b>	<b>-30,00</b>
<b>Ligante Virgen</b>	0,3914	0,3540	0,3200	0,2879	0,2571	0,2378
<b>Ligante Envejecido</b>	0,3205	0,2845	0,2605	0,2356	0,21874	0,1935
<b>Ligante Mezcla 5</b>	0,2693	0,2694	0,2695	0,26961	0,2697	0,2698

De conformidad con la especificación AASHTO M 320, se tiene que los valores máximos de la rigidez 'S' es de 300 MPa. El ligante AC 20, de grado PG 64, tiene un valor de rigidez S = 300 MPa., a una temperatura -23.9°C, para efectos de seguridad se toma la mayor temperatura en la escala, es decir -18°C. Se pasa inmediatamente a comprobar el valor de la pendiente 'm' a esa temperatura, y comprobar que cumpla el valor mínimo de 'm'=0.300 requisito de la normativa Superpave, toda vez que la temperatura que satisface esta condición es -12°C, en

base a la tabla 1 de la norma AASHTO M 320, se establece que el ligante de referencia AC20 tiene una calificación PG 64-22.

Tabla 92

Tabla 1 norma AASHTO M 320 para grado PG 64

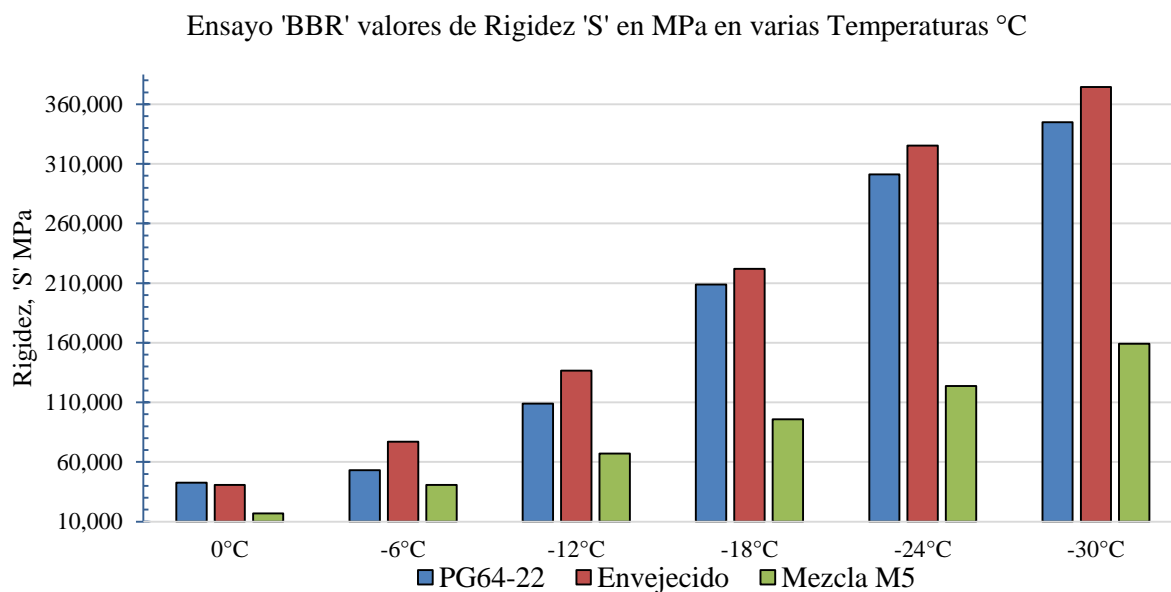
Propiedad	Grado del Ligante		PG 64					
	Norma AASHTO	Requisito	10	16	22	28	34	40
			Temperatura de Ensayo °C					
<b>Ligante Original</b>								
<b>Punto de Inflamación °C</b>	T 48	230						
<b>Viscosidad Máxima Pa·s @135°C</b>	T 316	3				135		
<b>Corte Dinámico Mínimo G*/senD kPa a la temp. de ensayo @ 10rad/s</b>	T 315	1				64		
<b>Residuo del Horno de Película Delgada Rotatoria AASHTO T 240 "RTFOT"</b>								
<b>Cambio de Masa Máximo %</b>	T 240	1						
<b>Corte Dinámico Mínimo G*/senD kPa a la temp. de ensayo @ 10rad/s</b>	T 315	2,2				64		
<b>Residuo de la Vasija de Envejecimiento PAV AASHTO R 28 Temperatura ensayo 100°C</b>								
<b>Corte Dinámico Máximo G*senD kPa a la temp. de ensayo @ 10rad/s</b>	T 315	5000	31	28	25	22	19	16
<b>Rigidez Creep Maxima, S MPa a la temp. de ensayo @60s °C</b>	T 313	300	0	-6	-12	-18	-24	-30
<b>Valor m mínimo, a la temp. De ensayo @ 60s</b>	T 313	0,3	0	-6	-12	-18	-24	-30

(AASHTO, Performance Graded Asphalt Binder, 2005)

Según lo indicado por la norma AASHTO M 320, se deben cumplir ambos requisitos, que  $S \leq 300,00$  MPa y  $m \geq 0,300$ ; para el caso del ligante envejecido la temperatura baja que cumple estas demandas es 0°C, el grado de desempeño simulado sería PG 88-10. Para el caso de los ligantes rejuvenecidos M5 el valor de m es constante y menor a 0,300 esto es un indicador que el equipo necesita de calibración y mantenimiento, motivo por el cual no se pudo ensayar más muestras.

## Ilustración 62

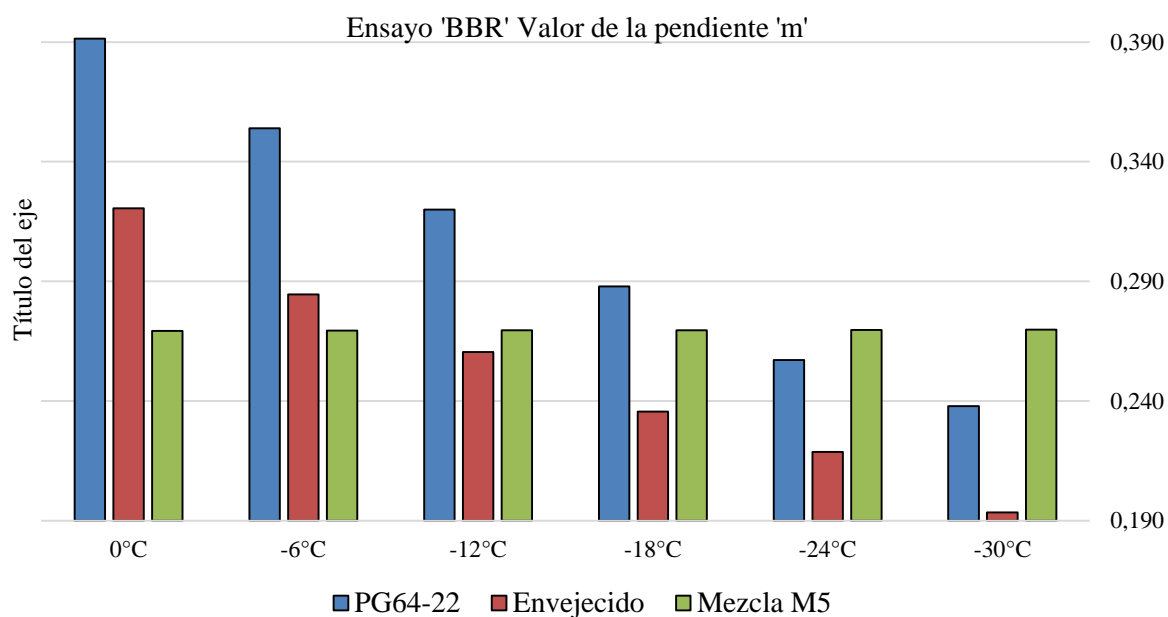
## Resultados la rigidez 'S' ensayo BBR



Como se aprecia, la mezcla M5 presenta una baja rigidez, valores bajos de 'S' son favorables por que indican un mejor comportamiento al fisuramiento en temperaturas bajas.

## Ilustración 63

## Resultados de la pendiente 'm' ensayo BBR



Altos valores de pendiente 'm' aseguran un mínimo de fisuramiento en temperaturas bajas,

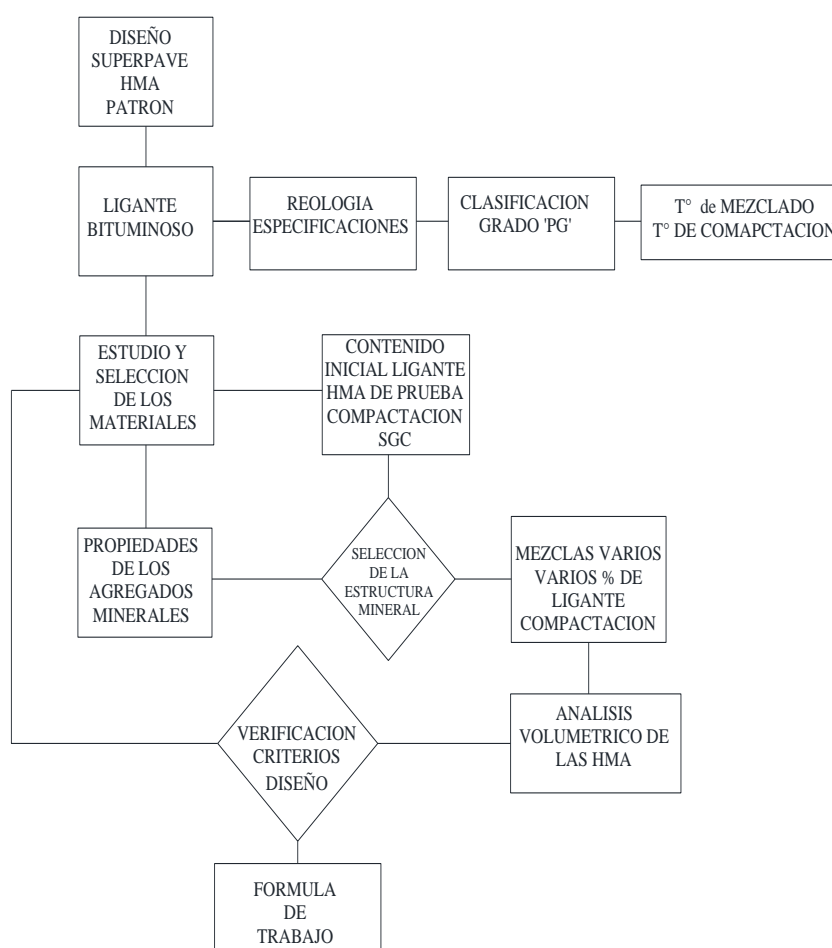
conforme la normativa AASHTO M 320, se deben cumplir ambos parámetros para que el ligante califique por desempeño. Para el caso del ligante de referencia y el ligante envejecido los valores de 'S' y 'm' son correspondientes entre sí. En el caso de la mezcla M5, los valores de 'S' no guardan relación con los valores de 'm', situación que indica la necesidad de calibrar el equipo.

### 3.2 Análisis de la HMA de referencia y la HMA con ligante Rejuvenecido.

La fórmula maestra de la HMA patrón se diseñó utilizando la metodología Superpave. Primero siguiendo el esquema que se muestra a continuación:

Ilustración 64

Esquema para Diseño de la Fórmula Maestra de la HMA de Referencia.



### 3.2.1. Análisis de la HMA de Referencia.

La mezcla asfáltica de patrón para las comparaciones, fue diseñada utilizando el ligante de referencia PG64-22/AC20, utilizando agregados minerales que corresponden a los procesados por la empresa COVIPAL, de conformidad con la normativa AASHTO M 323 para desempeño Superpave, se presentan en el siguiente cuadro las características de la mezcla HMA de referencia:

Tabla 93

Propiedades de la HMA de Referencia

Propiedad	Valor	Propiedad	Valor
T aire máxima °C	32,0	Relación AC	0,60
T aire mínima °C	0,00	Relación AFc	0,53
T XX °C	53,09	Relación AFf	0,39
T YY °C	1,70	Gsb	2,620
Rango de ESALs millones	3,0-10,0	Gsa	2,754
Velocidad máxima km/h	70,0	Gse	2,727
Angulosidad AC %	98,88	Pbi prueba %	5,24
Partículas Planas y Alargadas %	10,14	T° mezcla	146,5- 149,5
Equivalente de Arena %	46,0	T° compactación	136,0- 138,5
Dureza AC 3/4" %	18,0	N inicial	7
Dureza AC 3/8" %	16,0	N diseño	75
Firmeza AF %	1,85	N máximo	115
Firmeza AC 3/4" %	1,64	Pb diseño	5,35
Firmeza AC 3/8" %	3,70	Va %	4,0
Materiales Deletéreos AC 3/8 %	0,60	VMA %	12,6 ~ 13,0
Materiales Deletéreos AC 3/4 %	0,021	Densidad kg/m3	2415,0
Materiales Deletéreos AF %	0,73	VFA %	68,0
		%Gmm máximo	96,4

Los resultados obtenidos para la HMA de referencia cumplen la normativa para mezclas Superpave, el contenido de diseño de ligante es de 5.35%, el cual se aplicará junto con el mismo

esqueleto mineral a una HMA usando el ligante rejuvenecido M6, y determinar si los parámetros cumplen la normativa, la formula maestra a ser aplicada es la siguiente:

Tabla 94

Fórmula Maestra de Trabajo para HMA de Referencia

Total de la Mezcla g.	Agregados					Ligante PG 64-22 AC20	% Agregado en la Mezcla	% Ligante en la Mezcla	% Total de la Mezcla
	AC1 3/4"	AC2 3/8"	AF1 Arena Triturada	MF Relleno Mineral	Total Agregados				
<b>10000,00</b>	2791,2	6139,0	299,1	235,7	9465,0	535,0	94,65%	5,35%	100%
	29,5%	64,9%	3,2%	2,4%	100,0%	5,35%			

### 3.2.2. Análisis de la HMA con ligante Rejuvenecido.

Con la formula maestra de trabajo se elabora la HMA utilizando el ligante rejuvenecido, los resultados de la mezcla suelta y de los especímenes compactados son los que siguen:

Tabla 95

Propiedades de la HMA elaborada con ligante Rejuvenecido

Propiedad	Valor	Propiedad	Valor
T aire máxima °C	32,0	Relación AC	0,60
T aire mínima °C	0,00	Relación AFc	0,53
T XX °C	53,09	Relación AFf	0,39
T YY °C	1,70	Gsb	2,620
Rango de ESALs millones	3,0-10,0	Gsa	2,754
Velocidad máxima km/h	70,0	Gse	2,727
Angulosidad AC %	98,88	T° mezcla	146,5-149,5
Partículas Planas y Alargadas %	10,14	T° compactación	136,0-138,5
Equivalente de Arena %	46,0	N inicial	7
Dureza AC 3/4" %	18,0	N diseño	75
Dureza AC 3/8" %	16,0	N máximo	115
Firmeza AF %	1,85	Pb diseño	5,35
Firmeza AC 3/4" %	1,64	Va %	3,96
Firmeza AC 3/8" %	3,70	VMA %	12,5
Materiales Deletéreos AC 3/8 %	0,60	Densidad kg/m3	2419,5
Materiales Deletéreos AC 3/4 %	0,021	VFA %	68,5

Materiales Deletéreos AF %	0,73	% Gmm máximo	96,5
----------------------------	------	--------------	------

### 3.2.1. Comparación de HMA de Referencia y HMA con Ligante Rejuvenecido.

De conformidad con la normativa Superpave, los requisitos son los que siguen en la tabla a continuación:

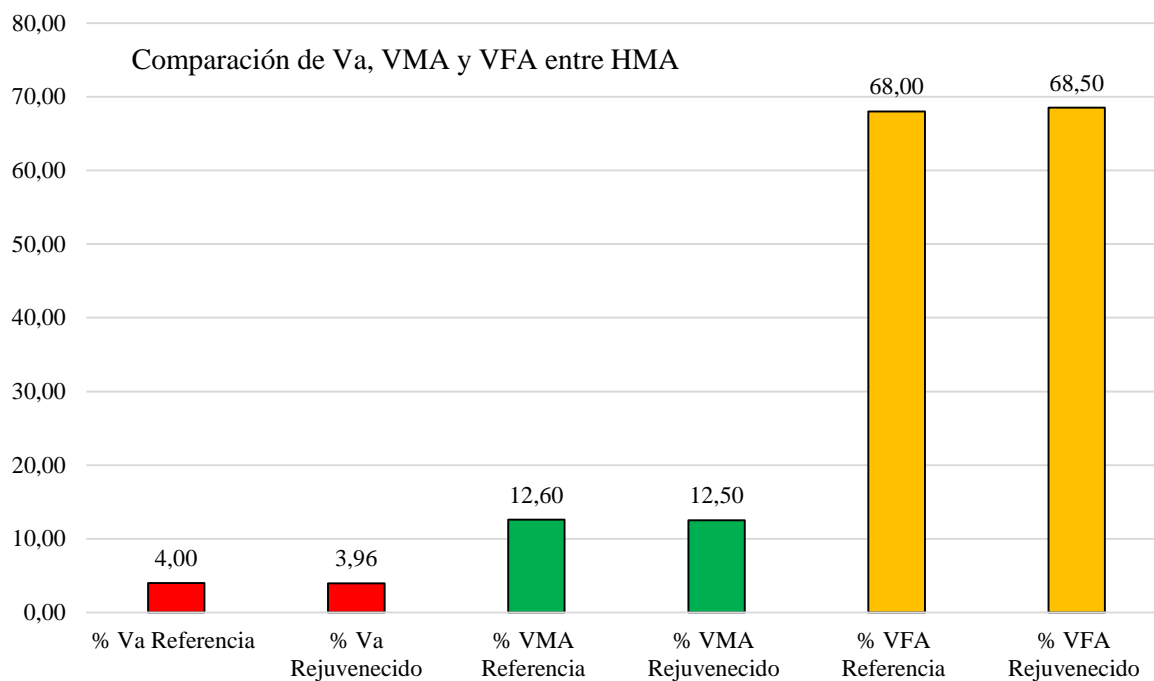
Tabla 96

Propiedades de HMA con ligante de referencia y rejuvenecido.

Parámetro	Valor
% Va Referencia	4,00
% Va Rejuvenecido	3,96
% VMA Referencia	12,60
% VMA Rejuvenecido	12,50
% VFA Referencia	68,00
% VFA Rejuvenecido	68,50
% Gmm máx Referencia	96,40
% Gmm máx Rejuvenecido	96,50
Densidad Referencia kg/m <sup>3</sup>	2415,00
Densidad Rejuvenecido kg/m <sup>3</sup>	2419,50

## Ilustración 65

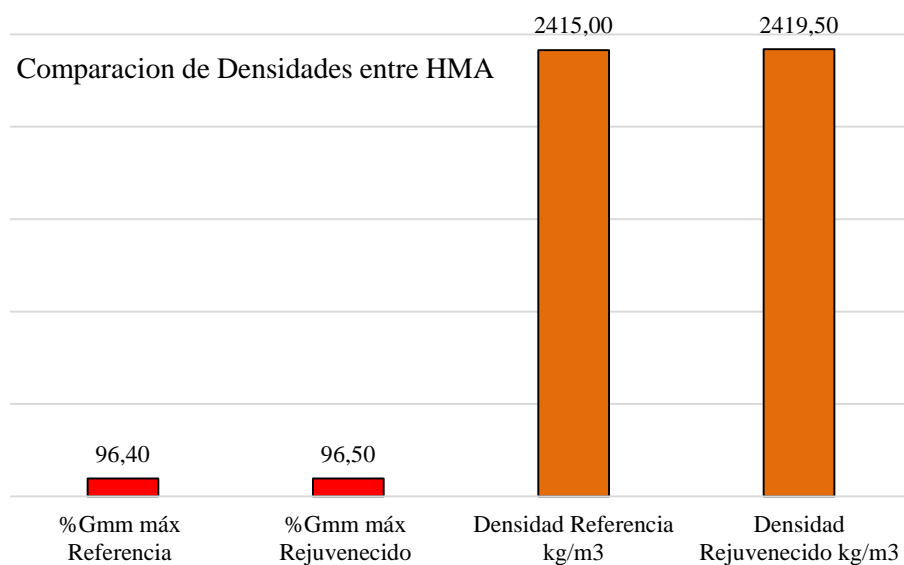
## Comparación de parámetros volumétricos en las HMA



Los valores son similares y cumplen con la especificación Superpave.

## Ilustración 66

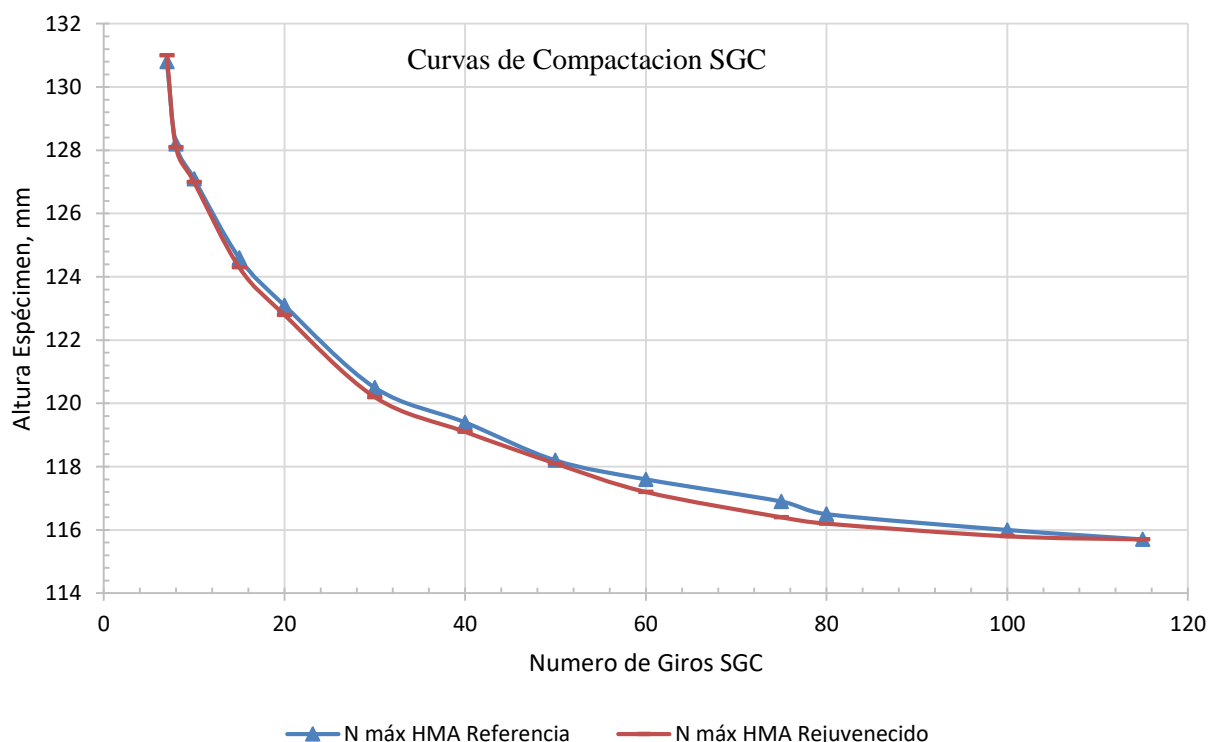
## Comparación de Densidades en las HMA



Los valores son similares y cumplen con la especificación Superpave.

## Ilustración 67

## Comparación de Curvas de Compactación en las HMA



Como se aprecia las condiciones de ambas mezclas son similares y cumplen la normativa Superpave.

## CAPITULO 4

### 4 Conclusiones.

- Los métodos tradicionales para la clasificación de ligantes asfálticos como penetración, viscosidad, ductilidad responden a condiciones locales de servicio y experiencias adquiridas en proyectos ejecutadas en áreas geográficas muy diferentes a las de nuestro medio. Es importante utilizar una metodología de estudio y seguimiento que correlacione ensayos de laboratorio de materiales con los comportamientos de estos en el campo, como lo trata de esquematizar la metodología de caracterización de ligantes y mezclas por desempeño SUPERPAVE.

- Para nuestro medio es evidente el proceso de envejecimiento acelerado que existe, por una parte, debido a los bruscos gradientes de temperatura en ciclos extremadamente cortos, que provocan fisuramiento por fatiga y agrietamiento térmico del ligante, y por otro lado debido a las condiciones de servicio donde las cargas pesadas y velocidades bajas aumentan la temperatura de trabajo de un pavimento, evidencia de un comportamiento reológico del ligante, que requiere que la caracterización del mismo sea efectuada por métodos no tradicionales.
- Según la composición química de los ligantes con respecto a su composición SARA, se puede anotar que los componentes más volátiles como los Aromáticos y las Resinas se pierden, en una parte debido a los gradientes de temperatura a los que se expone en los procesos de mezcla y construcción y por otra parte por las condiciones ambientales y de servicio en campo. Estas pérdidas pueden llegar a más de diez por ciento en peso del ligante, los cuales pasan a aumentar el porcentaje de asfáltenos dentro del bitumen en un porcentaje ligeramente menor, evidencia de esto son los resultados de los ensayos de cambio de masa en el ligante ya que la pérdida neta no supera el uno por ciento en peso. Considerando adicionalmente que los aceites lubricantes de motor de vehículos livianos tienen la misma naturaleza de las resinas y aromáticos que componen el bitumen, se verifica la factibilidad de su aplicación como rejuvenecedor de asfalto.
- Aplicando el sistema SUPERPAVE para determinar el comportamiento reológico de ligante, se estableció que asfalto de referencia AC-20 clasifica con la designación PG 64-18. Para el caso del ligante envejecido a corto y largo plazo su clasificación proyectada equivale a un PG 94 – 0, es decir un ligante extremadamente degradado. Al utilizar el aceite lubricante de motor desechado de vehículos livianos como rejuvenecedor se encontró que al mezclar 30 % en peso de este se conforma un ligante cuya caracterización proyectada equivalente a un grado PG 64 – 0, es decir que el comportamiento reológico del ligante de

referencia (AC-20 asfalto de Esmeraldas) con el comportamiento reológico del ligante rejuvenecido (mezclas 30% peso) son los mismos, dado que ambos clasifican con la misma temperatura máxima PG 64, lo que no sucede con el comportamiento de ambos ligantes en temperaturas bajas, ya que el ligante rejuvenecido tiene una menor fluencia, se vuelve más rígido, se cristaliza a temperaturas cercanas 0°C, no tiene la capacidad de trabajar dentro del campo elástico en temperaturas bajas lo que le hace inestable para su uso en zonas andinas.

- El comportamiento a bajas temperaturas es un proceso que requiere una cantidad de tiempo muy importante para su determinación, así como el uso de equipo que debe ser operado, calibrado y mantenido por personal capacitado y con experiencia en el tema, los componentes electrónicos que utiliza el equipo duran un determinado número de ensayos y requieren su renovación. Por este motivo no se ha podido realizar más ensayos respecto al comportamiento reológico de la mezcla rejuvenecida a bajas temperaturas.
- Las mezclas asfálticas tienen un comportamiento similar y ambas cumplen la metodología Superpave, con referencia a sus parámetros volumétricos, exepcto en la resistencia al daño inducido por humedad, donde es necesario aditivar con un mejorador de adherencia a la mezcla elaborada con ligante rejuvenecido.

## **5 Recomendaciones.**

- Se recomienda acompañar a los ensayos tradicionales para clasificación de ligantes, con pruebas por desempeño para ir generando conocimiento del comportamiento reológico de los ligantes comercializados en nuestro medio y su comportamiento en las mezclas asfálticas y en campo.
- La aplicación de aceites desechados de lubricante debe ser más estudiada ampliando su rango a otros tipos de desechos de aceites. Se puede aplicar estas mezclas de aceite desechado con el producto del almacenamiento recuperable de asfalto en tanques,

contenedores, tambores o piscinas dedicadas para este efecto. Se puede aplicar también en los residuos y sedimentos extraídos del fondo de los bloques petroleros. Se puede ocupar en el rejuvenecimiento del ‘Coque’ es decir del “residuo carbonoso que resulta de la destilación de los hidrocarburos (PETROECUADOR, Glosario de la Industria Petrolera, 2005)” o del ‘Crudo Reducido’

- Se recomienda estudiar el uso de otros aditivos como el ‘Spray Oil’ “producto derivado del petróleo utilizado en la industria del banano” (Segovia, 2014) como reductor de la rigidez de las mezclas rejuvenecidas en su comportamiento a baja temperatura.

## 6 Bibliografía.

- AASHTO. (2003). Viscosity Determination of Asphalt Binder Using Rotational Viscometer. *AASHTO T 316*. EEUU: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AASHTO. (2004). Superpave Volumetric Design for Hot Mix Asphalt (HMA). *AASHTO R35*. EEUU: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AASHTO. (2005). Performance Graded Asphalt Binder. *AASHTO M 320*. EEUU: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AASHTO. (2006). Accelerated Aging of Asphalt Binder using a Pressurized Aging Vessel (PAV). *AASHTO R 28*. EEUU: American Association of State Highway and Transportation Officials AASHTO.
- AASHTO. (2007). Superpave Volumetric Mix Design. *AASHTO M 323*. EEUU: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AASHTO. (2008). Determining Flexural Creep Stiffness of Asphalt Binder Using Bendind Beam Rheometer. *AASHTO T 313*. EEUU: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AASHTO. (2008). Determining the Rheological Porperties of Asphalt Binder using a Dynamic Shear Rheometer DSR. *AASHTO T 315*. EEUU: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AASHTO. (2008). Effect of Head and Air on a Moving Film of Asphalt. *AASHTO T240*. EEUU: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AASHTO. (2008). Grading or Verifying the Perfomance grade PG of an Asphalt Binder. *AASHTO R 29*. EEUU: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AASHTO. (2008). Preparing and Determining of Hot Mix Asphalt (HMA) Specimens by Means of the Superpave Gyrotory Compactor. *AASHTO T 312*. EEUU: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Agencia Espacial Civil Ecuatoriana, E. (2016). *Estación Climatológica Quito*. Obtenido de <http://www.quito.exa.ec/>
- Asphalt Institute. (2001). Superpave Mix Design. *Superpave Series*. Lexington, EEUU: Asphalt Institute.

- ASTM. (2005). Standard Test Method for Flash and Fire Points by Cleveland Open Cup Tester. *ASTM D 92*. EEUU: American Society of Testing Materials .
- ASTM. (2014). Bulk Specific Gravity and Density of Non-Absorptive Compacted Bituminous Mixtures. *ASTM D 2726*. EEUU: American Society of Testing Materials.
- Del Val, M. A. (1995). Proyecto y Formulación de Mezclas Asfálticas. *XI Curso Internacional de Carreteras*. Madrid.
- Fundación Suiza Cooperación Desarrollo, T. (2000). Estudio de Viabilidad de la eliminación adecuada del aceite automotor usado en la Ciudad de Quito. *Estudio de Viabilidad de la eliminación adecuada del aceite automotor usado en la Ciudad de Quito*. Quito, Pichincha, Ecuador.
- Garnica, P., Gómez, J., & Delgado, H. (2003). Algunos Aspectos de la Densificación de Mezclas Asfálticas con el Compactador Giratorio . *No.228 Instituto Mexicano del Transporte*. Queretaro, México.
- Gulf Oil. (s.f.). *Manual Técnico Lubricantes*. Obtenido de [http://www.gulfoil.com.ar/faq/manual\\_tecnico.pdf](http://www.gulfoil.com.ar/faq/manual_tecnico.pdf)
- INEC. (2015). *Anuario Estadísticas del Transporte 2015*. Quito, Ecuador: Instituto Nacional de Estadísticas y Censos.
- Lesueur, D. (2008). The colloidal structure of bitumen: Consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification. *Elsevier*.
- Liang, R. (2008). *Refine AASHTO T283 Resistance of Compacted Bituminous Mixture to Moisture Induced Damage for Superpave*. Ohio - EEUU: Ohio Department of Transportation Office of Research and Development.
- LMC-PUCE. (2013). Método de Ensayo Normalizado para Gravedad Específica Máxima Teórica y Densidad de Mezclas de Pavimentación Bituminosas. *Laboratorio de Materiales de Construcción - Resumen ASTM D2041*. Quito, Ecuador: Pontificia Universidad Católica del Ecuador.
- NCHRP. (March de 2011). A Manual for Design of Hot Mix Asphalt with Commentary. *Report 673*. Washington, DC, EEUU: National Cooperative Highway Research Program.
- Pantoja, J., & Pilar, M. (1995). *Que se hace en España con los Aceites Usados*.
- PETROECUADOR. (2005). *Glosario de la Industria Petrolera*. Quito: Unidad de Relaciones Institucionales.
- PETROECUADOR. (2015). *Informe Estadístico 2015*. Quito: Unidad de Relaciones Institucionales.
- Reyes, F., Daza, C., & Rondon, H. (2012). Determinación de las fracciones SARA de asfaltos colombianos envejecidos al medio ambiente empleando cromatografía líquida en columna. *EIA ISSN 1794-1237*.
- Rubio, B. (Junio de 1995). Betunes Asfálticos. Betunes Asfálticos Modificados. *XI Curso Internacional de Carreteras*. Madrid.
- Segovia, A. J. (2014). *Predicción de las deformaciones plásticas permanentes de mezclas asfálticas en caliente, correlacionando determinaciones de rigidez del ligante y ensayos dinámicos de carga*. Quito: Pontificia Universidad Católica del Ecuador.
- Serrano, V., Zuleta, D., Moscoso, V., Jácome, P., Palacios , E., & Villacís , M. (Diciembre de 2012). Análisis Estadístico de Datos Meteorológicos Mensuales y Diarios para la Determinación de Variabilidad Climática y Cambio Climático en el Distrito Metropolitano de Quito. *La Granja*. Obtenido de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=476047400004>.
- Torres, P. (2014). *Diseño de un Plan de Recolección y el Re-Refinamiento de los aceites lubricantes usados en la ciudad de Loja*. Quito: Universidad Internacional del Ecuador.

- Trujillo, V., & Renato, S. (2009). *Levantamiento del Catastro de Generadores, Diseño de un Plan de Recolección y Alternativas para la Disposición Final de Aceites Usado*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- Universidad Central del Ecuador, U. (s.f.). *Manejo Ambientalmente Adecuado de los Desechos Aceitosos en el Ecuador*. Obtenido de [http://archive.basel.int/centers/proj\\_activ/tctf\\_projects/020.pdf](http://archive.basel.int/centers/proj_activ/tctf_projects/020.pdf)
- Vavrik, W., Huber, G., Pine, W., Carpenter, S., & Bailey, R. (October de 2002). Bailey Method for Gradation Selection in Hot Mix Asphalt Mixture Design. *Circular Transportation Research*. Washintong DC, EEUU.
- Vavrik, W., Pine, W., & Carpenter, S. (2002). Aggregate Blending for Asphalt Mix Design Bailey Method. *Paper No.02-3629*. EEUU: Transportation Research Record N°1789.
- Zagar, M., Ahmadiania, E., Asli, H., & Rehan, M. (2012). Investigation of the possibility of using waste cooking oil as a rejuvenating agent for aged bitumen. *Journal of hazardous Materials*.

**7 Anexos.**