

# UCUENCA

Facultad de Ingeniería

Maestría en Ingeniería en Vialidad y Transporte, Tercera Cohorte

Implementación de Mezclas Tibias como una Alternativa para las Mezclas en Caliente para la Planta Asfáltica del GAD Municipal de Azogues, Evaluando el Ciclo de Vida de los Efectos Ambientales y Económicos en Producción

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Magíster en Ingeniería en Vialidad y Transporte

Autor:

Johnathan Leonardo Esquivel Villavicencio

CI: 0302024799

Correo electrónico: [jesquivelvillavicencio@gmail.com](mailto:jesquivelvillavicencio@gmail.com)

Director:

Ing. Yasmany Damián García Ramírez., PhD.

CI: 1103873384

**Cuenca, Ecuador**

01 de agosto de 2022

## Resumen:

El GAD Municipal de Azogues cuenta con una planta para la producción de mezcla asfáltica en caliente usada para la pavimentación de vías del cantón, la cual requiere de grandes cantidades de energía, recursos naturales y económicos para producir mezclas asfálticas en caliente, generando externalidades negativas de producción que inciden directamente en el medio biofísico y en la economía de la institución. Ante esto, se requiere mejorar los procesos de producción para equilibrar las condiciones económicas, medio ambientales y sociales tanto de la institución como del medio donde se ubica la planta de producción de asfalto. El presente trabajo de titulación se enfoca en realizar un diseño de pavimento y una mezcla asfáltica tibia como una alternativa a las mezclas asfálticas en caliente, evaluando el ciclo de vida de los efectos ambientales y económicos de producción. Se realizó una investigación acerca de los criterios de diseño de mezclas asfálticas tibias y el aditivo ZycoTherm para su elaboración, se recopiló datos de consumos de energía eléctrica, agua, combustibles y recursos naturales usados en la planta de asfalto para determinar los efectos ambientales y económicos en producción mediante el uso de la aplicación PaLATE (Greenroads, 2011) en términos de emisiones de CO<sub>2</sub>. Así también, se realizó el diseño óptimo de una mezcla asfáltica en caliente para poder evaluarla económicamente frente a la implementación de una mezcla asfáltica tibia. Los resultados indican que las actividades de producción, construcción y mantenimiento del pavimento usando una mezcla asfáltica tibia con una dosificación de ZycoTherm entre 0,1% – 0,15%, genera menores consumos de energía y emisiones de CO<sub>2</sub> que las mezclas asfálticas en caliente, tal es que, para una mezcla tipo MAC el consumo de energía es de 885,1 [GJ] y las emisiones de GEI es de 614,853 CO<sub>2</sub>e [kg], mientras que para mezclas tipo MAT el consumo de energía es de 878,4 [GJ] y las emisiones de GEI es de 588,615 CO<sub>2</sub>e [kg]. Además, MAT permite menores temperaturas de mezclado (de 10 a 20 grados centígrados menos) y también bajar las temperaturas de compactación (de 30 a 40 grados centígrados menos), su uso tiene beneficios ambientales debido a que es soluble en agua, no produce sedimentaciones, reduce olores, ahorra combustible en producción y disminuye emanaciones de CO<sub>2</sub> al ambiente y permite obtener mayor ventaja en trabajos que requieren longitudes de transporte y que requieren mayores tiempos de espera en la pavimentación. Por otro lado, la diferencia de costos proyectados entre mezclas MAC y MAT varía hasta 2,645% entre 2023 a 2035 a favor de las mezclas tipo MAC, sin embargo, esta diferencia puede variar de acuerdo al aumento o disminución del precio de mercado del aditivo. La implementación de MAT no necesita de equipos ni estructuras especiales en la planta, únicamente se requiere dosificar el aditivo por inyección por goteo en la línea de cara del tanque transportador hacia el tanque de almacenamiento de asfalto.

**Palabras claves:** Mezclas asfálticas tibias. Mezclas asfálticas en caliente. Evaluación del ciclo de vida. Evaluación del costo del ciclo de vida. PaLATE. Diseño de pavimentos y mezclas asfálticas. Producción de asfalto. ZycoTherm. MAT. MAC. ECV. ECCV.

## **Abstract:**

The Municipal GAD of Azogues has a plant for the production of hot mix asphalt used for paving roads in the city, which requires large amounts of energy, natural and economic resources to produce hot mix asphalt, generating negative externalities of production that directly affect the biophysical environment and the economy of the institution. Given this, it is necessary to improve the production processes to balance the economic, environmental and social conditions of both the institution and the environment where the asphalt production plant is located. The present titling work focuses on making a pavement design and a warm asphalt mixture as an alternative to hot asphalt mixtures, evaluating the life cycle of the environmental and economic effects of production. An investigation was carried out about the design criteria for warm asphalt mixtures and the ZycTherm additive for their preparation, data on the consumption of electricity, water, fuel and natural resources used in the asphalt plant were collected to determine the environmental and economic effects in production using the PaLATE application (Greenroads, 2011) in terms of CO<sub>2</sub> emissions. Likewise, the optimal design of a hot asphalt mixture was carried out in order to evaluate it economically against the implementation of a warm asphalt mixture. The results indicate that the activities of production, construction and maintenance of the pavement using a warm asphalt mixture with a dosage of ZycTherm between 0,1% - 0,15%, generate lower energy consumption and CO<sub>2</sub> emissions than hot asphalt mixtures, such that, for a MAC-type mixture, energy consumption is 885,1 [GJ] and GHG emissions are 614,853 CO<sub>2</sub>e [kg], while for MAT-type mixtures, energy consumption is 878,4 [GJ] and GHG emissions is 588,615 CO<sub>2</sub>e [kg]. In addition, MAT allows lower mixing temperatures (from 10 to 20 degrees Celsius less) and also lower compaction temperatures (from 30 to 40 degrees Celsius less), its use has environmental benefits because it is soluble in water, it does not produce sedimentation, reduces odors, saves fuel in production and decreases emissions of CO<sub>2</sub> into the environment and allows to obtain greater advantage in works that require transport lengths and that require longer waiting times in paving. On the other hand, the difference in projected costs between MAC and MAT mixtures varies up to 2,645% between 2023 and 2035 in favor of MAC-type mixtures, however, this difference may vary according to the increase or decrease in the market price of the additive. The implementation of MAT does not require special equipment or structures in the plant, it is only required to dose the additive by drip injection in the face line of the transport tank towards the asphalt storage tank.

**Keywords:** Warm mix asphalt. Hot mix asphalt. Life cycle assessment. Life cycle cost assessment. PaLATE. Design of pavement and asphalt mixtures. Asphalt production. ZycoTherm. WMA. HMA. LCA. LCCA.

## Índice de contenido

1.	INTRODUCCIÓN.....	26
1.1.	Antecedentes.....	26
1.2.	Planteamiento del problema.....	26
1.3.	Objetivos.....	27
1.3.1.	Objetivo General.....	27
1.3.2.	Objetivos Específicos.....	27
1.4.	Metodología.....	27
1.5.	Alcance.....	28
1.6.	Organización del trabajo de titulación.....	28
2.	MEZCLAS ASFÁLTICAS.....	30
2.1.	Mezclas Asfálticas en Caliente (MAC).....	30
2.1.1.	Temperatura de las mezclas.....	30
2.1.1.1.	Temperatura de compactación.....	31
2.1.1.2.	Temperatura de Mezclado.....	32
2.1.1.3.	Densidad de compactación.....	32
2.2.	Mezclas Asfálticas Tibias (MAT).....	33
2.2.1.	Temperatura de las mezclas.....	33
2.2.1.1.	Temperatura de compactación.....	35
2.2.1.2.	Densidad de compactación.....	36
3.	DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA DE ASFALTO.....	37
3.1.	Componentes principales de la Planta.....	37
3.1.1.	Conjunto de los silos dosificadores de árido.....	37
3.1.2.	Cinta transportadora y dosificadora.....	38
3.1.3.	Secador.....	39
3.1.4.	Cámara de combustión/mezcla quemadora.....	40
3.1.5.	Filtro de mangas.....	41
3.1.6.	Chimenea.....	42
3.1.7.	Elevador de arrastre.....	43
3.1.8.	Tubería de asfalto y combustible.....	44
3.1.9.	Cabina de mando.....	45
3.2.	Producción.....	45

3.2.1.	Producción de asfalto .....	46
3.2.2.	Consumo de diésel .....	46
3.2.3.	Consumo de arena .....	47
3.2.4.	Consumo de material de 3/8 pulgadas.....	48
3.2.5.	Consumo de material de ¾ pulgadas .....	49
3.2.6.	Consumo de AC20 .....	50
3.2.7.	Consumo de energía eléctrica .....	51
3.2.8.	Consumo de agua.....	52
4.	DISEÑO DE PAVIMENTO Y MEZCLAS ASFÁLTICAS TIBIAS Y EN CALIENTE.....	54
4.1.	Diseño de Pavimento por el Método de AASHTO.....	54
4.2.	Diseño de Mezclas Asfálticas Tibias .....	54
4.2.1.	Recopilar Información .....	55
4.2.2.	Selección del Cemento Asfáltico .....	58
4.2.3.	Determinar el nivel de compactación.....	58
4.2.4.	Selección del tamaño de agregado máximo nominal .....	59
4.2.5.	Determinación de los valores de VAM de diseño .....	59
4.2.6.	Cálculo del contenido de asfalto.....	60
4.2.7.	Cálculo del volumen de agregado.....	61
4.2.8.	Proporción de agregados para mezclas de prueba.....	61
4.2.9.	Cálculo de proporciones de la mezcla de prueba por peso y verificación la proporción de polvo a aglutinante .....	63
4.2.10.	Evaluar y perfeccionar las mezclas de prueba.....	64
4.2.11.	Preparación de las muestras .....	76
4.3.	Caracterización del agregado .....	76
5.	PROCEDIMIENTO DE DISEÑO PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS .....	77
5.1.	Método Marshall de Diseño de Mezclas.....	77
5.2.	Comparación de las mezclas asfálticas en tibio y en caliente .....	77
6.	CICLO DE VIDA .....	78
6.1.	Sostenibilidad .....	78
6.2.	Análisis de costos del Ciclo de Vida (LCCA) .....	79
6.3.	Herramientas para la evaluación .....	80
6.3.1.	PaLATE (Pavement Lifecycle Assessment Tool for Enviromental and Economic Effect)	80
6.3.1.1.	Input - Entradas.....	82

6.3.1.2.	Output – Salidas .....	82
6.3.1.3.	Datos de ingreso .....	84
7.	ADITIVO PARA MEZCLA ASFÁLTICA TIBIA .....	86
7.1.	Resistencia a la humedad mediante enlace químico .....	86
7.2.	Resistencia a la oxidación mediante recubrimiento completo .....	87
7.3.	Resistencia a la fatiga mediante compactación consistente.....	87
7.4.	Beneficios ambientales.....	87
7.5.	Dosificación .....	87
7.6.	Mezclado.....	88
7.7.	Protocolo de laboratorio.....	88
7.7.1.	Descripción de los ensayos.....	88
7.7.2.	Dosificación propuesta .....	88
7.7.3.	Ensayos .....	88
7.7.4.	Aditivación del asfalto .....	88
7.7.5.	Elaboración de las probetas.....	89
7.7.6.	Resultados Esperados.....	89
8.	DISEÑO DEL PAVIMENTO PARA ESTE ESTUDIO .....	91
8.1.1.	Resumen de parámetros de diseño .....	91
8.1.2.	Selección de los espesores.....	91
8.1.2.1.	Resultado de Espesores.....	94
9.	ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA.....	95
9.1.	Análisis de Procesos .....	95
9.1.1.	Diagrama de procesos .....	95
9.1.2.	Descripción de actividades.....	95
9.1.3.	Entradas y Salidas de los procesos.....	96
9.1.4.	Recursos naturales .....	99
9.1.4.1.	Recursos naturales requeridos para la etapa de producción y construcción del pavimento.....	100
9.1.4.2.	Recursos naturales requeridos para la etapa de producción y mantenimiento del pavimento.....	101
9.1.5.	Equipo.....	102
9.1.6.	Energía y emisiones.....	104
9.1.6.1.	Consumo de energía y emisiones del ciclo de vida del pavimento con una carpeta de mezcla asfáltica en caliente .....	104



9.1.6.2.	Consumo de energía y emisiones del ciclo de vida del pavimento con una carpeta de mezcla asfáltica en caliente .....	107
10.	DISEÑO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE (MAC) .....	111
10.1.	Mezcla de agregados .....	111
10.1.1.	Análisis granulométrico .....	111
10.1.2.	Temperatura de mezclado y compactación .....	112
10.1.3.	Briquetas .....	112
10.1.4.	Volúmenes de la mezcla .....	112
10.1.5.	Porcentaje óptimo de asfalto .....	115
10.1.6.	Propiedades de la mezcla asfáltica óptima .....	116
11.	DISEÑO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA TIBIA (MAT).....	118
11.1.	Mezcla de agregados .....	118
11.1.1.	Análisis granulométrico .....	118
11.1.2.	Temperatura de mezclado y compactación .....	118
11.1.3.	Briquetas .....	118
11.1.4.	Volúmenes de la mezcla .....	118
11.1.5.	Porcentaje óptimo de asfalto .....	121
11.1.6.	Propiedades de la mezcla asfáltica óptima .....	122
12.	EVALUACIÓN ECONÓMICA.....	124
12.1.	Costos por emisión de gases de efecto invernadero .....	124
12.1.1.	Huella de carbono .....	124
12.1.2.	Determinación de la huella de carbono.....	124
12.1.2.1.	Huella de carbono para MAC.....	125
12.1.2.2.	Huella de carbono para MAT.....	126
12.2.	Recursos de producción anual.....	127
12.2.1.	Proyección de recursos de producción para MAC .....	127
12.2.2.	Proyección de recursos de producción para MAT .....	128
12.3.	Gastos de producción anual.....	129
12.3.1.	Proyección de gastos de producción para MAC.....	129
12.3.2.	Proyección de gastos de producción para MAT .....	130
12.4.	Costos para construcción de estructura de pavimento, vía Macas-La Playa....	131
12.4.1.	Costos de pavimentación con MAC.....	131
12.4.2.	Costos de pavimentación con MAT.....	132

12.4.3.	Huella ecológica para MAT y MAC.....	132
12.5.	Comparativa económica entre MAC y MAT.....	133
12.5.1.	Comparación de costos de producción anual .....	133
12.5.2.	Comparación de costos de construcción vía Macas-La Playa .....	135
13.	RESULTADOS.....	137
13.1.	Planta de Asfalto .....	137
13.2.	Diseño de pavimento.....	137
13.3.	Análisis del ciclo de vida (LCA).....	138
13.4.	Aditivo.....	138
13.5.	Diseño de mezclas asfálticas .....	139
13.6.	Evaluación económica .....	139
14.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	140
15.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	142
16.	APÉNDICES.....	145
A.	Principales consideraciones de diseño de pavimentos por el método de la AASHTO 146	
A.1.	Tránsito .....	147
A.2.	Confiabilidad.....	147
A.3.	Desviación Estándar .....	148
A.4.	Nivel de Serviciabilidad .....	148
A.5.	Propiedades de los materiales.....	148
A.6.	Coeficientes de capa.....	149
A.7.	Drenaje.....	149
A.8.	Diseño Estructural.....	151
A.9.	Diseño Estructural.....	151
B.	Método Marshall de diseño de mezclas .....	154
B.1.	Preparación para efectuar los procedimientos Marshall .....	155
B.2.	Selección de las muestras del material.....	155
B.3.	Preparación del agregado .....	155
B.3.1.	Secado del agregado.....	155
B.3.2.	Análisis granulométrico por vía húmeda .....	155
B.3.3.	Deteminación del peso específico .....	156
B.4.	Preparación de las probetas de ensayo.....	156

B.5.	Procedimiento del ensayo Marshall.....	157
B.5.1.	Determinación del peso específico total .....	157
B.5.2.	Ensayos de estabilidad y fluencia.....	157
B.5.3.	Valor de la estabilidad Marshall.....	158
B.5.4.	Valor de la fluencia Marshall.....	158
B.5.5.	Análisis de densidad y vacíos.....	158
B.5.6.	Análisis de resultados del ensayo Marshall.....	159
B.5.6.1.	Resultados gráficos.....	159
B.5.6.2.	Relaciones y observaciones de los resultados de los ensayos .....	160
B.5.6.3.	Determinación del contenido óptimo de asfalto.....	160
B.5.6.4.	Verificando los criterios de diseño.....	161
B.5.6.5.	Selección de un diseño de mezcla.....	162
C.	Análisis del tráfico, materiales y variables de diseño de pavimentos por el método AASHTO	163
C.1.	Datos Generales.....	164
C.2.	Análisis de Tráfico .....	164
C.2.1.	Tránsito Promedio Diario Anual TPDA.....	165
C.2.2.	Clasificación funcional de vías .....	165
C.2.3.	Horizonte de Diseño .....	166
C.2.4.	Niveles de confiabilidad .....	166
C.2.5.	Factores de Distribución por Dirección FD.....	166
C.2.6.	Factores de Distribución por Carril FL .....	167
C.2.7.	Tasa de Crecimiento Vehicular en Redes Locales .....	167
C.2.8.	Composición Vehicular .....	168
C.2.9.	Factor de Equivalencia Global o Factor Camión Global.....	168
C.2.10.	Proyección del tráfico .....	170
C.3.	Datos generales de los Materiales .....	170
C.3.1.	Suelo de Fundación – Subrasante .....	170
C.3.2.	Capa de Subbase Granular .....	171
C.3.3.	Módulo Resiliente .....	172
C.3.4.	Capa de Base Granular.....	172
C.3.5.	Módulo Resiliente .....	173
C.4.	Variables y ecuación de diseño – Método AASHTO.....	173

C.4.1.	Confiabilidad.....	173
C.4.2.	Desviación Estándar .....	174
C.4.3.	Serviciabilidad.....	174
C.4.4.	Nivel o Índice de Servicios P <sub>o</sub> .....	175
C.4.5.	Nivel de Servicios Final P <sub>t</sub> .....	175
C.4.5.1.	Cambio total en el Índice de Servicios .....	175
C.4.6.	Drenaje.....	175
17.	ANEXOS.....	177
17.1.	Anexo 1 - Ábacos de diseño de estructuras de pavimento – AASHTO.....	177
17.2.	Anexo 2 - Resultados de Laboratorio .....	185

## Índice de tablas

Tabla 1. Temperaturas Típicas de Mezclado para Mezcla Asfáltica en Caliente .....	31
Tabla 2. Rango de temperaturas referenciales para las mezclas asfálticas tibias .....	34
Tabla 3. Pasos de diseño para las mezclas asfálticas en caliente y tibias .....	54
Tabla 4. Información requerida para diseños de mezclas MAT (en tibio) y MAC (en caliente) .....	56
Tabla 5. Niveles de compactación de diseño para MAT y MAC.....	58
Tabla 6. Tamaños máximos nominales de agregado recomendados para Mezclas Asfálticas en Caliente .....	59
Tabla 7. Requerimientos de vacíos en el agregado mineral (VAM) para mezclas densas.....	60
Tabla 8. <i>Criterios para partículas planas y elongadas</i> .....	62
Tabla 9. Requerimientos de angularidad para agregado fino .....	62
Tabla 10. Requerimientos del máximo contenido de arcilla .....	63
Tabla 11. Requerimientos para la proporción polvo/asfalto .....	64
Tabla 12. Comparación de los procesos de elaboración para diseño de muestras de prueba de MAC y MAT.....	64
Tabla 13. Rango aceptable para Factores Volumétricos para MAT y MAC.....	74
Tabla 14. Número de flujo mínimo para Mezclas MAT y MAC para la evaluación del rendimiento	75
Tabla 15. Ensayos para caracterización de los agregados .....	76
Tabla 16. Resultados esperados de densidad para la mezcla asfáltica tibia usando ZYCOTHERM...	89
Tabla 17. Resultados esperados de densidad para la mezcla asfáltica tibia usando ZYCOTHERM...	90
Tabla 18. Resumen de parámetros de diseño.....	91
Tabla 19. Espesores mínimos según ejes equivalentes .....	92
Tabla 20. Coeficientes estructurales obtenidos.....	93
Tabla 21. Números estructurales calculados.....	94
Tabla 22. <i>Cálculo de espesores y espesores asumidos</i> .....	94
Tabla 23. Datos de las características de la vía, sus materiales y las longitudes de transporte a obra .....	99
Tabla 24. Recursos requeridos para etapa de construcción.....	100
Tabla 25. Recursos requeridos para etapa de mantenimiento .....	101
Tabla 26. Equipos para la construcción de carpeta asfáltica .....	103
Tabla 27. Equipos para el mantenimiento de la vía .....	104
Tabla 28. Equipos para la producción de mezcla asfáltica .....	104
Tabla 29. Consumo de energía y emisiones para la producción, construcción y mantenimiento del pavimento, MAC .....	104
Tabla 30. Desglose de energía y emisiones para las fases de producción, construcción y mantenimiento de las que incluye las principales actividades propuestas, utilizando una mezcla asfáltica en caliente.....	105
Tabla 31. Consumo de energía y emisiones para la producción, construcción y mantenimiento del pavimento, MAT.....	107
Tabla 32. Desglose de energía y emisiones para las fases de producción, construcción y mantenimiento de las que incluye las principales actividades propuestas, utilizando una mezcla asfáltica tibia.....	108
Tabla 33. Análisis granulométrico y combinación de agregados de la mezcla.....	111
Tabla 34. Propiedades volumétricas de la mezcla MAC .....	113

Tabla 35. Contenido óptimo de asfalto y propiedades volumétricas de la mezcla MAC .....	116
Tabla 36. Propiedades de la mezcla asfáltica óptima - MAC.....	117
Tabla 37. Propiedades volumétricas de la mezcla MAT .....	119
Tabla 38. Contenido óptimo de asfalto y propiedades volumétricas de la mezcla MAT.....	122
Tabla 39. Propiedades de la mezcla asfáltica óptima - MAT.....	123
Tabla 40. Equivalencias de GEI, expresados en términos de emisiones de CO2, barriles de petróleo y monetarios, para mezclas tipo MAC.....	125
Tabla 41. Equivalencias de GEI, expresados en términos de emisiones de CO2, barriles de petróleo y monetarios, para mezclas tipo MAC.....	126
Tabla 42. Recursos para producción de mezcla asfáltica en caliente, 2020 - 2035 .....	127
Tabla 43. Recursos para producción de mezcla asfáltica tibia, 2022 - 2035 .....	128
Tabla 44. Costos para producción de mezcla asfáltica en caliente, 2020 - 2035.....	129
Tabla 45. Costos para producción de mezcla asfáltica tibia, 2022 – 2035.....	130
Tabla 46. Tasa de variación del precio del diésel premium industrial.....	131
Tabla 47. Costos de pavimentación con MAC .....	132
Tabla 48. Costos de pavimentación con MAT.....	132
Tabla 49. Equivalencias y costos por huella ecológica para MAC y MAT.....	133
Tabla 50. Costos generales de producción de mezclas MAC y MAT, 2022 - 2035.....	134
Tabla 51. Costos generales de pavimentación, MAC y MAT vía Macas-La Playa .....	136
Tabla 52. Cálculo de espesores y espesores asumidos.....	138
Tabla A 1. Niveles de confiabilidad sugeridos para diferentes carreteras.....	147
Tabla A 2. Calidad de drenaje .....	150
Tabla A 3. Porcentaje de tiempo de exposición de la estructura del pavimento.....	150
Tabla A 4. Espesores mínimos de capa (pulg.).....	152
Tabla B 1. Criterios del Instituto del Asfalto (U.S.A) para el diseño Marshall .....	160
Tabla B 2. Porcentaje mínimo de VAM.....	161
Tabla C 1. Datos generales .....	164
Tabla C 2. Proyección TPDA para livianos, buses y camiones.....	165
Tabla C 3. Clasificación funcional de las vías en base al TPDA .....	165
Tabla C 4. Horizonte de Diseño.....	166
Tabla C 5. Niveles de confiabilidad .....	166
Tabla C 6. Factores de Distribución por Dirección FD.....	167
Tabla C 7. Factores de Distribución por Carril FL .....	167
Tabla C 8. Tasa de Crecimiento Vehicular en Redes Locales.....	167
Tabla C 9. Composición Vehicular .....	168
Tabla C 10. Resultados Factor de Equivalencia Global o Factor Camión Global.....	169
Tabla C 11. Caracterización material sub base granular .....	171
Tabla C 12. Caracterización de material de base granular .....	172
Tabla C 13. Niveles de confiabilidad .....	174
Tabla C 14. Calidad de drenaje.....	175

Tabla C 15. Exposición de la estructura del pavimento .....176

## Índice de figuras

Figura 1. Relación de temperatura de compactación a partir de la Densidad Bulk.....	36
Figura 2. Planta BOMAG MARINI .....	37
Figura 3. Silos dosificadores .....	38
Figura 4. Cinta transportadora.....	39
Figura 5. Secador.....	40
Figura 6. Cámara de combustión .....	41
Figura 7. Filtro de mangas .....	42
Figura 8. Chimenea.....	43
Figura 9. Elevador de arrastre .....	44
Figura 10. Cabina de mando.....	45
Figura 11. Toneladas producidas de asfalto.....	46
Figura 12. Consumo de diésel.....	47
Figura 13. Consumo de arena.....	48
Figura 14. Consumo de agregado de 3/8 pulgadas en la planta asfáltica .....	49
Figura 15. Consumo de agregado de 3/4 pulg en la planta asfáltica .....	50
Figura 16. Consumo de AC-20 en la planta asfáltica .....	51
Figura 17. Consumo de energía eléctrica en la planta asfáltica .....	52
Figura 18. Consumo de agua en la planta asfáltica.....	53
Figura 19. Pavimentos Sustentables.....	79
Figura 20. Estructura de la aplicación PaLATE .....	81
Figura 21. Consumo de energía del ciclo de vida.....	83
Figura 22. Emisiones de CO2 en el ciclo de vida.....	83
Figura 23. Eficiencia de compactación - ZycTherm .....	86
Figura 24. Espesores considerados para el diseño de la estructura del pavimento .....	93
Figura 25. Diagrama de procesos de la pavimentación.....	95
Figura 26. Actividades de la pavimentación.....	96
Figura 27. Entradas y Salidas de los procesos- Producción.....	97
Figura 28. Entradas y Salidas de los procesos- Construcción.....	98
Figura 29. Entradas y Salidas de los procesos- Operación y Mantenimiento .....	98
Figura 30. Ubicación de la vía Macas-La Playa .....	99
Figura 31. Nivel de servicio de una vía .....	101
Figura 32. Consumo de energía del Ciclo de vida (producción, construcción y mantenimiento) del pavimento con mezcla asfáltica en caliente.....	106
Figura 33. Emisiones de CO2 equivalente del Ciclo de vida (producción, construcción y mantenimiento) del pavimento con mezcla asfáltica en caliente .....	107
Figura 34. Consumo de energía del Ciclo de vida (producción, construcción y mantenimiento) del pavimento con mezcla asfáltica tibia .....	109
Figura 35. Emisiones de CO2 equivalente del Ciclo de vida (producción, construcción y mantenimiento) del pavimento con mezcla asfáltica tibia .....	110
Figura 36. Curva granulométrica de los agregados y la combinación de la mezcla.....	112
Figura 37. Gráfica de las propiedades de la mezcla asfáltica MAC.....	115
Figura 38. Gráfica de las propiedades de la mezcla asfáltica MAT .....	121
Figura 39. Gráfica de variación porcentual del costo de producción de MAC y MAT.....	135



Figura 40. Gráfica de variación porcentual del costo de producción de MAC y MAT.....	135
Figura A 1. Estructura de espesores de estructura de pavimento y números estructurales.....	153
Figura B 1. Ejemplo de gráficas de resultados de probetas Marshall .....	159
Figura C 1. Modulo Resiliente calculado .....	171
Anexo 1_Figura 1. Estimación del módulo resiliente efectivo de la subrasante para pavimentos flexibles usando criterios de serviciabilidad.....	177
Anexo 1_Figura 2. Continuación - Estimación del módulo resiliente efectivo de la subrasante para pavimentos flexibles usando criterios de serviciabilidad .....	178
Anexo 1_Figura 3. Gráfica para estimar el coeficiente de capa estructural para concreto asfáltico de gradación densa basado en el módulo elástico o resiliente.....	179
Anexo 1_Figura 4. Variación del coeficiente ( $a_2$ ) para la capa de base granular en función de varios parámetros de esfuerzo.....	180
Anexo 1_Figura 5. Variación del coeficiente ( $a_3$ ) para la capa de sub base granular en función de varios parámetros de esfuerzo .....	181
Anexo 1_Figura 6. Variación de “ $a_2$ ” para bases granulares estabilizadas con cemento en función de varios parámetros de esfuerzo .....	182
Anexo 1_Figura 7. Variación de “ $a_2$ ” para bases granulares estabilizadas con emulsión asfáltica en función de varios parámetros de esfuerzo .....	183
Anexo 1_Figura 8. Carta de diseño para pavimentos flexibles basada en el uso de valores medios para cada entrada .....	184
Anexo 2_Figura 1. Resultados de laboratorio .....	185

## Lista de abreviaturas y símbolos

### Abreviaturas

GAD	Gobierno Autónomo Descentralizado
MAC	Mezcla Asfáltica en Caliente
MAT	Mezcla Asfáltica Tibia
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation
TPDA	Tránsito promedio diario anual
CBR	Relación de Soporte de California
MTOP	Ministerio de Transporte y Obras Públicas
NCHRP	National Cooperative Highway Research Program
ASTM	American Society for Testing and Materials
EMAPALEP	Empresa Municipal de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento Ambiental del Cantón Azogues
AASHO	American Association of State Highway and Transportation Officials
FHA	U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration
PaLATE	Pavement Lifecycle Assessment Tool for Environmental and Economic Effect
LCA	Life Cycle Assessment
LCCA	Life Cycle Cost Analysis
INEN	Instituto Nacional de Estadística y Censos
WWF	World Wildlife Fund
GEI	Gases de Efecto Invernadero

### Símbolos

CO <sub>2</sub> -e	Dióxido de carbono equivalente
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
NO <sub>x</sub>	Grupo de gases muy reactivos que contienen nitrógeno y oxígeno en diversas proporciones

PM10	Partículas sólidas dispersas en la atmósfera cuyo diámetro varía entre 2,5 y 10 $\mu\text{m}$
SO <sub>2</sub>	Dióxido de Azufre
CO	Monóxido de carbono
LL	Límite líquido
LP	Límite plástico
IP	Índice plástico
IG	Índice de grupo
D. máx.	Diámetro máximo
H. Opt.	Humedad óptima
M <sub>R</sub>	Módulo Resiliente
AC-20	Cemento asfáltico grado de viscosidad AC-20
N <sub>design</sub>	Tránsito de diseño
ESALs	Equivalent simple axial loads
FD	Factor de Distribución por Dirección
FL	Factor de Distribución por Carril
FC <sub>g</sub>	Factor de equivalencia global para los vehículos comerciales o factor camión global
R	Nivel de Confianza
W <sub>18</sub>	Número estimado de ejes simples
Z <sub>R</sub>	Desviación estándar normal
S <sub>o</sub>	Error estándar combinado de la predicción del comportamiento
P <sub>o</sub>	Índice de servicio inicial
P <sub>t</sub>	Índice de servicio final
$\Delta\text{PSI}$	Diferencia entre el índice de servicio inicial y el final
SN	Número Estructural
a <sub>i</sub>	Coficiente estructural de la capa i
D <sub>i</sub>	Espesor de la capa i

$M_i$	Coefficiente de drenaje de la capa $i$
$SN_1$	Número estructural sobre la base
$SN_2$	Número estructural sobre la subbase
$SN_3$	Número estructural sobre la subrasante
$V_b$	Porcentaje del contenido de asfalto
FAA	Fine aggregate angularity
VAM	Porcentaje de vacíos en el agregado mineral
VBA	Porcentaje del contenido de asfalto absorbido de la mezcla
VBE	Porcentaje efectivo de contenido de asfalto
VB	Porcentaje de contenido de asfalto
$W_t$	Peso total
$W_i$	Peso seco
$W_{dwf}$	Peso seco de la fracción húmeda del lote
$G_{mb}$	Peso específico Bulk de la mezcla compactada
$G_{mm}$	Peso específico máximo teórico de la mezcla suelta
$G_b$	Peso específico del asfalto
$G_{sb}$	Peso específico Bulk del agregado
$G_{mb}$	Peso específico Bulk de la mezcla
$P_b$	Porcentaje total de contenido de asfalto
$P_s$	Porcentaje de contenido de agregado de la mezcla
$P_{be}$	Porcentaje del contenido efectivo de asfalto
$P_{wa}$	Porcentaje de absorción de agua del agregado
$P_{b\ new}$	Porcentaje de peso de la mezcla total con el nuevo asfalto de la mezcla
$P_{0.075}$	Porcentaje de peso del contenido del polvo mineral
D/B	Proporción de Polvo/Asfalto
RAP	Reclaimed asphalt pavement

PMB	Asfalto modificado con polímeros
SBS	asfalto modificado con polímero SBS (Estireno-Butadieno-Estireno)
SBR	asfalto modificado con polímero SBR (Estireno-Butadieno-Rubber)
EVA	asfalto modificado con plastómero tipo EVA (Etil-Vinil-Acetato)
SRMB Metil).	asfalto modificado con polímero tensoactivo SRBM (Estireno-Rubber-Butadieno-

## Unidades

U.S. D	United States Dollar
Pa.s.	Pascal segundo
Cv	Caballos de vapor
btu/h	Unidad térmica británica por hora (energía térmica por hora)
kWh	Kilovatio hora
GJ	Gigajoule
M	Metro
cm	Centímetro
KPa	Kilopascales
lb	Libras
Ton	Tonelada
mm	Milímetros
kN	Kilonewtons
kN/m <sup>2</sup>	Kilonewtons por metro cuadrado
psi	Libra por pie cuadrado
°F	Grados Fahrenheit
°C	Grados centígrados

## Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

---

Johnathan Leonardo Esquivel Villavicencio en calidad de autor/a y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Implementación de Mezclas Tibias como una Alternativa para las Mezclas en Caliente para la Planta Asfáltica del GAD Municipal de Azogues, Evaluando el Ciclo de Vida de los Efectos Ambientales y Económicos en Producción", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 01 de agosto de 2022



Johnathan Leonardo Esquivel Villavicencio  
C.I: 0302024799

## Cláusula de Propiedad Intelectual

---

Johnathan Leonardo Esquivel Villavicencio, en calidad de autor y titular del trabajo de titulación "Implementación de Mezclas Tibias como una Alternativa para las Mezclas en Caliente para la Planta Asfáltica del GAD Municipal de Azogues, Evaluando el Ciclo de Vida de los Efectos Ambientales y Económicos en Producción", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 01 de agosto de 2022



Johnathan Leonardo Esquivel Villavicencio

C.I: 0302024799

## AGRADECIMIENTOS

A Dios por haberme concedido la salud, fortaleza y decisión que me permitió asumir este reto.

A Alicia Villavicencio, mi madre, por siempre creer en mí y darme ese aliento de vida para alcanzar esta meta.

A sor Celina Villavicencio, gracias por siempre pensar en mí.

Al Dr. Romel Sarmiento Castro, alcalde del cantón Azogues por haberme extendido esa mano amiga para trabajar en su administración, poder desarrollar y culminar este proyecto.

Al Ing. Yasmany García PhD, por su predisposición, tiempo, aporte científico y apoyo oportuno en la elaboración del presente trabajo de titulación.



## Dedicatoria

A mi amada esposa Liz, mi sueño fue posible gracias a tu amor y apoyo incondicional.  
A mi hijo Samuel, encuentro la fortaleza y alegría, con sólo mirarte.

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Antecedentes

Las entidades que ejecutan obra pública tienen la responsabilidad de hacerlo de manera que no se genere desperdicio en los recursos públicos. Entonces, es indispensable que optimice, mejore e innove en los diferentes procesos y tecnologías de ejecución de obra. Con esto se guía adecuadamente los procesos constructivos y se ahorren recursos económicos, los cuales actualmente son limitados. Las actividades de producción para la construcción en su mayoría generan impactos sobre el medio ambiente, los mismos que afectan principalmente al medio físico en términos de calidad de aire, agua y suelo generando externalidades negativas de producción para las entidades ejecutoras de obra.

El GAD Municipal de Azogues, cuenta con una planta para la producción de mezcla asfáltica en caliente tipo BOMAG MARINI y alcanza una producción de 80 toneladas por hora. Esta planta es utilizada por la municipalidad para la pavimentación de vías del cantón Azogues, generando externalidades negativas de producción que inciden directamente en el medio biofísico. Además, incurren en gastos operativos significativos. Por lo tanto, los procesos en la planta deben ser optimizados de tal manera que se disminuyan los impactos negativos al ambiente y se ahorren recursos económicos para la institución. Actualmente, la planta requiere de grandes cantidades de energía para producir mezclas asfálticas en caliente, y consecuentemente las emisiones a la atmósfera impactando la calidad del aire. De ahí, que es importante que se realice mejoras a los procesos de producción para equilibrar las condiciones económicas, medio ambientales y sociales tanto de la institución como del medio donde se ubica la planta de producción de asfalto.

### 1.2. Planteamiento del problema

El problema de la mayoría de los gobiernos Latinoamericanos es la falta de recursos económicos para satisfacer las necesidades de sus pueblos, y el GAD de Azogues no es la excepción. Es por esto que su presupuesto tiene que ser invertido responsablemente y de manera óptima, de tal forma que no se generen desperdicios en los recursos, pudiendo implementar el uso de procesos y tecnologías más eficientes. La planta de producción de mezclas en caliente del GAD Municipal de Azogues permite mejorar o extender la infraestructura vial del cantón. Esta planta consume grandes cantidades de agua, energía eléctrica y combustible, por lo que aumenta su costo de producción. Este consumo requiere ser optimizado mediante un proceso de producción más sostenible (expresado en términos de emisiones de CO<sub>2</sub>) que pueda generar un ahorro en los recursos de la institución y disminuir las emisiones solucionando en cierta medida el problema de contaminación

que afecta a la sociedad en general y mejorando la práctica ingenieril de las mezclas asfálticas en el Municipio de Azogues.

## **1.3. Objetivos**

### **1.3.1. Objetivo General**

Realizar un diseño de pavimento y mezcla tibia como una alternativa a las mezclas en caliente para la planta asfáltica del GAD Municipal de Azogues, evaluando el ciclo de vida de los efectos ambientales y económicos en producción determinando el consumo de energía y las emisiones de CO<sub>2</sub>.

### **1.3.2. Objetivos Específicos**

- Realizar la revisión de literatura técnica que permitan generar un marco teórico para el trabajo de titulación.
- Recopilar información de producción y consumos de la Planta Asfáltica.
- Realizar ensayos de los agregados que se usan para las mezclas asfálticas en la Planta Asfáltica del GAD Municipal de Azogues.
- Realizar el diseño de la estructura de pavimento, que se requiere para determinar las cantidades de materiales como agregados y carpeta asfáltica.
- Diseñar una mezcla asfáltica en caliente de manera óptima, con los parámetros de diseño adecuados y que actualmente usa el GAD Municipal de Azogues.
- Diseñar una mezcla asfáltica tibia, mediante el uso del aditivo adecuado y con los parámetros usados en la planta asfáltica.
- Evaluar el ciclo de vida de los efectos ambientales y económicos de producción mediante la aplicación PaLATE (Greenroads, 2011) en términos de emisiones de CO<sub>2</sub>.

## **1.4. Metodología**

Para alcanzar el objetivo del presente trabajo de titulación se realizó una extensa investigación sobre los criterios de diseño de las mezclas asfálticas tibias y sus principales aditivos para poder diseñar la misma. Se recopilaron datos de consumos de energía eléctrica, agua, combustible de la planta de asfalto del GAD Municipal de Azogues para determinar los efectos ambientales y económicos de

producción. Con la finalidad de elaborar el diseño de pavimento se realizó una caracterización de la capa de subrasante, subbase y base para luego determinar el espesor de la carpeta asfáltica. Una vez determinada la estructura del pavimento se estimaron las cantidades de agregado y carpeta asfáltica que intervendrían en el cálculo de los efectos ambientales y económicos de producción mediante la aplicación PaLATE (Greenroads, 2011) en términos de emisiones de CO<sub>2</sub>. Adicionalmente, se realizó un análisis de los procesos de producción de la planta asfáltica, la descripción de las actividades de construcción de la estructura vial y el equipo caminero que interviene en dichas actividades e incorporarlas en el análisis del cálculo de los efectos ambientales y económicos, así como también en la fase de mantenimiento de la vía. Finalmente, se procedió a realizar el diseño de las mezclas calientes y tibias para implementarlas en la planta asfáltica del GAD Municipal de Azogues y evaluar los costos económicos resultado de esta implementación.

## **1.5. Alcance**

El presente estudio se aplica al diseño de una mezcla asfáltica tibia mediante el uso de un aditivo organosilano en base a nanotecnología denominado ZycoTherm y la caracterización de los agregados minerales disponibles en la mina y la planta asfáltica ubicada en la provincia del Cañar-Ecuador, cantón Azogues, Parroquia San Miguel de Porotos. Esto, con la finalidad de proponer una alternativa a las mezclas asfálticas en caliente que actualmente se realizan en la planta asfáltica del municipio. Además, efectuar el análisis del cálculo de los efectos ambientales en términos de consumo de energía y emisiones de CO<sub>2</sub> mediante la metodología PaLATE (Greenroads, 2011). Por último, evaluar económicamente el costo de implementar mezclas asfálticas tibias y mezclas asfálticas en caliente y que permita optimizar la producción de mezcla asfáltica bajo un enfoque de sostenibilidad y responsabilidad corporativa con el medio ambiente.

## **1.6. Organización del trabajo de titulación**

El resto del trabajo de titulación se ha organizado de la siguiente forma. Del capítulo 2 al 7, se hace una explicación del marco teórico de la tesis. Se aborda el procedimiento para el diseño de elaboración de las Mezclas Asfálticas en Caliente (MAC) y Mezclas Asfálticas Tibias (MAT) mediante el Método Marshall. Se trata el tema de producción y caracterización de la planta de asfalto describiendo sus componentes principales, así como recopilación de datos históricos de producción de mezcla asfáltica, los consumos de recursos como diésel, arena, material de  $\frac{3}{4}$  y  $\frac{3}{8}$ , cemento asfáltico AC-20, energía eléctrica y agua con la finalidad de usarlos en la determinación de costos económicos y posteriormente proyectarlos. Se aborda también los diferentes parámetros necesarios para el diseño de la estructura del pavimento a partir del método AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993). Adicionalmente se realiza una explicación del concepto del análisis del ciclo de vida, sostenibilidad y las herramientas de

evaluación del mismo para posteriormente usarlo para determinar los efectos ambientales en términos de emisiones de CO<sub>2</sub>. Más adelante se desarrolla la descripción teórica del aditivo empleado para las mezclas tibias (MAT), sus beneficios ambientales, dosificación, mezclado ensayos y protocolos de laboratorio.

Luego de abordar un marco teórico amplio se abordó la parte donde se fue plasmando lo estudiado, es así que el Capítulo 8 se refiere al diseño del pavimento propiamente dicho, abordando el análisis de tráfico, datos generales de los materiales, variables y ecuaciones de diseño, y los resultados de espesores obtenidos mediante el método AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993).

El Capítulo 9 tiene que ver con la parte de análisis del ciclo de vida mediante el uso de la Aplicación PaLATE (Greenroads, 2011) calculando los efectos ambientales del proceso de producción, construcción y mantenimiento de la estructura de pavimento determinada en el capítulo anterior en términos de emisiones de CO<sub>2</sub>, para lo cual se procedió a realizar un análisis de procesos, descripción de cada una de las actividades y los recursos empleados (base, sub base y mejoramiento), además, la caracterización de la maquinaria empleada en obra, sus rendimientos, potencia, distancias recorridas, etc. para poder determinar los resultados bajo los escenarios de una mezcla y otra.

El Capítulo 10 y 11 trata el diseño de las mezclas asfálticas en caliente (MAC) y las mezclas tibias (MAT) para ser implementada en la Planta de Asfalto del GAD Municipal de Azogues. Una vez determinadas los diseños óptimos de las mezclas, el Capítulo 12 trata sobre el análisis económico resultado de implementar una y otra mezcla en la fase de producción. Finalmente, el Capítulo 13 aborda la discusión de los resultados y el capítulo 14, las conclusiones y recomendaciones respectivas.

## 2. MEZCLAS ASFÁLTICAS

El pavimento de concreto asfáltico está compuesto de agregado bien graduado y cemento asfáltico, los cuales son calentados y mezclados en proporciones exactas en una planta de mezclado. Después de que las partículas de agregado son revestidas uniformemente, la mezcla se lleva al lugar de construcción, en donde el equipo asfaltador la coloca sobre la base que ha sido previamente preparada. Antes de que la mezcla se enfríe, las compactadoras proceden a compactarla hasta lograr la densidad especificada. Por otro lado, existen otros pavimentos que se producen y colocan en forma similar, los cuales pueden ser mezclas en frío que utilizan asfaltos emulsificados o asfaltos diluidos que requieren poco o ningún calentamiento de materiales y que con frecuencia pueden ser producidos *in-situ* sin uso de planta central.

### 2.1. Mezclas Asfálticas en Caliente (MAC)

Las mezclas asfálticas en caliente son aquellas que deben ser colocadas y compactadas a temperaturas elevadas de tal manera que se pueda secar el agregado y obtener suficiente fluidez del cemento asfáltico, ambos deben calentarse antes de ser mezclados dando origen a la expresión de mezcla en caliente. En una mezcla asfáltica en caliente de pavimentación, las proporciones relativas de los materiales determinan las propiedades físicas de la mezcla y eventualmente el desempeño de la misma. Los métodos de diseño más comunes para determinar las proporciones apropiadas de asfalto y agregado en una mezcla son el Método Marshall y Método Hveem. Los dos métodos son ampliamente usados y cada uno de ellos contiene características y ventajas similares, por lo tanto, cualquier método puede ser usado con resultados satisfactorios.

#### 2.1.1. Temperatura de las mezclas

Tanto el asfalto como el agregado deben ser calentados antes de ser combinados en el mezclador para que pueda producir una mezcla final a la temperatura deseada. La relación entre temperatura y viscosidad puede ser diferente dependiendo del grado y del asfalto. La temperatura del agregado controla la temperatura de la mezcla, normalmente hay una especificación para temperatura de mezclado, como se puede ver en la tabla 1.

**Tabla 1. Temperaturas Típicas de Mezclado para Mezcla Asfáltica en Caliente**

Mezclas densamente graduadas		
Cementos Asfálticos	°F	°C
AC-2.5	235-280	115-140
AC-5	250-295	120-145
AC-10	250-315	120-155
AC-20	265-330	130-165
AC-40	270-340	130-170
AR-1000	225-275	105-135
AR-2000	275-325	135-165
AR-4000	275-325	135-165
AR-8000	275-325	135-165
AR-16000	300-350	150-175
200-300 pen.	235-305	115-150
120-150 pen.	245-310	120-155
85-100 pen.	250-325	120-165
60-70 pen.	265-335	130-170
40-50 pen.	270-350	130-175

Fuente: (Asphalt Institute, 1999)

Las temperaturas típicas de mezclado están basadas en factores relacionados con las condiciones de colocación y compactación de la mezcla. El mezclado deberá ser efectuado a la temperatura más baja posible que a la vez permita un revestimiento completo de las partículas de agregado y una mezcla con la trabajabilidad satisfactoria (Asphalt Institute, 1999).

### 2.1.1.1. Temperatura de compactación

A temperatura ambiente el asfalto es sólido, mientras que a temperaturas entre 120 y 150 °C es completamente fluido. Para que una mezcla pueda ser compactada correctamente, el asfalto debe tener suficiente fluidez para permitir que las partículas de agregado se muevan unas respecto a otras. A medida que la mezcla se enfría, el asfalto pierde su fluidez y a temperaturas por debajo de 85 °C, el asfalto, en combinación con los finos de la mezcla comienza a ligar firmemente las partículas de agregado, en consecuencia, la compactación de la mezcla se hace extremadamente difícil cuando se ha enfriado por debajo de 85 °C.

## 2.1.1.2. Temperatura de Mezclado

El mezclado y compactación de las mezclas asfálticas preparadas en el laboratorio de acuerdo al procedimiento Marshall empleando asfaltos convencionales, considera que la temperatura óptima de mezclado es la que corresponde a una viscosidad del ligante de 0,17 Pa.s. y para la compactación, 0,28 Pa.s. (Agnusdei et al., 2010). La temperatura a la cual una mezcla asfáltica es producida, afecta la facilidad de la compactación y el tiempo que le toma a la mezcla alcanzar la temperatura mínima a la cual puede haber densificación (hasta 85 °C). Entre más caliente esté la mezcla, más fluido será el asfalto y menos resistente será la mezcla bajo la compactación. El límite superior para la temperatura de la mezcla es de aproximadamente 163 °C.

## 2.1.1.3. Densidad de compactación

La densidad del pavimento se considera aceptable, o no, cuando se compara con la densidad de referencia establecida en el laboratorio usando una muestra de campo. La densidad del pavimento puede variar en un porcentaje promedio, establecido por las especificaciones, respecto a la densidad de referencia. Existen tres métodos para determinar la densidad de referencia, estos son:

- Porcentaje de la densidad de laboratorio

Este método se aplica a los procedimientos Marshall de compactación en obras donde se dispone de laboratorios de campo. Para cada lote o producción de un día se determina una densidad de referencia tomando la densidad promedio de 4 o más probetas de laboratorio preparadas con mezcla proveniente de los camiones que están entregando en obra mediante procedimientos aleatorios de muestreo (Apéndice C, (Asphalt Institute, 1999)). Las probetas son compactadas en el aparato Marshall de acuerdo a la norma AASHTO T 245 (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2015a).

- Porcentaje de la densidad máxima teórica

La densidad de referencia se determina, en este método, calculando cual sería el peso unitario de mezcla que esta se compacta hasta un punto donde no tenga vacíos, usando la norma AASHTO T 209 (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2020).

- Densidad de la sección de prueba o tramo de control

La densidad de referencia se determina a partir de un tramo de control de pavimento, construida al comienzo de cada capa que se va a colocar. El tramo de control es parte de la obra de pavimentación. Este tramo debe tener por lo menos 150 metros de longitud y estar construida con el mismo ancho y espesor que el resto de la capa que representa. La densidad de referencia se determina al promediar los resultados de un número específico de pruebas de densidad tomadas de lugares aleatorios dentro del tramo de control. Si la densidad de



referencia del tramo de control está por debajo del 92 por ciento de la densidad máxima teórica o 96 por ciento de la densidad de laboratorio para la misma mezcla, entonces la densificación se considera inadecuada (Asphalt Institute, 1999). En Ecuador, se considera aceptable si el promedio de todas las pruebas de densidad no es menor al 96% de la densidad máxima de diseño, siempre que ninguna prueba individual sea menor del 93% (Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones, 2002).

## **2.2. Mezclas Asfálticas Tibias (MAT)**

Los intentos por disminuir las emisiones producidas por las plantas de asfalto identificaron que esto puede lograrse a través de la disminución de la temperatura de las mezclas asfálticas. En Europa a mediados de los años 90, se empezó la investigación de técnicas prácticas y metodologías para alcanzar este objetivo a través de la reducción de temperaturas de mezclado. Estos esfuerzos resultaron en el surgimiento de diversas e innovativas técnicas que actualmente se conocen como Mezclas Asfálticas Tibias (MAT) mismas que pueden ser clasificadas en: 1. Tecnologías basadas en Agua, 2. Tecnología basada en aditivos de base acuosa, 3. Tecnologías basadas en aditivos orgánicos y 4. Tecnologías a base de aditivos químicos.

El uso de las MAT tiende a mejorar la compactación reduciendo la permeabilidad, mejora el desempeño en términos de resistencia a las fisuras y susceptibilidad a la humedad. Además, reduce las emisiones nocivas al ambiente y el consumo de energía. También, se logra obtener beneficios en la compactación ya que permite la extensión de los tiempos de trabajo y mayores distancias de transporte.

### **2.2.1. Temperatura de las mezclas**

La tecnología del uso de aditivos en el asfalto permite que pueda ser mezclado y colocado a temperaturas más bajas que las mezclas en caliente (MAC), en el orden de 100 a 135 °C (National Cooperative Highway Research Program, 2011). Estas tecnologías permiten reducir la viscosidad del cemento asfáltico permitiendo que los agregados se recubran completamente a temperaturas más bajas. Dependiendo de la tecnología y el proceso de producción existen rangos de temperaturas referenciales para las MAT, como puede observarse en la tabla 2.

**Tabla 2. Rango de temperaturas referenciales para las mezclas asfálticas tibias**

PROCESOS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS TIBIAS	COMPAÑÍA	ADITIVOS	TEMPERATURA DE PRODUCCIÓN (EN PLANTA) °C	TONELADAS PRODUCIDAS
<b>ADITIVOS - CERAS</b>				
Sasobit (Fischer-Tropsch cera)	Sasol	Si, en Alemania añadieron un promedio de 2,5	Variados, 120°C - 130°C	>10 millones de toneladas
Asfalto-B (Montan Cera)	Romonta	Si, en Alemania añadieron un promedio de peso de 2,5% al peso	Variados, 115°C - 135°C	Desconocido
Licomont BS100 (aditivo) o subit (ácido adiposo amidas)	Clariant	Si, alrededor del 3% del peso	Variados, 115°C - 135°C	>322500 metros cuadrados desde 1994
3E LT o Ecoflex (propietario)	Colas	Sí, 2% del peso	Variados, 115°C - 135°C	Desconocido
<b>PROCESO ESPUMADO</b>				
Aspha - mini (zeolite)	Eurovia y MHI	Si, alrededor de 0,3% en peso total de la mezcla	Entre 100°C - 135°C	Alrededor de 300000 toneladas
ECOMAC mezcla fría antes de echarla	Screg	Si (tipo y calidad desconocida)	Alrededor de 45°C	Algunas pruebas
LEA, también EBA y EBT (espumoso de una porción de fracción agregada)	LEACO, Fairco, y EIFFAGE Travaux publics	Si, 0,2% en peso de archivador de capa y agente de adhesión)	<100°C	>100000 toneladas
LEAB (espuma directa con aditivo archivador)	BAM	Si, añadieron 0,1% en peso	90°C	siete proyectos comerciales
<b>PROCESO DE ESPUMADO</b>				
LT asfalto (asfalto espumoso con adición de higroscopio) pasta de relleno para mantener funcionalidad	Nymas	Si, añadieron 0,5% - 1% de una pasta de relleno de Higroscopia	90°C	Desconocido

PROCESOS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS TIBIAS	COMPAÑÍA	ADITIVOS	TEMPERATURA DE PRODUCCIÓN (EN PLANTA) °C	TONELADAS PRODUCIDAS
Mezclas tibias de asfalto espumoso		Inyección de agua alta presión	110°C -120°C	>60000 toneladas
<b>APARICIÓN DE TECNOLOGÍAS DE ESTADOS UNIDOS</b>				
EVOTHERM (agregado caliente cubierto con emulsión)	Mead-Westvasco	Si	85°C -115°C	>17000 toneladas
Doble - barrel green	Astec	Inyección de agua a presión vaporizada	116°C -135°C	>4000 toneladas
Advera (zeolite)	PQ corporation	Si, alrededor de 0,25% de peso total de la mezcla	Variados, 120°C - 135°C	>10000 toneladas

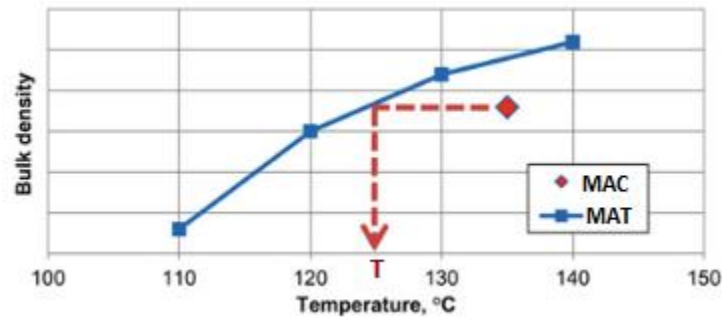
Fuente: (National Cooperative Highway Research Program, 2012)

Los rangos de temperaturas referenciales para las MAT que se mostraron en la tabla 2 son muy variables y se encuentran en el orden de 45°C y 135°C, esta variabilidad depende del proceso de mezcla tibia y el aditivo utilizado. En la planta asfáltica del GAD Municipal de Azogues, la temperatura de mezclado alcanza temperaturas de hasta 180°C.

### 2.2.1.1. Temperatura de compactación

Como puede verse en la figura 1, se presenta la relación de temperatura de compactación a partir de la densidad Bulk.

Figura 1. Relación de temperatura de compactación a partir de la Densidad Bulk



Fuente: Zaumanis (2014)

Como puede observarse en la figura 1, el método para determinar la temperatura óptima de una mezcla asfáltica tibia en laboratorio es comparando la densidad Bulk de la mezcla asfáltica en caliente (MAC) con la de la mezcla tibia (MAT) a diferentes temperaturas, pero con iguales esfuerzos de compactación. La temperatura a la cual las dos densidades son iguales puede ser determinada. Esto puede definirse como la temperatura óptima de compactación (Zaumanis, 2014).

### 2.2.1.2. Densidad de compactación

Debido a las temperaturas iniciales más bajas de las mezclas asfálticas tibias, estas se enfrían a una tasa más lenta que las mezclas asfálticas en caliente lo que provee un rango mayor de compactación. En la mayoría de casos también requiere de un esfuerzo menor de compactación incluso en temperaturas reducidas. En mezclas asfálticas tibias el objetivo es alcanzar una densidad de compactación de 96 por ciento, dependiendo de la metodología constructiva y el aditivo usado el grado de compactación puede ser menor comparado a las mezclas en caliente. Existen casos en las que las no se ha alcanzado el grado de compactación deseado, esto probablemente debido a la reducción de la temperatura de compactación debajo de los límites de trabajabilidad (Zaumanis, 2014).

## 3. DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA DE ASFALTO

### 3.1. Componentes principales de la Planta

Como se puede observar en la figura 2, la planta del GAD Municipal de Azogues es de tipo Contraflujo, marca BOMAG MARINI modelo Magnum 80.

Figura 2. Planta BOMAG MARINI



Fuente: Elaboración propia

En la figura 2 se muestra que la planta cuenta con una capacidad de 80 Ton/hora y reúne todos los requisitos necesarios para el moderno mercado de pavimentación, es computarizada, opera en forma automática, con todos los componentes de la mezcla monitoreados y controlados por sistema automatizado.

#### 3.1.1. Conjunto de los silos dosificadores de árido

En la figura 3 se puede observar los silos dosificadores de la planta de asfalto del GAD Municipal de Azogues.

Figura 3. Silos dosificadores



Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la figura 3, la planta cuenta con un silo dosificador triple (en línea) con 2800 mm de boca y capacidad  $6\text{m}^3$  con una compuerta regulable para flujo de áridos y un sistema de vibrador automático para un silo.

### 3.1.2. Cinta transportadora y dosificadora

En la figura 4, se puede observar las cintas dosificadoras y transportadoras de la planta de asfalto.

Figura 4. Cinta transportadora



Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en la figura 4, las cintas dosificadoras y transportadoras tienen las siguientes características.

- Cintas dosificadoras con lona de ancho de 20" apoyada sobre rodillos en "V" de lubricación permanente de 4"; motorreductor acoplado directamente al eje del tambor; tambores regulables con cojinetes de rodamiento oscilante y blindado; motor eléctrico 3cv.
- Cinta transportadora en viga "U", lona de ancho 24" apoyada sobre rodillos en "V" de 4" blindados, accionada por motor eléctrico 5cv.

### 3.1.3. Secador

Como se puede observar en la figura 5, la planta de asfalto está equipada con un tambor secador mezclador que tiene la finalidad de secar los áridos provenientes de los silos dosificadores y mezclarlos al ligante bituminoso.

Figura 5. Secador



Fuente: Elaboración propia

La figura 5, muestra que la estructura del tambor consiste de un cilindro con dos anillos de acero, que hacen girar el conjunto sobre cuatro rodillos de apoyo. En la zona de secado, está dispuesta una serie de paletas, que hacen que los áridos sean elevados y caigan obligatoriamente a través del flujo de gases calientes provenientes de la llama del quemador. De este modo, cumple su función de retirar la humedad de los áridos, así como calentarlos a la temperatura especificada para mezcla final.

El tambor secador mezclador, tiene un diámetro 1.800/1500 x 7.000 mm, apoyado sobre anillos armados en el cuerpo, cuatro rodillos de apoyo motorizados a través de motorreductor; motores eléctricos 7,5 cv.

### 3.1.4. Cámara de combustión/mezcla quemadora

En la figura 6, se puede observar la cámara de combustión de la planta de asfalto.



**Figura 6. Cámara de combustión**



Fuente: Elaboración propia

La figura 6, muestra que el quemador opera mediante combustible diésel y tiene un sistema de encendido automático a la distancia, accionado a través de botón de toque, instalado en el panel de mando, asegurando con eso agilidad y seguridad en su operación. El quemador modelo CF-04 con atomización del combustible por el conjunto de la bomba de engranajes (motor eléctrico 1 cv) aire comprimido y ventilador centrífugo de baja presión (motor eléctrico 40 cv) generando 39.600 X 103 btu/h. Sistema de encendido y regulado de la llama a partir del tablero de mando.

### **3.1.5. Filtro de mangas**

En la figura 7, se puede observar el filtro de mangas con un sistema de purificación de aire de las plantas de asfalto serie Magnum es del tipo vía seca (filtro de mangas).

Figura 7. Filtro de mangas



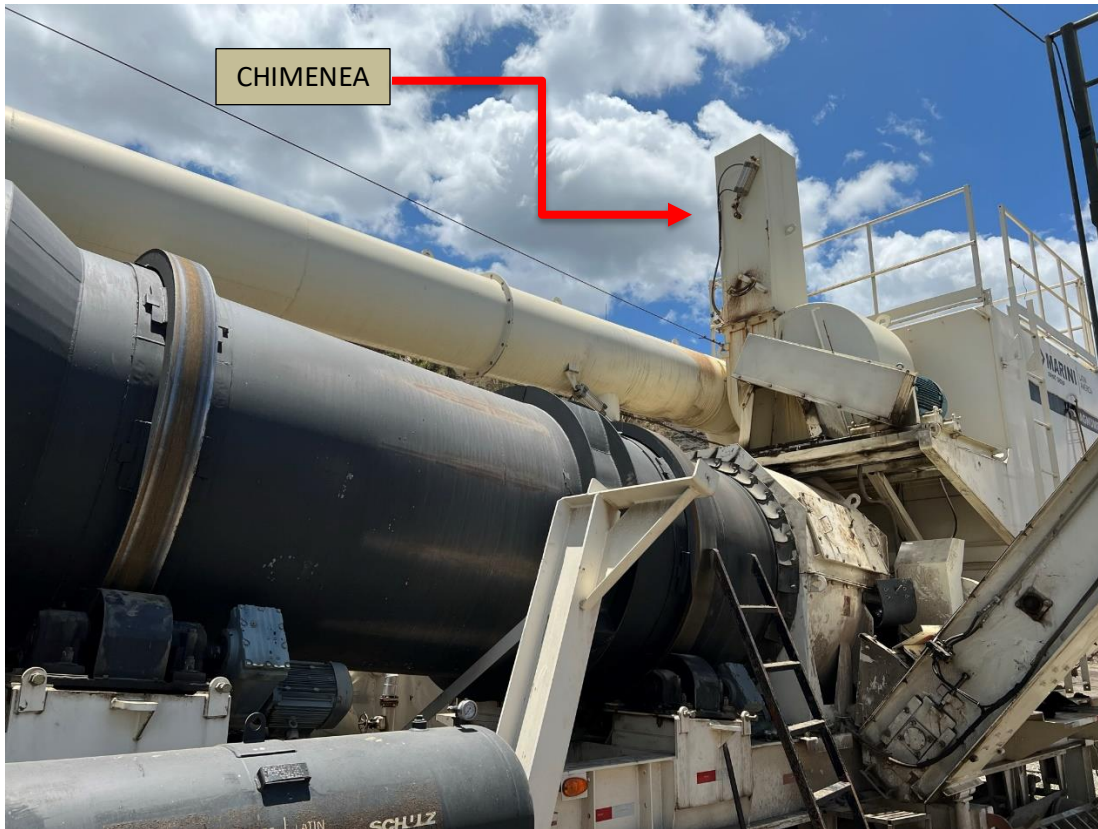
Fuente: (FAYAT GROUP, 2011)

La figura 7 muestra que, básicamente el filtrado se efectúa a través de bolsas de tejido (mangas), que consisten en un sistema recolector de polvo, con la finalidad de retener las partículas sólidas provenientes del secado de los áridos, evitando emanación a la atmósfera e incorporándolos al hormigón asfáltico. El filtro de mangas es un equipo anticontaminación extremadamente eficiente para lugares, donde la emanación de particulados no puede exceder a  $70 \text{ mg/m}^3$ .

### 3.1.6. Chimenea

Como se puede observar en la figura 8, la planta de asfalto cuenta con una chimenea que es la encargada de la extracción del material particulado y vapor de agua.

Figura 8. Chimenea



Fuente: Elaboración propia

En la figura 8 se puede ver que la chimenea forma parte integrante del sistema de extracción es en la chimenea que está localizada la válvula tipo veneciana (dámper), destinada a regular el caudal del extractor.

### 3.1.7. Elevador de arrastre

En la figura 9, se puede observar el elevador de arrastre para transporte de material que sale del secador de áridos de la planta de asfalto.

Figura 9. Elevador de arrastre



Fuente: Elaboración propia

En la figura 9 se puede ver que el elevador de arrastre tiene a la salida del elevador un presillo de almacenamiento que permite la producción continua de la planta durante los intervalos de carga en los camiones. La apertura de este silo se hace por una compuerta accionada por un cilindro neumático.

### 3.1.8. Tubería de asfalto y combustible

Consta de una bomba de asfalto que tiene la finalidad de succionar el ligante bituminoso (CAP) almacenado en el tanque de almacenamiento, transportarlo e inyectarlo en la zona de mezcla del mezclador rotativo externo. El sistema también cuenta con una bomba de combustible que tiene la función de bombear el aceite combustible bajo presión a la punta atomizadora del quemador.

## 3.1.9. Cabina de mando

En la figura 10, se puede observar que la planta de asfalto está equipada con una cabina de mando totalmente equipada para realizar las operaciones de producción.

Figura 10. Cabina de mando



Fuente: Elaboración propia

En la figura 10, se puede ver que la planta de asfalto tiene una cabina de mando incorporada al chasis, además, todas sus operaciones son controladas a partir de un panel de mando computadorizado.

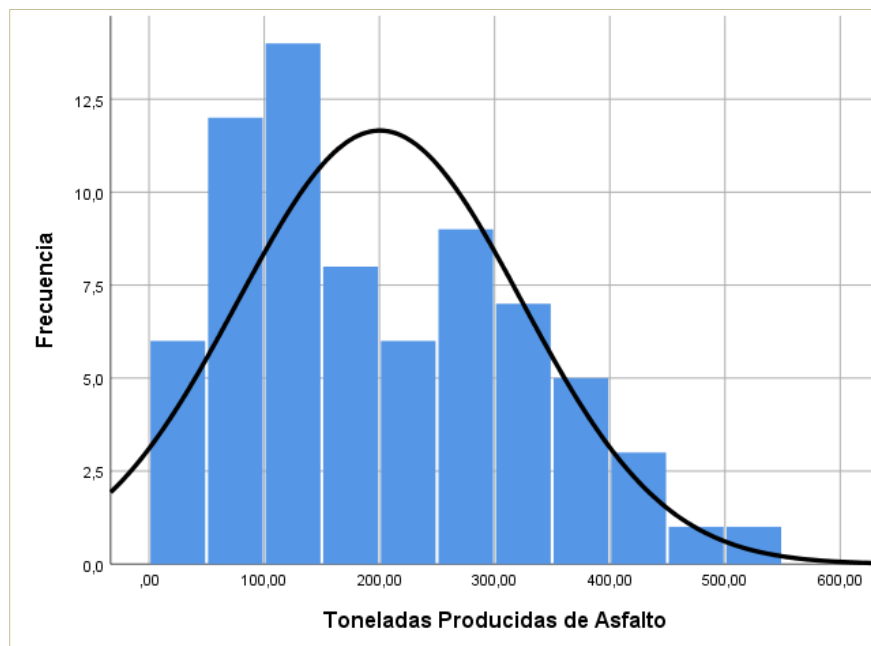
## 3.2. Producción

Se realizó la recopilación de información de operación de la planta de asfalto para poder generar una base estadística de producción de asfalto del 2021, cantidades de material pétreo, consumos de combustibles, agua y energía eléctrica de tal manera de establecer los valores promedio de consumo de la Planta de Asfalto.

### 3.2.1. Producción de asfalto

La planta de asfalto cuenta con personal de operación de la misma, el cual realiza un control y registro de los volúmenes procesados de asfalto, para este estudio se procedió a tabular la información de producción correspondiente al último año de funcionamiento para generar un gráfico de distribución de frecuencias obteniendo una media de producción diaria equivalente a 200.35 toneladas, tal como se ve en la figura 11.

Figura 11. Toneladas producidas de asfalto

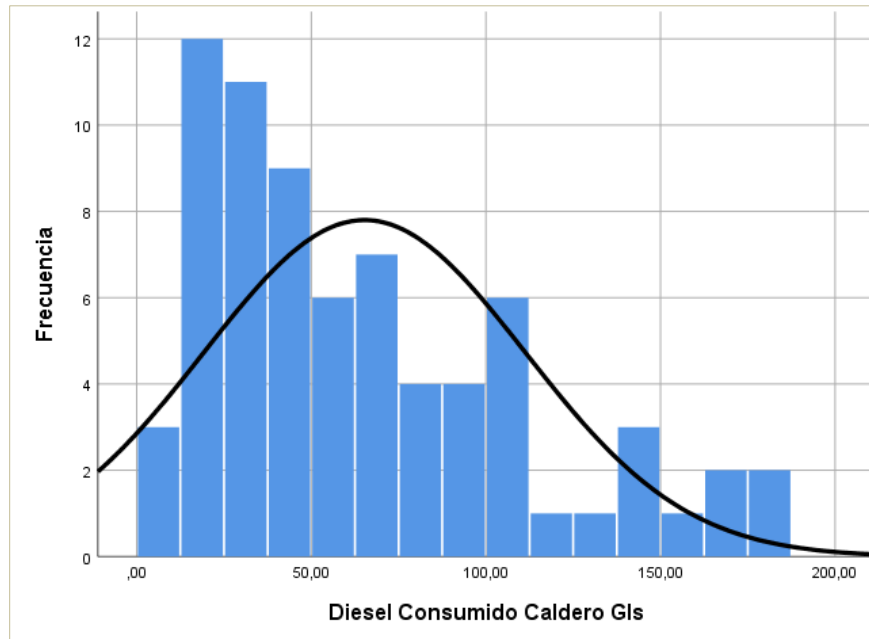


Fuente: (Planta de Asfalto GAD Azogues, 2022)

### 3.2.2. Consumo de diésel

Durante la producción de asfalto se consumen diferentes recursos, uno de ellos el combustible para el caldero y el quemador. La cantidad de diésel utilizada en cada día de producción es registrada por el operador de la planta como puede observarse en la figura 12.

Figura 12. Consumo de diésel



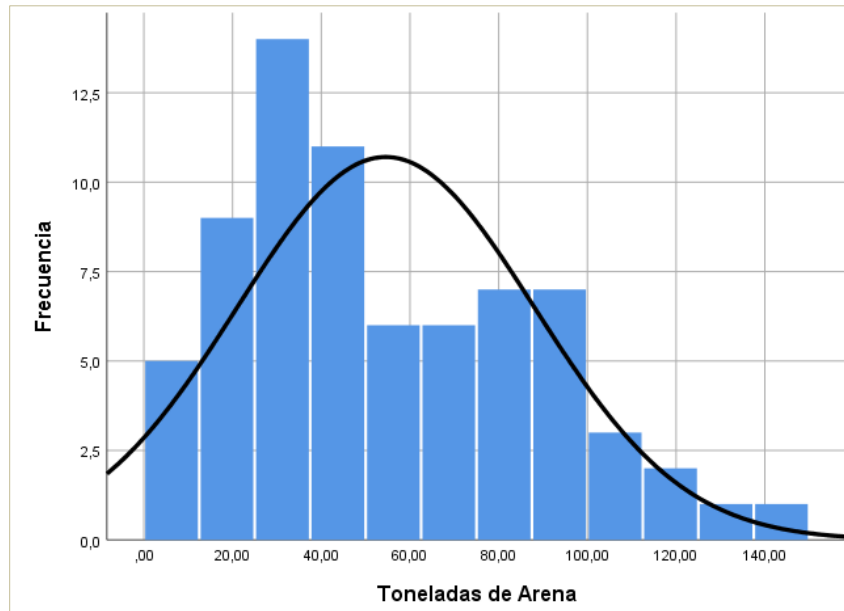
Fuente: (Planta de Asfalto GAD Azogues, 2022)

Como puede observarse en la figura 12, a partir de los datos recopilados se establece que el consumo de combustible promedio por cada día de producción es de 65,24 galones diésel.

### 3.2.3. Consumo de arena

El consumo de arena registrado para la elaboración de la mezcla asfáltica se presenta mediante el siguiente histograma de la figura 13.

**Figura 13. Consumo de arena**



Fuente: (Planta de Asfalto GAD Azogues, 2022)

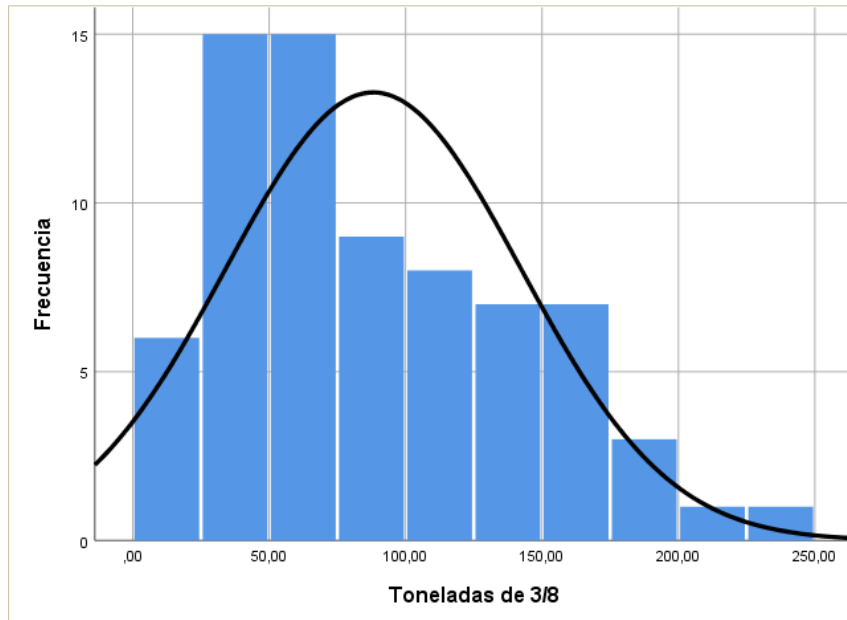
Como puede observarse en la figura 13, el consumo de arena registrado para la elaboración de la mezcla asfáltica fue un promedio de 54,54 toneladas por día de producción.

### 3.2.4. Consumo de material de 3/8 pulgadas

Como puede observarse en la figura 14, se presenta el histograma de consumo de agregado de 3/8 de pulgada.



Figura 14. Consumo de agregado de 3/8 pulgadas en la planta asfáltica



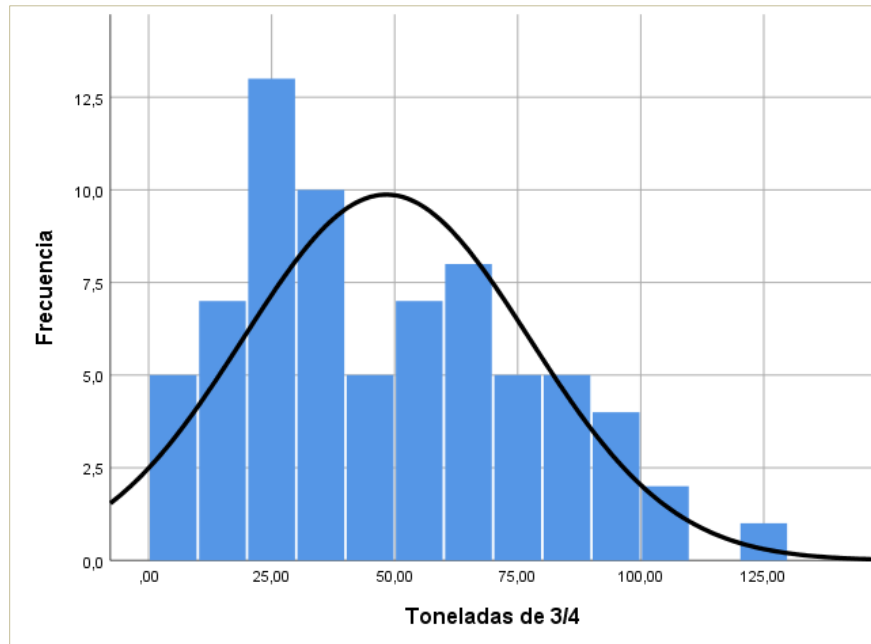
Fuente: (Planta de Asfalto GAD Azogues, 2022)

Como puede observarse en la figura 14, el consumo de agregado de 3/8 de pulgada registrado para la elaboración de la mezcla asfáltica correspondiente al último año de producción fue un promedio de 88,17 toneladas por día de producción.

### 3.2.5. Consumo de material de 3/4 pulgadas

El histograma de consumo de agregado de 3/4 de pulgada se muestra en la figura 15.

Figura 15. Consumo de agregado de 3/4 pulg en la planta asfáltica



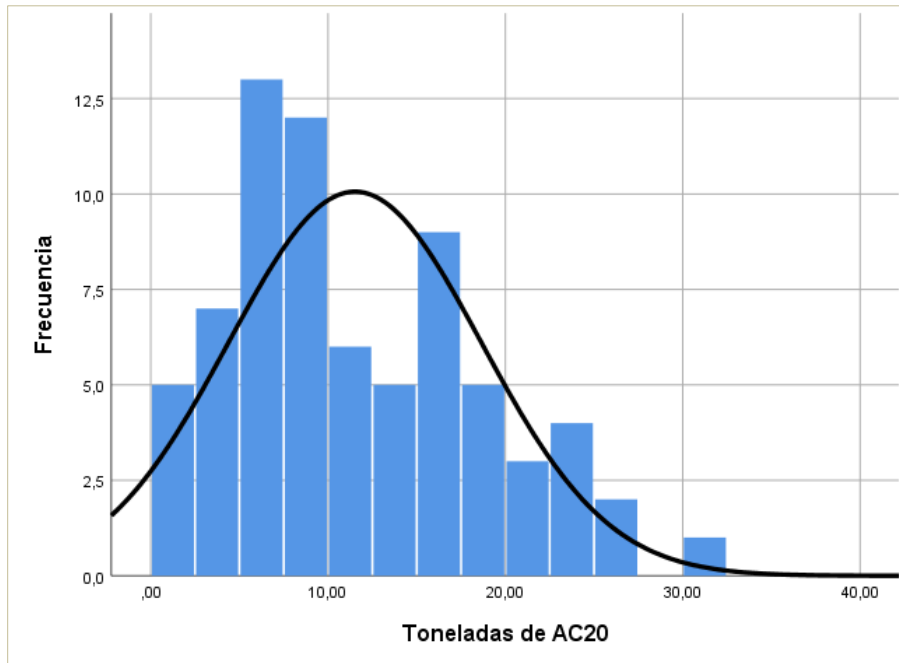
Fuente: (Planta de Asfalto GAD Azogues, 2022)

Como puede verse en la figura 15, el consumo de agregado de 3/4 de pulgada registrado para la elaboración de la mezcla asfáltica correspondiente al último año de producción fue un promedio de 48,29 toneladas por día de producción.

### 3.2.6. Consumo de AC20

Como puede observarse en la figura 16, se presenta el histograma de consumo de agregado de AC-20 en la planta asfáltica.

Figura 16. Consumo de AC-20 en la planta asfáltica



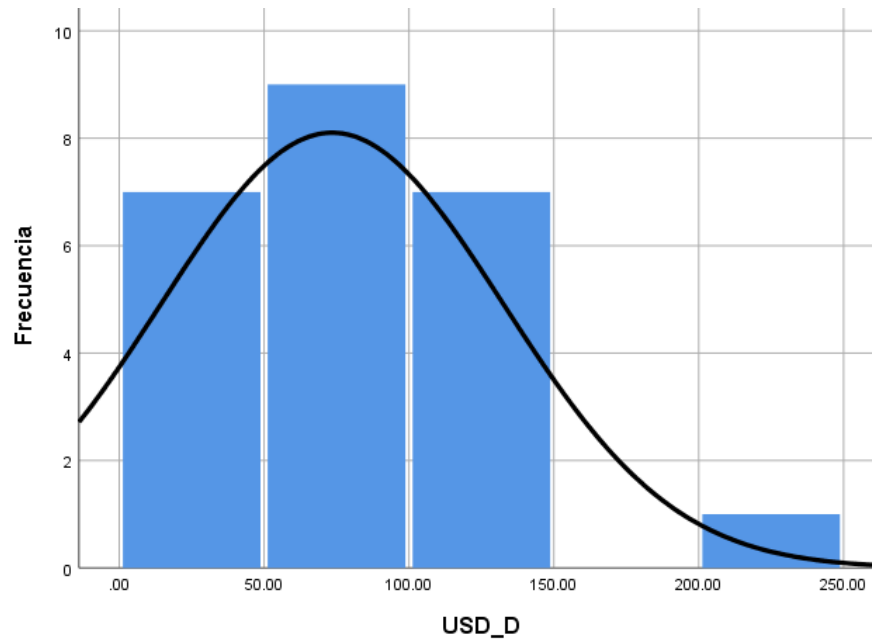
Fuente: (Planta de Asfalto GAD Azogues, 2022)

Como puede observarse en la figura 16, el consumo de cemento asfáltico AC-20 registrado para la elaboración de la mezcla asfáltica correspondiente al último año de producción fue un promedio de 11,51 toneladas por día de producción.

### 3.2.7. Consumo de energía eléctrica

Como puede verse en la figura 17, se presenta el histograma de consumo de energía eléctrica en la planta asfáltica.

Figura 17. Consumo de energía eléctrica en la planta asfáltica



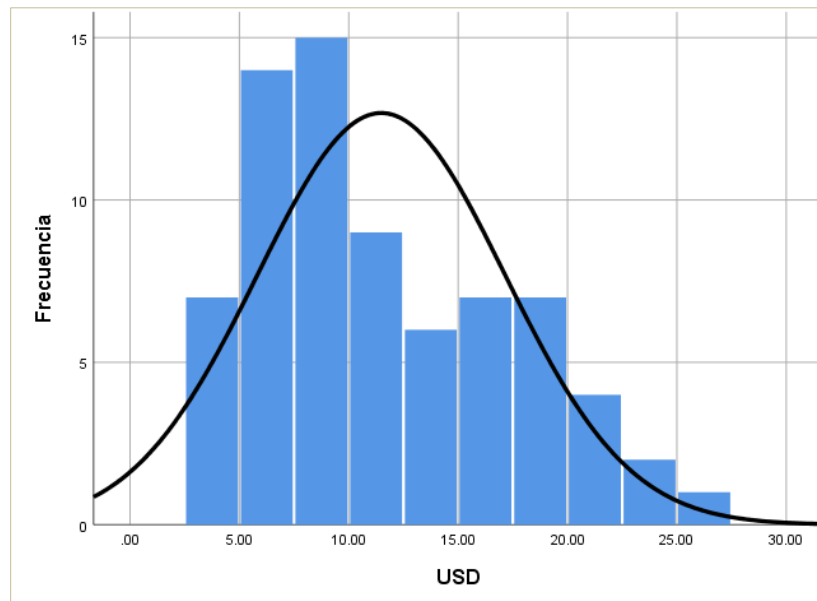
Fuente: (Planta de Asfalto GAD Azogues, 2022)

Como se observa en la figura 17, a partir de las temperaturas requeridas, los registros de consumo de energía y el pliego tarifario de la Empresa Eléctrica Azogues, se pudo establecer que el costo promedio requerido por día de producción es de 73,48 USD que equivale a 375,58 kWh.

### 3.2.8. Consumo de agua

Como puede verse en la figura 18, se presenta el histograma de consumo de agua en la planta asfáltica.

Figura 18. Consumo de agua en la planta asfáltica



Fuente: (Planta de Asfalto GAD Azogues, 2022)

Como se observa en la figura 18, la cantidad de agua que la planta requiere para su funcionamiento y producción de asfalto de acuerdo a las emisiones de agua registradas por la Empresa Municipal de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento Ambiental EMAPALEP se pudo establecer que el costo promedio requerido por día de producción es de 11,48 USD, equivalente a 3,25 m<sup>3</sup> de agua promedio.

De acuerdo a los datos indicados anteriormente se puede concluir que la producción promedio diaria de mezcla asfáltica es de 200,35 toneladas, el consumo medio de combustible diésel es de 65,24 galones, el agregado arena es de 54,54 toneladas, el consumo de material de 3/8 de pulgada es de 88,17 toneladas, el uso de agregado de 3/4 de pulgada es de 48,29 toneladas y el consumo de cemento asfáltico AC-20 es de 11,51 toneladas. En lo referente a consumo de energía eléctrica el costo consumo medio requerido por día de producción es de 375,58 kWh, mientras que el volumen medio de agua requerido es de 3,25 m<sup>3</sup> por día de producción.

La planta BOMAG MARINI Magnum 80, tiene una producción teórica de 80 toneladas por hora, es decir, alcanza un volumen de producción diario de 640 toneladas. El valor real de producción de 200,35 toneladas por día, es un valor promedio que puede variar en más o en menos y obedece a la necesidad real de producción del GAD Municipal de Azogues, sin embargo, este valor puede aumentar de acuerdo a la necesidad. En lo referente al consumo de agregados, obedecen a un diseño de mezcla que está en función de la necesidad de producción.

En cuanto al consumo de combustibles y energía eléctrica, los valores actuales se pueden disminuir mediante la aplicación de nuevas tecnologías como las mezclas asfálticas tibias.

## 4. DISEÑO DE PAVIMENTO Y MEZCLAS ASFÁLTICAS TIBIAS Y EN CALIENTE

### 4.1. Diseño de Pavimento por el Método de AASHTO

A partir de los resultados de la AASHTO ROAD TEST (Highway Research Board, 1962), el comité de diseño de la AASHTO elaboró una guía para el diseño de pavimentos rígidos y flexibles (American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993). Las principales consideraciones de diseño se describen en el apéndice A.

### 4.2. Diseño de Mezclas Asfálticas Tibias

Según el Reporte 714 del NCHRP sobre las Consideraciones especiales de diseño de mezclas y métodos para mezclas asfálticas tibias indica que *“(...) Aunque los procedimientos descritos han sido seleccionados específicamente para su uso en el diseño mezclas de gran densidad, la mayoría se puede aplicar al diseño de otros tipos de mezclas con poca o ninguna modificación. (...)”* (National Cooperative Highway Research Program, 2012) además se indica *“(...) la investigación realizada en NCHRP Project 9-43 (National Cooperative Highway Research Program & Bonaquist, 2009), “Prácticas de diseño para asfalto de mezclas en caliente”, concluyó que solo se necesitan modificaciones menores para abordar prácticas de diseño de mezclas asfálticas tibias (MAT). (...)”*

Como se puede observar en la tabla 3, esta resume los pasos de diseño de mezclas asfálticas y sus principales diferencias.

**Tabla 3. Pasos de diseño para las mezclas asfálticas en caliente y tibias**

Paso	Descripción	Diferencias entre MAT y MAC
1	Recopilar información	1. Proceso de MAT 2. Rata de aditivo 3. Temperatura de producción 4. Temperatura de compactación
2	Seleccionar Cemento Asfáltico	1. Límite recomendado en la rigidez a alta temperatura del aglutinante 2. Puede considerar la mejora del grado de baja temperatura al usar tablas de mezcla
3	Determinar el grado de compactación	Igual que mezclas asfálticas en caliente
4	Seleccionar tamaño máximo nominal del agregado	Igual que mezclas asfálticas en caliente
5	Determinar el VAM y el valor de diseño de vacíos	Igual que mezclas asfálticas en caliente

Paso	Descripción	Diferencias entre MAT y MAC
6	Calcular el contenido de asfalto	1. Menor absorción de asfalto debido a temperaturas más bajas
7	Calcular el volumen de agregado	Igual que mezclas asfálticas en caliente
8	Proporciones de agregados para las pruebas de la mezcla	Igual que mezclas asfálticas en caliente
9	Calcular las proporciones de pesos de la mezcla por peso y verificar Dust/Binder Ratio	Igual que mezclas asfálticas en caliente
10	Evaluar y Refinar las mezclas de prueba	1. Procesos de elaboración de muestras 2. Menor temperatura de envejecimiento a corto plazo más baja 3. Evalúe el recubrimiento y la compactibilidad en lugar de las temperaturas de mezcla y compactación basadas en la viscosidad
11	Realizar el reporte del diseño de la mezcla	Igual que mezclas asfálticas en caliente

Fuente: (National Cooperative Highway Research Program, 2012)

En la tabla 3 se observa que el diseño de una mezcla asfáltica tibia es muy similar al diseño de una mezcla asfáltica en caliente. La fabricación de muestras en el Paso 10 de evaluar y perfeccionar las mezclas de prueba, es la principal diferencia para el diseño de MAT en comparación con MAC. Los procedimientos para la fabricación de muestras son proceso específico; por lo tanto, la información sobre el proceso MAT que se utilizará y las temperaturas planificadas de producción y compactación deben recopilarse en el Paso 1 al principio del proceso de diseño de la mezcla MAT. Dado que la absorción de aglutinante es menor en las mezclas de MAT, la absorción más baja debe tenerse en cuenta al estimar el contenido de la carpeta de destino en el Paso 6. Otra diferencia importante entre el diseño MAT y MAC se produce en la selección de aglutinantes en el paso 2. El grado de alta temperatura de los aglutinantes reciclados debe ser inferior a la temperatura de compactación MAT planificada para promover la mezcla de cemento asfáltico de lo nuevo y reciclado. Al usar tablas de mezcla, el grado de baja temperatura del nuevo aglutinante puede ser mejorado debido al menor envejecimiento que se produce a temperaturas MAT. Las siguientes secciones proveer discusiones paso a paso de las similitudes y diferencias entre MAT y MAC. Estas van seguidas de un ejemplo de diseño MAT.

#### 4.2.1. Recopilar Información

El diseño de una MAT requiere de la misma información del tráfico de diseño, condiciones del clima en el lugar de construcción, agregados y cementos asfálticos disponibles y tipo de pavimento como el diseño de una mezcla MAC. Además, el diseño MAT requiere información sobre el proceso MAT y las temperaturas planificadas de mezcla y compactación porque la fabricación de muestras de MAT en el laboratorio es un proceso específico, simulando de manera aproximada, la producción

de la mezcla en el campo. La información que debe recopilarse para diseñar mezclas de MAT y comparar esta información con la requerido para diseñar mezclas de MAC se describe en la tabla 4.

**Tabla 4. Información requerida para diseños de mezclas MAT (en tibio) y MAC (en caliente)**

Tipo de Información	Detalle	MAT	MAC
<b>En sitio</b>	Ubicación	X	X
	Clima	X	X
	Tráfico de Diseño	X	X
	Periodo de diseño	X	X
	Requerimientos especiales de desempeño	X	X
<b>Construcción</b>	Espeor	X	X
	Tiempo de Transporte	X	X
	Temperatura de colocación	X	X
	Especificaciones especiales requeridas	X	X
	Requerimientos especiales de construcción	X	X
<b>Pavimento</b>	Tipo de Mezcla	X	X
	Distancia de la superficie del pavimento	X	X
<b>Agregado</b>	Tamaño máximo nominal	X	X
	Gradación	X	X
	Gravedad específica y absorción	X	X
	Propiedades de la especificación	X	X
<b>Cemento asfáltico</b>	Grado de rendimiento	X	X
	PG Plus, si se aplicase	X	X
	Tipo de modificación, si se aplicase	X	X



Tipo de Información	Detalle	MAT	MAC
	Grado de rendimiento continuo para Análisis de gráfico de mezcla	X	X
	Análisis de gráfico de mezcla	X	X
	Temperaturas de mezcla y compactación	NA	X
<b>Anti-Strip Additives</b>	Tipo de aditivo	X	X
	Tasa de dosificación	X	X
<b>MAT</b>	Proceso de MAT	X	NA
	Tipo de Aditivo	X	NA
	Tasa de dosificación del aditivo	X	NA
	Temperatura de producción	X	NA
	Temperatura de Compactación	X	NA

Fuente: (National Cooperative Highway Research Program, 2012)

En la tabla 4 se puede observar que para el diseño de las MAT se requiere información referente al proceso de MAT, aditivo, temperatura de producción y compactación. La selección del proceso MAT la realiza mejor el productor en consulta con la agencia de especificación y los proveedores de procesos MAT considerando (1) los datos de rendimiento disponibles, (2) el costo de los aditivos de mezcla tibia requeridos, (3) las temperaturas planificadas de producción y compactación, (4) las tasas de producción planificadas, (5) las capacidades de la planta existente y (6) las modificaciones de la planta y el laboratorio necesarias para utilizar con éxito el proceso MAT.

A los efectos del diseño de mezclas, los diversos procesos de MAT se pueden agrupar en cuatro categorías genéricas:

1. Aditivos mezclados con el aglutinante,
2. Aditivos añadidos a la mezcla,
3. Mezclas de áridos húmedos, y
4. Asfalto espumado.

Las técnicas de fabricación de muestras son algo diferentes para cada una de estas categorías. Dado que las temperaturas de mezcla y compactación basadas en la viscosidad no son aplicables a muchos procesos de MAT, las temperaturas de producción y compactación planificadas se utilizan en el proceso de diseño de la mezcla para evaluar el recubrimiento y la compactabilidad / trabajabilidad del MAT. Se debe enfatizar que las temperaturas óptimas de producción y compactación son diferentes para los diversos procesos de MAT y se deben considerar cuidadosamente al seleccionar las temperaturas de producción y compactación que se utilizarán en el proceso de diseño de MAT.

## 4.2.2. Selección del Cemento Asfáltico

El grado de aglutinante utilizado en las mezclas de MAT con menos del 15% de aglutinante reciclado es el mismo que el de una mezcla de MAC diseñada para las mismas condiciones. El cambio en las propiedades de alta y baja temperatura del aglutinante debido a temperaturas más bajas de MAT no es suficiente para justificar un cambio en el grado del aglutinante usado en la mezcla. El grado de aglutinante utilizado en MAT debe ser (1) el grado requerido por la agencia que especifica para MAC o (2) seleccionado considerando:

1. El clima en la ubicación del proyecto,
2. Se requiere un ajuste de pendiente de alta temperatura para el nivel y la velocidad del tráfico, y
3. Ajustes de grado de alta temperatura para construcción temporal.

El grado de aglutinante utilizado en la mayoría de las mezclas de MAT será el mismo que el utilizado en una mezcla de MAC comparable.

## 4.2.3. Determinar el nivel de compactación

Es bien conocido que las MAT son mezclas más fáciles de compactar que las MAC, sin embargo, el nivel de compactación de diseño debe ser igual en ambos tipos de mezclas (National Cooperative Highway Research Program & Bonaquist, 2009). Diseños de mezclas MAT y MAC con menos del 1% de absorción de asfalto diseñados conforme el Reporte 673 de la NCHRP (National Cooperative Highway Research Program, 2012) han presentado porcentajes óptimos de asfalto y propiedades volumétricas esencialmente iguales.

Como se muestra en la tabla 5, los niveles de compactación para MAT y MAC son:

**Tabla 5. Niveles de compactación de diseño para MAT y MAC**

Tráfico de diseño (millones de ESALs)	$N_{design}$
< 0,3	50
0,3 a < 3	75
3 a < 10	100
10 a < 30	100
≥ 30	125

Fuente: (National Cooperative Highway Research Program, 2012)

En la tabla 5 se observa que el nivel de compactación para las mezclas depende del tráfico de diseño y varía entre un 50% y 125%.

## 4.2.4. Selección del tamaño de agregado máximo nominal

Se debe usar la misma mezcla de tamaño de agregado máximo nominal al diseñar la mezcla como MAT o MAC. Por lo general, el tamaño máximo nominal viene dado por la agencia respectiva (National Cooperative Highway Research Program, 2011). Al igual que con el MAC, se deben usar tamaños de agregado más pequeños para usar mezclas de capa y cuando se desee una mayor durabilidad; esto ayudará a proporcionar una mezcla que se compacta fácilmente, tiene baja permeabilidad y resiste el agrietamiento por fatiga.

Los tamaños máximos nominales del agregado para mezclas asfálticas en caliente son los que pueden observarse en la tabla 6.

**Tabla 6. Tamaños máximos nominales de agregado recomendados para Mezclas Asfálticas en Caliente**

Aplicación	Recomendado mm	Mínimo Espesor, mm	
		Mezclas bien graduadas	Mezclas mal graduadas
Mezclas de Recapeo	4,75	15- 25	20 - 25
	9,5	30 - 50	40 - 50
	4,75	15 - 25	20 - 50
	9,5	30 - 50	40 - 50
Mezclas para Carpeta	12,5	40 - 65	50 - 65
Mezclas para Capas intermedias	19	60 - 100	75 - 100
	25	75 - 125	100 - 125
	19	60 - 100	75 - 100
	25	75 - 125	100 - 125
Mezclas para Capas Base	37,5	115 - 150	150
Mezclas abundantes para Capas Base	9,5	30 - 50	40 - 50
	12,5	40 - 65	50 - 65

Fuente: (National Cooperative Highway Research Program, 2012)

Los datos mostrados en la tabla 6 indican según la aplicación de la mezcla asfáltica, valores mínimos de tamaño de agregado y espesores mínimos de acuerdo a mezclas bien graduadas y mal graduadas.

## 4.2.5. Determinación de los valores de VAM de diseño

En el procedimiento de diseño, el porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VAM) objetivo y el contenido de huecos de aire de diseño se utilizan para calcular inicialmente el contenido de aglutinante de diseño para la mezcla usando un valor supuesto para la absorción de aglutinante. A continuación, se preparan mezclas de prueba utilizando el contenido de aglutinante de diseño para determinar una gradación agregada que proporcione el contenido de huecos de aire de diseño. Pequeños ajustes al contenido de aglutinante de diseño también pueden ser necesario para tener

en cuenta las diferencias entre la absorción de aglutinante inicialmente supuesta y la absorción real en las mezclas de prueba.

Como se puede ver en la tabla 7, el diseño de mezclas de MAT, se deben usar los mismos valores mínimos, máximos y objetivo de VAM que se describen para MAC.

**Tabla 7. Requerimientos de vacíos en el agregado mineral (VAM) para mezclas densas**

Agregado (mm)	Mínimo VAM		
	(%)	Máximo VAM (%)	VAM Objetivo (%)
4,75	16,0	18,0	17,0
9,50	15,0	17,0	16,0
12,50	14,0	16,0	15,0
19,00	13,0	15,0	14,0
25,00	12,0	14,0	13,0
37,50	11,0	13,0	12,0

Fuente: (National Cooperative Highway Research Program, 2012)

Nota. Se puede incrementar los valores máximos y mínimos de VAM hasta 1% para obtener mezclas con mayor contenido de asfalto lo que puede mejorar la compactación de campo, fatiga, resistencia y durabilidad.

Los datos que se mostraron en la Tabla 7 indican que, un VAM de diseño más alto aumentará el contenido de aglutinante de la mezcla, mejorando así la compactabilidad, durabilidad y resistencia al daño por fatiga, pero disminuyendo la resistencia a la formación de surcos. La disminución del VAM de diseño tendrá el efecto opuesto sobre la compactabilidad, durabilidad, resistencia al daño por fatiga y resistencia a la formación de surcos. El contenido objetivo de huecos de aire para mezclas de MAT debe ser 4,0% con un rango aceptable de 3,5 a 4,5%. Los huecos de aire de diseño más bajos aumentarán el contenido de aglutinante de diseño de la mezcla, mejorando así la compactabilidad, durabilidad y resistencia al daño por fatiga, pero disminuyendo la resistencia a la formación de surcos. Los huecos de aire de diseño más altos tendrán el efecto opuesto sobre la compactabilidad, durabilidad, resistencia al daño por fatiga y resistencia a la formación de surcos.

#### 4.2.6. Cálculo del contenido de asfalto

El contenido de ligante objetivo por volumen para MAT se calcula de la misma manera que para MAC: VAM objetivo menos los huecos de aire de diseño más el volumen de ligante absorbido. Las temperaturas más bajas para las mezclas de MAT dan como resultado una menor absorción de aglutinante en comparación con el MAC. En el Proyecto NCHRP 9-43 (National Cooperative Highway Research Program & Bonaquist, 2009), la absorción de aglutinante para las mezclas de MAT fue aproximadamente el 90% de la de MAC.

Una estimación razonable del volumen de aglutinante absorbido en las mezclas de MAT es el 45% del volumen de agua absorbido por los agregados utilizados en la mezcla. Esta estimación se da en la ecuación siguiente para estimar el contenido de la carpeta por volumen para MAT mezclas.

$$V_b = VMA - VA + \left(1 - \frac{VMA}{100}\right) \left(\frac{G_{sb} P_{wa}}{2.2}\right)$$

Donde:

*V<sub>b</sub>*: Porcentaje del contenido de asfalto (%)

*VAM*: Porcentaje de vacíos en el agregado mineral (%)

*G<sub>sb</sub>*: Peso específico Bulk del agregado (adimensional)

*P<sub>wa</sub>*: Porcentaje de absorción de agua del agregado (%)

Las MAT al igual que con el diseño de mezclas de MAC, el contenido de aglutinante por volumen calculado en este punto es una estimación que se refinará durante el Paso 10, Evaluar y refinar las mezclas de prueba, del proceso de diseño. Para el procesamiento por lotes, el contenido de aglutinante en volumen debe convertirse en contenido de aglutinante en peso utilizando el peso específico del aglutinante y los agregados en la mezcla.

#### 4.2.7. Cálculo del volumen de agregado

Para MAT, el contenido agregado total por volumen se calcula de la misma manera que se describe para MAC: 100% menos VAM objetivo. La determinación del contenido total de áridos por peso dependerá de los valores de gravedad específica del árido y de la mezcla específica de áridos que se utilice en cada mezcla.

#### 4.2.8. Proporción de agregados para mezclas de prueba

La dosificación de agregados para mezclas de prueba de MAT es la misma que se describe en el para el diseño de mezclas de MAC. El procedimiento de diseño de la mezcla establece el contenido de aglutinante en un valor que proporcionará el VAM adecuado una vez que se cumpla con el contenido de vacío de aire del diseño. Por lo tanto, se puede pensar que la dosificación de los agregados determina la combinación de agregados que proporcionará el contenido de huecos de aire adecuado para la mezcla.

La mayoría de los trabajos de diseño de mezclas MAT podrán adaptar un proceso MAT específico a un diseño MAC existente. Para este tipo de diseño, no es necesario cambiar las proporciones agregadas de las utilizadas en el diseño MAC; a menos que la absorción del aglomerante sea muy alta, las propiedades volumétricas de las mezclas de MAT y MAC serán muy similares. Al realizar un diseño MAT de una mezcla de MAC. Luego, el diseño procede como se lo hace para MAC,

determinando el contenido de huecos de aire y VAM para lotes de prueba, y luego haciendo más refinamientos en la gradación de agregados según sea necesario, hasta que se cumplan las propiedades de mezcla deseadas.

Los agregados utilizados en MAT deben cumplir con las propiedades de especificación de agregados dadas para MAC. Como se puede ver en las tablas 8-10, existen propiedades de especificación de agregados: (1) partículas planas y alargadas en el agregado grueso; (2) angularidad de agregado fino (FAA); y (3) contenido de arcilla del agregado fino (equivalente de arena).

**Tabla 8. Criterios para partículas planas y elongadas**

ESALs de diseño (millones)	Porcentaje máximo de partículas planas y elongadas 5:1
< 0,30	-
0,3 a < 3,0	10
3 a < 10	10
10 a < 30	10
30 o mas	10

Fuente: (National Cooperative Highway Research Program, 2012)

**Tabla 9. Requerimientos de angularidad para agregado fino**

ESALs de diseño (millones)	Espesor de la capa de Pavimento desde la superficie, mm	
	0 a 100 <sup>a</sup>	Superior a 100 <sup>a</sup>
< 0,30	* <sub>b</sub>	-
0,3 a < 3,0	40	-
3 a < 10	45 <sup>c</sup>	40
10 a < 30	45 <sup>c</sup>	45 <sup>c</sup>
30 o mas	45 <sup>c</sup>	45 <sup>c</sup>

Fuente: (National Cooperative Highway Research Program, 2012)

Notas:

a Si menos del 25% de una construcción está entre 100m de la superficie, la elevación se considera por debajo de 100mm para diseños del diseño de mezcla.

b No hay requerimientos de diseño debajo de un tráfico de 0.30 millones de ESALs, esta consideración deberá requerir un mínimo de contenido de vacíos de 40% para un diámetro máximo nominal de agregado para la mezcla de 4,75mm.

c Para el requerimiento de 45 se puede reducir a 43 si la experiencia de las condiciones locales y materiales indican que esto producirá MAC con adecuadas resistencias bajo un determinado nivel de tráfico de diseño.

**Tabla 10. Requerimientos del máximo contenido de arcilla**

ESALs de diseño (millones)	Valor mínimo de equivalente de arena (%)
< 0,30	40
0,3 a < 3,0	40
3 a < 10	45
10 a < 30	45
30 o mas	50

Fuente: (National Cooperative Highway Research Program, 2012)

Los datos que se vieron en las tablas 8-10, se debe tener en cuenta que, los requisitos de especificación de agregados se aplican a los agregados mezclados y deben medirse en la mezcla de diseño final de agregados.

#### **4.2.9. Cálculo de proporciones de la mezcla de prueba por peso y verificación la proporción de polvo a aglutinante**

Este paso en el diseño de mezclas de MAT es idéntico al descrito para MAC.

Este paso implica calcular lo siguiente para cada combinación de prueba de agregados:

1. Gravedad específica de la mezcla de agregados
2. Porcentaje en peso de aglutinante en la mezcla
3. Porcentaje en peso del agregado total en la mezcla
4. Contenido de aglutinante efectivo en peso

5. Porcentaje en peso de cada agregado en la mezcla

6. Porcentaje en peso de polvo mineral en la mezcla

7. Proporción de polvo a aglutinante eficaz

Las mezclas de MAT deben cumplir con los requisitos para la relación entre el polvo y el contenido de aglutinante efectivo que se indican para MAC. Estos requisitos se muestran en la tabla 11.

**Tabla 11. Requerimientos para la proporción polvo/asfalto**

Agregado para la mezcla, mm	Rango permitido para Polvo/Proporción de asfalto, por peso
> 4,75	0,8 a 1,6 $\beta$
4,75	0,9 a 2,0

Fuente: (National Cooperative Highway Research Program, 2012)

Nota.

$\beta$  Según se requiera el Rango permitido para Polvo/Proporción de asfalto puede bajar de 0,6 a 1,2 si hay garantía de las condiciones y materiales. La proporción polvo/asfalto no puede reducirse si los requerimientos de VAM son aumentados sobre los valores estándar de la tabla B-2

#### 4.2.10. Evaluar y perfeccionar las mezclas de prueba

Este paso implica la preparación y evaluación de muestras de laboratorio de MAT. El procedimiento es similar que en MAC con ligeras modificaciones. La tabla 12 resume los pasos para el diseño de MAT y MAC.

**Tabla 12. Comparación de los procesos de elaboración para diseño de muestras de prueba de MAC y MAT**

Paso	Descripción	MAC	MAT	Comentario
1	Cálculo del peso del lote	X	X	Se debe calcular el contenido del aditivo para MAT
2	Agregados del lote	X	X	Se debe guardar aditivo para algunos procesos
3	Calentamiento de agregados y el cemento asfáltico	X	X	Usar la temperatura planificada para la MAT
4	Mezcla de agregados y aglutinante	X	X	El proceso es específico de MAT
5	Procedimientos de acondicionamiento de la mezcla	X	X	MAT usa temperaturas más bajas



Paso	Descripción	MAC	MAT	Comentario
6	Muestras de laboratorio para compactación	X	X	MAT usa temperaturas más bajas
7	Cálculo de composición volumétrica de las muestras	X	X	
8	Ajuste de las proporciones de agregado para alcanzar los requerimientos volumétricos	X	X	
9	Evaluar el recubrimiento y compactabilidad	NA	X	Utilizado en el diseño MAT en lugar de las temperaturas de mezclas y compactación basadas en la viscosidad
10	Pruebas de desempeño	X	X	La sensibilidad a la humedad para todas las mezclas, la resistencia al tráfico de diseño de 3 millones de ESALs o más

Fuente: (National Cooperative Highway Research Program, 2012)

Las modificaciones que se muestran en la tabla 12, necesarias para el diseño MAT son:

1. Se debe calcular el aditivo MAT.
2. La mezcla de laboratorio se realiza a la temperatura de producción planificada.
3. La temperatura de acondicionamiento a corto plazo para MAT es la temperatura de compactación planificada.
4. La compactación de laboratorio se realiza a la temperatura de compactación planificada.
5. El diseño de MAT incluye una evaluación del recubrimiento y la compactabilidad utilizando las temperaturas de producción y compactación planificadas.

Estas modificaciones se analizan en las secciones siguientes.

- **Calcular pesos de lote**

Algunos procesos de MAT requieren que se agregue un aditivo al aglutinante o a la mezcla. El proveedor del proceso MAT puede especificar la cantidad de aditivo necesaria como porcentaje en peso de aglutinante o mezcla total. Por ejemplo, en el caso del aditivo Zydex se recomienda dosificar del 0,1% – 0,15% en función del peso del cemento asfáltico.

- **Agregados por lotes**

Para la mayoría de los procesos de MAT, el procesamiento por lotes agregado es idéntico al de MAC. En un proceso MAT, se agrega agua a una porción del agregado fino, luego este agregado fino húmedo se agrega frío a la mezcla durante el proceso de mezclado. Se calcula el peso del lote de

agregado seco para este agregado, luego agregue el peso requerido de agua al agregado seco, se mezcle, se cubre y se deja reposar 2 horas antes de usarlo en el proceso de la mezcla.

- **Agregados térmicos y aglutinante de asfalto**

Las diferencias más notables entre el diseño de MAT y MAC ocurren en el proceso de fabricación de la muestra, que comienza con este paso y continúa con los siguientes tres pasos. Los criterios de mezcla y compactación basados en la viscosidad no se pueden utilizar con la amplia gama de procesos disponibles de MAT. De hecho, la investigación en curso sugiere que la lubricación mejorada, no la reducción de la viscosidad, es el mecanismo principal que gobierna el éxito de los procesos de MAT.

El diseño de las mezclas de MAT se realiza utilizando las temperaturas de compactación y producción de campo planificadas. Los agregados y el aglutinante que se utilizarán se calientan en un horno a aproximadamente 27 ° F (15 ° C) por encima de la temperatura de producción planificada. Los agregados se pueden calentar durante la noche.

El aglutinante de asfalto debe calentarse el tiempo mínimo necesario para alcanzar esta temperatura objetivo.

- **Mezcla de áridos y aglutinante**

Para fines de diseño de mezclas, los diversos procesos de MAT se pueden agrupar en:

1. Aditivos mezclados con el aglutinante,
2. Aditivos añadidos a la mezcla,
3. Mezclas de áridos húmedos, y
4. Asfalto espumado.

Esta sección describe los procedimientos de laboratorio para preparar cada uno de estos tipos de mezclas de MAT. Algunos procesos de MAT pueden incluir elementos de dos o más de estos procesos.

El equipo de laboratorio necesario para producir las mezclas es generalmente el mismo que se requiere para MAC. Se necesita un mezclador mecánico capaz de mezclar lotes de 5 a 20 kg (10 a 45 lb) para los procesos de MAT. Para los procesos de MAT que requieren que el aditivo se mezcle en el aglutinante, se necesita un agitador mecánico de bajo cizallamiento con un impulso de tamaño apropiado para mezclar homogéneamente el aditivo en el aglutinante. Finalmente, para las mezclas de asfalto espumado, se necesita una planta de asfalto espumado a escala de laboratorio capaz de producir asfalto espumado consistente con el contenido de agua utilizado en la producción de campo.

- **Aditivos mezclados en el aglutinante**

La dosis requerida la proporcionará el proveedor del proceso MAT, quien generalmente también proporcionará instrucciones para mezclar el aditivo en el aglutinante. Si no se proporcionan instrucciones para mezclar el aditivo, se utiliza el siguiente procedimiento:

1. Seguir las instrucciones del fabricante para el almacenamiento del aditivo (por ejemplo, temperatura y humedad) particularmente después de abrir el empaque del fabricante.
2. Pesar la cantidad requerida de aditivo en un recipiente pequeño. El aditivo se especifica típicamente como porcentaje en peso de aglutinante.
3. Calentar el aglutinante de asfalto en un recipiente tapado en un horno a 135 ° C hasta que el aglutinante esté suficientemente líquido para verter. Durante el calentamiento, revuelva ocasionalmente el aglutinante manualmente para asegurar la homogeneidad.
4. Agregar la cantidad requerida de aditivo al aglutinante y revuelva con un agitador mecánico hasta que el aditivo esté totalmente disperso en el aglutinante.
5. Guardar el aglutinante con el aditivo MAT a temperatura ambiente en un recipiente tapado hasta que sea necesario utilizarlo en el diseño de la mezcla.

Algunos aglutinantes se suministran con el aditivo MAT premezclado en el aglutinante. Para estos aglutinantes, no es necesario mezclar el aditivo y la preparación de la mezcla de MAT procede como se describe a continuación.

Una vez que se ha añadido el aditivo MAT al aglutinante, la preparación de la mezcla MAT procede de manera similar a la del MAC. Los siguientes pasos resumen el proceso de preparación de la mezcla:

1. Calentar el agregado, el aglutinante y las herramientas de mezcla a aproximadamente 27 ° F (15 ° C) por encima de la temperatura de producción planificada. Los agregados se pueden calentar durante la noche. El aglutinante de asfalto debe calentarse el tiempo mínimo necesario para alcanzar esta temperatura objetivo.
2. Si se requiere un aditivo anti peladuras (*antistrip*), agregarlo al aglutinante según las instrucciones del fabricante.
3. Colocar el tazón para mezclar caliente en una balanza y ponga a cero la balanza.
4. Cargar el recipiente para mezclar con los agregados calientes y mezcle bien en seco.
5. Formar un cráter en el agregado mezclado y pese la cantidad requerida de aglutinante de asfalto en la mezcla para lograr el peso de lote deseado. Si los agregados y el RAP se han almacenado durante un período prolongado de tiempo en un ambiente húmedo, entonces puede ser necesario ajustar el peso del aglutinante en función del peso seco en horno de los agregados y el RAP de la siguiente manera:

- a. Registrar el peso seco en horno de los agregados y RAP,  $w_i$
- b. Determinar el peso total objetivo de la mezcla.

$$W_t = \frac{W_i}{\left(1 - \frac{P_{b_{new}}}{100}\right)}$$

Donde:

$W_t$ : Peso total (gr).

$W_i$ : Peso seco (gr).

$P_{b_{new}}$ : Porcentaje de peso de la mezcla total con el nuevo asfalto de la mezcla (%).

- c. Agregar un nuevo aglutinante al tazón para alcanzar el peso.  $w_i$
6. Retirar el vaso de la balanza y mezcle con una batidora mecánica durante 90 segundos.
7. Transferir la mezcla a un recipiente plano y poco profundo con un grosor uniforme de 1 a 2 pulgadas (25 a 50 mm) para acondicionamiento a corto plazo.

- **Mezclas de áridos húmedos**

Un proceso de MAT utiliza agregado fino húmedo frío para producir concreto asfáltico a temperaturas de descarga significativamente más bajas. En este proceso, una parte del agregado total se agrega en húmedo. El agregado grueso y la parte seca del agregado fino se mezclan con el aglutinante a temperaturas normales de producción de MAC. El contenido de humedad de esa porción del agregado fino y la temperatura de mezcla inicial. También se añade un aditivo al aglutinante siguiendo los pasos descritos anteriormente para los aditivos mezclados en el aglutinante. Calcule el peso del lote de agregado seco para este agregado, luego el peso del agua a agregar (basado en el contenido de humedad recomendado), y luego proceda de la siguiente manera:

1. Agregar la humedad requerida a la fracción húmeda del agregado, mezcle bien, luego cubra y deje reposar por lo menos 2 horas antes de mezclar con la fracción calentada.
2. Calentar el agregado, el aglutinante y las herramientas de mezcla a aproximadamente 27 ° F (15 ° C) por encima de la temperatura de mezcla inicial. Los agregados se pueden calentar durante la noche. El aglutinante de asfalto y RAP debe calentarse el tiempo mínimo necesario para alcanzar esta temperatura objetivo.
3. Colocar el tazón para mezclar caliente en una balanza y ponga a cero la balanza.
4. Cargar el recipiente para mezclar con los agregados calientes y mezcle bien en seco.

5. Formar un cráter en el agregado mezclado y pese la cantidad requerida de aglutinante de asfalto en la mezcla para lograr el peso de lote deseado. Si los agregados se han almacenado durante un período prolongado de tiempo en un ambiente húmedo, entonces puede ser necesario ajustar el peso del aglutinante en función del peso seco en horno de los agregados de la siguiente manera:

**a. Registre el peso seco en horno de los agregados calentados y RAP,  $w_i$**

**b. Determine el peso total objetivo de la mezcla:**

$$W_t = \frac{(W_i + W_{dwf})}{\left(1 - \frac{P_{b_{new}}}{100}\right)}$$

Donde:

$W_t$ : Peso total (gr).

$W_i$ : Peso seco (gr).

$W_{dwf}$ : Peso seco de la fracción húmeda del lote (gr).

$P_{b_{new}}$ : Porcentaje de peso de la mezcla total con el nuevo asfalto de la mezcla (%).

**c. Determine el peso objetivo de la mezcla calentada:**

$$W_{thm} = W_t - W_{dwf}$$

Donde:

$W_{thm}$ : Peso de la mezcla calentada (gr).

$W_t$ : Peso total (gr).

$W_{dwf}$ : Peso seco de la fracción húmeda del lote (gr).

**d. Agregue un nuevo aglutinante al tazón para alcanzar  $W_{thm}$**

6. Retirar el vaso de la balanza y mezcle con una batidora mecánica durante 30 segundos.
7. Detener el mezclador y agregue inmediatamente la fracción húmeda.
8. Reiniciar la batidora y continúe mezclando durante 60 segundos.
9. Transferir la mezcla a un recipiente plano y poco profundo con un grosor uniforme de 1 a 2 pulgadas (25 a 50 mm) para acondicionamiento a corto plazo.
10. Verificar la temperatura de la mezcla en la sartén. Debe estar entre 90 y 100 ° C.

- **Asfalto espumado**

La preparación de mezclas de asfalto espumado requiere un equipo especial de formación de espuma aglutinante de asfalto que puede producir asfalto espumado utilizando la cantidad de humedad que se utilizará en la producción de campo. El procedimiento para preparar mezclas asfálticas espumadas es el siguiente:

1. Preparar el equipo de formación de espuma aglutinante de asfalto y cárguelo con aglutinante según las instrucciones del fabricante.
2. Si se requiere un aditivo anti peladuras (*antistrip*), agregarlo al aglutinante en el equipo de espuma según las instrucciones del fabricante.
3. Calentar el agregado, el RAP y las herramientas de mezcla a aproximadamente 27° F (15 ° C) por encima de la temperatura de producción planificada. Los agregados se pueden calentar durante la noche. El aglutinante de asfalto y RAP debe calentarse el tiempo mínimo necesario para alcanzar esta temperatura objetivo.
4. Preparar el aglutinante de asfalto espumado según las instrucciones del equipo de espumado.
5. Colocar el tazón para mezclar caliente en una balanza y ponga a cero la balanza.
6. Cargar el tazón de mezcla con los agregados calientes y RAP y mezcle bien en seco.
7. Formar un cráter en el agregado mezclado y agregue la cantidad requerida de asfalto espumado en la mezcla para lograr el peso de lote deseado. Si los agregados y el RAP se han almacenado durante un período prolongado de tiempo en un ambiente húmedo, entonces puede ser necesario ajustar el peso del aglutinante espumado en función del peso seco en horno de los agregados y el RAP de la siguiente manera:

**a. Registrar el peso seco en horno de los agregados y RAP,  $w_i$ .**

**b. Determinar el peso total objetivo de la mezcla.**

$$W_t = \frac{W_i}{\left(1 - \frac{P_{b_{new}}}{100}\right)}$$

Donde:

$W_t$ : Peso total (gr).

$W_i$ : Peso seco (gr).

$P_{b_{new}}$ : Porcentaje de peso de la mezcla total con el nuevo asfalto de la mezcla (%).

### ***c. Agregar aglutinante espumado al tazón para alcanzar el peso.***

El equipo de espumado del laboratorio utiliza un temporizador para controlar la cantidad de aglutinante espumado que se proporciona. Asegúrese de que el tamaño del lote sea lo suficientemente grande para que la cantidad requerida de aglutinante espumado esté dentro del rango calibrado del dispositivo espumante. Esto puede requerir producir un lote para las dos muestras giratorias y la muestra de gravedad específica máxima con un contenido de asfalto dado y luego dividir las muestras individuales.

8. Retirar el vaso de la balanza y mezcle con una batidora mecánica durante 90 segundos.

9. Transferir la mezcla a un recipiente plano y poco profundo con un grosor uniforme de 1 a 2 pulgadas (25 a 50 mm) para acondicionamiento a corto plazo.

- **Procedimientos de acondicionamiento de mezclas**

El procedimiento de acondicionamiento para el diseño de mezclas volumétricas es esencialmente idéntico para MAT y MAC, con la única diferencia en la definición de temperatura de compactación para los dos tipos de mezclas. El acondicionamiento a corto plazo para las pruebas de rendimiento difiere en que solo se requieren 2 horas para las mezclas de MAT, mientras que se requieren 4 horas para el acondicionamiento de MAC. Además, las mezclas de MAT para pruebas de rendimiento se acondicionan a la temperatura de compactación planificada, mientras que AASHTO R 30 (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2002) especifica una temperatura de acondicionamiento de 135 ° C para las mezclas de MAC para pruebas mecánicas.

- **Muestras de laboratorio compactas**

Las muestras de MAT se compactan de la misma manera que se describe para MAC utilizando.

- **Calcular la composición volumétrica de las muestras de laboratorio**

El análisis volumétrico de muestras de MAT compactadas es el mismo que se describe en el para MAC. Recuerde que el procedimiento utilizado en este manual establece el contenido de la carpeta en un valor que proporcionará el VAM adecuado una vez que se cumpla con el contenido de vacío de aire de diseño, y se seleccionó la gradación para proporcionar una proporción aceptable de polvo a contenido de aglutinante efectivo en masa. Por tanto, el contenido de huecos de aire es el factor volumétrico principal utilizado para determinar la aceptabilidad de la mezcla de prueba. Dado que el contenido de aglutinante se fijó inicialmente usando una absorción supuesta de aglutinante, también se deben analizar el contenido de aglutinante efectivo y VAM de la mezcla de prueba. Las siguientes ecuaciones se utilizan para realizar el análisis volumétrico.

- **Contenido de Vacíos**

Contenido de Vacíos

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

Donde:

$V_A$ : Porcentaje de contenido de vacíos

$G_{mb}$ : Peso específico Bulk de la mezcla compactada

$G_{mm}$ : Peso específico máximo teórico de la mezcla suelta

Volumen total de contenido de asfalto

$$V_A = \frac{P_b G_{mb}}{G_b}$$

Donde:

$V_A$ : Porcentaje del volumen total del contenido de asfalto.

$P_b$ : Porcentaje total de contenido de asfalto

$G_{mb}$ : Peso específico Bulk de la mezcla

$G_b$ : Peso específico del asfalto

Volumen de asfalto absorbido

$$VBA = G_{mb} \left[ \left( \frac{P_b}{G_b} \right) + \left( \frac{P_s}{G_{sb}} \right) - \left( \frac{100}{G_{mm}} \right) \right]$$

Donde:

$VBA$ : Porcentaje del contenido de asfalto absorbido de la mezcla.

$G_{mb}$ : Peso específico Bulk de la mezcla

$P_b$ : Porcentaje total de contenido de asfalto.

$G_b$ : Peso específico del asfalto

$P_s$ : Porcentaje de contenido de agregado de la mezcla =  $100 - P_b$

$G_{sb}$ : Peso específico Bulk promedio de la mezcla del agregado

$G_{mm}$ : Peso específico máximo de la mezcla



Contenido efectivo de asfalto

$$VBE=VB-VBA$$

Donde:

*VBE: Porcentaje efectivo de contenido de asfalto*

*VB: Porcentaje de contenido de asfalto*

*VBA: Porcentaje del contenido de asfalto absorbido de la mezcla*

- **Contenido de aglutinante efectivo por masa**

Peso del contenido efectivo de asfalto

$$P_{be}=P_b \left( \frac{VBE}{VB} \right)$$

Donde:

*P<sub>be</sub>: Porcentaje del contenido efectivo de asfalto*

*P<sub>b</sub>: Porcentaje del contenido de asfalto*

*VBE: Porcentaje efectivo de contenido de asfalto*

*VB: Porcentaje de contenido de asfalto*

*Vacíos en el agregado mineral*

$$VMA=VA-VBE$$

Donde:

*VAM: Porcentaje de vacíos en el agregado mineral de la mezcla*

*VA: Porcentaje de contenido de vacíos de la mezcla*

*VBE: Porcentaje efectivo de contenido de asfalto de la mezcla.*

Vacíos en el agregado mineral

$$D/B = \frac{P_{0.075}}{P_{be}}$$

Donde:

$D/B$ : Proporción de Polvo/Asfalto calculado usando el contenido efectivo de asfalto

$P_{0.075}$ : Porcentaje de peso del contenido del polvo mineral

$P_{be}$ : Porcentaje del contenido efectivo de asfalto

- **Ajustar las proporciones agregadas para cumplir con los requisitos volumétricos**

Como se puede ver en la tabla 13, el ajuste de las mezclas de MAT para cumplir con los requisitos volumétricos es el mismo que se describe para MAC.

**Tabla 13. Rango aceptable para Factores Volumétricos para MAT y MAC**

Agregado (mm)	VAM		VA		Proporción de polvo mineral	
	Mínimo (%)	Máximo (%)	Mínimo (%)	Máximo (%)	Mínimo (%)	Máximo (%)
4,75	16,0	18,0	3,5	4,5	0,9	2
9,5	15,0	17,0	3,5	4,5	0,8	1,6
12,5	14,0	16,0	3,5	4,5	0,8	1,6
19,0	13,0	15,0	3,5	4,5	0,8	1,6
25,0	12,0	14,0	3,5	4,5	0,8	1,6
37,5	11,0	13,0	3,5	4,5	0,8	1,6

Fuente: (National Cooperative Highway Research Program, 2012)

Los detalles que se mostraron en la tabla 13, indica que el procedimiento presentado está diseñado para proporcionar propiedades volumétricas capaces cuando las muestras de la mezcla de prueba cumplen con el contenido de vacío de aire de diseño. Después de preparar las muestras de prueba, puede ser necesario hacer pequeños ajustes en el contenido de aglutinante para tener en cuenta las diferencias entre la absorción de aglutinante supuesta y real. Si los vacíos de aire de las muestras de prueba son más de unas pocas décimas de porcentaje fuera del rango de diseño, entonces la gradación del agregado debe ajustarse para cambiar el VAM de la mezcla. La regla general para ajustar las mezclas de agregados para cumplir con los requisitos de VAM es que cuanto más cerca esté una gradación de agregados a una gradación de densidad máxima, menor será su VAM.

Se debe indicar que las mismas condiciones de prueba que se utilizan para MAC se utilizan con MAT.

- **Pruebas de rendimiento**

La evaluación del rendimiento de MAT es la misma que la de MAC, la principal diferencia está en el acondicionamiento de la mezcla: las mezclas MAC se acondicionan durante 4 horas a 135 ° C, mientras que las mezclas de MAT se acondicionan a la temperatura de compactación planificada

durante 2 horas. La evaluación se hace utilizando la prueba de número de flujo como se puede observar en la tabla 14.

**Tabla 14. Número de flujo mínimo para Mezclas MAT y MAC para la evaluación del rendimiento**

Nivel de Tráfico, Millones de ESALs	Número Mínimo de Flujo
< 3	NA
3 a 10	30
10 a 30	105
≥ 30	415

Fuente: (National Cooperative Highway Research Program, 2012)

Como se observa en la tabla 14, la resistencia a la formación de surcos de MAT se evalúa para mezclas diseñadas para 3 millones de ESAL y superiores utilizando la prueba de número de flujo, AASHTO TP 79 (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2016). Las condiciones que se aplican para MAT y MAC son las siguientes:

1. Muestras compactadas a  $7,0 \pm 0,5\%$  de huecos de aire,
2. Prueba de temperatura igual al 50% de confiabilidad, temperatura máxima del pavimento de 7 días según se determina usando LTPPBind versión 3.1 (U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, 2008). Para cursos de superficie, calcule la temperatura de prueba a una profundidad de 20 mm. Para cursos intermedios y básicos, calcule la temperatura de prueba en la parte superior de la capa.
3. Pruebas no confinadas con una tensión repetida del desviador de 87 psi (600 kPa) y una tensión del desviador de contacto de 4,4 psi (30 kPa).

Se utilizan criterios más bajos para MAT en comparación con MAC debido a la reducción del acondicionamiento a corto plazo. Recuerde que el MAC utilizado en la fabricación de muestras para pruebas de rendimiento está condicionado para 4 horas a  $135\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $275\text{ }^{\circ}\text{F}$ ), mientras que el MAT utilizado para fabricar muestras para pruebas de rendimiento colocado durante solo 2 horas a la temperatura de compactación planificada, que generalmente es inferior a  $275\text{ }^{\circ}\text{F}$  ( $135\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). El tiempo de acondicionamiento más corto y la temperatura de condición más baja dan como resultado un menor envejecimiento del aglutinante en las muestras de MAT. Los criterios del número de flujo de MAT se enumeran en la tabla 14.

La resistencia a la formación de surcos de las mezclas de MAT se puede mejorar usando los mismos ajustes para MAC. Éstos incluyen:

Aumento del grado de aglutinante a alta temperatura.

- Si el aglutinante no se modifica, considerar usar un aglutinante modificado con polímero del mismo grado o un grado inferior para alta temperatura.
- Si el aglutinante está modificado con polímero, pruebe con un tipo diferente de aglutinante modificado.
- Aumentar la cantidad de relleno mineral en la mezcla y ajustar la gradación del agregado si es necesario para mantener un VAM adecuado.
- Disminuir el valor VAM de diseño, si es posible, ajustando la gradación agregada
- Reemplazo de parte o todo el agregado (fino o grueso o ambos) con un material o materiales que tengan una angularidad mejorada.

Si se usa un aglutinante asfáltico diferente en la mezcla, la composición volumétrica no debe cambiar. Sin embargo, si se cambian otros aspectos del diseño de la mezcla, la composición volumétrica puede cambiar significativamente, lo que requerirá un mayor refinamiento de la mezcla antes de realizar más pruebas de resistencia a los surcos.

#### 4.2.11. Preparación de las muestras

En la preparación de muestras de laboratorio, partes del procedimiento son similares a las de la práctica de MAC. Los pesos de los lotes se calculan de la misma forma.

### 4.3. Caracterización del agregado

No se aborda de manera detallada los procedimientos de los ensayos para la caracterización de los agregados y el asfalto, sin embargo, como se puede ver en la tabla 15, se presenta a el detalle de los ensayos realizados para tal efecto tomados del laboratorio de suelos de la Planta de Asfaltos del GAD Municipal de Azogues.

**Tabla 15. Ensayos para caracterización de los agregados**

Ensayos	Norma
Análisis Granulométrico	INEN 696
Equivalente de arenas y agregados finos	ASTM D 2419
Relación de Soporte de California CBR	ASTM D 1883-99
Estabilidad Marshall y Flujo de Mezclas Asfálticas	ASTM D 6927-15

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 15 se muestra que, para cada ensayo detallado se indica la norma técnica respectiva.

## 5. PROCEDIMIENTO DE DISEÑO PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS

### 5.1. Método Marshall de Diseño de Mezclas

En el apéndice B, se describe el proceso para el Diseño Marshall de Mezclas Asfálticas, de acuerdo a la norma AASHTO T 245 (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2015b).

### 5.2. Comparación de las mezclas asfálticas en tibio y en caliente

La investigación realizada por el NCHRP Project 09-43 ha mostrado que únicamente se requieren ciertos aditivos y cambios menores en la temperatura a las prácticas de diseño actuales para el diseño de mezclas asfálticas tibias (National Cooperative Highway Research Program, 2011).

## 6. CICLO DE VIDA

La consideración de los aspectos económicos, ecológicos y sociales en el ciclo de vida de la infraestructura vial es un prerrequisito para garantizar la movilidad de nuestra sociedad a largo plazo. Sostenibilidad seguridad, y eficiencia. La carretera del siglo 21 tiene por objeto establecer un equilibrio entre los aspectos económicos, ecológicos y sociales. Los elementos de infraestructura vial serán considerados como un todo durante su vida útil, teniendo en cuenta las cuestiones de sostenibilidad en la planificación, selección de materiales y métodos de construcción, mantenimiento y desmontaje y sobre todo la seguridad a todos los usuarios.

### 6.1. Sostenibilidad

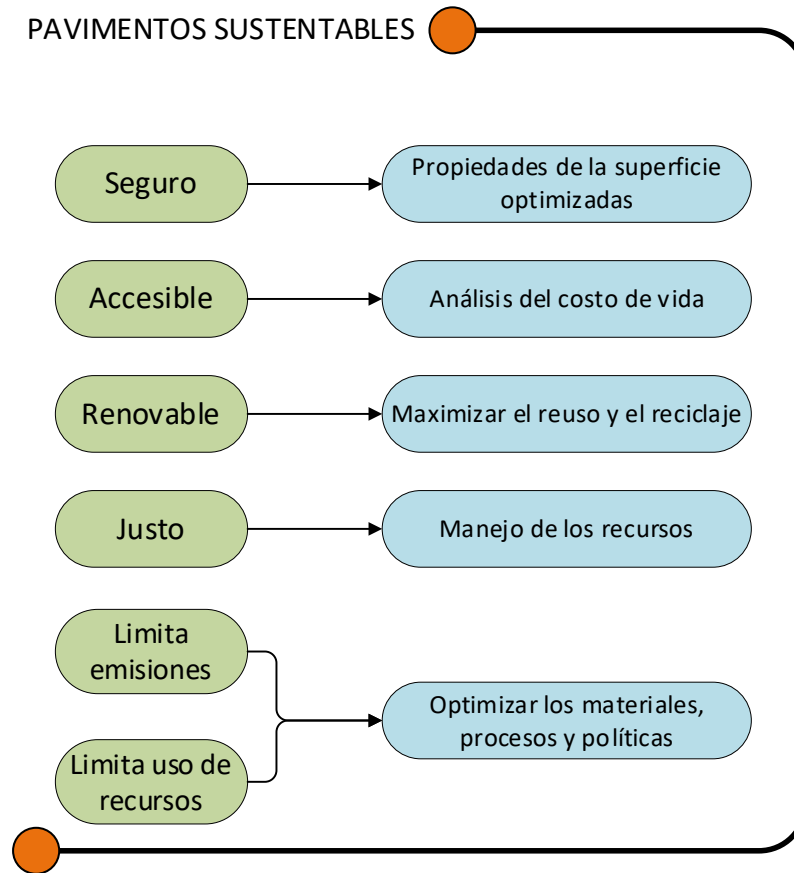
El desarrollo sostenible es el desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de satisfacer las necesidades de las futuras generaciones.

Desarrollo sostenible es el proceso de convertir recursos naturales en productos y servicios, que son más productivos, usables; mientras se mantiene o mejora, la calidad, disponibilidad y productividad de los recursos sobrantes (American Society of Civil Engineers, 1993).

Trasporte sustentable significa: Proveer movilidad excepcional y acceso, cumpliendo las necesidades de desarrollo, SIN comprometer la calidad de vida de las futuras generaciones. Un sistema de transporte es seguro, saludable, accesible, renovable opera justamente limitando las emisiones y el uso de recursos no renovables (U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, 2001).

Como se puede ver en la figura 19, el concepto gráfico de pavimentos sustentables se puede expresar de la siguiente manera.

Figura 19. Pavimentos Sustentables



Fuente: (U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, 2001)

En la figura 3 se puede observar que los pavimentos sustentables son aquellos que son seguros, accesibles, renovables y limitan el uso de recursos y emisiones.

## 6.2. Análisis de costos del Ciclo de Vida (LCCA)

En una evaluación económica es esencial que todos los costos que se dan durante el tiempo de vida de una instalación sean incluidos. Al hacer comparaciones económicas, estas no siempre han sido realizadas cuidadosamente o peor aún entendidas del todo por los diseñadores de pavimentos porque dichas comparaciones a menudo han sido realizadas tomando en cuenta periodos de diseño similares. Por lo tanto, los diseñadores asumieron que las primeras comparaciones de costos eran adecuadas para estudios económicos. Esto no es verdad, y, a fin de enfatizar la necesidad de elaborar un análisis de costos completo, el término “costo del ciclo de vida” fue acuñado en el año de 1979 para el uso de los pavimentos (U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, 1979). El costo del ciclo de vida se refiere a todos los costos (y, en todo el sentido,

todo el beneficio) los cuales están involucrados en la provisión de un pavimento durante su ciclo completo de vida. Estos incluyen, costos de construcción, costos de mantenimiento, etc.

### 6.3. Herramientas para la evaluación

La elaboración de los pavimentos para carreteras tiene cargas ambientales considerables asociadas con su construcción, mantenimiento y uso inicial. La evaluación del ciclo de vida (LCA) es una metodología versátil adoptada para cuantificar el efecto del uso de recursos y procesos.

- En los últimos años, se han desarrollado muchas herramientas de LCA para ayudar a los tomadores de decisiones en evaluar el desempeño ambiental de sus decisiones relacionadas con el pavimento. El conjunto de las herramientas LCA específicas para pavimentos (Santos et al., 2017) incluyen, entre otras, RealCost 2.5 for LCCA (U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, 2004), FHWA Self-Evaluation Tool as a Rating System, INVEST 1.0 (U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, 2010), PaLATE V2.2 (Greenroads, 2011), PE-2 (Mukherjee et al., 2013), ECORCEM (IFSTTAR, 2013), DuboCalc (Rijkswaterstaat, 2017), CO2NSTRUCT (BRANZ Inc., 2021). Herramientas comerciales de LCA, como SimaPro (PRé Consultants, 2016) y GaBi (PE International 2012 particularmente aplicable para los pavimentos p.ej., crudo materiales y equipo combustible combustión) (Sphera Soluciones GmbH, 1991). De todas estas opciones, una de las más utilizadas es la herramienta PaLATE (Pavement Lifecycle Assessment Tool for Environmental and Economic Effect) debido a que el cálculo del costo del ciclo de vida del pavimento en sus diferentes etapas tiene una amplia base de datos referente a cálculos de producción, tecnologías de mezclas asfálticas, mantenimiento de vías, desempeño de pavimentos y equipo caminero.

#### 6.3.1. PaLATE (Pavement Lifecycle Assessment Tool for Environmental and Economic Effect)

La herramienta de evaluación del ciclo de vida del pavimento para efectos ambientales y económicos (PaLATE) es un programa de LCA y LCCA de hoja de cálculo diseñado por el Consorcio sobre Diseño y Fabricación Ecológicos de la Universidad de California-Berkeley.

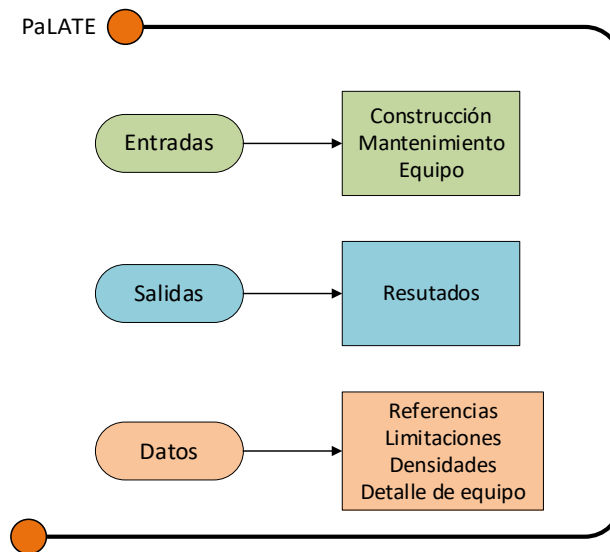
PaLATE (Pavement Lifecycle Assessment) es una herramienta basada en Excel para la evaluación del ciclo de vida (LCA) de los efectos ambientales y económicos de los pavimentos y carreteras. La herramienta toma la aportación del usuario para el diseño, construcción inicial, mantenimiento, uso de equipos y costos de una carretera, y proporciona resultados para los efectos y costos ambientales del ciclo de vida. Los efectos ambientales investigados incluyen:



- Consumo de energía
- Emisiones de CO<sub>2</sub>
- Emisiones de NO<sub>x</sub>
- Emisiones de PM10
- Emisiones de SO<sub>2</sub>
- Emisiones de CO
- Información de lixiviados

El programa PaLATE (Greenroads, 2011) también incluye un LCCA, que compara los costos asociados con los procesos y materiales para un escenario base y alternativo durante la vida útil del proyecto. El programa (Greenroads et al., 2011), tiene como base una hoja electrónica, la cual tiene tres tipos de celdas: entradas, salidas y datos de un determinado proceso tal como se muestra en la figura 20.

**Figura 20. Estructura de la aplicación PaLATE**



Fuente: (U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, 2001)

En la figura 20 se puede observar que, las entradas del programa se refieren al ingreso de datos referentes a la etapa de construcción, las salidas se refieren a los resultados presentados por el programa, mientras que los datos representan un conjunto de valores como densidades de materiales y detalles de equipo utilizado en el análisis.

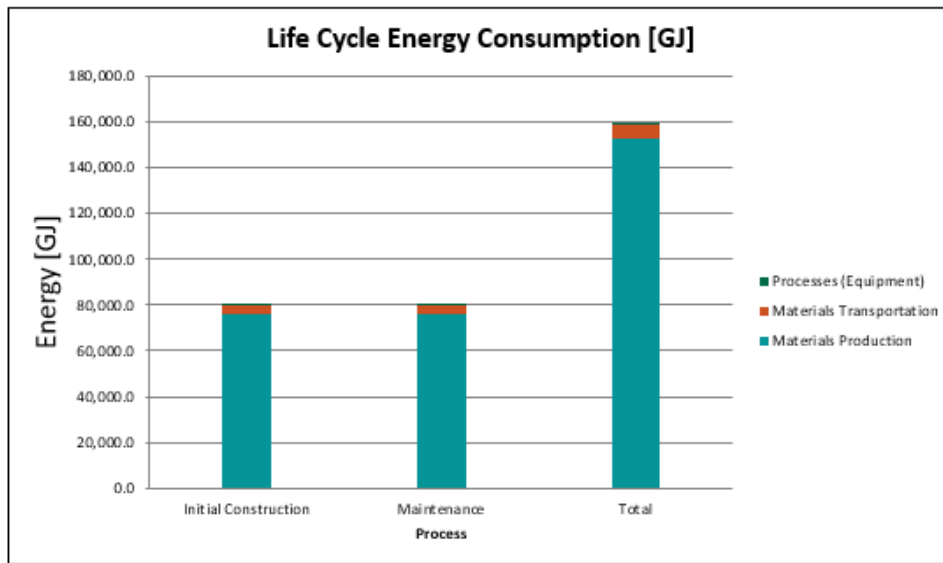
## 6.3.1.1. Input - Entradas

- **Construcción:** Esta pestaña es en la cual el proyecto de pavimento será plasmado caracterizando sus materiales, densidades, volúmenes de trabajo y distancias de transporte de materiales.
- **Mantenimiento:** se ingresan datos acerca del mantenimiento a través de la vida útil del pavimento, teniendo en cuenta el número asumido de eventos de mantenimiento a tener en cuenta en el ciclo de vida del pavimento. Cada actividad deberá ser desagregada en sus materiales básicos y tener en cuenta las emisiones que se generan en la cadena de suministro de los materiales. El total deberá sumar todos los materiales usados en cada tipo de pavimento. Se debe tomar en cuenta que para los materiales que no se encuentren representados en el programa se deberá realizar una aproximación de los mismos. En caso que para un material en particular, se use varios modos de transporte se deberá seleccionar el modo más dominante.
- **Equipo:** esta pestaña provee al usuario una serie de equipos para cada proceso en la elaboración del pavimento, además, el usuario puede insertar diferentes tipos de equipos de acuerdo a su requerimiento de acuerdo a datos relevantes como el tipo de equipo, potencia, rendimiento, consumo de combustible, tipo de combustible, etc.

## 6.3.1.2. Output – Salidas

Los resultados se determinan para las fases de construcción y mantenimiento, equipo, transporte y producción de materiales y se interpretan mediante gráficas de barras que contienen la energía (GJ) y la magnitud de emisiones de CO<sub>2</sub> (KG) empleada durante el ciclo de vida de las distintas fases (Muench et al., 2011). Como se puede observar en la figura 5, la manera en que el programa genera los resultados de manera gráfica es la siguiente:

Figura 21. Consumo de energía del ciclo de vida

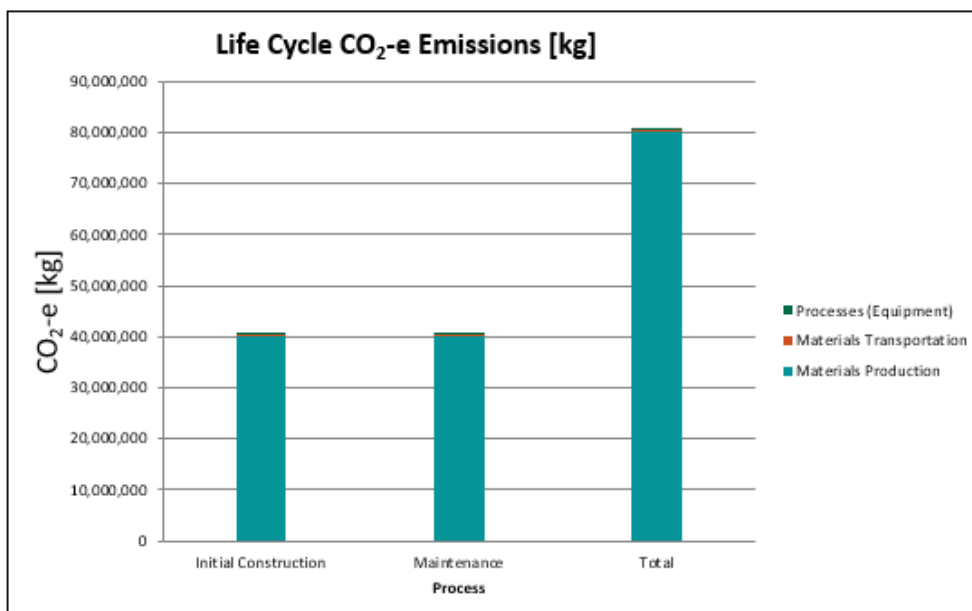


Fuente: (Greenroads, 2011)

En la figura 5 se puede observar que el consumo de energía parcial y total durante el ciclo de vida, se presenta para las etapas de construcción inicial y mantenimiento de una vía, además, los consumos de energía para el equipo, transporte y producción de materiales.

Los valores de las emisiones de CO<sub>2</sub>-e durante el ciclo de vida de la construcción del pavimento, son generados por el programa y se presentan como se puede observar en la figura 6.

Figura 22. Emisiones de CO2 en el ciclo de vida



Fuente: (Greenroads, 2011)

En la figura 6 se puede distinguir que las emisiones de CO<sub>2</sub>-e parcial y total durante el ciclo de vida de la construcción del pavimento, se presenta para las etapas de construcción inicial y mantenimiento de una vía, además, las emisiones que generan el equipo, transporte y producción de materiales.

### 6.3.1.3. Datos de ingreso

- Referencias: Los datos que maneja el programa (Greenroads et al., 2011) para el cálculo del costo del ciclo de vida del pavimento en sus diferentes etapas tiene una amplia base de datos basada en las siguientes consideraciones:
    - Densidades
    - Cálculo de Producción
    - Datos medioambientales
    - Datos estadísticos generales de caminos.
    - Tecnologías de mezclas asfálticas.
    - Mantenimiento
    - Desempeño del concreto y pavimentos
    - Agregados, etc.
  
  - Equipo: la hoja electrónica cuenta con una amplia gama de equipos que incluyen sus datos de producción como:
    - Tipo de equipo
    - Modelo
    - Potencia
    - Productividad
    - Consumo de combustible
    - Tipo de combustible
- Además, en el caso de requerir un modelo de equipo específico se cuenta con la opción de caracterizar un equipo definido por el usuario.
- Limitaciones: el programa (Greenroads et al., 2011) ha sido revisado por la Universidad de Washington, sin embargo, posee ciertas limitaciones que se indican a continuación.
    - Algunas de las conversiones en este modelo usan densidades típicas de materiales de construcción para el cálculo del peso transportado, las densidades pueden variar lo que puede generar algún error, pero no más error que cualquier proyecto de diseño pueda asumir.

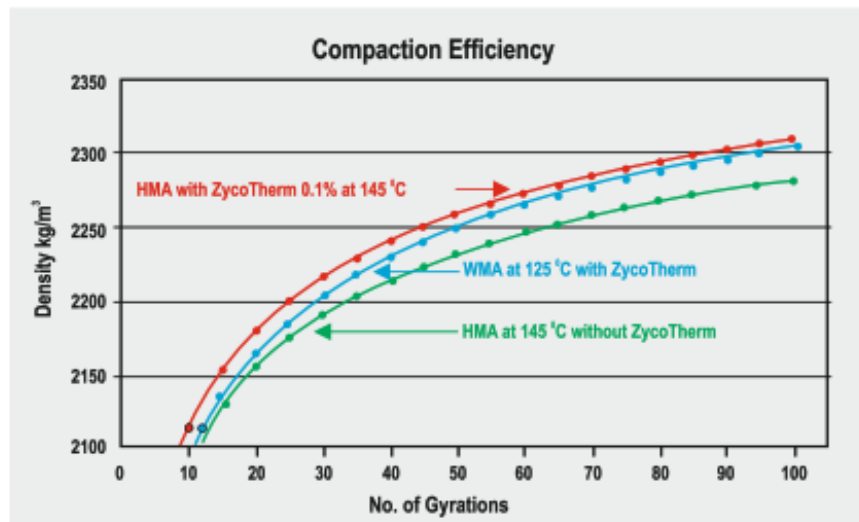
- PaLATE (Greenroads, 2011) se ha modificado únicamente para determinar energía y CO<sub>2</sub>, no puede determinar ningún impacto sobre la salud humana y no cubre la mayoría de gases de efecto invernadero.
- Densidades: PaLATE (Greenroads, 2011) tiene una base de datos de un rango de valores de densidades recomendadas y valores reales de densidad de materiales como:
  - Mezcla asfáltica
  - Agregado
  - Bitumen
  - Aditivos
  - Ceniza Volante
  - Agua, etc.

## 7. ADITIVO PARA MEZCLA ASFÁLTICA TIBIA

El aditivo que permite la mezcla asfáltica tibia es un organosilano en base a nanotecnología, con tamaño de partícula de entre 4 a 6 nm, se denomina ZycTherm y es de la compañía Zydex.

Como puede observarse en la figura 7, se muestra una curva de eficiencia de compactación para mezclas asfálticas MAT y MAC a diferentes temperaturas de compactación.

Figura 23. Eficiencia de compactación - ZycTherm



Fuente: (BREM Environmental Solutions, 2021)

En la figura 7 se muestra que este aditivo ofrece mayores densidades de compactación a menor temperatura lo que incide en múltiples beneficios en el proceso de la mezcla, transporte, tendido y compactación de la mezcla asfáltica, además, permite menores temperaturas de mezclado (de 10 a 20 grados centígrados menos) y también bajar las temperaturas de compactación (de 30 a 40 grados centígrados menos).

### 7.1. Resistencia a la humedad mediante enlace químico

- Este aditivo modifica químicamente la superficie del agregado, convirtiéndola de hidrófila (atrae el agua) a hidrófoba (repele el agua).
- Logra una unión química permanente en la interfaz del agregado de todo tipo, logrando un excelente desempeño contra las peladuras (*anti-stripping*).
- Elimina el desprendimiento del agregado (*Raveling*), en agregado fino y grueso.

## 7.2. Resistencia a la oxidación mediante recubrimiento completo

- El aditivo logra un 100% de recubrimiento en los agregados con un 30% a 40% menos de tiempo de mezclado, incluso en partículas por debajo de las 75 micras.
- Logra un aspecto más oscuro y brillante de la mezcla asfáltica, debido al 100% de recubrimiento.
- Aporta con una facilidad de mezclado a baja temperatura, logrando un ahorro de energía.
- Permite conservar una mayor limpieza de tanques y equipos.

## 7.3. Resistencia a la fatiga mediante compactación consistente

- Se logra obtener un mejor flujo y trabajabilidad de la mezcla a menor temperatura.
- Incremento de la temporada de pavimentación o la posibilidad de pavimentar durante temporadas frías.
- Logra extender los trayectos de trabajo.

## 7.4. Beneficios ambientales

- Es soluble en agua.
- No produce sedimentaciones.
- Reduce olores.
- Ahorra combustible en producción con temperaturas menores.
- Disminuye las emanaciones de CO<sub>2</sub> al ambiente.
- Extiende la vida del asfalto por lo que se ahorran recursos no renovables como materiales pétreos, betún combustible.

## 7.5. Dosificación

- Se recomienda dosificar del 0,1% – 0,15% en función del peso del cemento asfáltico.
- Para asfaltos modificados como (PMB/SBS/SBR/EVA/SRMB)<sup>1</sup>, (RAP/RAS)<sup>2</sup>, la dosificación usada va de 0,15% - 0,17% en función del peso de cemento asfáltico.

---

<sup>1</sup> PMB: Asfalto modificado con polímeros, SBS: asfalto modificado con polímero SBS (Estireno-Butadieno-Estireno), SBR: asfalto modificado con polímero SBR (Estireno-Butadieno-Rubber), EVA: asfalto modificado con plastómero tipo EVA (Etil-Vinil-Acetato), SRMB: asfalto modificado con polímero tensoactivo SRBM (Estireno-Rubber-Butadieno-Metil).

<sup>2</sup> RAP: Pavimento asfáltico reciclado, RAS: Tejas de asfalto recuperado.

## **7.6. Mezclado**

EL mezclado se lo realiza mediante vertido en el tanque de almacenamiento de asfalto en la planta durante la descarga.

## **7.7. Protocolo de laboratorio**

### **7.7.1. Descripción de los ensayos**

Se considera el siguiente esquema de ensayos:

- Mezcla a menor temperatura con un rango de hasta 20° C por debajo de la temperatura convencional de mezclado.
- Compactación a menor temperatura, con un rango de hasta 20° C menos respecto a la temperatura convencional.

### **7.7.2. Dosificación propuesta**

- La dosificación será de 0,1% con respecto al peso del cemento asfáltico.

### **7.7.3. Ensayos**

Realizar grupos de briquetas de mezcla asfáltica compactadas a temperatura:

- Temperatura de mezclado convencional 165° C compactación convencional 145° C.
- Temperatura de mezclado convencional 165° C compactación a menor temperatura 135° C.
- Temperatura de mezclado a menor temperatura 150° C compactación menor temperatura 135° C.

### **7.7.4. Aditivación del asfalto**

En la cantidad necesaria de asfalto para el total de briquetas a realizar se seguirá el siguiente proceso de aditivación:

- Llevar el asfalto a 160° C cuidando que el asfalto no supere esa temperatura.
- Agitar de forma mecánica el asfalto de tal manera que se forme un vórtice.



- Añadir el aditivo, en la dosificación mediante goteo, de tal manera que el aditivo caiga en el vórtice formado.
- Agitar durante 20 minutos.

### 7.7.5. Elaboración de las probetas

Se realizará la cantidad suficiente de mezcla asfáltica para tener 3 briquetas en cada punto de temperatura considerando:

- Temperatura de mezclado según condición
- Colocar la cantidad necesaria de mezcla para realizar cada briketa en el molde metálico.
- Los tres moldes metálicos reposarán durante dos horas en un horno cuya temperatura sea la temperatura de compactación seleccionada.
- Posterior a las dos horas realizar la compactación de las briquetas de forma inmediata.
- Continuar proceso de rotura convencional.

### 7.7.6. Resultados Esperados

Como se detalla en la tabla 16, para asfalto convencional se presenta a continuación valores referenciales de los resultados esperados de densidad.

**Tabla 16. Resultados esperados de densidad para la mezcla asfáltica tibia usando ZYCOTHERM**

Ensayo	Aditivo	Golpes por cara	Temp. Mezcla °C	Temp. Compact. °C	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Volumen (g/cm <sup>3</sup> )
MARSHALL-VN-E9-86	ZYCOTHERM 0,07%	75	150	140	2,451	10,05
MARSHALL-VN-E9-87	ZYCOTHERM 0,07%	75	150	130	2,442	10,01
MARSHALL-VN-E9-88	ZYCOTHERM 0,07%	75	150	120	2,442	10,01
MARSHALL-VN-E9-89	ZYCOTHERM 0,07%	75	150	110	2,448	10,04

Fuente:(BREM Enviromental Solutions, 2021)

Los datos que se muestran en la tabla 16, muestran que, a una diferente temperatura de compactación a la habitual, se logra mantener la densidad con valores altos y homogéneos.

Como se muestra en la tabla 17, para asfalto convencional se presenta a continuación valores referenciales de los resultados esperados para estabilidad y fluencia.

**Tabla 17. Resultados esperados de densidad para la mezcla asfáltica tibia usando ZYCOTHERM**

VAM (%)	%Vacíos (%)	R B/V	R F/V	Altura probeta	Estabilidad	FLUENCIA	
						M.M.	R E/F
15	4,8	66,77	1,42	64,30	1796	2,2	8363
15,4	4,9	65,13	1,42	64,97	1702	2,2	7626
15,3	4,9	65,3	1,42	64,90	1480	1,9	7939
15,1	5	66,47	1,42	64,17	1557	2,3	6758

Fuente: (BREM Environmental Solutions, 2021)

Los valores que se muestran en la tabla 17, indican que, a una diferente a una diferente temperatura de compactación a la habitual, se logra mantener la estabilidad y fluencia con valores altos y similares.

## 8. DISEÑO DEL PAVIMENTO PARA ESTE ESTUDIO

En el apéndice C, se describe el análisis del tráfico, materiales y variables de diseño de pavimentos por el método AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993).

### 8.1.1. Resumen de parámetros de diseño

A continuación, la tabla 18 resume los parámetros de diseño determinados en numerales anteriores los cuales se usarán para definir los espesores de capa de la estructura de pavimento.

**Tabla 18. Resumen de parámetros de diseño**

Parámetros de suelo		
CBR subrasante (%)	CBR1	6,37
Módulo resiliente de la subrasante (psi)	MR1	9558
CBR subbase (%)	CBR2	47
Módulo resiliente de la subbase (psi)	MR2	16897
CBR base (%)	CBR3	88
Módulo resiliente de la base (psi)	MR3	19610
Parámetros de diseño		
Error estándar combinado	So	0,45
Índice de servicio inicial	Po	4,2
Índice de servicio final	Pt	2,2
Perdida de serviciabilidad	$\Delta$ PSI	2
Confiabilidad (%)		65
Desviación Estándar normal	ZR	-0,39
Coefficiente de drenaje Base	m2	0,80
Coefficiente de drenaje Subbase	m3	0,80
Módulo elástico del concreto asfáltico (psi)		398253,6

Fuente: Elaboración propia

Como puede observarse en la tabla 18, se muestra los parámetros del suelo, así como los de diseño como son CBR, módulos resilientes, parámetros de serviciabilidad, confiabilidad, drenaje y módulo elástico del asfalto.

### 8.1.2. Selección de los espesores

A continuación, se presenta la ecuación de diseño que recomienda la AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993) con tránsito superior a  $0,05 \times 10^6$  ejes equivalentes de 8,2 toneladas.

$$\log_{10} W_{18} = z_R * S_o + 9,36 * \log_{10} (SN + 1) - 0,20 + \frac{\log_{10} \left[ \frac{\Delta PSI}{4,2 - 1,5} \right]}{0,40 + \frac{1094}{(SN+1)^{5,19}}} + 2,32 * \log_{10} M_R - 8,07$$

Donde:

$W_{18}$ : Número estimado de ejes simples (adimensional)

$Z_R$ : Desviación estándar normal (adimensional)

$S_o$ : Error estándar combinado de la predicción del comportamiento (adimensional)

$\Delta PSI$ : Diferencia entre el índice de servicio inicial ( $P_o$ ) y el final ( $P_t$ ) (adimensional)

$M_R$ : Módulo Resiliente (psi)

Número Estructural SN:  $SN = a_1 D_1 + a_2 m_2 D_2 + a_3 m_3 D_3$  (adimensional)

$a_i$ : Coeficiente estructural de la capa  $i$ , el cual depende de la característica del material (adimensional)

$D_i$ : Espesor de la capa  $i$  (pulgadas)

$M_i$ : Coeficiente de drenaje de la capa  $i$  (adimensional)

El SN es un número abstracto que expresa resistencia estructural de un pavimento requerido para una combinación dada de soporte del suelo, del tránsito total, de la serviciabilidad terminal y de las condiciones ambientales. Se debe además considerar los espesores mínimos como se puede observar en la tabla 19.

**Tabla 19. Espesores mínimos según ejes equivalentes**

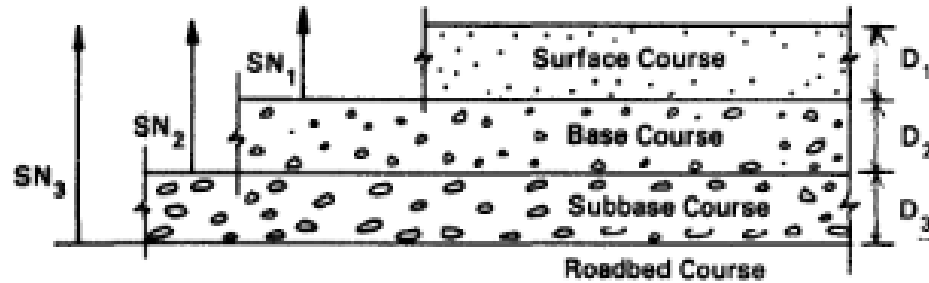
# de ejes equivalentes (millones)	Concreto	
	Asfáltico	Base Granular
< 0,05%	1,0 o TSD	4
0,05 – 0,15	2,0	4
0,15 – 0,50	2,5	4
0,50 – 2,00	3,0	6
3,00 – 7,00	3,5	6
> 7,00	4,0	6

Fuente: (American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993)

Como puede verse en la tabla 19, el espesor mínimo de concreto asfáltico y la base granular se determina en función del número de ejes equivalentes determinados en el análisis del tránsito.

Como puede verse en la figura 24, los espesores considerados en el diseño son los que se presentan a continuación.

Figura 24. Espesores considerados para el diseño de la estructura del pavimento



Fuente: (Asphalt Institute, 1999)

En la figura 24 se detalla los espesores de cada una de las capas de la estructura del pavimento cuyas relaciones se presentan a continuación.

$$D_1^* \geq \frac{SN_1}{a_1}$$

$$SN_1^* = a_1 D_1^* \geq SN_1$$

$$D_2^* \geq \frac{SN_2 - SN_1^*}{a_1 m_2}$$

$$SN_1^* + SN_2^* \geq SN_2$$

$$D_3^* \geq \frac{SN_3 - (SN_1^* + SN_2^*)}{a_3 m_3}$$

\*El asterisco indica el valor real usado, el cual debe ser igual o mayor al valor requerido

Los coeficientes \$a\_i\$ se obtienen a partir de los ábacos presentados en el Anexo 1. Ábacos de diseño de estructuras de pavimento – AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993) los cuales se pueden ver en la tabla 20.

Tabla 20. Coeficientes estructurales obtenidos

a1	0,42
a2	0,139
a3	0,123

Fuente: Elaboración propia

Como puede observarse, la tabla 20 muestra que los coeficientes de capa para la mezcla asfáltica es 0,42, para la capa de base granular es 0,139 y para la sub base es 0,123.

## 8.1.2.1. Resultado de Espesores

Los detalles de la tabla 21 presentan los resultados del cálculo de los números estructurales de capa.

**Tabla 21. Números estructurales calculados**

Ecuación AASHTO – Números Estructurales Calculados		
Número Estructural sobre la subrasante	SN3	31,224
Número Estructural sobre la subbase	SN2	25,336
Número Estructural sobre la base	SN1	23,971

Fuente: Elaboración propia

Como puede observarse en la tabla 21, el número estructural sobre la subrasante es 31,224, sobre la subbase es 25,336 y sobre la base es 23,971.

Luego se determinan los espesores calculados, y, finalmente los espesores que se asumen para recalculer los números estructurales tal como se muestra en la tabla 22.

**Tabla 22. Cálculo de espesores y espesores asumidos**

Cálculo de espesores y espesores asumidos		
Espesor calculado carpeta (pulg.)	D1	5,71
Espesor asumido carpeta (pulg.)	<b>D1'</b>	<b>5</b>
Número Estructural sobre el base corregido	SN1'	2,1
Espesor calculado base (pulg.)	D2	3,90
Espesor asumido base (pulg.)	<b>D2'</b>	<b>4</b>
Número Estructural sobre la subbase corregido	SN2'	2,54
Espesor calculado subbase (pulg.)	D3	5,87
Espesor asumido subbase (pulg.)	<b>D3'</b>	<b>6</b>
Número Estructural sobre la subrasante corregido	SN3'	3,14

Fuente: Elaboración propia

Como se puede ver en la tabla 22, el espesor asumido de la carpeta es de 5 pulgadas, el espesor asumido de la base es de 4 pulgadas y el espesor asumido de la sub base es de 6 pulgadas.

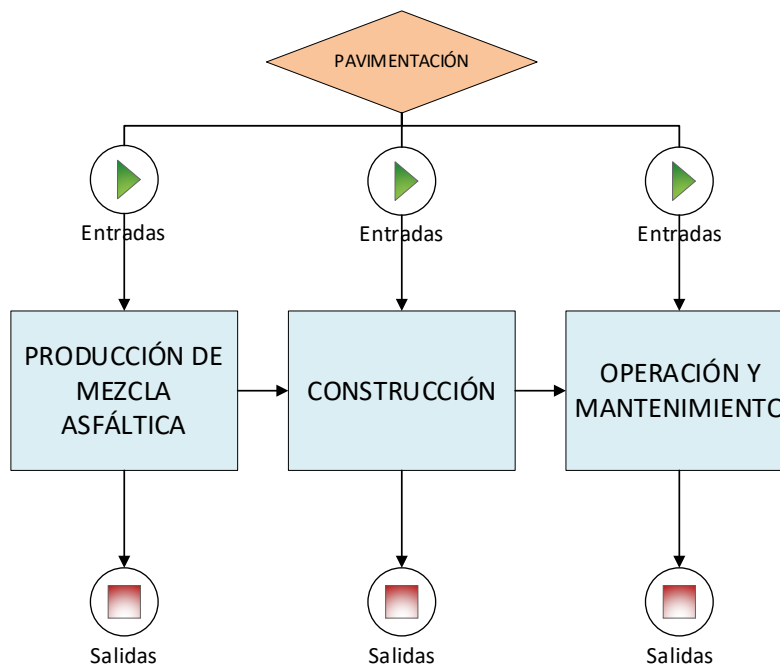
## 9. ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA

### 9.1. Análisis de Procesos

#### 9.1.1. Diagrama de procesos

A continuación, se presenta el diagrama de procesos de la pavimentación, tal como se puede observar en la figura 25.

Figura 25. Diagrama de procesos de la pavimentación



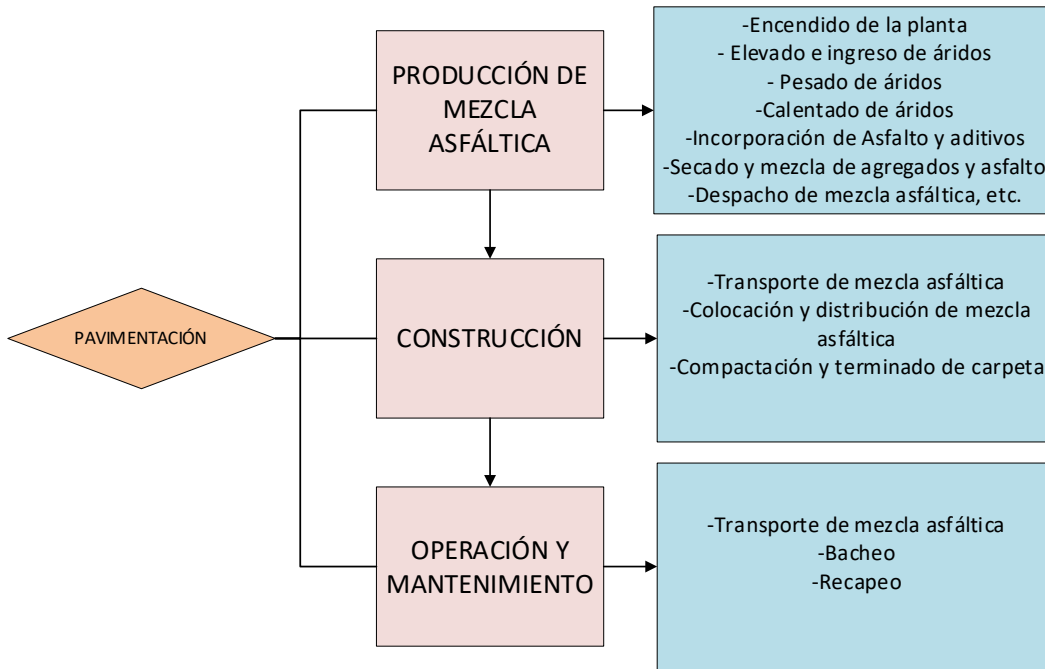
Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en la figura 25, el análisis del ciclo de vida se lo realiza en la etapa de producción, construcción y mantenimiento del pavimento, identificando para tal efecto el diagrama de procesos para la construcción del pavimento.

#### 9.1.2. Descripción de actividades

Las actividades que se realizan en la actividad de pavimentación son las siguientes, como puede observarse en la figura 26.

Figura 26. Actividades de la pavimentación



Fuente: Elaboración propia

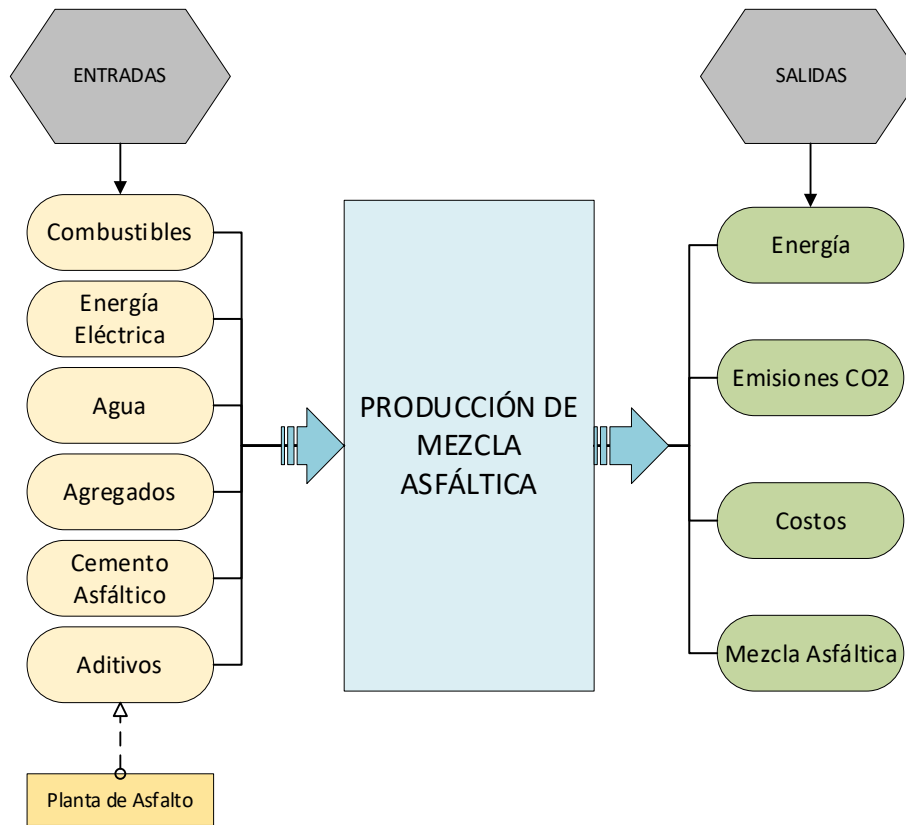
Como se detalla en la figura 26, para realizar la evaluación del costo del ciclo de vida de la pavimentación se debe establecer para cada proceso de la pavimentación y las respectivas actividades contenidas dentro de ellos y para las etapas de producción, construcción y operación y mantenimiento.

### 9.1.3. Entradas y Salidas de los procesos

Las entradas y salidas del proceso de producción se presentan a continuación mediante la figura 27.



Figura 27. Entradas y Salidas de los procesos- Producción

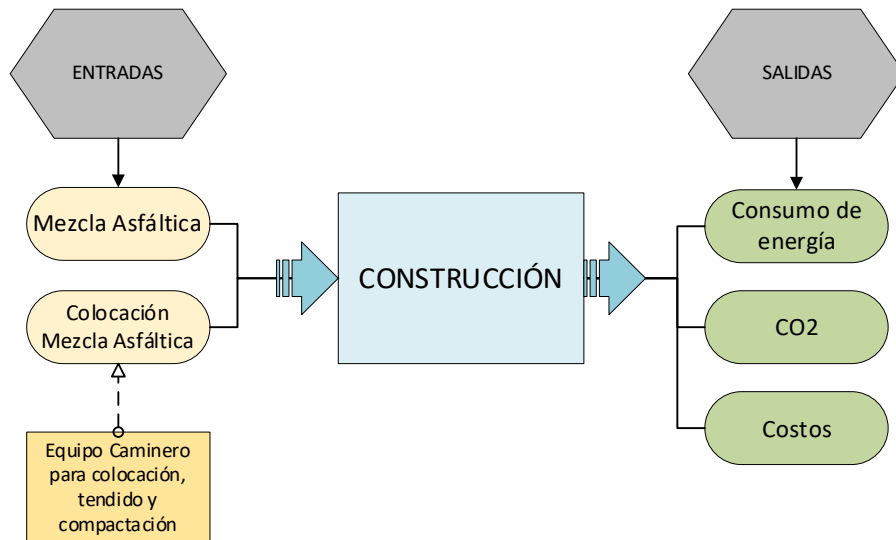


Fuente: Elaboración propia

Como se muestra en la figura 27, se identificaron las respectivas entradas y salidas de los procesos de producción de la mezcla asfáltica para establecer los siguientes diagramas que permitirán analizar el costo del ciclo de vida propuesto en la fase de la producción.

Como puede observarse en la figura 28, se presentan las entradas y salidas de los procesos en la etapa de construcción.

**Figura 28. Entradas y Salidas de los procesos- Construcción**

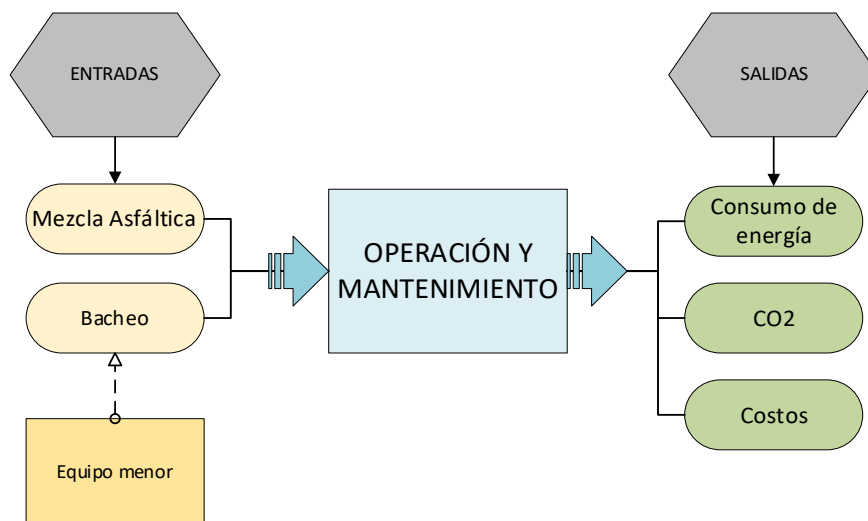


Fuente: Elaboración propia

Como puede observarse en la figura 28, se identificaron las respectivas entradas y salidas de los procesos de construcción del pavimento, logrando establecerse el diagrama que permitirán analizar el costo del ciclo de vida propuesto en la fase de la construcción.

Como se observa en la figura 29, se determinó las entradas y salidas de los procesos de operación y mantenimiento del pavimento.

**Figura 29. Entradas y Salidas de los procesos- Operación y Mantenimiento**



Fuente: Elaboración propia

Como puede observarse en la figura 29, utilizando las actividades determinadas en incisos anteriores se identificaron las respectivas entradas y salidas de los procesos de mantenimiento del pavimento que permitirán analizar el costo del ciclo de vida propuesto en la fase de operación y mantenimiento.

### 9.1.4. Recursos naturales

Los recursos naturales que intervienen en las entradas ilustradas anteriormente fueron determinados a partir de la estructura del pavimento calculada para la vía Macas-La Playa desde la abscisa 0+000 hasta la 0+705.00 ubicada en la parte baja de la ciudad de Azogues de acuerdo a como se observa en la figura 30.

Figura 30. Ubicación de la vía Macas-La Playa



Fuente: (Google, 2021)

Como puede observarse en la tabla 23, se presentan los datos que se requieren como insumo de la aplicación PaLATE (Greenroads, 2011).

Tabla 23. Datos de las características de la vía, sus materiales y las longitudes de transporte a obra

<i>Datos</i>	
<i>Ancho de vía (m)</i>	6
<i>Longitud de Vía (m)</i>	705
<i>Longitud de Transporte (m) - Planta Asfalto</i>	8570
<i>Longitud de transporte (m) - Mina</i>	8960

<i>Datos</i>	
<i>Peso Específico Grava (kg/m<sub>3</sub>)</i>	<i>1710</i>
<i>Peso Específico Arena (kg/m<sub>3</sub>)</i>	<i>1630</i>
<i>Peso Específico Piedra (kg/m<sub>3</sub>)</i>	<i>2210</i>
<i>Peso Específico Agregado Asfalto (kg/m<sub>3</sub>)</i>	<i>2390</i>
<i>Peso Específico Asfalto (kg/m<sub>3</sub>)</i>	<i>1100</i>
<i>Peso Específico Imprimación (kg/m<sub>3</sub>)</i>	<i>1100</i>
<i>Dotación de ligante asfáltico (l/m<sub>2</sub>)</i>	<i>5</i>

Fuente: Elaboración propia

Como se puede apreciar, los datos están en función de las características de la vía, sus materiales y las longitudes de transporte a obra, etc.

### 9.1.4.1. Recursos naturales requeridos para la etapa de producción y construcción del pavimento

Como se detalla en la tabla 24, se presentan los datos correspondientes a los recursos requeridos para la etapa de construcción del pavimento.

**Tabla 24. Recursos requeridos para etapa de construcción**

Estructura de Pavimento	Material	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Volumen (m <sup>3</sup> )	Peso (Kg)	Distancia de transporte una sola dirección (km)
Material de Subbase	Roca				
	Grava	1710	520,88	890702,7754	8960
	Arena	1630	123,77	201750,2899	8960
Material de Base	Suelo				
	Roca				
	Grava	1710	0,043	73,490328	8960
Pavimento	Arena	1630	429,73	700451,7878	8960
	Suelo				
	Agregado	2390	436,11	1042295,916	8960
	Asfalto	1100	31,59	34746,7428	8960
	Imprimación	1100	21,15	23265	8960

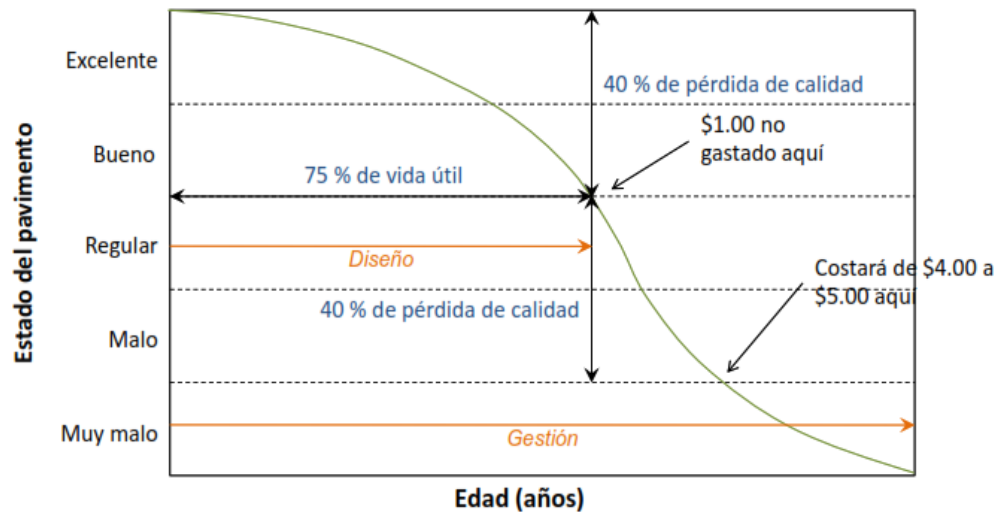
Fuente: Elaboración propia

Como se ha venido manifestando, la producción de mezcla asfáltica, la construcción de la estructura del pavimento y el mantenimiento del pavimento requiere de recursos naturales como los agregados vírgenes, en este caso, a partir de la estructura del pavimento determinada en capítulos anteriores se procedió a calcular los agregados básicos para la etapa de construcción y mantenimiento de la vía tal como se puede observar en la tabla 24.

## 9.1.4.2. Recursos naturales requeridos para la etapa de producción y mantenimiento del pavimento

Como puede observarse en la figura 30, se presenta la curva del nivel de servicio de una vía en función de su condición y años de servicio.

Figura 31. Nivel de servicio de una vía



Fuente: (U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration & American Association of State Highway and Transportation Officials, 1997)

Como puede verse en la figura 30, para la etapa de mantenimiento del pavimento se debe tomar en cuenta que se realizará un recapeo de 1 pulgada de espesor al 75% del periodo de servicio para que la condición de la capa de rodadura se mantenga en condiciones buenas y antes de alcanzar el nivel de servicio final de tal manera que no se requiera de mayores inversiones para mantener la capa de rodadura en buenas condiciones.

Como puede observarse en la tabla 25, se determinó los siguientes valores de agregados vírgenes para la etapa de mantenimiento.

Tabla 25. Recursos requeridos para etapa de mantenimiento

Estructura de Pavimento	Material	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Volumen (m <sup>3</sup> )	Peso (Kg)	Distancia de transporte una sola dirección (km)
Recapeo	Agregado	2390	87,22	208459,1833	8960
	Asfalto	1100	6,32	6949,34856	8960
	Imprimación	1100	21,15	23265	8960

Fuente: Elaboración propia

Como puede verse en la tabla 25, el volumen de agregado para el recapeo es de 87,22 m<sup>3</sup>, el volumen de asfalto requerido es de 6,32 m<sup>3</sup> y para la imprimación 21,15 m<sup>3</sup>.

## **9.1.5. Equipo**

Para la determinación de las emisiones generadas por las diferentes actividades contempladas para la producción de asfalto, la construcción de la estructura vial con carpeta asfáltica y el mantenimiento de la misma, se requiere definir el equipo para cada una de estas etapas, su rendimiento, consumo y tipo de combustible, así como datos de potencia de la maquinaria como puede observarse en las tablas 26 – 28.

**Tabla 26. Equipos para la construcción de carpeta asfáltica**

Actividades	Equipo	Marca/Modelo	Productividad ton/h	Consumo Combustible lt/h	Tipo Combustible	HP
Material de Subbase	Volquete 8m <sup>3</sup>	HINO/500	18	9,2	Diesel	172
	Volquete 8m <sup>3</sup>	INTERNATIONAL	18	9,5	Diesel	182
	Volquete 12 m <sup>3</sup>	INTERNATIONAL	27	14,2	Diesel	240
	Motoniveladora	NEW HOLLAND/140H	50	12	Diesel	185
	Rodillo Liso	CATERPILLAR/CS-563C	50	13	Diesel	139
	Tanquero de agua	INTERNATIONAL	0,71	9,5	Diesel	182
	Cargadora	HYUNDAI HL 790-9S	106	11,83	Diesel	215
Material de Base	Volquete 8m <sup>3</sup>	HINO/500	18	9,2	Diesel	172
	Volquete 8m <sup>3</sup>	INTERNATIONAL	18	9,5	Diesel	182
	Volquete 12 m <sup>3</sup>	INTERNATIONAL	27	14,2	Diesel	240
	Motoniveladora	NEW HOLLAND/140H	51	12	Diesel	185
	Rodillo Liso	CATERPILLAR/CS-563C	51	13	Diesel	139
	Tanquero de agua	INTERNATIONAL	0,71	9,5	Diesel	182
	Cargadora	HYUNDAI HL 790-9S	108	11,83	Diesel	215
Pavimento	Tanquero imprimación	VOLKSWAGEN/17220	1,041	7,10	Diesel	140
	Teminadora	BOMAG/BF 300C	75	7,10	Diesel	74
	Rodillo Tándem	BOMAG/BW 202 AD	75	2,37	Diesel	138
	Rodillo Neumático	BOMAG/BW 24 RH	75	4,73	Diesel	100

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 27. Equipos para el mantenimiento de la vía**

Actividades	Equipo	Marca/Modelo	Productividad ton/h	Consumo Combustible lt/h	Tipo Combustible	HP
Recapeo	Tanquero imprimación	VOLKSWAGEN/17220	1	7,10	Diesel	140
	Teminadora	BOMAG/BF 300C	75	7,10	Diesel	74
	Rodillo Tándem	BOMAG/BW 202 AD	75	2,37	Diesel	138
	Rodillo Neumático	BOMAG/BW 24 RH	75	4,73	Diesel	100

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 28. Equipos para la producción de mezcla asfáltica**

Equipo	Productividad (ton/h)	Energía (MJ/ton)	CO <sub>2</sub> (kg/ton)
BOMAG MARINI / MAGNUM 80	80,00	418,60	3315

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en las tablas 26 – 28, a partir de la información proporcionada por la Dirección de Obras Públicas Municipales y de la investigación en campo efectuada al equipo caminero para la construcción vial se generó los datos primordiales para ingresarlos a través de la aplicación PaLATE (Greenroads, 2011).

### 9.1.6. Energía y emisiones

Una vez establecidas las entradas, definidas las actividades, haber determinado los recursos naturales y equipo caminero requerido para la producción, construcción y mantenimiento de una vía con carpeta asfáltica (MAT y MAC) se obtiene los siguientes datos de consumo de energía y emisiones.

#### 9.1.6.1. Consumo de energía y emisiones del ciclo de vida del pavimento con una carpeta de mezcla asfáltica en caliente

Los resultados del consumo de energía del ciclo de vida del pavimento cuando se usa una mezcla asfáltica en caliente pueden observarse en la tabla 29.

**Tabla 29. Consumo de energía y emisiones para la producción, construcción y mantenimiento del pavimento, MAC**

		Energía [GJ]	CO <sub>2e</sub> [kg] = GWP
Construcción	Producción de materiales	665,5	500,834
	Transporte de materiales	56,4	3,892



		Energía [GJ]	CO <sub>2</sub> e [kg] = GWP
	<b>Equipo</b>	32,6	2,248
<b>Mantenimiento</b>	<b>Producción de materiales</b>	122,4	107,318
	<b>Transporte de materiales</b>	6,4	441
	<b>Equipo</b>	1,7	120
<b>Total</b>	<b>Producción de materiales</b>	787,9	608,152
	<b>Transporte de materiales</b>	62,8	4333
	<b>Equipo</b>	34,3	2368
<b>Total</b>		<b>885,100</b>	<b>614,853</b>

Fuente: (Greenroads, 2011)

Como se puede observar en la tabla 29, el consumo total de energía para del ciclo de vida del pavimento cuando se usa una mezcla asfáltica en caliente es de 885,100 GJ, mientras que las emisiones de CO<sub>2</sub> equivalentes son de 614,853 CO<sub>2</sub>e [kg].

A continuación, como puede verse en la tabla 30 se muestra el desglose de energía y emisiones para las fases de producción, construcción y mantenimiento usando una MAC.

**Tabla 30. Desglose de energía y emisiones para las fases de producción, construcción y mantenimiento de las que incluye las principales actividades propuestas, utilizando una mezcla asfáltica en caliente**

Fase	Capa	Energía [MJ]	CO <sub>2</sub> -e [kg]
<b>Producción inicial de material de construcción</b>	Conformación estructura	279,235	19,262
	Carpeta	386,271	481,572
	Estructuras	0	0
	<b>Total</b>	<b>665,506</b>	<b>500,834</b>
<b>Transporte de Material de Construcción Inicial</b>	Residuos de Demolición	0	0
	Conformación estructura	25,334	1,748
	Carpeta	31,074	2,144
	Estructuras	0	0
<b>Total</b>	<b>56,408</b>	<b>3,892</b>	
<b>Equipo de construcción inicial</b>	Demolición	0	0
	Conformación estructura	24,540	1,693
	Carpeta	8,043	555
	Estructuras	0	0
<b>Total</b>	<b>32,583</b>	<b>2,248</b>	
<b>Producción de materiales de mantenimiento</b>	Conformación estructura	0	0
	Carpeta	122,417	107,318
	<b>Total</b>	<b>122,417</b>	<b>107,318</b>
<b>Transporte de material de mantenimiento</b>	Residuos de Demolición	0	0

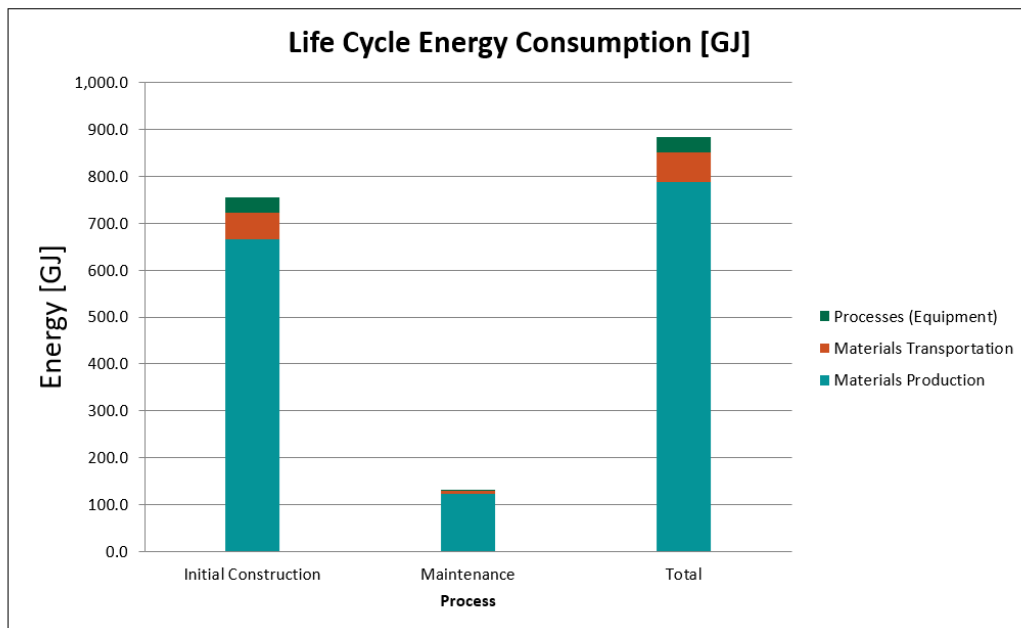
Fase	Capa	Energía [MJ]	CO <sub>2</sub> -e [kg]
Equipo de mantenimiento	Conformación estructura	0	0
	Bacheo	6,397	441
	<b>Total</b>	<b>6,397</b>	<b>441</b>
	Demolición	0	0
	Conformación estructura	0	0
	Bacheo	1,745	120
	<b>Total</b>	<b>1,745</b>	<b>120</b>

Fuente: (Greenroads, 2011)

Como puede observarse en la tabla 30, los consumos de energía y emisiones de CO<sub>2</sub> son mayores en la etapa inicial de producción y construcción del pavimento seguido de la producción de la mezcla asfáltica en la etapa de mantenimiento.

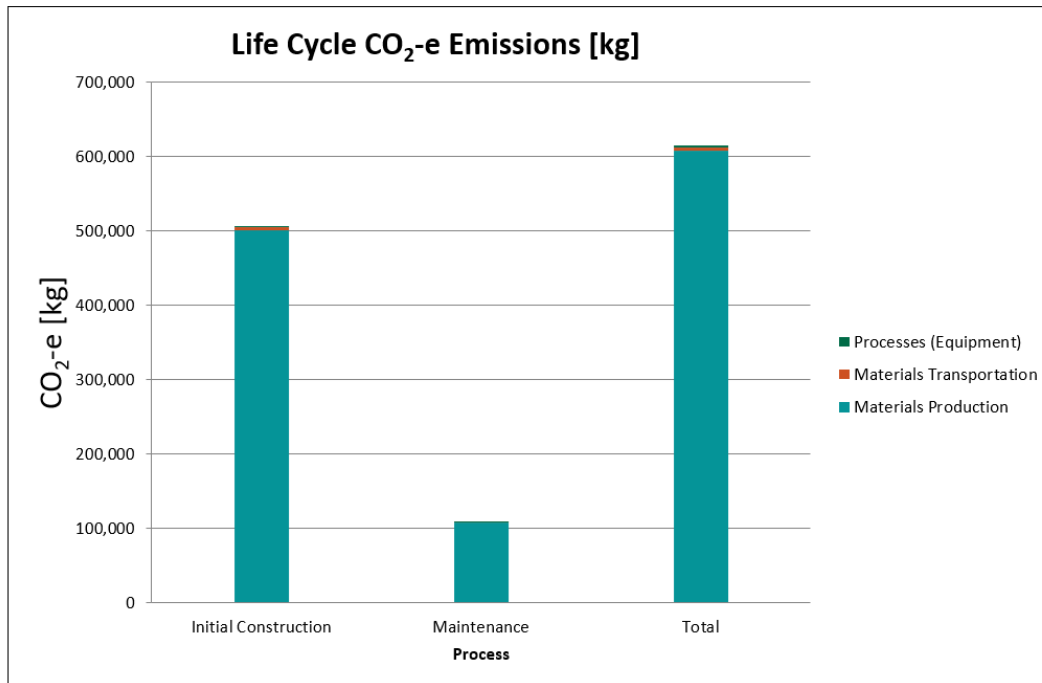
El consumo gráfico de energía y emisiones del ciclo de vida para las fases de producción, construcción y mantenimiento del pavimento con mezcla asfáltica en caliente se puede observar en las figuras 32 – 33.

**Figura 32. Consumo de energía del Ciclo de vida (producción, construcción y mantenimiento) del pavimento con mezcla asfáltica en caliente**



Fuente: (Greenroads, 2011)

Figura 33. Emisiones de CO2 equivalente del Ciclo de vida (producción, construcción y mantenimiento) del pavimento con mezcla asfáltica en caliente



Fuente. (Greenroads, 2011)

Como puede observarse en las figuras 32 – 33, los mayores consumos de energía y emisiones se dan en las fases de producción y construcción inicial del pavimento.

### 9.1.6.2. Consumo de energía y emisiones del ciclo de vida del pavimento con una carpeta de mezcla asfáltica en caliente

Los resultados del consumo de energía del ciclo de vida del pavimento cuando se usa una mezcla asfáltica en caliente pueden observarse en la tabla 31.

Tabla 31. Consumo de energía y emisiones para la producción, construcción y mantenimiento del pavimento, MAT

		Energía [GJ]	CO <sub>2</sub> e [kg] = GWP
Construcción	Producción de materiales	660,0	479,274
	Transporte de materiales	56,4	3,892
	Equipo	32,6	2,248
Mantenimiento	Producción de materiales	121,2	102,640
	Transporte de materiales	6,4	441
	Equipo	1,7	120
Total	Producción de materiales	781,2	581,914
	Transporte de materiales	62,8	4,333

	Energía [GJ]	CO <sub>2</sub> e [kg] = GWP
<b>Equipo</b>	34,3	2,368
<b>Total</b>	<b>878,400</b>	<b>588,615</b>

Fuente: (Greenroads, 2011)

Como se puede ver en la tabla 31, el consumo total de energía para del ciclo de vida del pavimento cuando se usa una MAT es de 878,400 GJ, mientras que las emisiones de CO<sub>2</sub> equivalentes son de 588,615 CO<sub>2</sub>e [kg].

A continuación, como puede verse en la tabla 32 se muestra el desglose de energía y emisiones para las fases de producción, construcción y mantenimiento usando una MAT.

**Tabla 32. Desglose de energía y emisiones para las fases de producción, construcción y mantenimiento de las que incluye las principales actividades propuestas, utilizando una mezcla asfáltica tibia**

Fase	Capa	Energía [MJ]	CO <sub>2</sub> -e [kg]
<b>Producción inicial de material de construcción</b>	Conformación estructura	279,235	19,262
	Carpeta	380,771	460,012
	Estructuras	0	0
	<b>Total</b>	<b>665,506</b>	<b>500,834</b>
<b>Transporte de Material de Construcción Inicial</b>	Residuos de Demolición	0	0
	Conformación estructura	25,334	1,748
	Carpeta	31,074	2,144
	Estructuras	0	0
<b>Total</b>	<b>56,408</b>	<b>3,892</b>	
<b>Equipo de construcción inicial</b>	Demolición	0	0
	Conformación estructura	24,540	1,693
	Carpeta	8,043	555
	Estructuras	0	0
<b>Total</b>	<b>32,583</b>	<b>2,248</b>	
<b>Producción de materiales de mantenimiento</b>	Conformación estructura	0	0
	Carpeta	121,223	102,640
	<b>Total</b>	<b>121,223</b>	<b>102,640</b>
<b>Transporte de material de mantenimiento</b>	Residuos de Demolición	0	0
	Conformación estructura	0	0
	Bacheo	6,397	441
	<b>Total</b>	<b>6,397</b>	<b>441</b>
<b>Equipo de mantenimiento</b>	Demolición	0	0
	Conformación estructura	0	0
	Bacheo	1,745	120

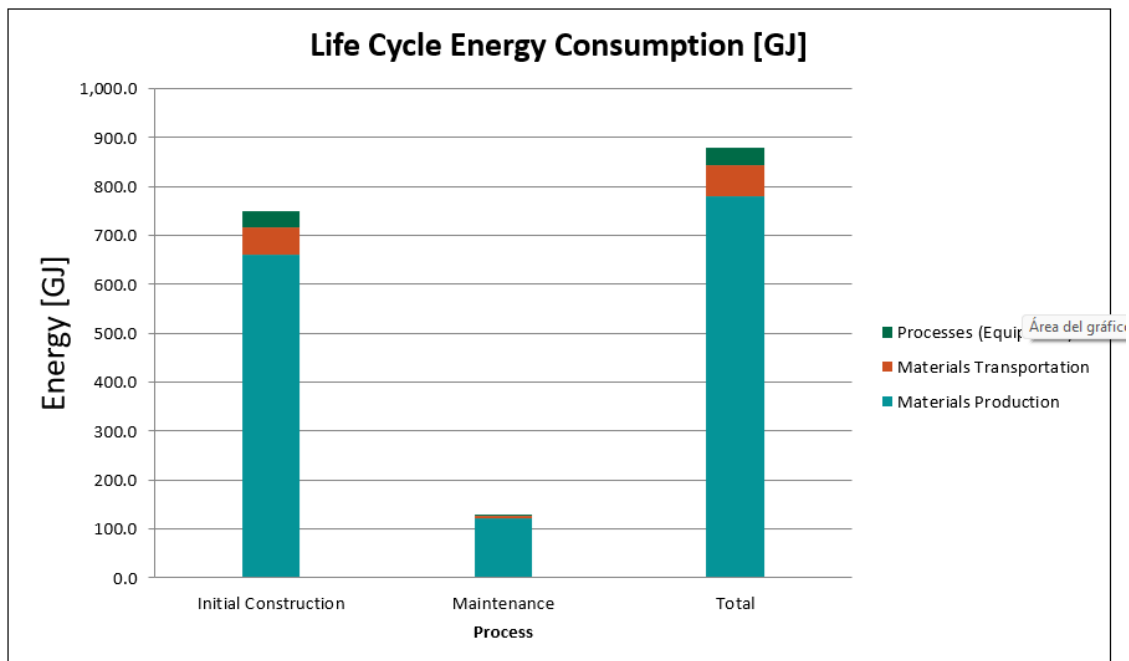
Fase	Capa	Energía [MJ]	CO <sub>2</sub> -e [kg]
	<b>Total</b>	<b>1,745</b>	<b>120,000</b>

Fuente: (Greenroads, 2011)

Como puede observarse en la tabla 32, los consumos de energía y emisiones de CO<sub>2</sub> son mayores en la etapa inicial de producción y construcción del pavimento seguido de la producción de la mezcla asfáltica en la etapa de mantenimiento.

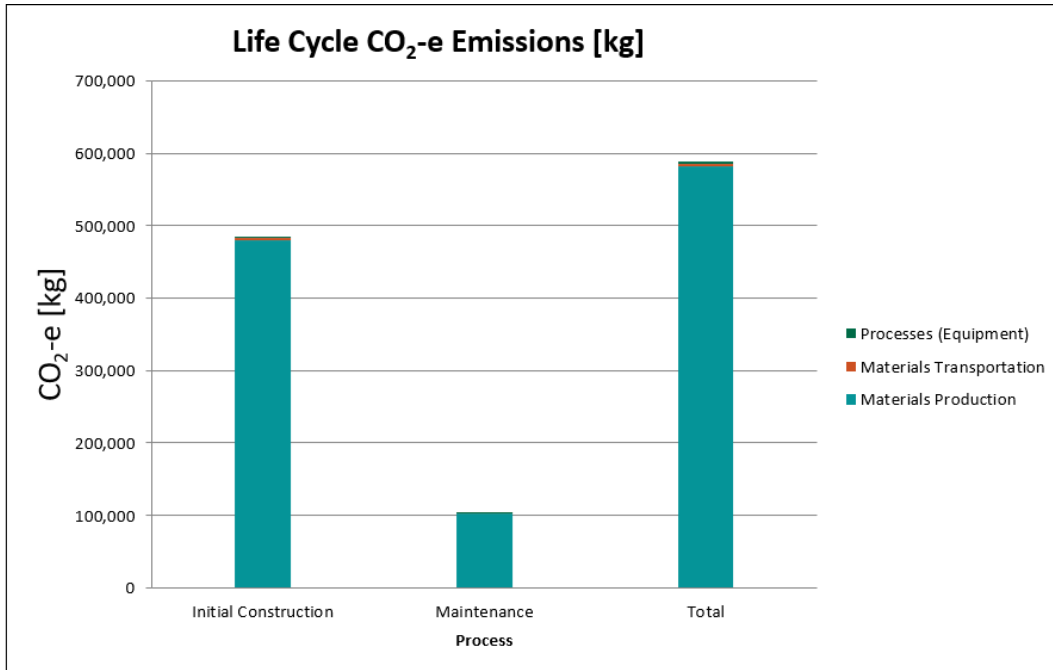
El consumo gráfico de energía y emisiones del ciclo de vida para las fases de producción, construcción y mantenimiento del pavimento con una MAT se puede observar en las figuras 34 – 35.

**Figura 34. Consumo de energía del Ciclo de vida (producción, construcción y mantenimiento) del pavimento con mezcla asfáltica tibia**



Fuente: (Greenroads, 2011)

Figura 35. Emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente del Ciclo de vida (producción, construcción y mantenimiento) del pavimento con mezcla asfáltica tibia



Fuente: (Greenroads, 2011)

Como puede observarse en las figuras 34 – 35, los mayores consumos de energía y emisiones se dan en las fases de producción y construcción inicial del pavimento.

## 10. DISEÑO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE (MAC)

El presente diseño está enmarcado en la aplicación de la metodología Marshall para pavimentación, formulado por Bruce Marshall, ingeniero de asfaltos del Departamento de Autopistas del estado de Mississippi (Garnica et al., 2005) la cual se describe en el Apéndice B.

### 10.1. Mezcla de agregados

Los agregados utilizados para el diseño de la mezcla son:

- Agregado grueso, pasante  $\frac{3}{4}$  y retenido en  $\frac{3}{8}$ .
- Agregado medio, pasante  $\frac{3}{8}$  y retenido en N°4.
- Agregado fino, arena triturada.

#### 10.1.1. Análisis granulométrico

A continuación, la tabla 33 muestra el análisis granulométrico y la combinación de los agregados descritos en el numeral anterior.

**Tabla 33. Análisis granulométrico y combinación de agregados de la mezcla**

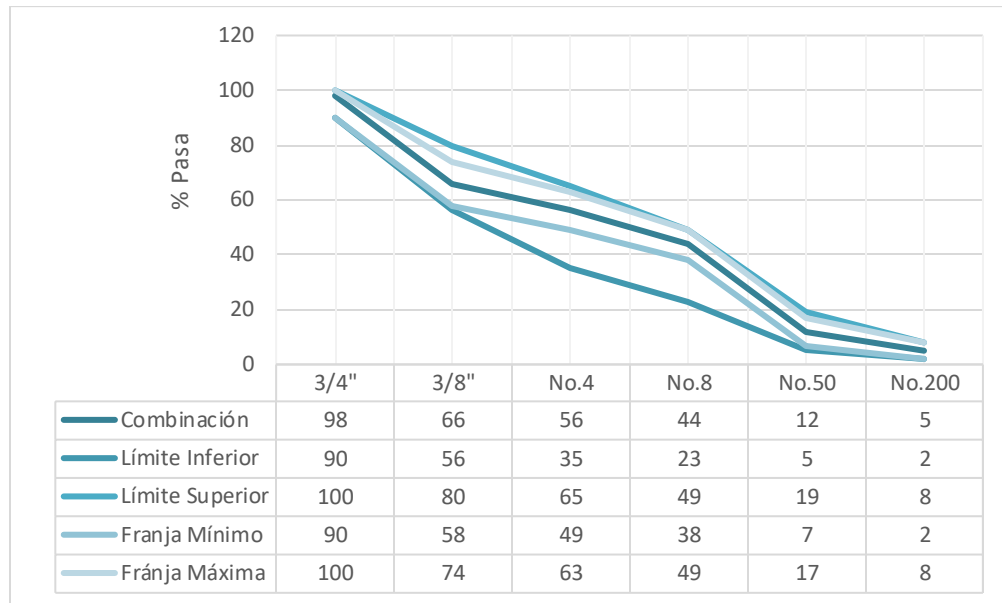
Tamiz	Peso Retenido Acumulado			% Pasa			% Diseño			Combinación áridos	Combinación especificada		Valor medio	Franja de trabajo	
	Fracción			Fracción			Fracción				min.	máx.		min.	máx.
	1	2	3	1	2	3	1	2	3						
1"				100	100	100	44	27	29	100	100	100	100	100	100
3/4"	4	0	0	96	100	100	42,2	27	29	98	90	100	95	90	100
3/8"	76,7	0	0,8	23,3	100	99,2	10,3	27	28,8	66	56	80	68	58	74
No.4	96,1	1,5	4,6	3,9	98,5	95,4	1,7	26,6	27,7	56	35	65	50	49	63
No.8	98,1	24,7	20,8	1,9	75,3	79,2	0,8	20,3	23	44	23	49	36	38	49
No.50	98,3	73,2	86,2	1,7	26,8	13,8	0,7	7,2	4	12	5	19	12	7	17
No.200	98,7	86,6	95,7	1,3	13,4	4,3	0,6	3,6	1,2	5	2	8	5	2	8

Fuente: Elaboración propia

Nota: Fracción 1: Agregado  $\frac{3}{4}$ , fracción 2: Agregado  $\frac{3}{8}$  y fracción 3: Agregado arena cribada

Como se puede observar, la tabla 33 muestra el resultado de las granulometrías individuales de los agregados y la combinación de la mezcla de diseño. Del análisis efectuado se obtuvo la curva granulométrica de la combinación de agregados, tal como se muestra en la figura 36.

Figura 36. Curva granulométrica de los agregados y la combinación de la mezcla



Fuente: Elaboración propia

Como puede observarse en la figura 36, la curva granulométrica de la combinación de agregados se encuentra entre los rangos máximos y mínimos especificados (Asphalt Institute, 1999).

### 10.1.2. Temperatura de mezclado y compactación

Se escogió una temperatura de 160°C para mezclado y una temperatura de compactación de 148°C.

### 10.1.3. Briquetas

Para la elaboración de las briquetas se tomó como guía lo establecido en la normativa ASTM D6926 (American Society for Testing and Materials, 2020).

### 10.1.4. Volúmenes de la mezcla

El cálculo de las propiedades volumétricas de la mezcla se presenta a continuación, mediante la tabla 34.



**Tabla 34. Propiedades volumétricas de la mezcla MAC**

Gravedad Especifica De C.A. (Gb):		1,019		Golpes:		75		Anillo:		1							
Gravedad Especifica Bulk De Ag. (Gsb):		2,544		Gravedad Especifica Bulk De Ag. (Gsb):		2,624		Constante Anillo:		10,01							
MUESTRA	AGREGADOS.	DOSIFICACIÓN %	PESO BRIQUETA gr.			VOLUMEN c.c.	DENSIDAD		VOLUMEN %			V.A.M. %	Relación A./V. %	FACTOR CORREC.	ESTABILIDAD (lbs.)		FLUJO
			AIRE SECO	AIRE S.S.S	AGUA S.S.S		BRIQUETA BULK.	TEÓRICA RICE	AGREGADO	AIRE	ASFALTO				DIAL	CORREG.	
1	3/4"	41,8	1192	1203	675	528	2,253							0,96	2893,9	2772	11
2	3/8"	25,65	1191	1203	673	531	2,242							0,97	3217,2	3082	9
3	ARENA	27,55	1191	1198	675	523	2,274							0,98	3414,9	3276	9
	% C.A.	5															
	total	100					<b>2,256</b>	<b>2,464</b>	<b>82,17</b>	<b>8,26</b>	<b>9,48</b>	<b>17,74</b>	<b>53,38</b>			<b>2928</b>	<b>10</b>
4	3/4"	41,58	1193	1196	682	513	2,328							1,00	4004,2	4018	10
5	3/8"	25,52	1191	1194	677	517	2,309							1,00	3638,9	3663	11
6	ARENA	27,41	1191	1193	671	522	2,283							1,00	3575,8	3574	13
	% C.A.	5,5															
	total	100					<b>2,307</b>	<b>2,431</b>	<b>83,55</b>	<b>5,46</b>	<b>11,16</b>	<b>16,62</b>	<b>67,28</b>			<b>3837</b>	<b>11</b>
7	3/4"	41,36	1197	1198	689	509	2,319							1,01	3789,1	3684	12
8	3/8"	25,38	1192	1914	685	509	2,348							1,04	3472,4	3627	12
9	ARENA	27,26	1190	1191	678	513	2,321							1,00	3544,7	3548	12
	% C.A.	6															
	total	100					<b>2,330</b>	<b>2,419</b>	<b>83,94</b>	<b>2,96</b>	<b>12,72</b>	<b>15,68</b>	<b>80,80</b>			<b>3664</b>	<b>12</b>
10	3/4"	41,14	1192	1192	683	509	2,346							1,04	3232,4	3383	13
11	3/8"	25,25	1188	1189	683	506	2,351							1,04	3343,3	3485	12
12	ARENA	27,12	1213	1214	694	520	2,322							1,00	3286,4	3256	15
	% C.A.	6,5															
	total	100					<b>2,340</b>	<b>2,390</b>	<b>83,86</b>	<b>2,08</b>	<b>14,06</b>	<b>16,14</b>	<b>87,10</b>			<b>3426</b>	<b>13</b>
13	3/4"	40,92	1196	1196	688	504	2,355							1,04	3314,1	3456	14

		Gravedad Especifica De C.A.(Gb):		1,019		Golpes:		75		Anillo:		1					
		Gravedad Especifica Bulk De Ag. (Gsb):		2,544		Gravedad Especifica Bulk De Ag. (Gsb):		2,624		Constante Anillo:		10,01					
MUESTRA	AGREGADOS.	DOSIFICACIÓN %	PESO BRIQUETA gr.			VOLUMEN c.c.	DENSIDAD		VOLUMEN %			V.A.M. %	Relación A./V. %	FACTOR CORREC.	ESTABILIDAD (lbs.)		FLUJO
			AIRE SECO	AIRE S.S.S	AGUA S.S.S		BRIQUETA BULK.	TEÓRICA RICE	AGREGADO	AIRE	ASFALTO				DIAL	CORREG.	
14	3/8"	25,11	1192	1193	687	509	2,382							1,03	3018,5	3210	13
15	ARENA	26,97	1203	1203	693	510	2,349							1,00	3320	3298	14
	% C.A.	7															
	total	100					<b>2,362</b>	<b>2,376</b>	<b>84,19</b>	<b>1,20</b>	<b>14,90</b>	<b>16,11</b>	<b>92,78</b>			<b>3322</b>	<b>14</b>

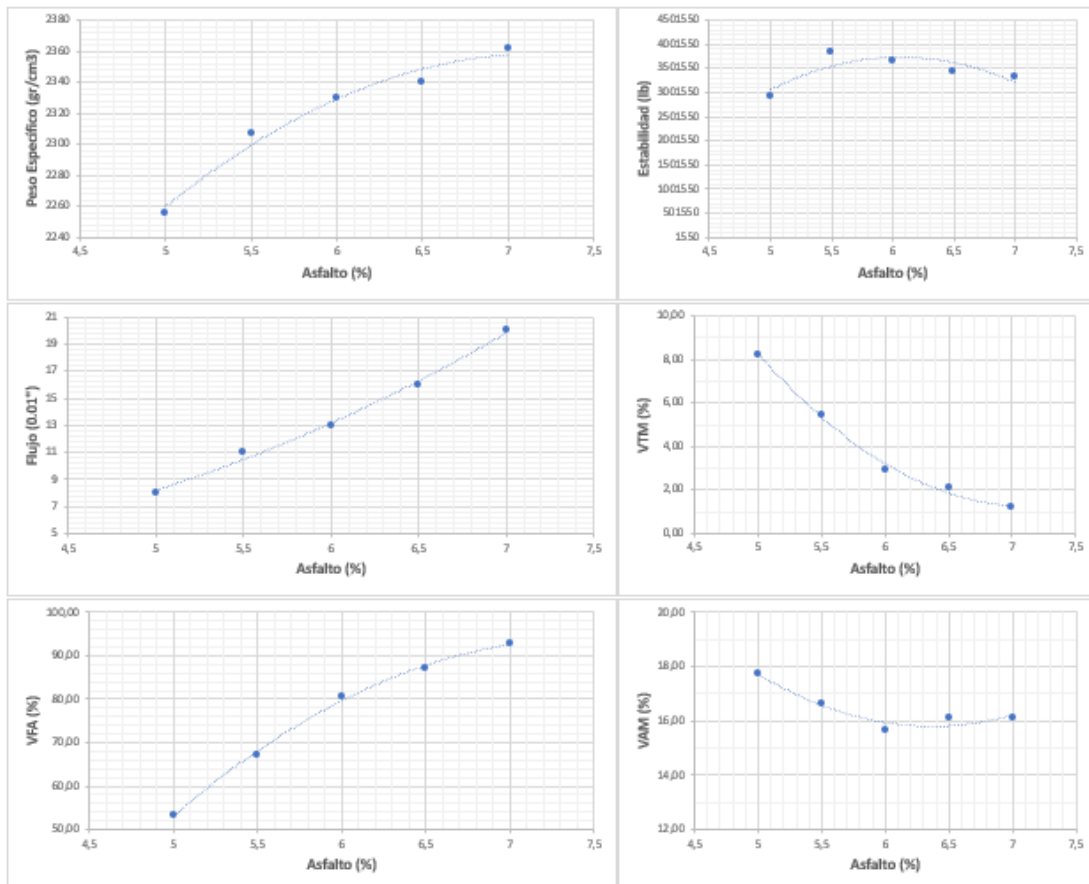
Fuente: Elaboración propia

Como puede observarse en la tabla 34, las propiedades volumétricas varían con el porcentaje de asfalto y son calculadas para cada briqueta.

## 10.1.5. Porcentaje óptimo de asfalto

Mediante el uso de diferentes porcentajes de contenido de asfalto con incrementos de 0,5% se obtuvieron las siguientes gráficas, tal como puede observarse en la figura 37.

Figura 37. Gráfica de las propiedades de la mezcla asfáltica MAC



Fuente: Elaboración propia

Como puede verse en la figura 37, la relación de vacíos, VMA, VFA, peso unitario, estabilidad y fluencia, varían de acuerdo al contenido de asfalto.

Para determinar el contenido óptimo de asfalto se analizó los siguientes criterios:

- Mínimo valor de estabilidad Marshall.
- Rango Marshall de los valores de flujo.
- Rango de vacíos de la mezcla Pa.
- Mínimo VMA.
- Rango de valores de VFA.

El porcentaje de asfalto que logra que el porcentaje de vacíos de la mezcla de diseño sea 4%, resulta ser el porcentaje óptimo de asfalto. Por lo anterior, se determinó un porcentaje óptimo de asfalto de 5,8%. Con el valor inicial del contenido de asfalto se calcula a partir de las curvas anteriores los valores de:

- Estabilidad Marshall.
- Flujo Marshall.
- VMA.
- VFA.

Los resultados obtenidos se presentan a continuación, en la tabla 35.

**Tabla 35. Contenido óptimo de asfalto y propiedades volumétricas de la mezcla MAC**

Parámetro	Valor
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	2320
Vacíos de aire (%)	4
Estabilidad (lb)	2890
% Óptimo de asfalto	5,80
Fluencia (1/100 pulg.)	11,6
RBA (%)	74,48

Fuente: Elaboración propia

Como puede observarse en la tabla 35, para el porcentaje óptimo de asfalto se tienen nuevos valores de los parámetros de diseño, mismos que se comparan con la especificación indicada en las tablas B1 y B2, del Apéndice B, resultando que, cumplen a satisfacción con los criterios especificados.

### **10.1.6. Propiedades de la mezcla asfáltica óptima**

Determinado el porcentaje óptimo de asfalto de la mezcla, se determina las relaciones volumétricas mostradas en la tabla 36.

**Tabla 36. Propiedades de la mezcla asfáltica óptima - MAC**

		Gravedad Especifica De C.A. (Gb):		1,019		Golpes:		75		Anillo:		1					
		Gravedad Especifica Bulk De Ag. (Gsb):		2,544		Gravedad Especifica Bulk De Ag. (Gsb):		2,624		Constante Anillo:		10,01					
MUESTRA	AGREGADOS.	DOSIFICACIÓN %	PESO BRIQUETA gr.			VOLUMEN c.c.	DENSIDAD		VOLUMEN %			V.A.M. %	Relación A./V. %	FACTOR CORREC.	ESTABILIDAD (lbs.)		FLUJO
			AIRE SECO	AIRE S.S.S	AGUA S.S.S		BRIQUETA BULK.	TEÓRICA RICE	AGREGADO	AIRE	ASFALTO				DIAL	CORREG.	
A	3/4"	41,43	1195	2089	689	515	2,341							1,00	3738,7	3715	14
B	3/8"	25,43	1192	2078	684	509	2,344							1,04	3300,9	3430	12
C	ARENA	27,31	1190	2080	679	508	2,331							1,04	3948,3	4119	12
	% CA.	5,8															
	Total	100					<b>2,339</b>	<b>2,432</b>	<b>84,47</b>	<b>4,0</b>	<b>11,63</b>	<b>15,61</b>	<b>74,54</b>		<b>229</b>	<b>3754,4629</b>	<b>13</b>

Fuente: Elaboración propia

Como puede verse en la tabla 36, para un porcentaje de asfalto de 5,8% y un porcentaje de vacíos de 4,0%, se tiene una gravedad específica relativa Bulk de 2,339, un VAM de 15,61%, una estabilidad corregida de 3754,46 lb, un flujo de 13 mm., un VFA de 74,54% y una densidad relativa teórica RICE de 2,432.

## 11. DISEÑO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA TIBIA (MAT)

Para el diseño de la mezcla tibia es necesario aplicar la metodología Marshall (Zydex Industries, 2022), descrito en el Apéndice B, la dosificación y protocolos de ensayo establecidas por el fabricante del aditivo Zycotherm y descritas en el capítulo 7.

### 11.1. Mezcla de agregados

Los agregados utilizados para el diseño de la mezcla son:

- Agregado grueso, pasante  $\frac{3}{4}$  y retenido en  $\frac{3}{8}$ .
- Agregado medio, pasante  $\frac{3}{8}$  y retenido en N°4.
- Agregado fino, arena triturada.

#### 11.1.1. Análisis granulométrico

El análisis granulométrico y la combinación de los agregados obedecen a los determinados en el acápite 10.1.1 del presente trabajo.

#### 11.1.2. Temperatura de mezclado y compactación

Con la finalidad de validar el uso de mezclas tibias se escogió una temperatura de 150°C para mezclado y una temperatura de compactación de 135°C.

#### 11.1.3. Briquetas

Para la elaboración de las briquetas se tomó como guía lo establecido en la normativa ASTM D6926 (American Society for Testing and Materials, 2020).

#### 11.1.4. Volúmenes de la mezcla

El cálculo de las propiedades volumétricas de la mezcla se presenta a continuación, mediante la tabla 34.

**Tabla 37. Propiedades volumétricas de la mezcla MAT**

Gravedad Especifica De C.A.(Gb):		1,019		Golpes:		75		Anillo:		1							
Gravedad Especifica Bulk De Ag. (Gsb):		2,544		Gravedad Especifica Bulk De Ag. (Gsb):		2,624		Constante Anillo:		10,01							
MUESTRA	AGREGADOS	DOSIFICACIÓN %	PESO BRIQUETA gr			VOLUMEN N c.c.	DENSIDAD		VOLUMEN %			V.A.M %	Relación A./V. %	FACTOR CORRECC.	ESTABILIDAD (lbs.)		FLUJO
			AIRE SECO	AIRE S.S.	AGUA S.S.S		BRIQUETA BULK.	TEÓRICA RICE	AGREGADO	AIRE	ASFALTO				DIAL	CORREG.	
1	3/4"	41,8	1210	1212	672	540	2,241							0,93	184	1715	8
2	3/8"	25,65	1198	1198	674	524	2,286							0,99	165	1627	9
3	ARENA	27,55	1150	1151	645	506	2,273							1,05	155	1632	8
	% C.A.	5															
	total	100					<b>2,267</b>	<b>2,495</b>	<b>84,66</b>	<b>9,14</b>	<b>6,21</b>	<b>15,34</b>	<b>54,9</b>		<b>168</b>	<b>1658</b>	<b>8</b>
4	3/4"	41,58	1173	1175	669	506	2,318							1,07	205	2193	11
5	3/8"	25,52	1152	1154	657	497	2,318							1,11	200	2213	10
6	ARENA	27,41	1097	1099	626	473	2,319							1,21	174	2114	11
	% C.A.	5,5															
	total	100					<b>2,318</b>	<b>2,464</b>	<b>86,1</b>	<b>5,91</b>	<b>7,98</b>	<b>13,9</b>	<b>67,9</b>		<b>193</b>	<b>2173</b>	<b>11</b>
7	3/4"	41,36	1173	1175	668	507	2,314							1,06	261	2782	12
8	3/8"	25,38	1152	1154	658	496	2,323							1,11	244	2710	13
9	ARENA	27,26	1097	1099	625	474	2,314							1,21	231	2795	14
	% C.A.	6															
	total	100					<b>2,317</b>	<b>2,432</b>	<b>85,61</b>	<b>4,74</b>	<b>9,65</b>	<b>14,39</b>	<b>74,2</b>		<b>245</b>	<b>2762</b>	<b>13</b>

Gravedad Especifica De C.A.(Gb):		1,019		Golpes:		75		Anillo:		1							
Gravedad Especifica Bulk De Ag. (Gsb):		2,544		Gravedad Especifica Bulk De Ag. (Gsb):		2,624		Constante Anillo:		10,01							
MUESTRA	AGREGADO	DOSIFICACIÓN	PESO BRIQUETA gr			VOLUMEN	DENSIDAD		VOLUMEN %			V.A.M	Relación A./V. %	FACTOR CORRECTOR	ESTABILIDAD (lbs.)		FLUJO
			AIRE SECO	AIRE S.S.	AGUA S.S.S		N c.c.	BRIQUETA BULK.	TEÓRICA RICE	AGREGADO	AIRE				ASFALTO	DIAL	
10	3/4"	41,14	1043	1045	593	452	2,308							1,32	248	3282	16
11	3/8"	25,25	1070	1073	606	467	2,291							1,24	234	2912	15
12	ARENA	27,12	1024	1026	575	451	2,271							1,33	218	2897	16
	% C.A.	6,5															
	total	100					<b>2,29</b>	<b>2,401</b>	<b>84,16</b>	<b>4,62</b>	<b>11,21</b>	<b>15,84</b>	<b>76</b>		<b>233</b>	<b>3031</b>	<b>16</b>
13	3/4"	40,92	1043	1045	591	454	2,297							1,31	238	3124	21
14	3/8"	25,11	1070	1073	604	469	2,281							1,23	211	2605	22
15	ARENA	26,97	1024	1026	572	454	2,256							1,31	200	2625	18
	% C.A.	7															
	total	100					<b>2,278</b>	<b>2,37</b>	<b>83,28</b>	<b>3,87</b>	<b>12,86</b>	<b>16,72</b>	<b>80,2</b>		<b>216</b>	<b>2785</b>	<b>20</b>

Fuente: Elaboración propia

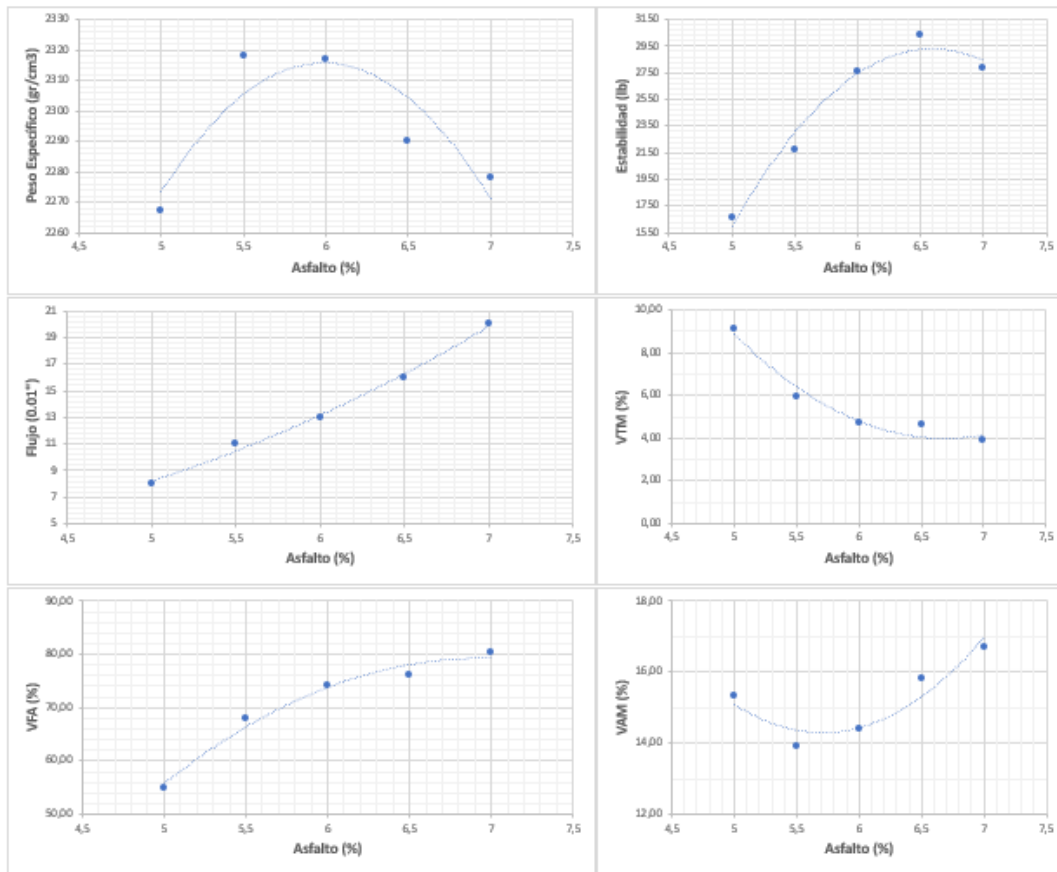
Las propiedades volumétricas de la mezcla varían con el porcentaje de asfalto y son calculadas para cada briqueta, tal como se muestra en la tabla 37



## 11.1.5. Porcentaje óptimo de asfalto

Aplicando diferentes porcentajes de contenido de asfalto con incrementos de 0,5% se obtuvieron las siguientes gráficas, tal como puede observarse en la figura 38.

Figura 38. Gráfica de las propiedades de la mezcla asfáltica MAT



Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la figura 38, para determinar el contenido óptimo de asfalto se analizó los siguientes criterios:

- Mínimo valor de estabilidad Marshall.
- Rango Marshall de los valores de flujo.
- Rango de vacíos de la mezcla Pa.
- Mínimo VMA.
- Rango de valores de VFA.

El porcentaje de asfalto que logra que el porcentaje de vacíos de la mezcla de diseño sea 4%, resulta ser el porcentaje óptimo de asfalto equivalente a 5,83%. Con el valor inicial del contenido de asfalto se calcula a partir de las curvas anteriores los valores de:

- Estabilidad Marshall.
- Flujo Marshall.
- VMA.
- VFA.

Los resultados obtenidos se presentan a continuación, en la tabla 38.

**Tabla 38. Contenido óptimo de asfalto y propiedades volumétricas de la mezcla MAT**

Parámetro	Valor
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	2315
Vacíos de aire (%)	3.98
Estabilidad (lb)	2890
% Óptimo de asfalto	5,83
Fluencia (1/100 pulg.)	12
VMA (%)	15,6
RBA (%)	78

Fuente: Elaboración propia

Como puede observarse en la tabla 38, el porcentaje óptimo de asfalto se tienen nuevos valores de los parámetros de diseño que comparados con la especificación indicada en las tablas B1 y B2, del Apéndice B, resulta que, cumplen a satisfacción con los criterios especificados.

### **11.1.6. Propiedades de la mezcla asfáltica óptima**

Con el porcentaje óptimo de asfalto de la mezcla, se determina las relaciones volumétricas mostradas en la tabla 39.

**Tabla 39. Propiedades de la mezcla asfáltica óptima - MAT**

Gravedad Especifica De C.A.(Gb):		1,019		Golpes:		75		Anillo:		1							
Gravedad Especifica Bulk De Ag. (Gsb):		2,544		Gravedad Especifica Bulk De Ag. (Gsb):		2,624		Constante Anillo:		10,01							
MUESTRA	AGREGADO S.	DOSIFICACIÓN %	PESO BRIQUETA gr.			VOLUMEN c.c.	DENSIDAD		VOLUMEN %			V.A.M %	Relación A./V. %	FACTOR CORRECTOR	ESTABILIDAD (lbs.)		FLUJO
			AIRE SECO	AIRE S.S.	AGUA S.S.S		BRIQUETA BULK.	TEÓRICA RICE	AGREGADO	AIRE	ASFALTO				DIAL	CORREG.	
A	3/4"	41,43	1120	1122	636	486	2,305							1,12	241	2693	13
B	3/8"	25,43	1195	1198	681	517	2,311							0,99	233	2318	10
C	ARENA	27,31	1180	1180	668	512	2,305							1,01	214	2168	12
	% CA.	5,83															
	Total	100					<b>2,307</b>	<b>2,443</b>	<b>85,4</b>	<b>5,57</b>	<b>9,04</b>	<b>14,6</b>	<b>70,3</b>		<b>229</b>	<b>2393</b>	<b>12</b>

Fuente: Elaboración propia

La tabla 39 indica que para un porcentaje de asfalto de 5,83% y un porcentaje de vacíos de 3,98%, se tiene una gravedad específica relativa Bulk de 2,307, un VAM de 14,6%, una estabilidad corregida de 2393 lb, un flujo de 12 mm., un VFA de 70,30% y una densidad relativa teórica RICE de 2,443.

Las propiedades físicas de la mezcla asfáltica tibia no tienen mayor variación con respecto a las de la mezcla asfáltica en caliente, sin embargo, la temperatura de la mezcla MAT alcanza densidades similares a las MAC con temperaturas de mezclado y compactación menor, determinando un beneficio en producción y en la colocación de la mezcla.

## 12. EVALUACIÓN ECONÓMICA

La evaluación económica de la planta de asfalto en este trabajo, incluye los diferentes recursos y actividades que se realizan dentro de ella, en los escenarios del uso de mezclas asfálticas tibias y calientes. Esta evaluación permite ofrecer información de orden económico que sirva de apoyo para la toma de decisiones y conociendo las repercusiones que tiene una y otra alternativa. Se realizaron dos evaluaciones, una mediante el análisis de producción anual de mezcla asfáltica y otra particularizando al caso específico de la vía Macas-La Playa.

### 12.1. Costos por emisión de gases de efecto invernadero

#### 12.1.1. Huella de carbono

Actualmente, se está consumiendo los recursos naturales demasiado rápido —a mayor velocidad que el tiempo que se requiere para renovarlos—. La población tiene una mayor demanda, resultado del crecimiento de la población y consumo individual. Nuestra huella global ahora excede en casi un 30% la capacidad del planeta en regenerarse, en gran parte debido a la creciente demanda de biocombustibles. En 2008, por primera vez en la historia documentada, la cubierta de hielo ártica quedó rodeada por aguas abiertas por el impacto de nuestra huella de carbono (World Wildlife Fund et al., 2008).

Los combustibles fósiles —carbón, petróleo y gas natural— son extraídos de la corteza terrestre y no son renovables en lapsos de tiempo ecológicos. La quema de estos combustibles genera emisiones de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), convirtiéndolas en la huella de carbono de la humanidad. La huella de carbono del consumo de un país, empresa o institución, incluye las emisiones directas de dióxido de carbono a partir del uso de combustibles fósiles, así como las emisiones indirectas de los productos fabricados en el exterior (World Wildlife Fund et al., 2008).

#### 12.1.2. Determinación de la huella de carbono

El cálculo de equivalencias de gases de efecto invernadero (GEI), se realizó a través de la herramienta de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), el calculador de Equivalencias de Gases de Efecto Invernadero permite convertir los datos de emisiones o de energía en una cantidad equivalente a las emisiones de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) al utilizar esa cantidad. El calculador permite traducir en términos económicos y concretos las medidas abstractas para que se puedan entender, tales como las emisiones anuales de automóviles, hogares, o barriles de petróleo de tal manera que se pueda lograr la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, 2022).

## 12.1.2.1. Huella de carbono para MAC

Como puede verse en la tabla 40, se presenta el cálculo y proyección de las equivalencias de (GEI) en términos de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente y barriles de petróleo consumidos, para los recursos de diésel y energía eléctrica a usarse para mezclas tipo MAC.

**Tabla 40. Equivalencias de GEI, expresados en términos de emisiones de CO<sub>2</sub>, barriles de petróleo y monetarios, para mezclas tipo MAC**

Recurso	Unidad	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
Diésel	Gal	2933,40	3031,38	3132,63	3237,26	3345,38	3457,12	3572,58	3691,91	3815,22	3942,65	4074,33	4210,41	4351,04	4496,36
Eqq. GEI	CO <sub>2</sub> e	26,10	26,90	27,80	28,80	29,84	30,92	32,04	33,2	34,4	35,64	36,92	38,25	39,63	41,06
	BPC <sup>3</sup>	60,40	62,40	64,50	66,60	68,77	71,01	73,32	75,71	78,18	80,73	83,36	86,08	88,89	91,79
Subtotal	USD	3.575,68	3.704,61	3.838,20	3.976,60	4.119,99	4.268,55	4.422,46	4.581,93	4.747,15	4.918,32	5.095,67	5.279,41	5.469,78	5.667,01
		\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$
Energ.															
Elect.	kWh	76126,29	78668,91	81296,45	84011,75	86817,74	89717,45	92714,02	95810,67	99010,74	102317,70	105735,11	109266,66	112916,17	116687,57
Eqq. GEI	CO <sub>2</sub> e	32,9	34	35,2	36,3	37,43	38,6	39,81	41,06	42,35	43,68	45,05	46,46	47,91	49,41
	BPC	76,2	78,8	81,4	84,1	86,89	89,77	92,75	95,83	99,01	102,3	105,7	109,21	112,84	116,59
Subtotal	USD	4.511,04	4.673,70	4.842,23	5.016,83	5.197,73	5.385,15	5.579,33	5.780,51	5.988,95	6.204,90	6.428,64	6.660,45	6.900,61	7.149,44
		\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$
<b>Total</b>	<b>USD</b>	<b>8.086,72</b>	<b>8.378,31</b>	<b>8.680,42</b>	<b>8.993,43</b>	<b>9.317,71</b>	<b>9.653,70</b>	<b>10.001,79</b>	<b>10.362,44</b>	<b>10.736,10</b>	<b>11.123,22</b>	<b>11.524,31</b>	<b>11.939,86</b>	<b>12.370,39</b>	<b>12.816,45</b>
		\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$

Fuente: (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, 2022)

Como puede observarse en la tabla 40, el consumo de diésel y energía eléctrica que se requiere para producción de asfalto, expresado en toneladas de CO<sub>2</sub> y barriles de petróleo<sup>4</sup>, también puede expresarse en términos monetarios.

<sup>3</sup> Equivalencia de GEI a barriles de petróleo consumido

<sup>4</sup> El precio promedio de exportación de crudo (USD/Barril) corresponde a 59,20 \$, de acuerdo a la proforma presupuestaria 2022 elaborada por el Ministerio de Economía y Finanzas, Banco Central del Ecuador, Secretaría de Hidrocarburos (Ministerio de Economía y Finanzas, 2022).

## 12.1.2.2. Huella de carbono para MAT

En la tabla 41 se presenta el cálculo y proyección de las equivalencias de (GEI) en términos de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente y barriles de petróleo consumidos, para los recursos de diésel y energía eléctrica a usarse para mezclas tipo MAT.

**Tabla 41. Equivalencias de GEI, expresados en términos de emisiones de CO<sub>2</sub>, barriles de petróleo y monetarios, para mezclas tipo MAC**

Recurso	Unidad	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
Diésel	Gal	2607,47	2694,56	2784,56	2877,56	2973,67	3072,99	3175,63	3281,70	3391,30	3504,57	3621,63	3742,59	3867,59	3996,77
Eqq. GEI	Ton CO <sub>2</sub> e	23,20	23,90	24,70	25,60	26,53	27,49	28,48	29,51	30,58	31,69	32,84	34,03	35,26	36,53
	BPC	53,60	55,40	57,30	59,20	61,16	63,18	65,27	67,43	69,66	71,96	74,34	76,8	79,34	81,96
Subtotal	USD	3.173,12 \$	3.287,54 \$	3.406,08 \$	3.528,90 \$	3.656,15 \$	3.787,98 \$	3.924,57 \$	4.066,08 \$	4.212,70 \$	4.364,60 \$	4.521,98 \$	4.685,04 \$	4.853,97 \$	5.029,00 \$
Energ. Elect.	kWh	67667,81	69927,92	72263,51	74677,11	77171,33	79748,85	82412,46	85165,04	88009,55	90949,07	93986,77	97125,92	100369,93	103722,29
Eqq. GEI	Ton CO <sub>2</sub> e	29,3	30,3	31,3	32,3	33,33	34,39	35,48	36,6	37,76	38,96	40,2	41,48	42,8	44,16
	BPC	67,8	70	72,4	74,8	77,28	79,84	82,48	85,21	88,03	90,94	93,95	97,06	100,27	103,59
Subtotal	USD	4.013,76 \$	4.158,49 \$	4.308,44 \$	4.463,79 \$	4.624,75 \$	4.791,51 \$	4.964,29 \$	5.143,29 \$	5.328,75 \$	5.520,90 \$	5.719,97 \$	5.926,23 \$	6.139,92 \$	6.361,31 \$
Zycotherm	Ton	0,497	0,514	0,531	0,548	0,567	0,586	0,605	0,625	0,646	0,668	0,690	0,713	0,737	0,762
Eqq. GEI	Ton CO <sub>2</sub> e	0,56	0,58	0,60	0,62	0,64	0,66	0,68	0,7	0,72	0,74	0,76	0,78	0,8	0,82
	BPC	1,30	1,30	1,40	1,40	1,4	1,44	1,48	1,52	1,56	1,6	1,64	1,68	1,72	1,76
Subtotal	USD	76,96 \$	79,74 \$	82,61 \$	85,59 \$	88,68 \$	91,87 \$	95,19 \$	98,62 \$	102,17 \$	105,86 \$	109,67 \$	113,63 \$	117,73 \$	121,97 \$
<b>Total</b>	<b>USD</b>	<b>7.263,84 \$</b>	<b>7.525,76 \$</b>	<b>7.797,13 \$</b>	<b>8.078,28 \$</b>	<b>8.369,57 \$</b>	<b>8.671,37 \$</b>	<b>8.984,04 \$</b>	<b>9.307,99 \$</b>	<b>9.643,62 \$</b>	<b>9.991,36 \$</b>	<b>10.351,63 \$</b>	<b>10.724,89 \$</b>	<b>11.111,62 \$</b>	<b>11.512,29 \$</b>

Fuente: (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, 2022)

El consumo de los recursos correspondientes a diésel y energía eléctrica que se requiere para producción de asfalto, expresado en toneladas de CO<sub>2</sub> y barriles de petróleo, también puede expresarse en términos monetarios, como se vio en la tabla 41.

## 12.2. Recursos de producción anual

Los recursos para la producción anual se determinaron en función de los datos obtenidos en el capítulo 3 y se proyectaron hasta el año 2035, analizando los casos de mezclas asfálticas tibias y en caliente.

### 12.2.1. Proyección de recursos de producción para MAC

En la tabla 42 se presentan los recursos usados para pavimentación, proyectados hasta el año 2035.

**Tabla 42. Recursos para producción de mezcla asfáltica en caliente, 2020 - 2035**

Recursos	Unidad	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
Diésel	Gls	1858,96	2838,59	2933,40	3031,38	3132,63	3237,26	3345,38	3457,12	3572,58	3691,91	3815,22	3942,65	4074,33	4210,41	4351,04	4496,36
Arena	Ton	1378,21	2441,63	2523,18	2607,45	2694,54	2784,54	2877,55	2973,66	3072,98	3175,61	3281,68	3391,29	3504,56	3621,61	3742,57	3867,57
Agregado 3/8	Ton	2047,69	3833,79	3961,84	4094,16	4230,91	4372,22	4518,25	4669,16	4825,11	4986,27	5152,81	5324,92	5502,77	5686,56	5876,49	6072,77
Agregado 3/4	Ton	1120,15	1974,06	2039,99	2108,13	2178,54	2251,30	2326,50	2404,20	2484,50	2567,49	2653,24	2741,86	2833,44	2928,07	3025,87	3126,93
AC-20	Ton	249,91	480,91	496,97	513,57	530,72	548,45	566,77	585,70	605,26	625,48	646,37	667,96	690,27	713,32	737,15	761,77
RC-250	Ton	74,97	144,27	149,09	154,07	159,22	164,54	170,03	175,71	181,58	187,64	193,91	200,39	207,08	214,00	221,14	228,53
Energía eléctrica	kWh	18593,03	73665,85	76126,29	78668,91	81296,45	84011,75	86817,74	89717,45	92714,02	95810,67	99010,74	102317,70	105735,11	109266,66	112916,17	116687,57
Agua	m3	94,50	99,23	102,54	105,96	109,50	113,16	116,94	120,85	124,88	129,05	133,36	137,82	142,42	147,18	152,09	157,17

Fuente: Elaboración propia

Como puede observarse en la tabla 42, los valores anuales de recursos aumentan anualmente, debido a que la proyección realizada toma en cuenta la tasa de crecimiento vehicular de 3,34%, mostrada en el Apéndice C, tabla C8.

## 12.2.2. Proyección de recursos de producción para MAT

Los recursos usados para pavimentación con mezcla asfáltica tibia, proyectados hasta el año 2035 se presentan en la tabla 43.

**Tabla 43. Recursos para producción de mezcla asfáltica tibia, 2022 - 2035**

Recursos	Unidad	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
Diésel	Gls	1858,96	2838,59	2607,47	2694,56	2784,56	2877,56	2973,67	3072,99	3175,63	3281,70	3391,30	3504,57	3621,63	3742,59	3867,59	3996,77
Arena	Ton	1378,21	2441,63	2523,18	2607,45	2694,54	2784,54	2877,55	2973,66	3072,98	3175,61	3281,68	3391,29	3504,56	3621,61	3742,57	3867,57
Agregado 3/8	Ton	2047,69	3833,79	3961,84	4094,16	4230,91	4372,22	4518,25	4669,16	4825,11	4986,27	5152,81	5324,92	5502,77	5686,56	5876,49	6072,77
Agregado 3/4	Ton	1120,15	1974,06	2039,99	2108,13	2178,54	2251,30	2326,50	2404,20	2484,50	2567,49	2653,24	2741,86	2833,44	2928,07	3025,87	3126,93
AC-20	Ton	249,91	480,91	496,97	513,57	530,72	548,45	566,77	585,70	605,26	625,48	646,37	667,96	690,27	713,32	737,15	761,77
RC-250	Ton	74,97	144,27	149,09	154,07	159,22	164,54	170,03	175,71	181,58	187,64	193,91	200,39	207,08	214,00	221,14	228,53
Zycotherm	Ton			0,4970	0,5136	0,5307	0,5485	0,5668	0,5857	0,6053	0,6255	0,6464	0,6680	0,6903	0,7133	0,7371	0,7618
Energía eléctrica	kWh	18593,03	73665,85	67667,81	69927,92	72263,51	74677,11	77171,33	79748,86	82412,46	85165,04	88009,55	90949,07	93986,77	97125,92	100369,93	103722,29
Agua	m3	94,50	99,23	91,15	94,19	97,34	100,59	103,95	107,42	111,01	114,71	118,55	122,50	126,60	130,82	135,19	139,71

Fuente: Elaboración propia

Como puede observarse en la tabla 43, los valores anuales de recursos aumentan debido a que la proyección de los valores se realiza mediante la tasa de crecimiento vehicular de 3,34% mostrada en el Apéndice C, tabla C8. Cabe aclarar que, los recursos como el diésel y energía eléctrica disminuyen aproximadamente un 10,28% respecto a los recursos de la tabla 42, debido a la disminución de la temperatura de mezclado de la MAT, además, se incorporó un nuevo recurso que es el organosilano (ZycoTherm) con una dosificación conservadora recomendada del 0,1% en peso de AC-20, tal como se sugirió en el capítulo 7.



## 12.3. Gastos de producción anual

Los gastos de producción son los costos incurridos en las actividades para elaborar mezclas asfálticas.

### 12.3.1. Proyección de gastos de producción para MAC

Una vez determinada la proyección de recursos necesarios para la producción anual de pavimento, se procedió a determinar los costos respectivos, tal como puede verse en la tabla 44.

**Tabla 44. Costos para producción de mezcla asfáltica en caliente, 2020 - 2035**

Costos Operativos	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
Diésel	4.242,91 \$	7.618,22 \$	8.484,57 \$	9.084,12 \$	9.726,02 \$	10.413,29 \$	11.149,12 \$	11.936,95 \$	12.780,45 \$	13.683,55 \$	14.650,47 \$	15.685,72 \$	16.794,11 \$	17.980,83 \$	19.251,41 \$	20.611,76 \$
Arena	38.576,21 \$	69.586,46 \$	76.452,37 \$	81.854,71 \$	87.638,79 \$	93.831,59 \$	100.461,99 \$	107.560,91 \$	115.161,47 \$	123.299,10 \$	132.011,76 \$	141.340,08 \$	151.327,56 \$	162.020,79 \$	173.469,63 \$	185.727,48 \$
Agregado 3/8	73.274,36 \$	76.292,42 \$	79.276,39 \$	84.878,28 \$	90.876,02 \$	97.297,57 \$	104.172,89 \$	111.534,04 \$	119.415,34 \$	127.853,56 \$	136.888,05 \$	146.560,94 \$	156.917,35 \$	168.005,57 \$	179.877,31 \$	192.587,94 \$
Agregado 3/4	41.978,70 \$	68.401,18 \$	73.953,85 \$	79.179,63 \$	84.774,69 \$	90.765,10 \$	97.178,82 \$	104.045,75 \$	111.397,91 \$	119.269,60 \$	127.697,52 \$	136.720,98 \$	146.382,07 \$	156.725,83 \$	167.800,52 \$	179.657,77 \$
AC-20	77.493,44 \$	151.005,74 \$	161.676,23 \$	173.100,72 \$	185.332,50 \$	198.428,61 \$	212.450,13 \$	227.462,45 \$	243.535,58 \$	260.744,49 \$	279.169,42 \$	298.896,31 \$	320.017,16 \$	342.630,46 \$	366.841,69 \$	392.763,75 \$
RC-250	23.248,03 \$	45.301,72 \$	48.502,87 \$	51.930,22 \$	55.599,75 \$	59.528,58 \$	63.735,04 \$	68.238,74 \$	73.060,67 \$	78.223,35 \$	83.750,83 \$	89.668,89 \$	96.005,15 \$	102.789,14 \$	110.052,51 \$	117.829,12 \$
Energía eléctrica	1.548,03 \$	6.133,33 \$	6.338,19 \$	6.549,88 \$	6.768,65 \$	6.994,72 \$	7.228,34 \$	7.469,77 \$	7.719,26 \$	7.977,09 \$	8.243,52 \$	8.518,85 \$	8.803,38 \$	9.097,42 \$	9.401,27 \$	9.715,27 \$
Agua	333,80 \$	350,49 \$	362,20 \$	374,30 \$	386,80 \$	399,72 \$	413,07 \$	426,86 \$	441,12 \$	455,86 \$	471,08 \$	486,82 \$	503,07 \$	519,88 \$	537,24 \$	555,19 \$
<b>Total</b>	<b>260.695,49 \$</b>	<b>424.689,56 \$</b>	<b>455.046,66 \$</b>	<b>486.951,85 \$</b>	<b>521.103,21 \$</b>	<b>557.659,19 \$</b>	<b>596.789,41 \$</b>	<b>638.675,47 \$</b>	<b>683.511,81 \$</b>	<b>731.506,59 \$</b>	<b>782.882,65 \$</b>	<b>837.878,59 \$</b>	<b>896.749,85 \$</b>	<b>959.769,92 \$</b>	<b>1.027.231,57 \$</b>	<b>1.099.448,28 \$</b>

Fuente: Elaboración propia

Como puede observarse en la tabla 44, los costos operativos se incrementan anualmente, debido a que el aumento del precio del diésel industrial tiene una incidencia directa sobre los costos de los insumos usados en la producción de pavimento.

## 12.3.2. Proyección de gastos de producción para MAT

Establecida la proyección de recursos necesarios para la producción anual de pavimento con MAT, se procedió a determinar sus costos, tal como se ve en la tabla 45.

**Tabla 45. Costos para producción de mezcla asfáltica tibia, 2022 – 2035**

Costos Operativos	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
Diésel	4.242,91 \$	7.618,22 \$	7.541,84 \$	8.074,77 \$	8.645,36 \$	9.256,26 \$	9.910,33 \$	10.610,62 \$	11.360,40 \$	12.163,16 \$	13.022,64 \$	13.942,86 \$	14.928,10 \$	15.982,96 \$	17.112,36 \$	18.321,57 \$
Arena	38.576,21 \$	69.586,46 \$	76.452,37 \$	81.854,71 \$	87.638,79 \$	93.831,59 \$	100.461,99 \$	107.560,91 \$	115.161,47 \$	123.299,10 \$	132.011,76 \$	141.340,08 \$	151.327,56 \$	162.020,79 \$	173.469,63 \$	185.727,48 \$
Agregado 3/8	73.274,36 \$	76.292,42 \$	79.276,39 \$	84.878,28 \$	90.876,02 \$	97.297,57 \$	104.172,89 \$	111.534,04 \$	119.415,34 \$	127.853,56 \$	136.888,05 \$	146.560,94 \$	156.917,35 \$	168.005,57 \$	179.877,31 \$	192.587,94 \$
Agregado 3/4	41.978,70 \$	68.401,18 \$	73.953,85 \$	79.179,63 \$	84.774,69 \$	90.765,10 \$	97.178,82 \$	104.045,75 \$	111.397,91 \$	119.269,60 \$	127.697,52 \$	136.720,98 \$	146.382,07 \$	156.725,83 \$	167.800,52 \$	179.657,77 \$
AC-20	77.493,44 \$	151.005,74 \$	161.676,23 \$	173.100,72 \$	185.332,50 \$	198.428,61 \$	212.450,13 \$	227.462,45 \$	243.535,58 \$	260.744,49 \$	279.169,42 \$	298.896,31 \$	320.017,16 \$	342.630,46 \$	366.841,69 \$	392.763,75 \$
RC-250	23.248,03 \$	45.301,72 \$	48.502,87 \$	51.930,22 \$	55.599,75 \$	59.528,58 \$	63.735,04 \$	68.238,74 \$	73.060,67 \$	78.223,35 \$	83.750,83 \$	89.668,89 \$	96.005,15 \$	102.789,14 \$	110.052,51 \$	117.829,12 \$
Zycotherm			9.010,62 \$	19.294,67 \$	19.939,11 \$	20.605,07 \$	21.293,28 \$	22.004,48 \$	22.739,43 \$	23.498,93 \$	24.283,79 \$	25.094,87 \$	25.933,04 \$	26.799,20 \$	27.694,29 \$	28.619,28 \$
Energía eléctrica	1.548,03 \$	6.133,33 \$	5.633,94 \$	5.822,12 \$	6.016,58 \$	6.217,53 \$	6.425,20 \$	6.639,80 \$	6.861,57 \$	7.090,74 \$	7.327,57 \$	7.572,31 \$	7.825,23 \$	8.086,59 \$	8.356,68 \$	8.635,80 \$
Agua	333,80 \$	350,49 \$	321,96 \$	332,71 \$	343,82 \$	355,30 \$	367,17 \$	379,44 \$	392,11 \$	405,20 \$	418,74 \$	432,72 \$	447,18 \$	462,11 \$	477,55 \$	493,50 \$
Total	260.695,49 \$	424.689,56 \$	462.370,06 \$	504.467,82 \$	539.166,60 \$	576.285,63 \$	615.994,85 \$	658.476,22 \$	703.924,48 \$	752.548,12 \$	804.570,32 \$	860.229,97 \$	919.782,83 \$	983.502,66 \$	1.051.682,54 \$	1.124.636,21 \$

Fuente: Elaboración propia

En esta tabla, los costos operativos se incrementaron anualmente, debido al aumento del precio del diésel industrial.

Los costos determinados en acápite anteriores se determinaron a partir de la tasa de variación del precio del diésel premium industrial promedio en el Ecuador, calculada a partir de datos históricos (Instituto Nacional de Estadística y Censos, 2022), tal como se muestra en la tabla 46.

**Tabla 46. Tasa de variación del precio del diésel premium industrial**

Año	USD/Gls	Tasa de variación
2017	2,137	-
2018	2,400	1,123
2018	2,605	1,085
2019	2,166	0,831
2019	2,194	1,013
2019	2,290	1,043
2019	2,285	0,998
2019	2,256	0,988
2020	2,282	1,012
2021	2,684	1,190
2022	2,892	1,078
<b>Tasa de variación promedio</b>		<b>1,036</b>

Fuente: (Instituto Nacional de Estadística y Censos, 2022)

En esta tabla, se determina que existe una variación anual en el precio del diésel premium industrial, dando un promedio de variación anual de 1,036%.

## **12.4. Costos para construcción de estructura de pavimento, vía Macas-La Playa**

El análisis económico para la construcción de la vía del sector Macas-La Playa se realizó tomando en cuenta el uso de las mezclas de tipo MAC y MAT para la conformación de la estructura del pavimento.

### **12.4.1. Costos de pavimentación con MAC**

Como se puede ver en la tabla 47, se presentan los volúmenes y costos para pavimentación de la vía Macas-La Playa, utilizando mezcla asfáltica en caliente.

**Tabla 47. Costos de pavimentación con MAC**

Recurso	Volumen	Costo 2022
Sub base granular (m <sup>3</sup> )	644,65	11,511.55 \$
Base granular (m <sup>3</sup> )	429,76	9,209.07 \$
Imprimación RC-250 (m <sup>3</sup> )	21,15	7,568.62 \$
Asfalto AC-20 (m <sup>3</sup> )	31,59	11,303.89 \$
Carpeta asfáltica (m <sup>3</sup> )	537,21	192,243.06 \$
<b>Total</b>	<b>1664,36</b>	<b>231,836.20 \$</b>

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en la tabla 47, el costo total de pavimentación con MAC, de la vía con la estructura y los espesores de la tabla 22 es de 231,836.20 \$, lo que significa que el costo por metro sería de 328,84 USD/m.

### 12.4.2. Costos de pavimentación con MAT

Como se observa en la tabla 48, se presentan los volúmenes y costos para pavimentación de la vía Macas-La Playa, utilizando mezcla asfáltica tibia.

**Tabla 48. Costos de pavimentación con MAT**

Recurso	Volumen	Costo 2022
Sub base granular (m <sup>3</sup> )	644,65	11,511.55 \$
Base granular (m <sup>3</sup> )	429,76	9,209.07 \$
Imprimación RC-250 (m <sup>3</sup> )	21,15	7,568.62 \$
Asfalto AC-20 (m <sup>3</sup> )	31,59	11,303.89 \$
ZycoTherm (kg)	34,74	1,259.99 \$
Carpeta asfáltica (m <sup>3</sup> )	537,21	192,243.06 \$
<b>Total</b>	<b>1699,11</b>	<b>233,096.19 \$</b>

Fuente: Elaboración propia

Como puede verse en la tabla 48, el costo total de pavimentación de la vía con MAT, con la estructura y los espesores de la tabla 22, es de 233,096.19 \$, es decir, un costo de 330,63 USD/m.

### 12.4.3. Huella ecológica para MAT y MAC

El cálculo de las equivalencias de (GEI) en términos de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente y barriles de petróleo consumidos para determinar los costos por huella ecológica para la construcción de la vía Macas-La Playa para mezclas tipo MAT y MAC se muestran en la tabla 49.

**Tabla 49. Equivalencias y costos por huella ecológica para MAC y MAT**

Tipo de mezcla	Equivalencias GEI	Total	Costos
MAC	Ton CO <sub>2</sub> e	0,614853	82,88 \$
	Barriles de petróleo consumidos	1,4	
MAT	Ton CO <sub>2</sub> e	0,588615	79,33 \$
	Barriles de petróleo consumidos	1,34	

Fuente: Elaboración propia

Como puede observarse en la tabla 49, el costo de construcción de la vía Macas-La Playa, de acuerdo a las equivalencias de gases de efecto invernadero, expresado en toneladas de CO<sub>2</sub> y barriles de petróleo<sup>5</sup>, es de 82,88 \$ para MAC y 79,33 \$ para MAT, respectivamente.

## 12.5. Comparativa económica entre MAC y MAT

Determinados los costos de producción de la mezcla asfáltica y de pavimentación de la vía Macas-La Playa, y bajo los escenarios del uso de mezclas asfálticas de tipo MAC y MAT, a continuación, se realiza un análisis comparativo de costos, para determinar el escenario más conveniente, desde el punto de vista económico.

### 12.5.1. Comparación de costos de producción anual

Determinados los costos operativos, estimadas las equivalencias de (GEI) y transformadas a costos monetarios de las mezclas tipo MAC y MAT, se procedió a establecer los costos generales de producción y el costo asociado a huella de carbono, tal como puede observarse en la tabla 50.

<sup>5</sup> El precio promedio de exportación de crudo (USD/Barril) corresponde a 59,20 \$, de acuerdo a la proforma presupuestaria 2022 elaborada por el Ministerio de Economía y Finanzas, Banco Central del Ecuador, Secretaría de Hidrocarburos (Ministerio de Economía y Finanzas, 2022).

**Tabla 50. Costos generales de producción de mezclas MAC y MAT, 2022 - 2035**

Costos generales	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
Costo operativo MAC	455.046,66 \$	486.951,85 \$	521.103,21 \$	557.659,19 \$	596.789,41 \$	638.675,47 \$	683.511,81 \$	731.506,59 \$	782.882,65 \$	837.878,59 \$	896.749,85 \$	959.769,92 \$	1.027.231,57 \$	1.099.448,28 \$
Costo operativo MAT	462.370,06 \$	504.467,82 \$	539.166,60 \$	576.285,63 \$	615.994,85 \$	658.476,22 \$	703.924,48 \$	752.548,12 \$	804.570,32 \$	860.229,97 \$	919.782,83 \$	983.502,66 \$	1.051.682,54 \$	1.124.636,21 \$
Huella de carbono MAC	8.086,72 \$	8.378,31 \$	8.680,42 \$	8.993,43 \$	9.317,71 \$	9.653,70 \$	10.001,79 \$	10.362,44 \$	10.736,10 \$	11.123,22 \$	11.524,31 \$	11.939,86 \$	12.370,39 \$	12.816,45 \$
Huella de carbono MAT	7.263,84 \$	7.525,76 \$	7.797,13 \$	8.078,28 \$	8.369,57 \$	8.671,37 \$	8.984,04 \$	9.307,99 \$	9.643,62 \$	9.991,36 \$	10.351,63 \$	10.724,89 \$	11.111,62 \$	11.512,29 \$
Total, MAC	463.133,38 \$	495.330,17 \$	529.783,64 \$	566.652,62 \$	606.107,12 \$	648.329,17 \$	693.513,61 \$	741.869,03 \$	793.618,74 \$	849.001,81 \$	908.274,16 \$	971.709,78 \$	1.039.601,96 \$	1.112.264,73 \$
Total, MAT	469.633,90 \$	511.993,58 \$	546.963,73 \$	584.363,91 \$	624.364,43 \$	667.147,59 \$	712.908,52 \$	761.856,12 \$	814.213,94 \$	870.221,33 \$	930.134,46 \$	994.227,55 \$	1.062.794,16 \$	1.136.148,50 \$
Variación MAT/MAC	6.500,52 \$	16.663,42 \$	17.180,10 \$	17.711,29 \$	18.257,30 \$	18.818,42 \$	19.394,92 \$	19.987,09 \$	20.595,20 \$	21.219,52 \$	21.860,30 \$	22.517,78 \$	23.192,20 \$	23.883,76 \$
Porcentaje	1,384%	3,255%	3,141%	3,031%	2,924%	2,821%	2,721%	2,623%	2,529%	2,438%	2,350%	2,265%	2,182%	2,102%

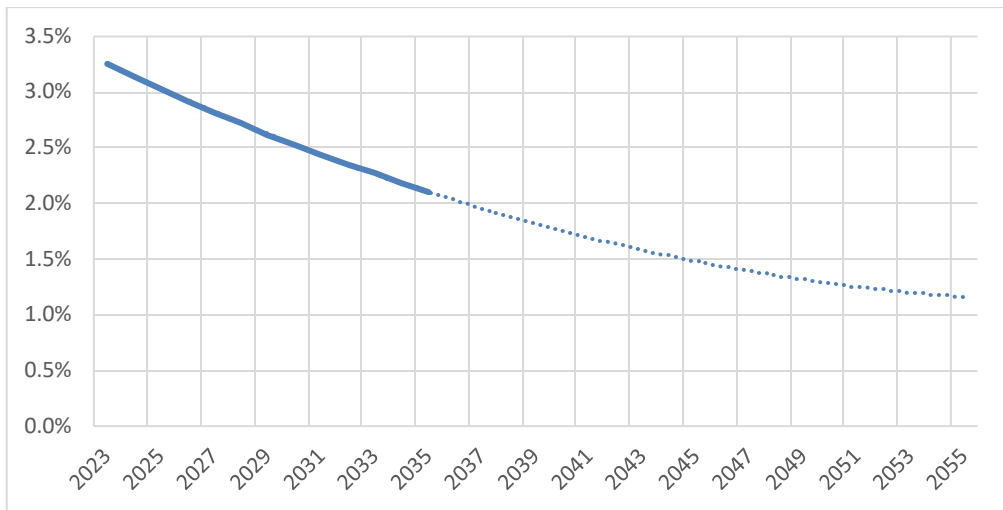
Fuente: Elaboración propia

En esta tabla se puede observar una variación entre 1,384% hasta 2,102% entre los costos de producción. Expresados en términos monetarios, representa una variación anual desde 6,500.52 \$<sup>6</sup> en 2022, hasta un promedio de 20.098,56 \$ entre 2023 a 2035, lo que indica que los costos para MAT son superiores a MAC.

De acuerdo a la información de la tabla anterior, se realizó la gráfica y proyección hasta el 2050 de la variación del costo de producción entre las mezclas tipo MAC y MAT, tal como se observa en la figura 39.

<sup>6</sup> La variación MAT/MAC correspondiente al año 2022, es inferior a los de los años subsiguientes pues se considera que la MAT se implementa a partir del segundo semestre del año 2022.

**Figura 39. Gráfica de variación porcentual del costo de producción de MAC y MAT**

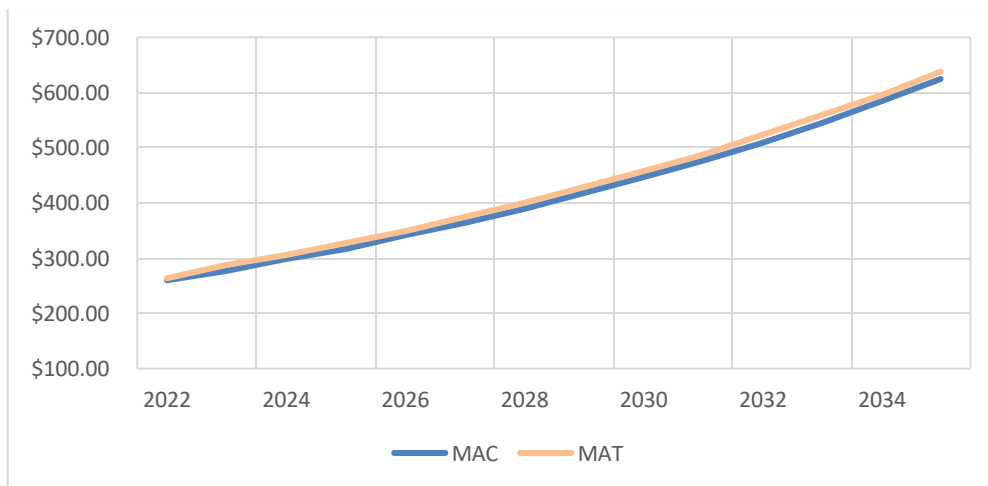


Fuente: Elaboración propia

La figura 39, muestra que la diferencia porcentual entre los costos de producción de mezclas MAC y MAT, a mayor volumen de producción la diferencia de costos entre las mezclas disminuye cerca del 1%, sin embargo, los costos para MAT son superiores a MAC, tal como se analizó en la tabla anterior.

Los costos generales de producción de las mezclas asfálticas tibias y en caliente pueden expresarse como costo por kilómetro de vía construida, tal como se observa en la figura 40.

**Figura 40. Gráfica de variación porcentual del costo de producción de MAC y MAT**



Fuente: Elaboración propia

La figura 40 muestra que los costos por kilómetro de una vía construida, con la estructura de pavimento establecida y mediante el uso de mezclas tibias, es mayor al costo por uso de mezclas en caliente. El costo varía anualmente desde 263,72\$ en 2022 hasta 638,00\$ en 2035 en MAT y desde 260,07\$ en 2022 hasta 624,59\$ en 2035 en MAC.

## 12.5.2. Comparación de costos de construcción vía Macas-La Playa

Una vez determinados los costos de pavimentación de la vía Macas-La Playa, estimadas las equivalencias de (GEI) y transformadas a costos monetarios de las mezclas tipo MAC y MAT, se establecieron los costos generales de construcción y el costo asociado a huella de carbono, tal como puede observarse en la tabla 51.

**Tabla 51. Costos generales de pavimentación, MAC y MAT vía Macas-La Playa**

Costos generales	Unidad	2022
Costo construcción MAC	USD	231,836.20 \$
Costo construcción MAT	USD	233,096.19 \$
Huella de carbono MAC	USD	82.88 \$
Huella de carbono MAT	USD	79.33 \$
Total, MAC	USD	231,919.08 \$
Total, MAT	USD	233,175.51 \$
Variación MAT/MAC	USD	1,256.44 \$
Porcentaje	%	0,54%

Fuente: Elaboración propia

Como puede observarse en la tabla 51, se establece una diferencia de costos para la construcción de la vía Macas-La Playa, usando mezclas de tipo MAC y MAT, existiendo una variación entre ellas de 1,256.44 \$, equivalente a 0,54%, lo que evidencia que los costos para MAT son superiores a MAC.



## 13.RESULTADOS

### 13.1. Planta de Asfalto

La planta del GAD Municipal de Azogues, es de tipo Contraflujo, marca BOMAG MARINI modelo Magnum 80 y consta de los siguientes elementos:

- Silos dosificadores
- Cinta transportadora y dosificadora
- Secador
- Cámara de combustión
- Filtros
- Chimenea
- Elevador de arrastre
- Sistema de asfalto y combustible
- Cabina de mando

De los datos recabados se puede indicar que, la producción promedio diaria de mezcla asfáltica es de 200,35 toneladas, con consumos medios por día de producción de los siguientes recursos:

- Diésel: 65,24 galones
- Arena: 54,54 toneladas
- Agregado de 3/8 de pulgada: 88,17 toneladas
- Agregado de 3/4 de pulgada: 48,29 toneladas
- AC-20: 11,51 toneladas
- Energía eléctrica: 375,58 116kWh
- Volumen de agua: 3,25 m<sup>3</sup>.

En lo referente al consumo de agregados, obedecen a un diseño de mezcla que está en función de la necesidad de producción.

### 13.2. Diseño de pavimento

La estructura del pavimento consta de una carpeta de pavimento flexible, una capa de material de subbase y una capa de base cuyos números estructurales, espesores calculados y espesores asumidos se detallan en la tabla 52.

**Tabla 52. Cálculo de espesores y espesores asumidos**

Espesor calculado carpeta (pulg.)	$D_1$	5,71
Espesor asumido carpeta (pulg.)	$D_1'$	5
Número Estructural sobre el base corregido	$SN_1'$	2,1
Espesor calculado base (pulg.)	$D_2$	3,90
Espesor asumido base (pulg.)	$D_2'$	4
Número Estructural sobre la subbase corregido	$SN_2'$	2,54
Espesor calculado subbase (pulg.)	$D_3$	5,87
Espesor asumido subbase (pulg.)	$D_3'$	6
Número Estructural sobre la subrasante corregido	$SN_3'$	3,14

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en la tabla 52, el espesor asumido de la carpeta asfáltica es de 5 pulgadas, el espesor de la base es de 4 pulgadas y el de la sub base es de 6 pulgadas.

### 13.3. Análisis del ciclo de vida (LCA)

El análisis con la aplicación PaLATE (Greenroads, 2011) indica que el consumo de energía y emisiones para la producción, construcción y mantenimiento del pavimento para una mezcla tipo MAC es de 885,1 [GJ] y 614,853 CO<sub>2</sub>e [kg] respectivamente, mientras que, el consumo de energía y emisiones para la producción, construcción y mantenimiento del pavimento, para una mezcla tipo MAT es de 878,4 [GJ] y 588,615 CO<sub>2</sub>e [kg] respectivamente. Por lo tanto, se evidencia que las actividades de producción, construcción y mantenimiento del pavimento usando una mezcla asfáltica tibia, genera menores consumos de energía y emisiones de CO<sub>2</sub> que las mezclas asfálticas en caliente.

### 13.4. Aditivo

El aditivo usado para la mezcla asfáltica tibia es un organosilano en base a nanotecnología, con tamaño de partícula de entre 4 a 6 nm, denominado ZycoTherm, de la compañía Zydex. Este aditivo ofrece mayores densidades de compactación a menor temperatura lo que incide en múltiples beneficios en el proceso de la mezcla, transporte, tendido y compactación de la mezcla asfáltica (Zydex Industries, 2022). Permite menores temperaturas de mezclado (de 10 a 20 grados centígrados menos) y también bajar las temperaturas de compactación (de 30 a 40 grados centígrados menos) (Zydex Industries, 2022).

La dosificación recomendada es de 0,1% – 0,15% en función del peso del cemento asfáltico y tiene beneficios ambientales debido a que es soluble en agua, no produce sedimentaciones, reduce olores, ahorra combustible en producción y disminuye emanaciones de CO<sub>2</sub> al ambiente.

## 13.5. Diseño de mezclas asfálticas

El diseño de mezclas MAC y MAT se realizó mediante la determinación óptima del contenido de asfalto para cada una de ellas mediante ensayos de laboratorio. Los resultados indican que las diferencias entre los porcentajes óptimos de asfalto y demás parámetros físicos de las mezclas no presentan mayor variación, pues, para las mezclas MAC se obtuvo un contenido óptimo de asfalto de 5,80%, mientras que para las MAT se obtuvo un porcentaje óptimo de 5,83%. Cabe indicar que la diferencia más relevante de las dos mezclas es la temperatura de mezclado y la temperatura de compactación. Para el caso de MAC la temperatura de mezclado y compactación es de 160°C y 148°C respectivamente, mientras que, para MAT la temperatura de mezclado es de 150°C y la temperatura de compactación es de 135°C, logrando una disminución de recursos en la producción de la mezcla y mejorando la trabajabilidad y temporada de pavimentación.

## 13.6. Evaluación económica

La evaluación económica que se realizó para la producción de mezclas asfálticas, incluye costos de producción y costos por huella ecológica estimadas a través de equivalencias de (GEI) y transformadas a costos monetarios. Los resultados indican que la diferencia de costos entre mezclas de tipo MAC y MAT representa una variación de 6,500.52 \$ en 2022, hasta un promedio de 20.098,56 \$ entre 2023 a 2035, variación equivalente a 1,384% en 2022 hasta 2,645% entre 2023 a 2035; por lo que, la mezcla de tipo MAC refiere costos generales inferiores a MAT. Se debe tomar en cuenta que, el costo por huella de carbono de MAC es mayor a la de MAT con un promedio de 10.453,70 \$ entre 2023 a 2035.

Para el caso específico de la vía Macas-La Playa, los resultados demuestran que la diferencia de costos por el uso de mezclas de tipo MAC y MAT representa una variación de 1,256.44 \$ equivalente a 0,54%, entre ellas, evidenciando que los costos para MAT son superiores a MAC.

## 14. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El objetivo del presente trabajo de titulación fue realizar un diseño de pavimento y mezcla tibia como una alternativa a las mezclas en caliente para la planta asfáltica del GAD Municipal de Azogues, evaluando el ciclo de vida de los efectos ambientales y económicos en producción determinando el consumo de energía y las emisiones de CO<sub>2</sub>, para lograr este objetivo se determinaron los valores promedio de producción de la planta de asfalto, se diseñó la estructura de pavimento y las mezclas tipo MAC y MAT de la vía Macas-La Playa para calcular los recursos necesarios para el análisis del ciclo de vida de los efectos ambientales de producción, construcción y mantenimiento del pavimento mediante el uso del software pertinente. Del estudio se obtuvieron las siguientes conclusiones:

En un inicio se indicó que, mediante el uso de un proceso de producción más sostenible, como es la aplicación de mezclas tipo MAT, se pueda generar un ahorro en los recursos de la institución, a este respecto se concluye que las mezclas tipo MAT efectivamente son un proceso más sostenible desde el punto de vista de emisiones de GEI y consumo de energía, sin embargo, al momento de analizar los costos de producción, construcción y mantenimiento del pavimento se determinó que, las mezclas tipo MAT requieren de una inversión mayor a las mezclas tipo MAC, debido básicamente al empleo del aditivo organosilano.

Para la implementación del procedimiento de mezclas tibias en la planta se consideró el uso de un organosilano en base a nanotecnología denominado ZycTherm, con la dosificación de manera óptima 0,1% en peso de mezcla asfáltica, no se necesita de equipos ni estructuras especiales en la planta, únicamente se requiere dosificar el aditivo por inyección por goteo en la línea de cara del tanque transportador hacia el tanque de almacenamiento de asfalto, en la planta de asfalto.

En la evaluación del ciclo de vida de los efectos ambientales de producción, construcción y mantenimiento del pavimento se determinó que, para una mezcla tipo MAC, el consumo de energía es de 885,1 [GJ] y las emisiones de GEI es de 614,853 CO<sub>2</sub>e [kg], mientras que para mezclas tipo MAT el consumo de energía es de 878,400 [GJ] y las emisiones de GEI es de 588,615 CO<sub>2</sub>e [kg], lo que indica que las mezclas tipo MAT son más amigables con el ambiente al requerir de menor energía de producción y menores emisiones. Asimismo, se determinó que la diferencia de costos proyectados entre mezclas de tipo MAC y MAT varía hasta 2,645% entre 2023 a 2035 a favor de las mezclas tipo MAC, sin embargo, esta diferencia puede variar de acuerdo al aumento o disminución del precio de mercado del aditivo ZycTherm.

El presente trabajo de titulación tiene sus limitaciones, una de ellas es que, el análisis se realizó en función del uso del único aditivo que actualmente se encuentra disponible en el Ecuador, es decir, los resultados presentados pueden variar dependiendo del aditivo usado y de su precio de venta a futuro, para cuyo caso se requeriría una actualización del presente estudio. Otra limitación es la particularidad del análisis, ya que los resultados se presentan en función de la producción específica de la planta de asfaltos del GAD de Azogues, las características físicas y costos de los agregados, así como los costos del asfalto y el aditivo para MAT. Pese a estas limitaciones, los resultados son claros y se convierten en una herramienta de toma de decisiones al momento de plantear el paso de una mezcla tipo MAC a MAT para la planta analizada.

Considerando los resultados de este trabajo de titulación, se puede mencionar las siguientes recomendaciones:

La implementación de las mezclas asfálticas tibias permite un proceso de producción más sostenible. Se recomienda que el mismo pueda ser implementado en la planta de asfalto del GAD Municipal de Azogues para disminuir las emisiones de GEI y consumo de energía.

El uso de mezclas tipo MAT requiere de mayor recurso económico derivado del uso del aditivo ZycoTherm. Se recomienda que para la aplicación de estas mezclas se asigne el recurso necesario, mediante el presupuesto anual del Municipio de Azogues para la adquisición del aditivo que permita elaborar las mezclas asfálticas tibias, sin modificación del equipo actual con el que cuenta la planta de asfalto.

Las mezclas tipo MAT permite mayores densidades de compactación a menor temperatura. Se recomienda aplicar la alternativa de MAT en la planta de asfalto, para alcanzar beneficios en la resistencia a la humedad, desempeño ante el desprendimiento del agregado fino y grueso y trabajabilidad.

Aplicar mezclas asfálticas tibias permite bajar las temperaturas de compactación. Se recomienda usar MAT, con la finalidad de obtener mayor ventaja en trabajos que requieren longitudes de transporte y que requieren mayores tiempos de espera en la pavimentación.

## 15. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, E. (2022). *Calculador de equivalencias de gases de efecto invernadero*. 2022. <https://espanol.epa.gov/la-energia-y-el-medioambiente/calculador-de-equivalencias-de-gases-de-efecto-invernadero#results>
- Agnusdei, J., Marcozzi, R., & Morea, F. (2010). *Nuevas tecnologías sustentables aplicadas a la pavimentación asfáltica*. (R. Marcozzi, Ed.; 1a ed.). Laboratorio de Entrenamiento Multidisciplinario para la Investigación Tecnológica (LEMIT).
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (1993). *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures*. American Association of State Highway and Transportation Officials.
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2002). *AASHTO R 30 Standard Practice for Mixture Conditioning of Hot Mix Asphalt (HMA)*.
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2015a). *AASHTO T 245*.
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2015b). *AASHTO T 245 Standard Method of Test for Resistance to Plastic Flow of Asphalt Mixtures Using Marshall Apparatus*.
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2016). *Flow Number Test and Assessment of AASHTO TP 79-13 Rutting Criteria*.
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2020). *AASHTO T 209, 2020 Edition, 2020 - Standard Method of Test for Theoretical Maximum Specific Gravity (G<sub>mm</sub>) and Density of Asphalt Mixtures*.
- American Society for Testing and Materials. (2020). *ASTM D6926 Standard Practice for Preparation of Asphalt Mixture Specimens Using Marshall Apparatus*.
- American Society of Civil Engineers. (1993). *Policy statement 418 - The role of the civil engineer in sustainable development*. <https://www.asce.org/advocacy/policy-statements/ps418---the-role-of-the-civil-engineer-in-sustainable-development/?msclkid=4ee4d72fad2d11ec881210e2d9c92280>
- Asphalt Institute. (1999). *Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla Asfáltica en Caliente: Vol. Volumen 22* (Asphalt Institute, Ed.; 1999th ed.). Asphalt Institute.
- BRANZ Inc. (2021). *CO<sub>2</sub>NSTRUCT* (Version BC001). BRANZ. <https://www.branz.co.nz/environment-zero-carbon-research/framework/branz-co2nstruct/?msclkid=dffb175bad1c11ecbf1ff14e5d3edb03>
- BREM Environmental Solutions. (2021). *Propuesta de validación de beneficios del uso de nanomateriales en mezclas asfálticas*.

FAYAT GROUP. (2011). *Manual de Operación BOMAG Marini Magnum 80* (FAYAT GROUP, Ed.; 11/2011, pp. 1–51).

Garnica, P., Delgado, H., & Sandoval, C. (2005). *Análisis comparativo de los métodos de Marshall y Superpave para compactación de mezclas asfálticas*.

Google. (2021). *Google Earth Pro* (7.3). Google LLC.

Greenroads. (2011). *PaLATE* (Version 2.2; pp. 1–74). University of Washington.  
<https://www.greenroads.org>

Highway Research Board. (1962). *The AASHO Road Test Report 7*.  
<http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/sr/sr61g/61g.pdf>

IFSTTAR. (2013). *ECORCEM ECO comparison Road Construction and Maintenance* (Version 2.1). IFSTTAR.  
<http://ecorcem.ifsttar.fr/use.php?msclid=7bc1e039ad1911ec9b87794249b4d494>

Instituto Nacional de Estadística y Censos, I. (2022). *Índice de precios de materiales, equipo y maquinaria de la construcción*. <https://aplicaciones3.ecuadorencifras.gob.ec/BIINEC-war/>

Ministerio de Economía y Finanzas. (2022). *Proforma Presupuesto General del Estado*.  
[https://www.finanzas.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2021/10/presentacio%CC%81n-proforma-2022\\_30-oct.pdf](https://www.finanzas.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2021/10/presentacio%CC%81n-proforma-2022_30-oct.pdf)

Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones. (2002). *Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos y Puentes* (Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones, Ed.). Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones.

Muench, S. T., Anderson, J. L., Hatfield, J. P., Koester, J. R., & Söderlund, M. (2011). *Greenroads software and user guide modified by Civil & Environmental Engineering Department* (J. Anderson, C. Weiland, & S. Muench, Eds.). University of Washington.

Mukherjee, A., Stawowy, B., & Cass, D. (2013). Project Emission Estimator. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2366, 3–12.  
<https://doi.org/10.3141/2366-01>

National Cooperative Highway Research Program. (2011). *NCHRP Report 691 Mix Design Practices for Warm-Mix Asphalt*. Transportation Research Board.

National Cooperative Highway Research Program. (2012). *Special mixture design considerations and methods for warm mix asphalt: a supplement to NCHRP report 673, A manual for design of hot mix asphalt with commentary*. Transportation Research Board.  
[www.national-academies.org](http://www.national-academies.org)

National Cooperative Highway Research Program, & Bonaquist, R. (2009). *NCHRP 9-43 Mix Design Practices for Warm Mix Asphalt*.

Planta de Asfalto GAD Azogues. (2022). *Datos de producción de asfalto del GAD Municipal de Azogues*.

- PRé Consultants. (2016). *SimaPro* (Version 9.3; pp. 1–89). PRé Sustainability. <https://simapro.com/>
- Rijkswaterstaat. (2017). *DuboCalc* (Version 5.0). Cenosco and Royal Haskoning DHV. <https://www.dubocalc.nl/en/?msckid=401ba576ad1711eca1469f73ee90d396>
- Santos, J. M., Thyagarajan, S., Keijzer, E., Fernández Flores, R., & Flintsch, G. (2017). Pavement life cycle assessment a comparison of American and European tools. *Pavement Life-Cycle Assessment Symposium*, 1–12. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01651650>
- Sphera Soluciones GmbH. (1991). *GaBi Software* (Version 2022). Sphera Soluciones GmbH. <https://gabi.sphera.com/international/index/>
- U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration. (1979). *Life Cycle Cost Analysis in Pavement Design*.
- U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration. (2001). *Sustainable transportation practices in Europe*. United States. Federal Highway Administration.
- U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration. (2004). *Real Cost Life Cycle Cost Analysis Software* (Version 2.5; pp. 1–46). U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration.
- U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration. (2008). *LTPP InfoPave Tools* (Version 3.1). U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration. <https://infopave.fhwa.dot.gov/?msckid=d651d7c6ad2c11ec808c1c29531347d0>
- U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration. (2018). *FHWA Self-Evaluation Tool as a Rating System, INVEST* (Version 1.3). U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration. <https://www.sustainablehighways.org/>
- U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, & American Association of State Highway and Transportation Officials. (1997). *Transportation Asset Management*.
- World Wildlife Fund, W., Zoological Society of London, Z., & Global Footprint Network. (2008). *Informe Planeta Vivo*.
- Zaumanis, M. (2014). Warm Mix Asphalt. In *Green Energy and Technology* (Vol. 204). Technical University of Denmark. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-44719-2\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-662-44719-2_10)
- Zydex Industries. (2022). *Ficha Técnica ZycoTherm*. <https://brem.com.ec/wp-content/uploads/2018/08/ZYCOTHERM.pdf>





## APÉNDICE A

### A. Principales consideraciones de diseño de pavimentos por el método de la AASHTO

## A.1. Tránsito

Es de interés para el dimensionamiento de los pavimentos las cargas por eje esperadas en el carril de diseño durante el periodo de diseño asumido, además se debe tomar en cuenta la repetición de cargas del tránsito y la consecuente acumulación de deformaciones sobre el pavimento.

Con el efecto de evaluar el efecto, en un pavimento flexible, de las cargas a la estándar de 8,2 toneladas equivalente a un tándem de 14,5 toneladas, se han determinado factores de equivalencia de carga por eje, que se han obtenido a partir de los resultados del AASHTO ROAD TEST (Highway Research Board, 1962). Los resultados obtenidos determinan la equivalencia entre cargas diferentes transmitidas al pavimento por el sistema de ejes.

La determinación del tránsito existente de una vía se debe realizar mediante procedimientos de la ingeniería de tránsito que requiere la información del tránsito promedio diario anual TPDA, número, tipo y peso de los ejes de los vehículos pesados.

Además, se requiere realizar los cálculos del factor camión a partir de las Normas de aplicación para el Control de Pesos y Dimensiones a los vehículos de carga pesada que circulan en la Red Vial del País, emitido mediante Acuerdo Ministerial 018-2016 de fecha 05 de mayo de 2016 (Valarezo, 2016).

## A.2. Confiabilidad

Se define como la probabilidad de que una sección diseñada se comportará satisfactoriamente bajo las condiciones de tránsito y ambientales impuestas. Este factor tiene en cuenta variaciones tanto en la predicción del tránsito como en la del comportamiento, proporcionando un nivel de confianza (R).

Para minimizar la incongruencia en los resultados obtenidos, es necesario escoger los niveles de confiabilidad en función de la clasificación de carreteras como puede verse en la tabla A1.

**Tabla A 1. Niveles de confiabilidad sugeridos para diferentes carreteras**

Clasificación	Nivel de confiabilidad recomendado	
	Urbano	Rural
Autopistas Interprovinciales y otras	85 – 99,9	80 – 99,9
Arterias principales	80 - 99	75 - 95
Colectoras de tránsito	80 - 95	75 - 95
Carreteras locales	50 - 80	50 - 80

Fuente: (American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993)

Los detalles que se muestran en la tabla A1 permite escoger niveles mayores de confiabilidad con la finalidad de cumplir con la expectativa de seguridad, a mayor nivel de confiabilidad podemos decir que las corresponden a vías de mayor uso.

### A.3. Desviación Estándar

Los valores de desviación estándar ( $S_o$ ) desarrollados en la AASHO Road Test no incluyen error por el tránsito. El error en la predicción del comportamiento desarrollado en el tramo de ensayo fue de 0,35 para pavimentos flexibles, lo cual corresponde a una desviación estándar total de 0,45. Valores típicos de  $S_o$  son de 0,40 (se usa más) a 0,50 para pavimentos flexibles y de 0,35 a 0,40 para pavimentos rígidos.

### A.4. Nivel de Serviciabilidad

La serviciabilidad de un pavimento está definido como la habilidad de servir a tipo de tráfico que lo va a usar. La medida primordial de la serviciabilidad es el Índice de servicio presente (PSI) el cual va desde un valor de 0 (vía imposible) a 5 (vía perfecta). La idea es que el concepto de desempeño de la serviciabilidad permite el diseño de un pavimento basado en un volumen total y específico de tráfico a un mínimo nivel de serviciabilidad al final del periodo de diseño.

La selección del mínimo valor permitido del PSI o Índice de serviciabilidad final ( $p_t$ ) está basado en los índices mínimos que serán aceptables antes de la rehabilitación, recapeo o que la reconstrucción llegue a ser necesaria. Un índice de 2.5 o mayor es usado para diseño de grandes autopistas y 2 para vías de menor volumen de tráfico.

Para vías menores lo recomendable es reducir el periodo de diseño o el tráfico de diseño en lugar de diseñar la vía con índices de serviciabilidad menores a 2.

Como el tiempo al cual un pavimento alcanza el nivel de servicio final depende del volumen del tráfico y el nivel de servicio inicial ( $p_o$ ), algunas consideraciones para la selección de ( $p_o$ ) deben ser tomadas en cuenta a partir de la AASHO Road Test (Highway Research Board, 1962).

Una vez que ( $p_o$ ) y ( $p_t$ ) sean determinadas, se aplicará la siguiente ecuación para definir el cambio total en el Índice de Serviciabilidad.

$$\Delta PSI = p_o - p_t$$

### A.5. Propiedades de los materiales

- Módulo Resiliente Efectivo del Suelo: La base para caracterización de los materiales es el módulo resiliente o el módulo elástico el cual se determina mediante ensayos

especiales (AASHTO T 274) (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2001) y también mediante correlaciones para determinarlo a partir de otros ensayos.

El valor de soporte efectivo de la subrasante se determina en función de las variaciones climáticas. En base al valor del módulo resiliente estacional se determina el daño relativo ( $u_r$ ) que pondera las características de los suelos a las condiciones climáticas.

- Materiales de los pavimentos: La estructura de los pavimentos se caracteriza a partir de los módulos de elasticidad de los materiales que lo componen.
  - Subbase: El material de subbase requiere incorporar el uso de un denominado coeficiente de capa ( $a_3$ ) el cual permite convertir su espesor en un número estructural (SN).
  - Base: El material de base puede ser granular o estabilizada cuyas características de calidad son superiores a la capa de subbase, para el diseño, este material se representa a través de un coeficiente de capa ( $a_2$ ) y tiene un número estructural (SN<sub>2</sub>).
  - Capa de Rodadura: La capa de rodadura está conformada por la mezcla de agregados pétreos y cemento asfáltico; su coeficiente se lo representa mediante ( $a_1$ ) y su número estructurales (SN<sub>1</sub>). Esta mezcla se diseña y construye de tal manera que no solo presente una función estructural, sino resista la abrasión del tránsito, proporcione una superficie antideslizante y uniforme y que al mismo tiempo prevenga la penetración del agua superficial.

## A.6. Coeficientes de capa

La obtención de los coeficientes de capa ( $a_i$ ) de los materiales requeridos para el diseño estructural del pavimento flexible es necesario, el valor de este coeficiente es asignado a cada capa de material de la estructura del pavimento para realizar la conversión del espesor de capa a un número estructural (SN<sub>i</sub>). Este coeficiente de capa expresa la relación entre el SN<sub>i</sub> y el espesor ( $D_i$ ) y es una medida de la capacidad relativa del material para funcionar como un componente estructural del pavimento.

Los coeficientes de cada capa se pueden estimar en base al módulo elástico del material u otra propiedad, mediante diagramas. La siguiente ecuación corresponde al cálculo del número estructural (SN).

$$SN = \sum_{i=1} a_i D_i$$

## A.7. Drenaje

El tratamiento para el nivel esperado de drenaje para el pavimento flexible se da a través del uso de coeficientes de capa modificados, para un coeficiente de capa más efectivo se tendrá condiciones de drenaje mejoradas. El factor de modificación del factor de capa (m) ha sido integrado en la ecuación del número estructural (SN), conjuntamente con el coeficiente de capa ( $a_i$ ) y el espesor de capa ( $D_i$ ), por lo tanto, se tiene:

$$SN = a_1D_1 + a_2D_2m_2 + a_3D_3m_3$$

La tabla A2 detalla la calidad de drenaje y el porcentaje del tiempo durante el año en el cual la estructura del pavimento estará expuesta a niveles de humedad de saturación.

**Tabla A 2. Calidad de drenaje**

Calidad de drenaje	Tiempo para remoción del agua
Excelente	2 horas
Buena	1 día
Aceptable	1 semana
Pobre	1 mes
Muy Pobre	El agua no drena

Fuente: (American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993)

Cabe indicar que los datos que se muestran en la tabla A2 aplican únicamente a capas de base y subbase no tratadas y existe la libertad de seleccionar cual nivel o calidad de drenaje se logra tomando en cuenta una serie de condiciones de drenaje.

Como se puede ver en la tabla A3, se detalla el factor de modificación del coeficiente de drenaje ( $m_i$ ) en función de la calidad de drenaje.

**Tabla A 3. Porcentaje de tiempo de exposición de la estructura del pavimento**

Calidad de drenaje	% de tiempo de exposición de la estructura del pavimento a nivel de humedad próximo a la saturación			
	< 1%	1 - 5%	5 - 25%	> 25%
Excelente	1,4 – 1,35	1,35 – 1,30	1,30 – 1,20	1,20
Buena	1,35 – 1,25	1,25 – 1,15	1,150 - 1,00	1,00
Aceptable	1,25 – 1,15	1,15 – 1,05	1,00 – 0,80	0,80
Pobre	1,15 – 1,05	1,05 – 0,80	0,80 – 0,60	0,60
Muy Pobre	1,05 – 0,95	0,95 – 0,75	0,75 – 0,40	0,40

Fuente: (American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993)

En la tabla A3, se observa que el porcentaje de tiempo de exposición de la estructura del pavimento a nivel de humedad próximo a la saturación se puede obtener en función de la calidad de drenaje de la estructura del pavimento y varía entre 0,4 y 1,4 para diferentes porcentajes de tiempo de exposición.

## A.8. Diseño Estructural

El concepto básico de diseño para pavimentos es determinar el espesor requerido basado en el nivel de tráfico. El periodo de desempeño asociado es corregido por cualquier pérdida de serviciabilidad asociada a efectos ambientales. El diseñador podrá considerar una rehabilitación planificada por efectos ambientales o económicos. El diseño está basado en determinar un número estructural para pavimento flexible (SN) para resistir la carga de tráfico proyectada. A continuación, se presenta la ecuación de diseño que recomienda la AASHTO con tránsito superior a  $0,05 \times 10^6$  ejes equivalentes de 8,2 toneladas.

$$\log_{10} W_{18} = Z_R * S_o + 9,36 * \log_{10} (SN + 1) - 0,20 + \frac{\log_{10} \left[ \frac{\Delta PSI}{4,2 - 1,5I} \right]}{0,40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5,19}}} + 2,32 * \log_{10} M_R - 8,07$$

Donde:

$W_{18}$ : Número estimado de ejes simples.

$Z_R$ : Desviación estándar normal.

$S_o$ : Error estándar combinado de la predicción del comportamiento.

$\Delta PSI$ : Diferencia entre el índice de servicio inicial ( $P_o$ ) y el final ( $P_t$ ).

$M_R$ : Módulo Resiliente (psi)

SN: número estructural

$a_i$ : Coeficiente estructural de la capa  $i$ , el cual depende de la característica del material.

$D_i$ : Espesor de la capa  $i$  (pulg)

$M_i$ : Coeficiente de drenaje de la capa  $i$ .

El SN es un número abstracto que expresa resistencia estructural de un pavimento requerido para una combinación dada de soporte del suelo, del tránsito total, de la serviciabilidad terminal y de las condiciones ambientales.

## A.9. Diseño Estructural

**Determinación del Número Estructural (SN):** El número estructural se determina a partir del diagrama presentado por la AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993) mediante los siguientes parámetros:

- Tránsito estimado en el periodo de diseño.

- El nivel de confiabilidad (R).
  - Desviación estándar total ( $S_0$ ).
  - Módulo resiliente de la subrasante ( $M_R$ ).
  - Pérdida de nivel de servicio durante el periodo de diseño ( $\Delta PSI$ )
- **Selección de los espesores:** Una vez diseñado el número estructural (SN) inicial de la estructura del pavimento es necesario identificar un conjunto de espesores los cuales, combinados, proveerán la capacidad de carga correspondiente al número estructural (SN) diseñado. La ecuación del número estructural es la siguiente:

$$SN: SN = a_1 D_1 + a_2 m_2 D_2 + a_3 m_3 D_3$$

Donde:

$a_1, a_2, a_3$ : Coeficientes de capa representativos de la subrasante, sub base y base.

$D_1, D_2, D_3$ : Espesor (pulgadas) de la superficie de subrasante, base y subbase.

$m_2, m_3$ : Coeficientes de drenaje de las capas de base y subbase.

La ecuación del número estructural (SN) no es una única solución, existen varias combinaciones de espesor de capa que generan soluciones satisfactorias. El espesor de las capas del pavimento diseñado debe ser redondeadas al valor más cercano de  $\frac{1}{2}$  pulgada.

- **Espesores mínimos:** En el diseño estructural del pavimento se establecen espesores mínimos de concreto asfáltico y base tal como se detalla en la tabla A4.

**Tabla A 4. Espesores mínimos de capa (pulg.)**

# de ejes equivalentes (millones)	Concreto Asfáltico	Base Granular
< 0,05	1.0 o TSD	4
0,05 – 0,15	2.0	4
0,15 – 0,50	2.5	4
0,50 – 2,00	3.0	6
3,00 – 7,00	3.5	6
> 7,00	4.0	6

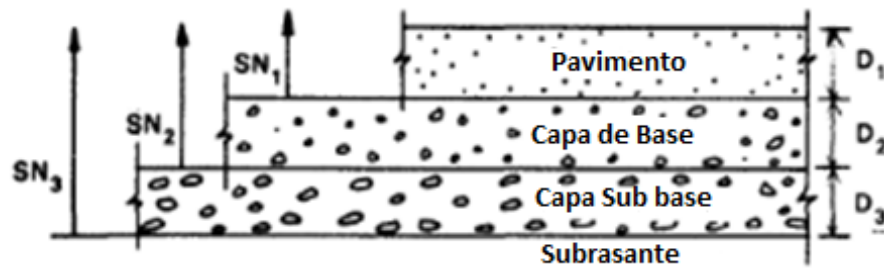
Fuente: (American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993)

Los detalles de la tabla A4 establecen los espesores mínimos recomendados en función del número de ejes equivalentes, debido a que es impráctico y antieconómico diseñar capas muy delgadas.

Como puede observarse en la figura A1, la estructura del pavimento debería ser diseñada en concordancia con los siguientes principios.



Figura A 1. Estructura de espesores de estructura de pavimento y números estructurales



Fuente:(Asphalt Institute, 1999)

La estructura que se observó en la Figura A1, es un sistema de capas que consta de subbase y base granular, así como de hormigón asfáltico, mismos que tienen un espesor de capa  $D_i$  y un número estructural  $SN_i$ , los cuales vienen dados por las siguientes relaciones.

$$D_1^* \geq \frac{SN_1}{a_1}$$

$$SN_1^* = a_1 D_1^* \geq SN_1$$

$$D_2^* \geq \frac{SN_2 - SN_1^*}{a_2 m_2}$$

$$SN_1^* + SN_2^* \geq SN_2$$

$$D_3^* \geq \frac{SN_3 - (SN_1^* + SN_2^*)}{a_3 m_3}$$

*\*El asterisco indica el valor real usado, el cual debe ser igual o mayor al valor requerido*

## APÉNDICE B

### **B. Método Marshall de diseño de mezclas**

## **B.1. Preparación para efectuar los procedimientos Marshall**

El primer paso es determinar las cualidades (estabilidad, durabilidad, trabajabilidad, resistencia al deslizamiento, etc.) que debe tener la mezcla y seleccionar un tipo de agregado y asfalto que puedan combinarse para ciertas cualidades, una vez hecho esto, se puede empezar con la preparación de los ensayos. Antes de preparar las muestras es necesario lo siguiente:

- Los materiales deberán cumplir con las especificaciones técnicas adecuadas.
- La mezcla de los áridos cumplirá las especificaciones en cuanto a granulometría.
- Disponer de suficiente volumen de áridos secos y divididos por grupos.
- Disponer de una probeta normalizada de 2,5 pulgadas de altura y 4 pulgadas de diámetro.

## **B.2. Selección de las muestras del material**

Reunir muestras de asfalto y agregado que van a ser usados en la mezcla de pavimentación, es importante que estas muestras sean iguales a las que se usarán en la mezcla final. La mezcla será exacta solo cuando los ingredientes ensayados en laboratorio sean idénticos a los usados en el producto final. Una variabilidad en esto último puede ocasionar problemas en la trabajabilidad y falla prematura del pavimento.

## **B.3. Preparación del agregado**

La relación de viscosidad – temperatura del cemento asfáltico que va a ser usado debe ser ya conocida para poder establecer las temperaturas de mezclado y compactación en laboratorio. Por lo tanto, los procedimientos preliminares se concentran en el agregado, con el propósito de identificar exactamente sus características e incluyen el proceso de secado del agregado, determinar el peso específico y un análisis granulométrico.

### **B.3.1. Secado del agregado**

El Método Marshall requiere que los agregados estén libres de humedad calentándolos a una temperatura de 110 °C.

### **B.3.2. Análisis granulométrico por vía húmeda**

Este procedimiento identifica las proporciones de partículas de tamaño diferente en las muestras del agregado, este análisis consta de los siguientes pasos:

- Secado y pesado de la muestra de agregado.
- Lavado de la muestra a través de un tamiz de 0,075 mm (No.200) para la remoción de polvo mineral.
- Secado de las muestras lavadas y posterior pesado.
- Registro de peso seco de las muestras, la cantidad de polvo mineral es determinado si se comparan los pesos registrados de las muestras antes y después del lavado.

### **B.3.3. Determinación del peso específico**

El peso específico es la proporción de peso – volumen de una unidad de esa sustancia comparada con la proporción peso – volumen de una unidad igual de agua. El peso específico de una muestra de un agregado se expresa en múltiplos del peso específico del agua. El cálculo del peso específico de la muestra seca de agregado establece un punto de referencia para medir los pesos específicos necesarios en la determinación de las proporciones de agregado, asfalto, y vacíos que van a usarse en los métodos de diseño.

### **B.4. Preparación de las probetas de ensayo**

Son preparadas haciendo que cada una contenga una ligera cantidad diferente de asfalto. El margen de contenido de asfalto usado en las briquetas está determinado con base en experiencia previa con los agregados de la mezcla. Este margen le da al laboratorio un punto de partida para determinar el contenido exacto de asfalto para la mezcla final. La proporción de agregado en las mezclas está formulada por los resultados del análisis granulométrico.

Las muestras se preparan de la siguiente manera:

- Para obtener resultados adecuados se triplican de ordinario las probetas para cada contenido de asfalto.
- Para cada probeta se necesita por lo general 1200 gr de áridos.
- La cantidad mínima de áridos necesaria para una serie de probetas de una granulometría determinada es de unos 22 Kg.
- En cuanto al betún es suficiente emplear cuatro litros del mismo.
- Los áridos se calientan a temperaturas de 175°C a 190°C.
- Se calienta el betún asfáltico a temperatura de 120 °C a 137 °C.
- El asfalto y el agregado se calientan y mezclan completamente hasta que todas las partículas de agregado estén revestidas. Esto simula los procesos de calentamiento y mezclado que ocurren en la planta.
- La temperatura de la mezcla para compactación no debe ser inferior a 107 °C.
- La mezcla asfáltica se coloca en los moldes pre calentados Marshall (95 °C a 150 °C). Luego se usa el martillo Marshall para compactar la mezcla. Este martillo también es calentado para que no enfríe la superficie de la mezcla al golpearla.
- Las briquetas son compactadas mediante golpes del Martillo Marshall de compactación. El número de golpes del martillo (35, 50 o 75) depende de la cantidad de tránsito para la cual la mezcla está siendo diseñada. Ambas caras de cada biqueta reciben el mismo número de golpes.

- Luego de la compactación se quita la extensión y la placa base y las probetas deben ser enfriadas en agua fría por lo menos 2 minutos.
- Se saca la muestra con ayuda del gato de expulsión y se numera los moldes.
- Las probetas deben tener una altura de 2,5 pulgadas  $\pm$  1/8 pulgadas, caso contrario se puede corregir la cantidad de la mezcla de acuerdo a la siguiente relación.

$$\text{Peso corregido de la mezcla} = \frac{2,5 \times \text{peso de mezcla empleado (gr)}}{\text{altura de la probeta obtenida (pulg.)}}$$

## B.5. Procedimiento del ensayo Marshall

Existen tres procedimientos en el método del ensayo Marshall. Estos son: a) determinación del peso específico total, b) medición de estabilidad y fluencia Marshall, y, c) análisis de la densidad y el contenido de vacíos de las probetas.

### B.5.1. Determinación del peso específico total

El peso específico total de cada probeta se determina tan pronto como las probetas recién compactadas se hayan enfriado a la temperatura ambiente. Esta medición de peso específico es para el análisis preciso de densidad – vacíos. El peso específico total se determina mediante la norma AASHTO T 166 (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2021).

### B.5.2. Ensayos de estabilidad y fluencia

El ensayo está dirigido para medir la resistencia a la deformación de la mezcla, la fluencia mide la deformación, bajo carga, que ocurre en la mezcla. El procedimiento es el que se describe a continuación:

- Las briquetas son calentadas en un baño de agua a 60 °C. Esta temperatura representa la temperatura más caliente que un pavimento en servicio va a experimentar.
- La probeta es removida del baño, secada, y colocada rápidamente en el aparato Marshall. El aparato consiste de un dispositivo que aplica carga sobre la probeta, y de unos medidores de carga y deformación (fluencia).
- La carga del ensayo es aplicada a la probeta a una velocidad constante de 51 mm (2 pulgadas) por minuto hasta que la muestra falle. La falla está definida como la carga máxima que la briqueta puede resistir.
- La carga de falla se registra como el valor de estabilidad Marshall y la lectura del medidor de fluencia se registra como la fluencia.

### **B.5.3. Valor de la estabilidad Marshall**

Es una medida de la carga bajo la cual una probeta cede o falla totalmente. En el ensayo, cuando la carga es aplicada lentamente, los cabezales superior e inferior del aparato se acercan, y la carga sobre la briqueta aumenta al igual que la lectura en el indicador de cuadrante, luego se suspende la carga una vez se obtiene la carga máxima. La carga máxima indicada por el medidor es el Valor de Estabilidad Marshall. Las estabilidades extremadamente altas se obtienen a costa de durabilidad, entonces una estabilidad alta no necesariamente representa una medida de calidad de la mezcla.

### **B.5.4. Valor de la fluencia Marshall**

Representa la deformación de la briqueta, misma que se indica como la disminución en el diámetro vertical de la briqueta. Las mezclas que tienen valores bajos de fluencia y valores muy altos de estabilidad Marshall son consideradas demasiado frágiles y rígidas para un pavimento en servicio. Aquellas que tienen valores altos de fluencia son consideradas demasiado plásticas, y tienen tendencia a deformarse fácilmente bajo las cargas del tránsito.

### **B.5.5. Análisis de densidad y vacíos**

Es para determinar el porcentaje de vacíos en la mezcla compactada.

- Análisis de vacíos: Es el aire que se encuentra entre las partículas de agregado revestidas de asfalto. El porcentaje de vacíos se calcula a partir del peso específico total de cada probeta compactada y del peso específico teórico de la mezcla de pavimentación (sin vacíos). Este último puede ser calculado a partir de los pesos específicos del asfalto y el agregado de la mezcla, con un margen apropiado para tener cuenta la cantidad de asfalto absorbido por el agregado; o directamente mediante un ensayo normalizado (AASHTO T 209) (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2020) efectuado sobre la muestra de mezcla sin compactar. El peso específico total de las probetas compactadas se determina pesando las probetas en aire y en agua.

- Análisis de peso unitario

El peso unitario promedio para cada muestra se determina multiplicando el peso específico total de la mezcla por  $1000 \text{ Kg/m}^3$ .

- Análisis de VAM

Los vacíos en el agregado mineral están definidos por el espacio intergranular de vacíos que se encuentran entre las partículas de agregado de la mezcla de pavimentación compactado, incluyendo los vacíos de aire y el contenido efectivo de asfalto, y se expresa como el porcentaje del volumen total de la mezcla. El VAM es calculado con base en el peso específico total del agregado y se expresa como un porcentaje del volumen total de la mezcla compactada. Se calcula restando el volumen de agregado (peso específico total del agregado) del volumen total de la mezcla.

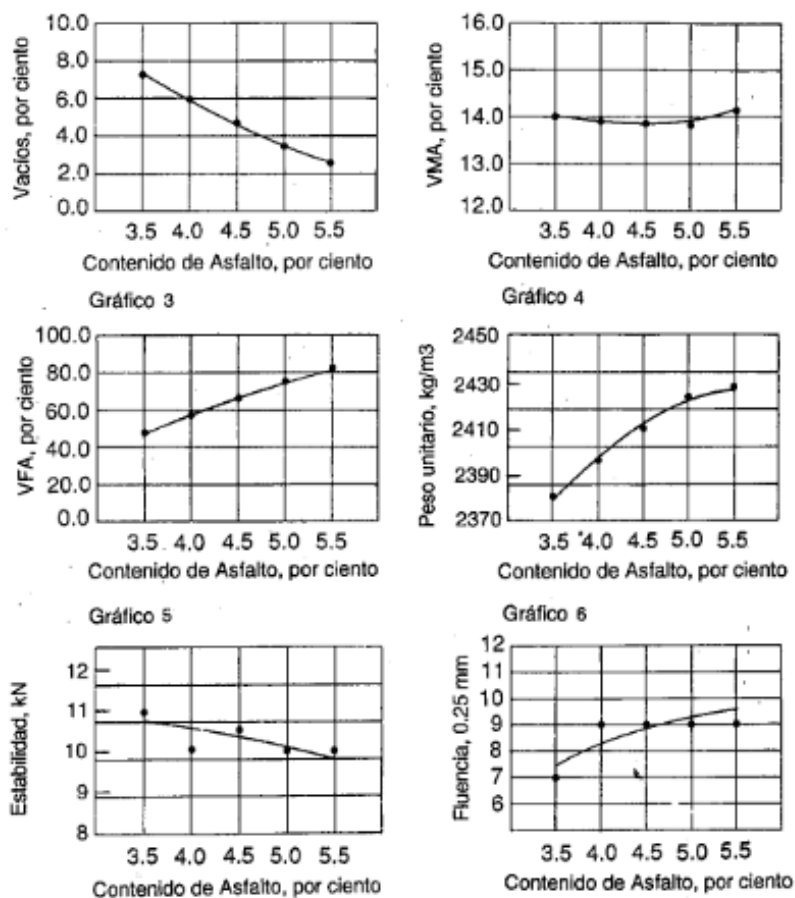
## B.5.6. Análisis de resultados del ensayo Marshall

### B.5.6.1. Resultados gráficos

Se debe trazar los resultados del ensayo Marshall en gráficas de cada probeta usada, mediante el análisis de la gráfica se puede determinar que probeta cumple mejor los criterios establecidos para el pavimento terminado. Las proporciones de asfalto y agregado en esta probeta se convierten en las proporciones usadas en la mezcla final.

Los resultados del ensayo Marshall en cuanto a VAM, VFA, densidades, estabilidad y fluencia se pueden ver en la figura B1.

Figura B 1. Ejemplo de gráficas de resultados de probetas Marshall



Fuente: (Asphalt Institute, 1999)

En la figura B1, se puede observar que los resultados del ensayo están representados por puntos los cuales deben ser conectados con una curva de ajuste suave (Asphalt Institute, 1999).

### B.5.6.2. Relaciones y observaciones de los resultados de los ensayos

En las gráficas indicadas anteriormente se puede enunciar ciertas tendencias en las relaciones entre el contenido de asfalto y las propiedades de la mezcla. A continuación, se indican dichas tendencias.

- El porcentaje de vacíos disminuye a medida que aumenta el contenido de asfalto
- El porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VAM) disminuye hasta un valor mínimo y luego aumenta con aumentos en el contenido de asfalto.
- El porcentaje de vacíos llenos de asfalto (VFA) aumenta con aumentos en el contenido de asfalto.
- La curva para el peso unitario de la mezcla es similar a la curva de estabilidad excepto que el peso unitario máximo se presenta a un contenido de asfalto ligeramente mayor que el que determina la máxima estabilidad.
- Los valores de estabilidad aumentan a medida que el contenido de asfalto aumenta, más luego de determinado punto, la estabilidad disminuye con cualquier aumento en el contenido de asfalto.
- Los valores de fluencia aumentan con aumento en el contenido de asfalto.

### B.5.6.3. Determinación del contenido óptimo de asfalto

El contenido óptimo de asfalto se determina a partir de los resultados gráficos indicados en el punto anterior. Inicialmente se determina el contenido de asfalto para el cual el contenido de vacíos es de 4 %. Luego se puede determinar todas las propiedades calculadas y medidas para este contenido de asfalto. Los criterios del Instituto del Asfalto para el diseño Marshall son los siguientes, como puede observarse en la tabla B1.

**Tabla B 1. Criterios del Instituto del Asfalto (U.S.A) para el diseño Marshall**

Criterios para Mezcla del Método Marshall	Tránsito Liviano		Tránsito Mediano		Tránsito Pesado	
	Carpeta y Base		Carpeta y Base		Carpeta y Base	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Compactación, número de golpes en cada cara de la probeta	35		50		75	
Estabilidad, N (lb.)	3336	-	5338	-	8006	-
Flujo, 0,25mm (0,01 pulg.)	750	18	1200	16	1800	14
Porcentaje de Vacíos	8	5	3	5	3	5



Criterios para Mezcla del Método Marshall	Tránsito Liviano		Tránsito Mediano		Tránsito Pesado	
	Carpeta y Base		Carpeta y Base		Carpeta y Base	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Porcentaje de Vacíos en el Agregado Mineral (VAM)	Ver Tabla B2					
Porcentaje de Vacíos llenos de Asfalto (VFA)	70	80	65	78	65	75

Fuente: (Asphalt Institute, 1999)

En la tabla B1 se puede ver que, el contenido óptimo de asfalto obtenido lo comparamos con los criterios de diseño del Instituto del Asfalto para el diseño Marshall, si es que cumplen todos los criterios entonces este es el contenido de diseño de asfalto, en caso de no cumplir los criterios, será necesario hacer ajustes o volver a diseñar la mezcla.

#### B.5.6.4. Verificando los criterios de diseño

Usando las gráficas de resultados del ensayo Marshall (VAM, VFA; densidades, estabilidad y fluencia) y el contenido de asfalto de diseño para un contenido de vacíos de 4% se determina las otras propiedades, luego se puede comparar estos valores con los valores recomendados por el Instituto del Asfalto en los Criterios de Diseño Marshall, como se puede ver en la tabla B2.

**Tabla B 2. Porcentaje mínimo de VAM**

Tamaño Máximo en mm Porcentaje		VAM mínimo, por ciento		
		Vacíos de Diseño, por ciento		
mm	in.	3.0	4.0	5.0
1.18	No. 16	21.5	22.5	23.5
2.36	No. 8	19.0	20.0	21.0
4.75	No. 4	16.0	17.0	18.0
9.5	3/8	14.0	15.0	16.0
12.5	1/2	13.0	14.0	15.0
19	3/4	12.0	13.0	14.0
25	1.0	11.0	12.0	13.0
37.5	1.5	10.0	11.0	12.0
50	2.0	9.5	10.5	11.5
63	2.5	9.0	10.0	11.0

Fuente: (Asphalt Institute, 1999)

En la tabla B2 se puede ver que el porcentaje mínimo de vacíos en el agregado mineral puede ser revisado y comparado con el VAM del agregado.

## **B.5.6.5. Selección de un diseño de mezcla**

El diseño de mezcla seleccionado para ser usado en un pavimento es el que cumple de manera económica con los criterios establecidos. La mezcla no se debe diseñar para optimizar una propiedad en particular. Cualquier variación en el diseño deberá ser permitida solo bajo circunstancias inusuales.

## APÉNDICE C

### **C. Análisis del tráfico, materiales y variables de diseño de pavimentos por el método AASHTO**

## C.1. Datos Generales

Como puede observarse, la tabla C1 presenta el detalle de los datos generales para el diseño de la mezcla asfáltica en caliente.

**Tabla C 1. Datos generales**

Tipo de vía	Local
Número de carriles	2
Ancho de carril	3,6
Tipo de pavimento a diseñar	Flexible
Tipo de mezcla Asfáltica	MAC
Horizonte de diseño	2035

Fuente: Elaboración propia

Los valores que se muestran en la tabla C1, corresponden a una vía local de 2 carriles de 3,6 m de ancho, para lo cual se diseñó una mezcla asfáltica en caliente y con un horizonte de diseño al año 2035.

## C.2. Análisis de Tráfico

Se refiere al movimiento de vehículos por la sección de una vía, determinado en la unidad de tiempo, la unidad utilizada en el presente estudio es el TPDA, que es el número de vehículos que circulan por un tramo de la vía durante un año, 24 horas al día todos los días dividido para 365 días del año. El GAD Municipal de Azogues cuenta con un estudio de consultoría para la “Evaluación, conteo de tráfico, ensayos de geotecnia y diseño del asfaltado de las calles de la parte baja de la ciudad de Azogues” (Ortíz, 2016), del cual se obtuvo los datos de TPDA que se requiere para el diseño.

## C.2.1. Tránsito Promedio Diario Anual TPDA

La proyección del tránsito promedio diario anual se realizó para diferentes periodos, como se puede observar en la tabla C2.

**Tabla C 2. Proyección TPDA para livianos, buses y camiones**

TPDA	LIVIANOS	BUSES		CAMIONES			TOTAL	
		2 o 3 ejes	2 ejes	3 ejes	2S2	3S2		3S3
TPDA 2015	545	43	27	2	0	0	0	617
TPDA 2020	657	55	30	2	0	0	0	744
TPDA 2025	774	59	33	2	0	0	0	868
TPDA 2030	895	63	36	2	0	0	0	996
TPDA 2035	1035	67	40	2	0	0	0	1144

Fuente: (Ortíz, 2016)

Los datos que se muestran en la tabla 19, representa el tráfico promedio anual proyectados en quinquenios hasta el horizonte de diseño y se distribuyen de acuerdo al tipo de vehículos, el tráfico total proyectado al final del periodo de diseño es de 1144 vehículos.

## C.2.2. Clasificación funcional de vías

Para establecer la clasificación funcional de la vía en base al TPDA de diseño, se tomó como referencia la tabla C3.

**Tabla C 3. Clasificación funcional de las vías en base al TPDA<sub>d</sub>**

Descripción	Clasificación Funcional	Tráfico Promedio Diario Anual al año de horizonte (TPDA) <sub>d</sub>	
		Límite Inferior	Límite Superior
Autopista	AP2	80000	120000
	AP1	50000	80000
Autovía o Carretera Multicarril	AV2	26000	50000
	AV1	8000	26000
Carretera de 2 carriles	C1	1000	8000
	C2	500	1000
	C3	0	500

Fuente: (Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador, 2013)

Como puede observarse en la tabla C3, de acuerdo a esta clasificación se puede establecer que la vía en análisis es una carretera de 2 carriles de tipo C1 pues el  $TPDA_d = TPDA_{2035}$  es 1144 y está entre 1000 – 8000 vehículos.

## C.2.3. Horizonte de Diseño

Como puede verse en la tabla C4, a continuación, se presentan los datos para el periodo de diseño.

**Tabla C 4. Horizonte de Diseño**

TPDA 2035	1144
Período de diseño	13
Año de inicio	2022

Fuente: Elaboración propia

Los datos que se muestran en la tabla C4, indican que el horizonte de diseño será el año 2035 y el año de inicio es 2022, dando un periodo de diseño de 13 años.

## C.2.4. Niveles de confiabilidad

Como puede observarse en la tabla C5, se presentan los niveles de confiabilidad para el diseño de pavimentos.

**Tabla C 5. Niveles de confiabilidad**

Clasificación Funcional	Nivel de confiabilidad recomendado	
	Urbano	Rural
Vías Internas y otras autopistas	85 – 99,9	80 – 99,9
Arterias Principales	80 - 99	75 - 95
Colectoras	80 - 95	75 - 95
Locales	50 - 80	50 - 80

Fuente: (American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993)

En la tabla C5 se puede observar que, según la clasificación funcional de las vías, el nivel de confiabilidad corresponde a una vía local de tipo urbana y se recomienda usar el valor de 50-80. En este caso se utiliza el valor promedio.

## C.2.5. Factores de Distribución por Dirección FD

Como puede observarse, la tabla C6 presenta los factores de distribución por dirección.

**Tabla C 6. Factores de Distribución por Dirección FD**

Número de carriles en ambas direcciones	% Vehículos pesados en el carril de diseño
2	50
4	45
6 o más	40

Fuente: (American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993)

En la tabla C6 se muestra que el porcentaje de vehículos pesados en el carril de diseño depende del número de carriles, para nuestro caso corresponde el 50% de vehículos pesados pues el número de carriles es 2.

### C.2.6. Factores de Distribución por Carril FL

Como se puede ver, la tabla C7 detalla los factores de distribución por carril.

**Tabla C 7. Factores de Distribución por Carril FL**

Número de carriles en cada dirección	% ESAL en el carril de diseño
1	100
2	80 - 100
3	60 - 80
4	50 - 75

Fuente: (American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993)

En la tabla C7 se puede observar que el porcentaje de carga estándar por eje equivalente (ESAL) en el carril de diseño depende del número de carriles en cada dirección, al tratarse de una vía de dos carriles y un sentido por cada carril el porcentaje de ESAL equivale al 100%.

### C.2.7. Tasa de Crecimiento Vehicular en Redes Locales

Las tasas de crecimiento vehicular en la provincia del Cañar se muestran en detalle en la tabla C8.

**Tabla C 8. Tasa de Crecimiento Vehicular en Redes Locales**

Periodo	Tasas de crecimiento vehicular - Cañar		
	Livianos	Buses	Camiones
2010-2015	4,42%	1,68%	272%
2015-2020	3,82%	1,49%	2,42%
2020-2025	3,34%	1,34%	2,18%
2025-2030	2,94%	1,22%	1,98%

Fuente: (Ortíz, 2016)

Como puede observarse en la tabla C8, la tasa de crecimiento vehicular, de acuerdo a la “Evaluación, conteo de tráfico, ensayos de geotecnia y diseño del asfaltado de las calles de la parte baja de la ciudad de Azogues” (Ortíz, 2016) está proyectada en quinquenios y para los diferentes tipos de vehículos.

## C.2.8. Composición Vehicular

La composición del tráfico se puede observar en la tabla C9 de acuerdo a lo determinado en conteos volumétricos de tráfico realizada en un estudio previo en Azogues (Ortíz, 2016).

**Tabla C 9. Composición Vehicular**

Composición Vehicular			
LIVIANOS	BUSES	CAMIONES	TOTAL
88,33%	6,97%	4,70%	100,00%

Fuente: (Ortíz, 2016)

Como puede verse en la tabla C9, el 88,33% corresponde a vehículos livianos y el tráfico restante está compuesto por buses y camiones.

## C.2.9. Factor de Equivalencia Global o Factor Camión Global

El factor de Equivalencia Global o Factor Camión Global viene dado por la siguiente expresión:

$$FC_g = \frac{\sum Ci * Fi}{\sum Ci}$$

$$FP = \frac{(1 + r_i)^n - 1}{\ln(1 + r_i)}$$

FC<sub>g</sub>: Factor de equivalencia global para los vehículos comerciales o factor camión global.

FP: Factor de proyección por tipo de vehículo.

$$\frac{W_x}{W_{18}} = \left[ \frac{L_{18} + L_{2s}}{L_x + L_{2x}} \right]^{4,79} \left[ \frac{10^{G/\beta x}}{10^{G/\beta 18}} \right] [L_{2x}]^{4,33}$$

$$0,4 + \left( \frac{0,081(L_x + L_{2x})^{3,23}}{(SN + 1)^{5,19} L_{2x}^{3,23}} \right)$$



$$\log\left(\frac{4,2 - P_t}{4,2 - 1,5}\right)$$

Donde:

$P_t$ : Índice de servicio final.

SN: Número Estructural

$$\frac{W_x}{W_{18}} = \left[\frac{L_{18} + L_{2s}}{L_x + L_{2x}}\right]^{4,62} \left[\frac{10^{G/\beta x}}{10^{G/\beta 18}}\right] [L_{2x}]^{3,28}$$

$$\log\left(\frac{4,5 - P_t}{4,5 - 1,5}\right)$$

$$1,0 + \left(\frac{3,63(L_x + L_{2x})^{5,20}}{(D + 1)^{8,46} L_{2x}^{3,52}}\right)$$

Los resultados de los parámetros de la expresión anterior se pueden observar en la tabla C10.

**Tabla C 10. Resultados Factor de Equivalencia Global o Factor Camión Global**

Vehículo	Eje	FC	Carga Eje (ton)	Tipo de Eje
Liviano	Eje 1	0,004	2	Simple
	Eje 2	0,004	2	Simple
		<b>0,008</b>		
Vehículo	Eje	FC	Carga Eje (ton)	Tipo de Eje
2s2 (bus)	Eje 1	0,54	7	Simple
	Eje 2	3,42	11	Simple
	Eje 3	3,14	20	Tándem
		<b>7,098</b>		
Vehículo	Eje	FC	Carga Eje (ton)	Tipo de Eje
Camión	Eje 1	0,20	10	Tándem
	Eje 2	9,73	26	Tándem
	Eje 3	4,98	12	Simple
	Eje 4	4,97	32	Trídem
		<b>19,876</b>		

Fuente: Elaboración propia

Como puede observarse en la tabla C10, el factor camión global para vehículos livianos es de 0,008, para buses 7,098 y para camiones de 19,876.

## C.2.10. Proyección del tráfico

Se basa en el número de ejes equivalentes de 8,2 ton (18kips) en el carril de diseño y en el periodo de diseño ( $W_{18}$  o  $N$ ), el  $F_{\text{proy}}$  para este método es:

$$F_{\text{proy}} = \frac{(1+r)^n - 1}{r}$$

Con un periodo de diseño de 13 años y tomando en cuenta los datos anteriores, se proyecta el tráfico al año 2035 y obteniendo el valor de tránsito equivalente proyectado  $N$  de 2694552 a partir de la siguiente fórmula.

*N: Número de ejes simples equivalentes acumulados de vehículos pesados en el carril de diseño y en el periodo de diseño.*

$$N = TPD * \%V_c * FD * FL * F_p * FE_c * 365$$

## C.3. Datos generales de los Materiales

### C.3.1. Suelo de Fundación – Subrasante

Para la obtención de los parámetros de resistencia del suelo de subrasante donde se construye la estructura vial se tiene de referencia la “Evaluación, conteo de tráfico, ensayos de geotecnia y diseño del asfaltado de las calles de la parte baja de la ciudad de Azogues” (Ortíz, 2016), mediante el cual se realizó diecinueve calcatas a cielo abierto de 1,50m de profundidad, de la cual se procedió a la toma de la muestra de suelo para ser sometido a los ensayos de laboratorio estandarizados con fines de clasificatorios. Previamente en cada una de las calcatas se realizó ensayos de penetración dinámica con DCP, cuya finalidad es determinar el módulo de resiliencia de la subrasante para el diseño de pavimento.

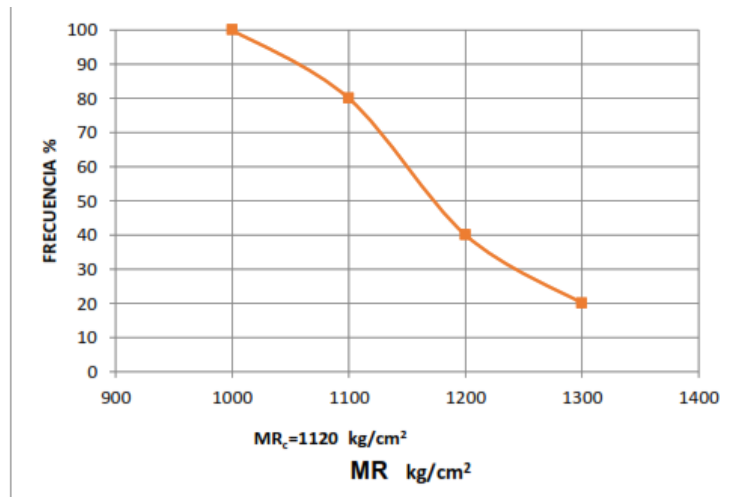
MR: Módulo Resiliente

$$M_R = 235,3 DCP^{-0,475}$$

DCP: MM/Golpe de penetración

La gráfica del módulo resiliente y su frecuencia se puede observar a través de la figura C1.

Figura C 1. Modulo Resiliente calculado



Módulo Resiliente de diseño  $MR_D=0.6*1120=672 \text{ Kg/cm}^2$

Fuente: (Ortíz, 2016)

Como se puede observar en la figura C1, para el módulo de resiliente de la subrasante, se utilizó la expresión dada por (George & Uddin, 2000). Para considerar la variación del módulo resiliente dependiendo de la época del año, se ha considerado el 60% de los valores obtenidos en campo para ser empleados en el diseño.

A partir del módulo resiliente obtenido calculamos el CBR de la subrasante con la siguiente ecuación, de lo cual se obtiene un CBR de 6,37% (menor a 10%).

MR: Módulo Resiliente

$$M_R (\text{psi}) = 1500 \times \text{CBR} < 10\% \text{ sugerido por AASHTO}$$

### C.3.2. Capa de Subbase Granular

Las características del material de sub base se presenta a continuación en la tabla C11.

Tabla C 11. Caracterización material sub base granular

Sub Base Granular	Valor
Grava	80,80%
Arena	15,65%
Finos	3,56%

Sub Base Granular	Valor
HN	2,24%
LL	24,72%
IP	8,74%
IG	0,00
D. máx.	2,215
H. Opt.	7,50%
CBR 100%	47,00%
CBR 95%	36,00%

Fuente: Elaboración propia

Como puede observarse en la tabla C11, mediante un ensayo de laboratorio realizado por la Dirección de Obras Públicas a la capa de sub base granular utilizada en planta, se obtuvieron los resultados de porcentajes de agregados, plasticidad, densidades CBR. (Anexo 2- Resultados de Laboratorio).

### C.3.3. Módulo Resiliente

Las relaciones entre  $M_R$  y CBR se puede obtener a partir de las siguientes ecuaciones:

$M_R$ : *Módulo Resiliente*

$$M_{R (psi)} = 3000 \times CBR^{0.65} \text{ para CBR de 10\% a 20\%}$$

$$M_{R (psi)} = 4326 \times \ln(CBR) + 241, \text{ para suelos granulares}$$

Usando la ecuación para suelos granulares se obtiene que el  $M_R$  para la capa de sub base es de 16896,73 psi o 1188 Kg/cm<sup>2</sup>.

### C.3.4. Capa de Base Granular

Las características del material de base granular se puede observar en la tabla C12.

**Tabla C 12. Caracterización de material de base granular**

Base Granular	Valor
Grava	0,01%
Arena	86,09%
Finos	13,90%

Base Granular	Valor
HN	2,22%
LL	21,40%
IP	7,88%
IG	0,00
D. máx.	2,250
H. Opt.	7,40%
CBR 100%	88,00%
CBR 95%	65,00%

Fuente: Elaboración propia

Como puede verse en la tabla C12, mediante un ensayo de laboratorio realizado por la Dirección de Obras Públicas a la capa de base granular se determinó los porcentajes de agregado del material, plasticidad, densidades y CBR (Anexo 2 – Resultados de Laboratorio).

### C.3.5. Módulo Resiliente

Las relaciones entre  $M_R$  y CBR se puede obtener a partir de las ecuaciones indicadas en incisos anteriores.

Usando la ecuación para suelos granulares se obtiene que el  $M_R$  para la capa de base es de 19610 psi o 1379 Kg/cm<sup>2</sup>.

## C.4. Variables y ecuación de diseño – Método AASHTO

El método permite seleccionar diversas estrategias de diseño, desde estructuras construidas para que duren todo el periodo de análisis hasta construidas por etapas con una estructura inicial y colocación de sobrecapas.

### C.4.1. Confiabilidad

Es la probabilidad de que una sección diseñada, se comportará satisfactoriamente bajo las condiciones de tránsito y ambientales impuestas.

Este factor tiene en cuenta variaciones tanto en la predicción del tránsito como en la del comportamiento, proporcionando un nivel de confianza (**R**). A medida que crece el volumen del tránsito, se esperan mayores divergencias de los resultados, aumentando el riesgo de no cumplir con la expectativa pública de seguridad, lo cual debe, ser minimizado. Esto se logra escogiendo niveles mayores de confiabilidad. A continuación, se presenta la tabla C13 correspondiente a los

niveles de confiabilidad AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993).

**Tabla C 13. Niveles de confiabilidad**

Clasificación Funcional	Nivel de confiabilidad recomendado	
	Urbano	Rural
Vías Internas y otras autopistas	85 - 99.9	80 - 99,9
Arterias Principales	80 - 99	75 - 95
Colectoras	80 - 95	75 - 95
Locales	50 - 80	50 - 80

Fuente: (American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993)

Como puede observarse en la tabla C13, los niveles más elevados corresponden a las vías que reciben mayor uso para diferentes carreteras, de acuerdo con esta, el nivel de confiabilidad para carreteras locales urbanas es de 50-80, para lo cual se asume el valor promedio de 65%.

#### C.4.2. Desviación Estándar

Los valores de desviación estándar ( $S_o$ ) desarrollados en la AASHTO Road Test (Highway Research Board, 1962) no incluyen error por el tránsito. El error en la predicción del comportamiento desarrollado en el tramo de ensayo fue de 0,35 para pavimentos flexibles, lo cual corresponde a una desviación estándar total de 0,45

Los valores típicos de  $S_o$  son de 0,40 a 0,50 para pavimentos flexibles y de 0,35 a 0,40 para pavimentos rígidos. Para este estudio, el pavimento flexible se toma un valor promedio de los valores típicos por lo que finalmente se tiene  $S_o$  de 0,45.

#### C.4.3. Serviciabilidad

La serviciabilidad de un pavimento se define como la idoneidad que tiene el mismo para servir a la clase de tránsito que lo va a utilizar. Se evalúa a través del índice de servicio presente (PSI) el cual varía de 0 (intransitable) hasta 5 (carretera perfecta). El criterio se base en obtener al final del periodo de diseño un nivel mínimo de serviciabilidad.

La AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993) sugiere un valor de PSI de 2,5 para las autopistas y vías principales y 2,0 para las demás carreteras.

## C.4.4. Nivel o Índice de Serviciabilidad $P_o$

Del ensayo AASHO (Highway Research Board, 1962) se obtuvo el valor de 4,2 para pavimentos flexibles y 4,5 para pavimentos rígidos. Para este caso se asume un valor de serviciabilidad Inicial de 4,2.

## C.4.5. Nivel de Serviciabilidad Final $P_t$

La selección del mínimo valor permitido del PSI o Índice de serviciabilidad final ( $P_t$ ) está basado en los índices mínimos que serán aceptables antes de la rehabilitación, recapeo o que la reconstrucción llegue a ser necesaria. Un índice de 2,5 o mayor es usado para diseño de grandes autopistas y 2 para vías de menor volumen de tráfico. En este caso, al ser una vía de dos carriles y que no son de tráfico pesado se asume un nivel de serviciabilidad Final  $P_t$  de 2,2 pues el  $\Delta PSI$  se recomienda que no debe ser inferior a 2.

### C.4.5.1. Cambio total en el Índice de Servicio

Con los valores de  $P_o$  y  $P_t$  y aplicando la siguiente ecuación se determina que el  $\Delta PSI$  es de 2, en concordancia con el párrafo anterior.

$$\Delta PSI = P_o - P_t$$

## C.4.6. Drenaje

El método deja la libertad de seleccionar cuál nivel o calidad de drenaje se logra tomando en cuenta una serie específica de condiciones de drenaje.

De acuerdo al término para remoción del agua se puede determinar la calidad del drenaje mediante la tabla C14.

**Tabla C 14. Calidad de drenaje**

Calidad de drenaje	Término para la remoción del agua
Excelente	2 horas
Buena	1 día
Aceptable	1 semana
Pobre	1 mes
Muy Pobre	El agua no drena

Fuente: (American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993)

Como puede observarse en la tabla C14, para la vía analizada se puede asumir que el drenaje del agua de las capas de la estructura vial no tiene mayor saturación por lo que se puede decir que es aceptable por lo que el término para remoción del agua es de 1 semana. Para determinar

el factor de modificación del coeficiente de drenaje ( $m_i$ ), para las capas de subbase y base) se asume que la época de invierno en la ciudad de Azogues es de 4 meses a lo largo del año, por lo tanto, como puede verse en la tabla C15 y tomando en cuenta que el término para remoción del agua es de 1 semana se puede determinar que el porcentaje de tiempo de exposición de la estructura del pavimento es de 33,33%.

**Tabla C 15. Exposición de la estructura del pavimento**

Calidad de drenaje	% de Tiempo de exposición de la estructura del pavimento a nivel de humedad próximo a la saturación			
	< 1%	1 - 5%	5 - 25%	> 25%
Excelente	1,4 – 1,35	1,35 – 1,30	1,30 – 1,20	1,20
Buena	1,35 – 1,25	1,25 – 1,15	1,15 – 1,00	1,00
Aceptable	1,25 – 1,05	1,15 – 1,05	1,00 – 0,80	0,80
Pobre	1,15 – 1,05	1,05 – 0,80	0,80 – 0,60	0,60
Muy Pobre	1,05 – 0,95	0,95 – 0,75	0,75 – 0,40	0,40

Fuente: (American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993)

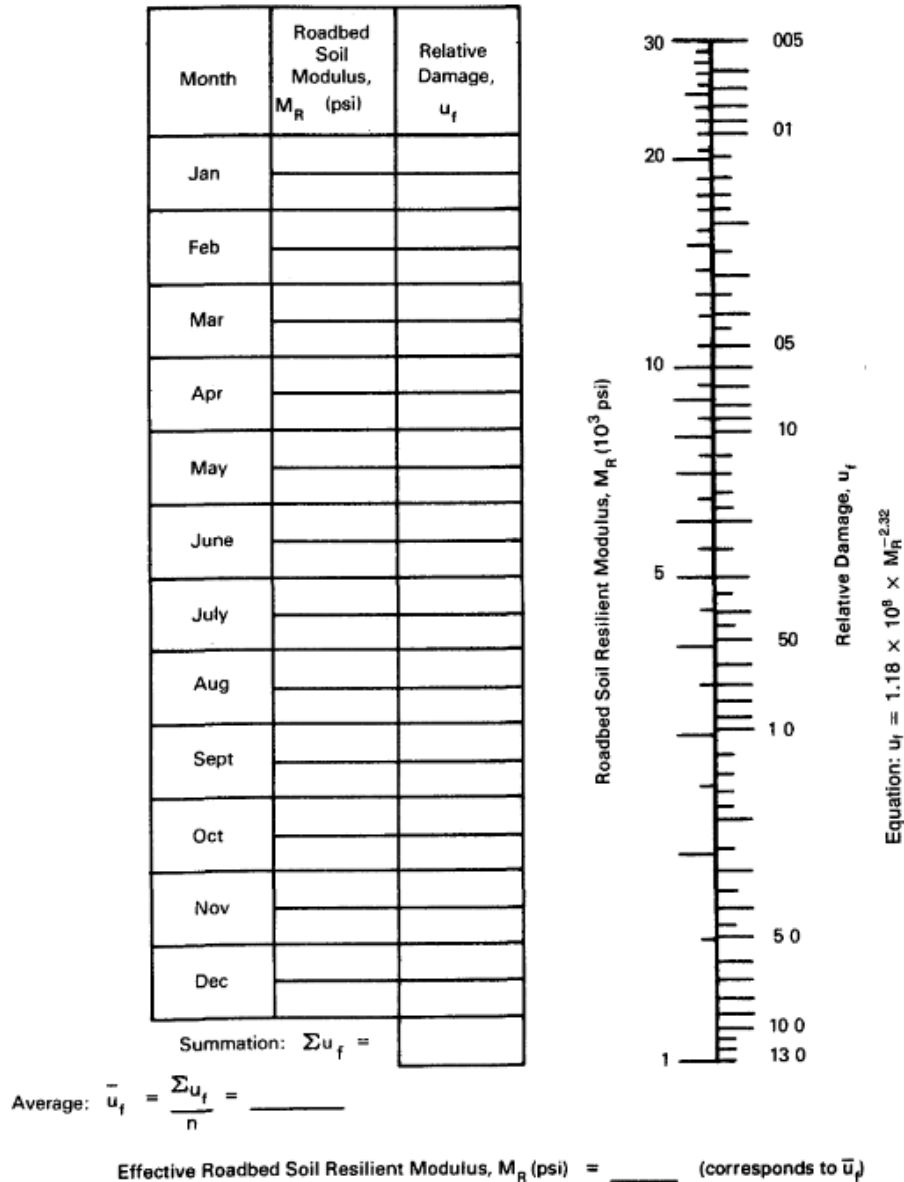
Como puede verse en la tabla C15, con la calidad de drenaje Aceptable y el porcentaje de tiempo de exposición de la estructura del pavimento a la humedad mayor a 25% se colige que los factores de modificación del coeficiente de drenaje  $m_2$  para la base y  $m_3$  para la sub base son los siguientes:  $m_1=0,80$ ,  $m_3=0,80$ .



## 17.ANEXOS

### 17.1. Anexo 1 - Ábacos de diseño de estructuras de pavimento – AASHTO

Anexo 1\_Figura 1. Estimación del módulo resiliente efectivo de la subrasante para pavimentos flexibles usando criterios de serviciabilidad



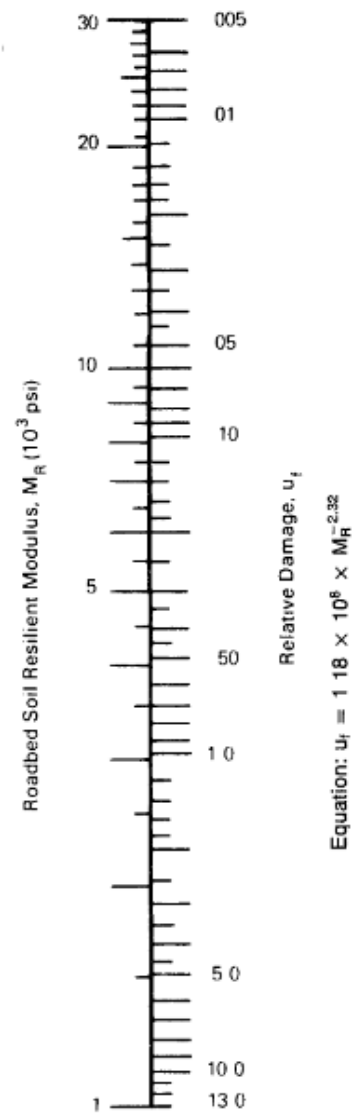
Fuente: (American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993)

Anexo 1\_Figura 2. Continuación - Estimación del módulo resiliente efectivo de la subrasante para pavimentos flexibles usando criterios de serviciabilidad

Month	Roadbed Soil Modulus $M_R$ (psi)	Relative Damage, $u_f$
Jan	20,000	0.01
Feb	20,000	0.01
Mar	2,500	1.51
Apr	4,000	0.51
May	4,000	0.51
June	7,000	0.13
July	7,000	0.13
Aug	7,000	0.13
Sept	7,000	0.13
Oct	7,000	0.13
Nov	4,000	0.51
Dec	20,000	0.01
Summation	$\sum u_f =$	3.72

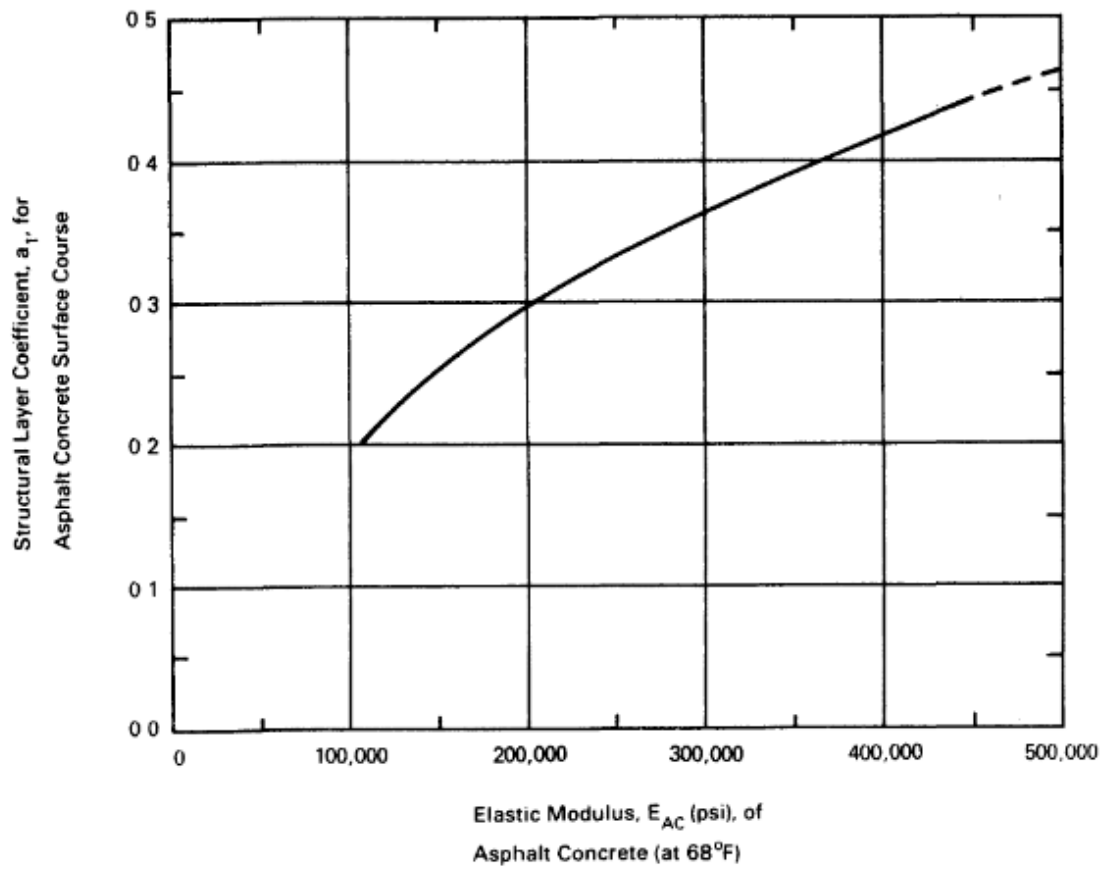
$$\bar{u}_f = \frac{\sum u_f}{n} = \frac{3.72}{12} = 0.31$$

$$\text{Effective Roadbed Soil Resilient Modulus, } M_R \text{ (psi)} = \underline{5,000} \quad (\text{corresponds to } \bar{u}_f)$$



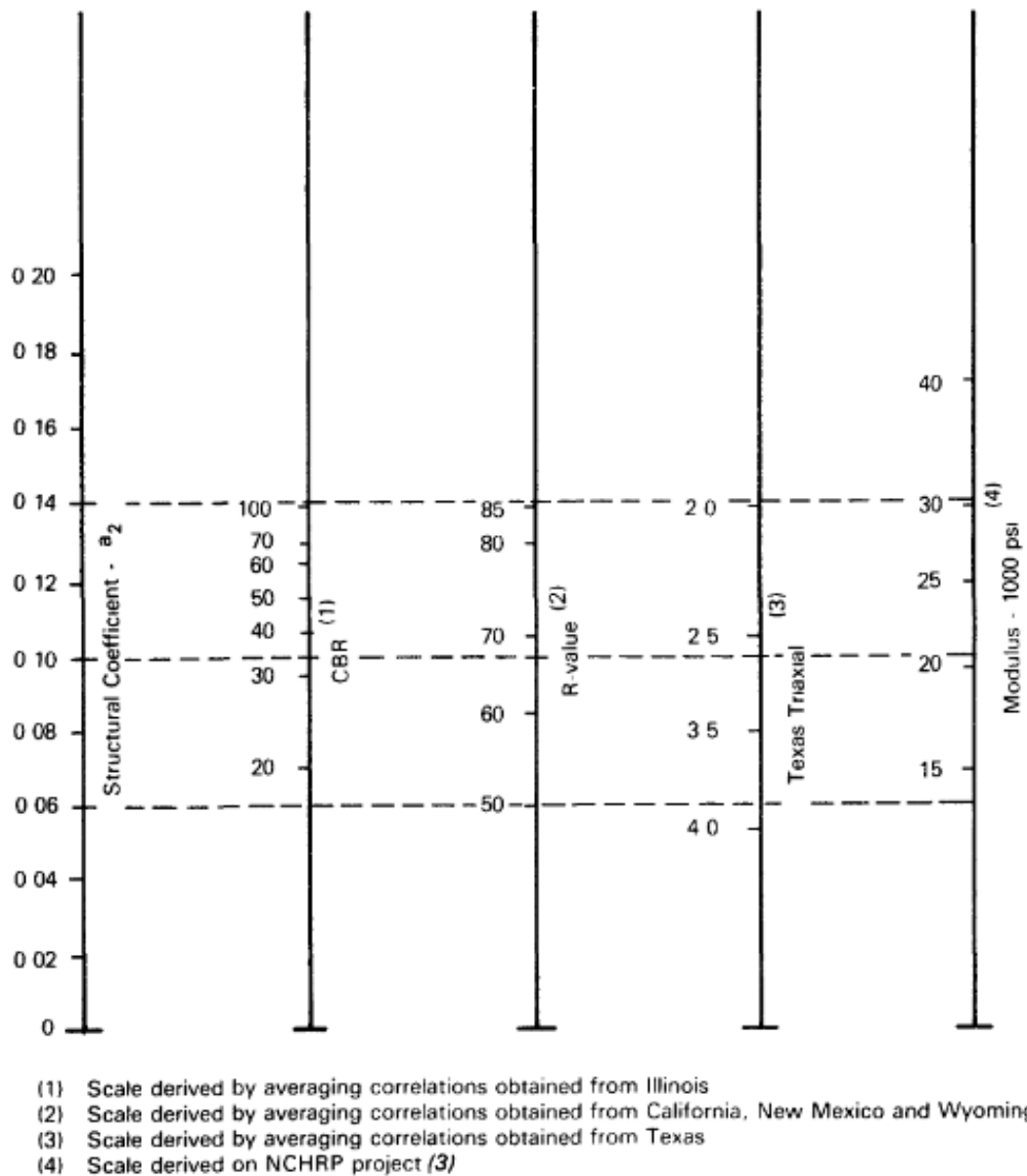
Fuente: (American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993)

Anexo 1\_Figura 3. Gráfica para estimar el coeficiente de capa estructural para concreto asfáltico de gradación densa basado en el módulo elástico o resiliente



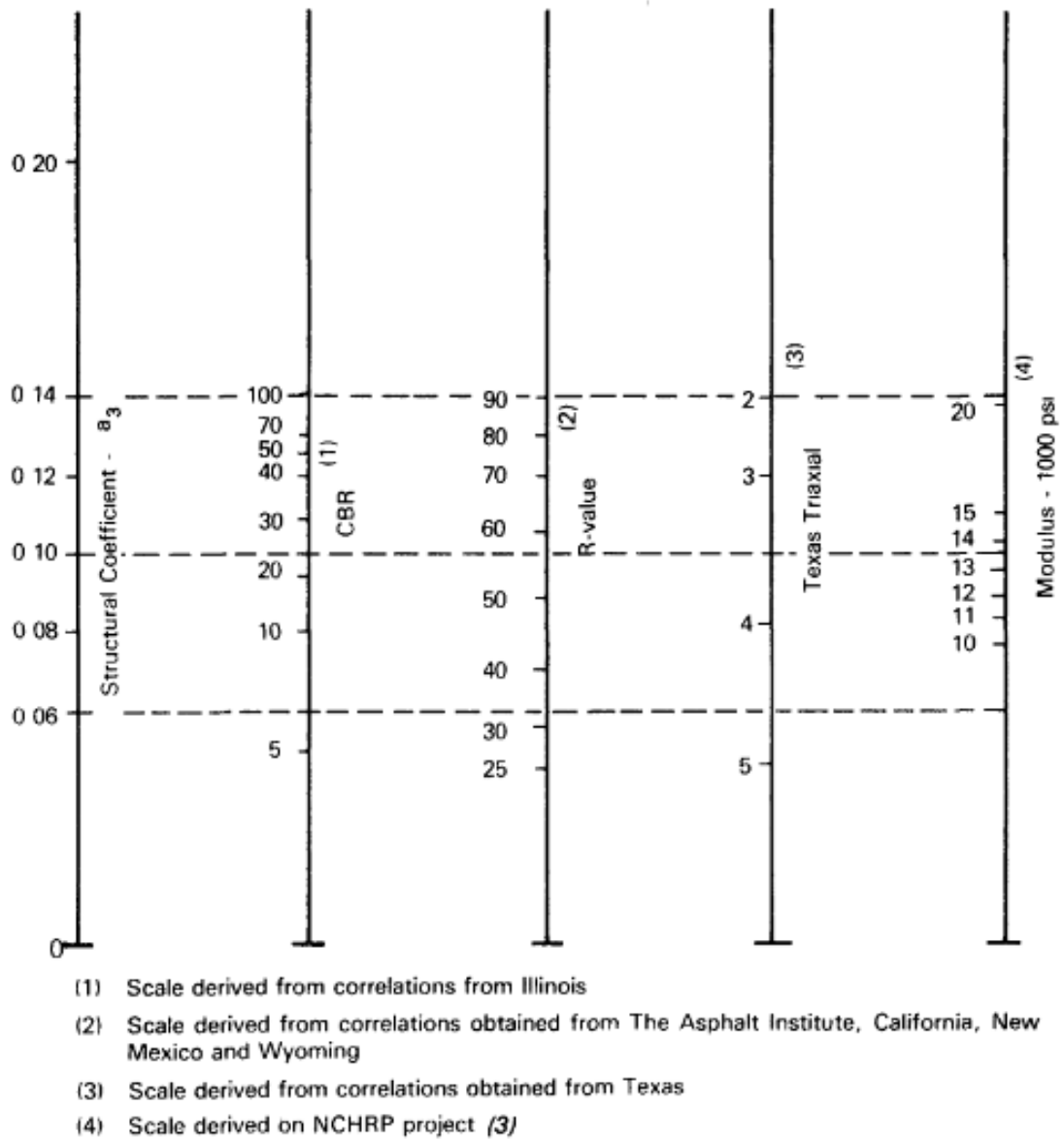
Fuente: (American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993)

Anexo 1\_Figura 4. Variación del coeficiente ( $a_2$ ) para la capa de base granular en función de varios parámetros de esfuerzo



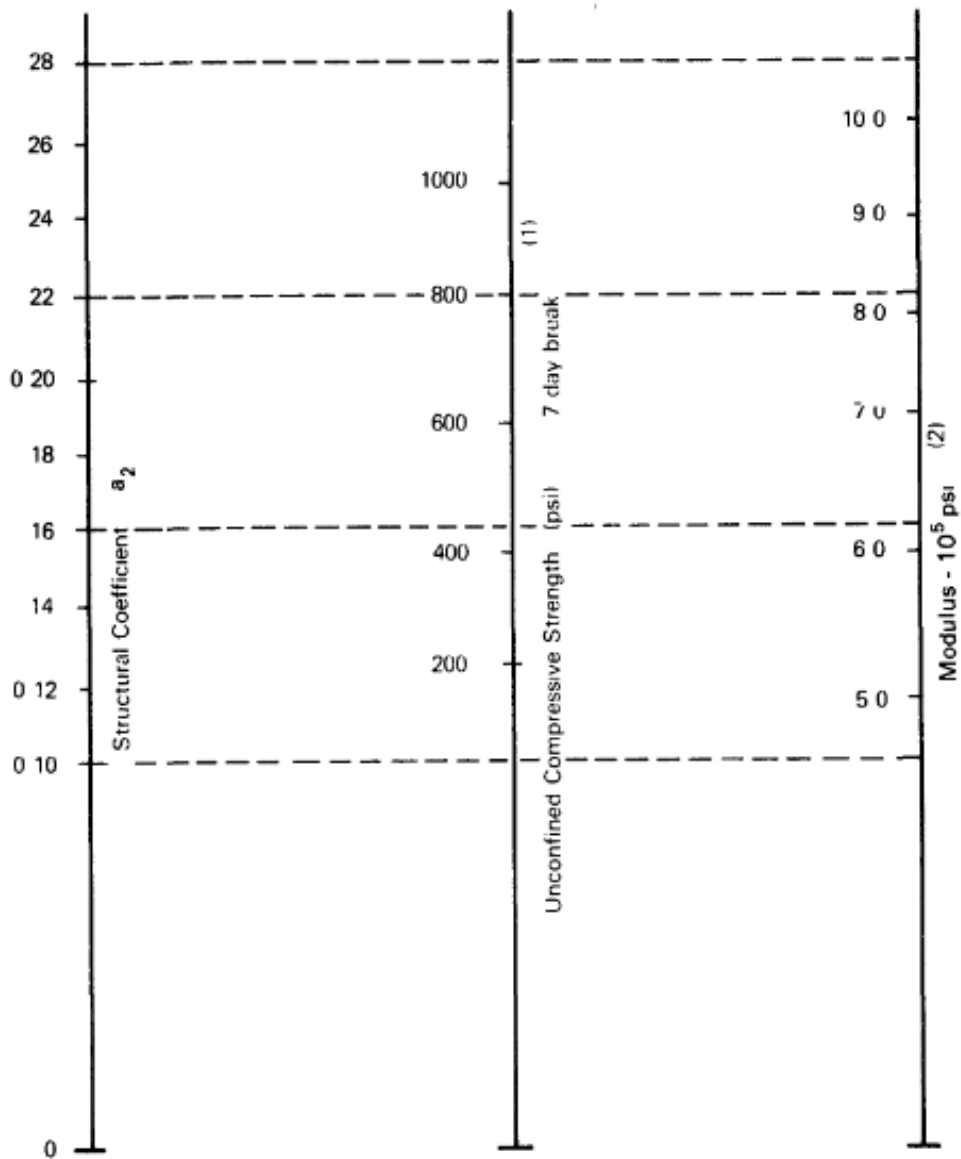
Fuente: (American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993)

Anexo 1\_Figura 5. Variación del coeficiente ( $a_3$ ) para la capa de sub base granular en función de varios parámetros de esfuerzo



Fuente: (American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993)

Anexo 1\_Figura 6. Variación de "a2" para bases granulares estabilizadas con cemento en función de varios parámetros de esfuerzo

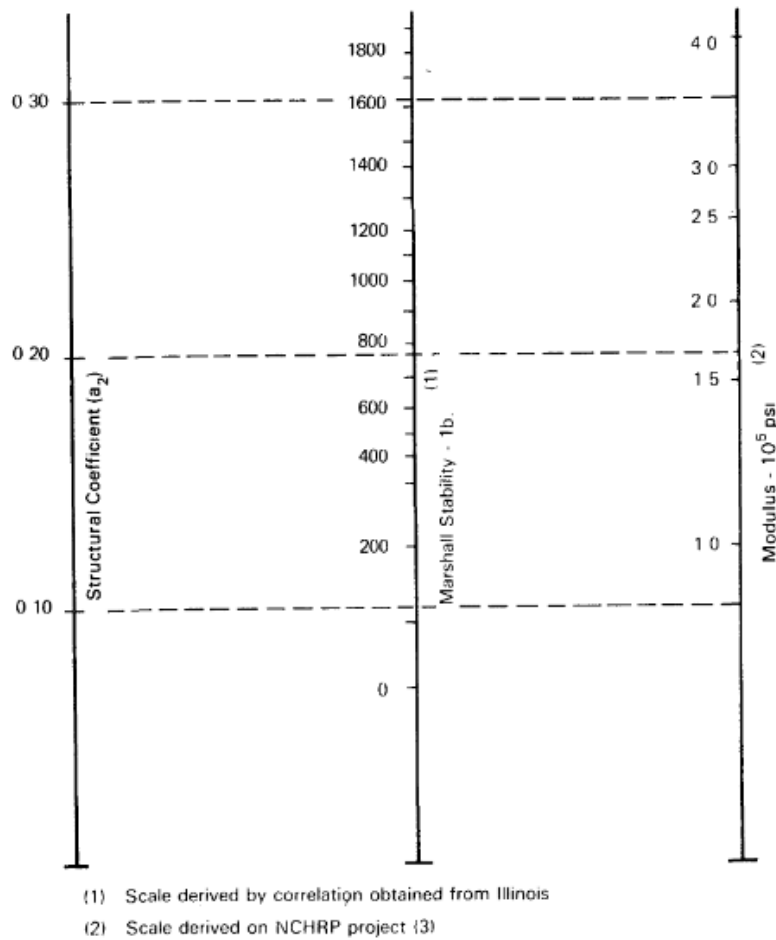


(1) Scale derived by averaging correlations from Illinois Louisiana and Texas

(2) Scale derived on NCHRP project (3)

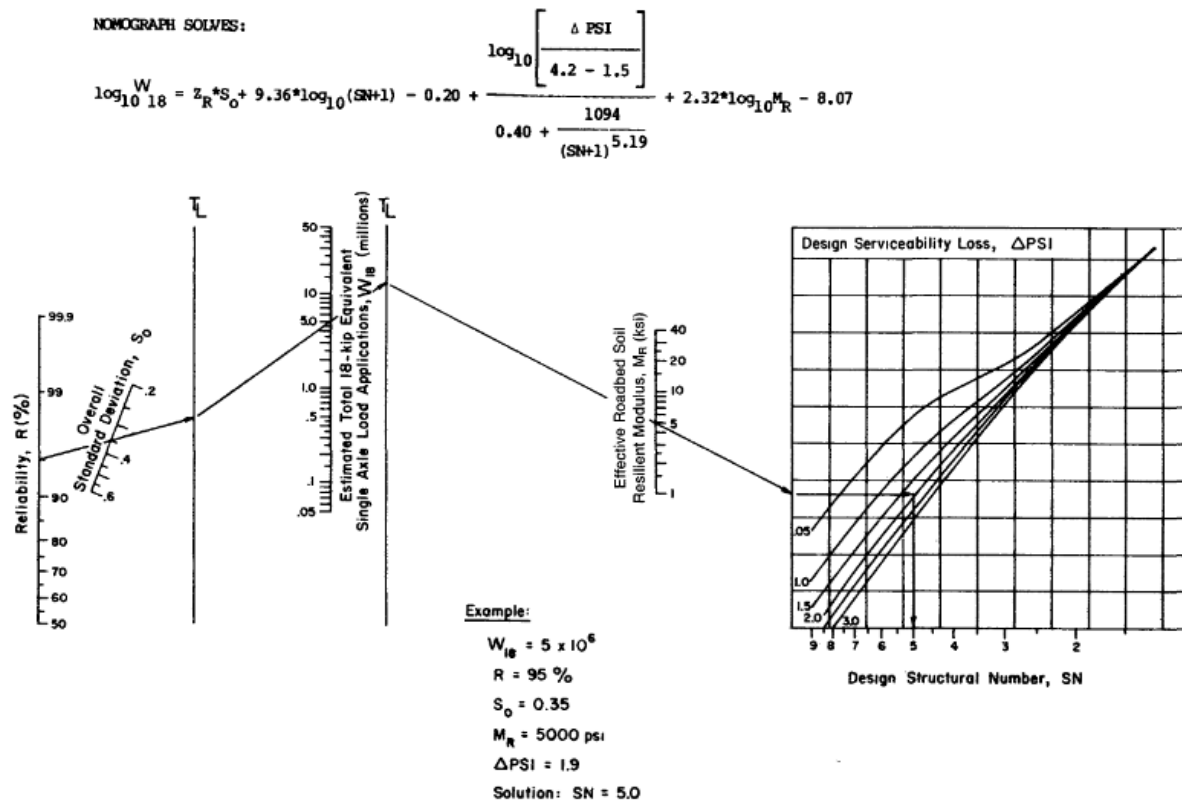
Fuente: (American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993)

Anexo 1\_Figura 7. Variación de "a2" para bases granulares estabilizadas con emulsión asfáltica en función de varios parámetros de esfuerzo



Fuente: (American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993)

Anexo 1\_Figura 8. Carta de diseño para pavimentos flexibles basada en el uso de valores medios para cada entrada



Fuente: (American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993)



## 17.2. Anexo 2 - Resultados de Laboratorio

Anexo 2\_Figura 1. Resultados de laboratorio

GAD MUNICIPIO DE AZOGUES RESUMEN DE RESULTADOS													
MATERIAL	GRAVA	ARENA	FINOS	HN	LL	IP	IG	D. MAX.	H. OPT	CBR 100%	CBR 95%	SUCS	ASSHTO
BASE GRANULAR	0,01 %	86,09 %	13,90 %	2,22 %	21,40 %	7,88 %	0	2.250	7,40 %	88,00	65,00	GC	A-2
SUBBASE GRANULAR	80,80 %	15,65 %	3,56 %	2,24 %	24,72 %	8,74 %	0	2.215	7,50 %	47,00	36,00	GW-GP	A-2

Fuente: (Dirección de Obras Públicas del GAD Municipal de Azogues, 2019)