



UNIVERSIDAD JOSÉ CARLOS MARIÁTEGUI

VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y
ARQUITECTURA**

CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL

T E S I S

**PAVIMENTOS LOW COST DE BASE ESTABILIZADA CON
EMULSIÓN CSS-1H EN LAS CARRETERAS VECINALES
DE LOS PALOS - LA YARADA - TACNA - 2020**

PRESENTADA POR

BACHILLER KELVIN GABRIEL CUAYLA FLORES

ASESOR:

MGR. MARIO PEDRO RODRÍGUEZ VÁSQUEZ

PARA OPTAR TÍTULO PROFESIONAL DE

INGENIERO CIVIL

MOQUEGUA-PERÚ

2021

CONTENIDO

	Pág.
Pagina de jurado	i
Dedicatoria	ii
Agradecimientos.....	iii
Contenido.....	iv
CONTENIDO DE TABLAS.....	viii
CONTENIDO DE FIGURAS.....	xi
CONTENIDO DE ECUACIONES.....	xv
CONTENIDO DE APÉNDICES.....	xviii
RESUMEN.....	xix
ABSTRACT.....	xx
INTRODUCCIÓN.....	xxi

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

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

1.5. Alcances y limitaciones.....	4
1.5.1. Alcance social.	4
1.5.2. Alcance económico.	4
1.6. Variables.	5
1.6.1. Variables independientes.	5
1.6.2. Variables dependientes.....	5
1.6.3. Operacionalización de las variables.	5
1.7. Hipótesis de la investigación.....	5
1.7.1. Hipótesis general.	5
1.7.2. Hipótesis específicas.	6

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación.	7
2.1.1. Antecedentes internacionales.	7
2.1.2. Antecedentes nacionales.	9
2.2. Bases teóricas.	12
2.2.1. Suelos.	12
2.2.2. Pavimentos.	21
2.2.3. Emulsión asfáltica.	26
2.2.4. El agua.....	37
2.2.5. Pavimentos económicos “low cost” con emulsión asfáltica.	37
2.2.6. Método de Illinois para diseño de mezclas asfálticas en frío.....	46

2.2.7. Diseño de pavimentos flexibles por el método AASHTO -93.....	58
2.2.8. Proceso constructivo de pavimento estabilizado con emulsión asfáltica	
CSS-1h	80
2.3. Definición de términos.....	110

CAPÍTULO III

MÉTODO

3.1. Tipo de la investigación.	112
3.2. Diseño de la investigación.	112
3.3. Población y muestra.	114
3.3.1. Población.....	114
3.3.2. Muestra.....	115
3.4. Descripción de los instrumentos para la recolección de datos.....	120
3.4.1. Instrumentos directos.	120

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

4.1. Presentación de resultados	122
4.1.1. Ensayos de laboratorio para caracterización de materiales.....	122
4.1.2. Diseño de base estabilizada low cost	125
4.1.3. Propuesta de diseño de pavimento	130
4.1.4. Comparación de presupuesto de un pavimento	133
4.1.5. Ensayos en campo para determinar la deflexión en pavimento	136

4.2. Contrastación de hipótesis	139
4.2.1. Hipótesis General	139
4.2.2. Hipótesis alternativas	145
4.3. Discusión de resultados.....	150

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones.	153
5.2. Recomendaciones.....	154
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	156
APÉNDICES.....	167
MATRIZ DE CONSTENCIA.....	249

CONTENIDO DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 Operacionalización de las variables	5
Tabla 2 Tamices requeridos para clasificación de suelos	15
Tabla 3 Simbología sistema clasificación SUCS	16
Tabla 4 Especificaciones normalizadas por la ASTM-International	28
Tabla 5 Parámetros para emulsiones asfálticas catiónicas	36
Tabla 6 Granulometría abierta de agregados para mezcla con emulsión asfáltica	40
Tabla 7 Granulometría cerrada de agregados para mezcla con emulsión asfáltica	41
Tabla 8 Granulometría de arena para mezclas con emulsión.....	42
Tabla 9 Criterio de compactación Marshall según tipo de trafico	44
Tabla 10 Ejemplo de dosificación de agua en mezcla asfáltica	52
Tabla 11 Factores de corrección para estabilidad Marshall	54
Tabla 12 Criterios de aceptación mínimos y máximos para mezclas de emulsión y agregado	58
Tabla 13 Factor direccional y factor carril para diseño de pavimentos	62
Tabla 14 Pesos de ejes según tipo de vehículos	64
Tabla 15 Peso máximo por eje o grupo de ejes.....	65
Tabla 16 Factor de presión de inflado para pavimentos flexibles.....	66
Tabla 17 Periodos de análisis según AASHTO 93	67
Tabla 18 Confiabilidad recomendada según la importancia de la vía	71

Tabla 19	Valores de desviación estándar para una confiabilidad R (%).....	71
Tabla 20	Valores de desviación estándar recomendados por AASHTO -93	72
Tabla 21	Índices de serviciabilidad y su calificación.....	74
Tabla 22	Índices de serviciabilidad inicial y final para pavimentos flexibles	74
Tabla 23	Calidad de drenaje según tiempo de evacuación del agua	75
Tabla 24	Coeficientes de drenaje según tiempo de evacuación y exposición al agua	75
Tabla 25	Coeficientes estructurales para capa superficial de pavimento.....	77
Tabla 26	Coeficientes estructurales para capa base y sub base de pavimento.....	78
Tabla 27	Requisitos granulométricos para sub bases granulares	85
Tabla 28	Requisitos de ensayos para sub bases granulares.....	85
Tabla 29	Requisitos de ensayos para bases estabilizadas con emulsión asfáltica	88
Tabla 30	Requisitos de ensayos de agregados para morteros asfálticos	91
Tabla 31	Requisitos para control de calidad en mortero asfáltico	91
Tabla 32	Factor de corrección por estacionalidad.....	102
Tabla 33	Deflexión característica del pavimento.....	103
Tabla 34	Interpretación de deflexiones y radios de curvatura	105
Tabla 35	Determinación del tamaño de la muestra n.....	115
Tabla 36	Número de calicatas para exploración de suelos.	117
Tabla 37	Ubicación de puntos de inspección.....	118
Tabla 38	Caracterización de sub rasante 0+750 - Tramo II.....	123
Tabla 39	Caracterización de material propio 0+750 - Tramo II	123
Tabla 40	Caracterización de sub rasante 1+000 - Tramo II.....	124
Tabla 41	Caracterización de material propio 1+000 - Tramo II	124

Tabla 42	Contenido tentativo de emulsión asfáltica para el diseño	125
Tabla 43	Dosificación para elaboración de pastillas para diseño de base estabilizada low cost.	127
Tabla 44	Análisis de dosificación de emulsión y contenido de asfalto residual	127
Tabla 45	Resultados del Ensayo Marshall para diseño de base estabilizada	128
Tabla 46	Criterios mínimos para diseños de emulsión con agregado.....	128
Tabla 47	Resultados de diseño de base estabilizada con emulsión asfáltica para un óptimo de 2,5% de emulsión asfáltica.....	130
Tabla 48	Parámetros de diseño para pavimento tomados de pavimento construido en Tacna-2019	131
Tabla 49	Propiedades y dimensionamiento de propuestas de paquetes estructurales.....	133
Tabla 50	Análisis de costo de producción de base estabilizada low cost	135
Tabla 51	Análisis de costo por km para aplicación de propuestas de base estabilizada.....	136
Tabla 52	Ensayo de Viga Benkelman para determinación de deflexiones y radio de curvatura.....	137
Tabla 53	Comparación entre deflexiones tomadas en distintos años en pavimento de base estabilizada Los Palos- Tacna	138

CONTENIDO DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Registro estratigráfico de un suelo residual.....	13
Figura 2. Representación de fases que conforman un suelo.	14
Figura 3. Sistema de clasificación de suelos SUCS.....	17
Figura 4. Sistema de clasificación SUCS.....	18
Figura 5. Esquema típico de un pavimento.....	22
Figura 6. Tamaño relativo de las partículas de asfalto y su distribución.	35
Figura 7. Diagrama de una planta de elaboración de emulsión asfáltica.	35
Figura 8. Distribución porcentual aproximada de tamaños de partícula de asfalto en emulsión.....	36
Figura 9. Elección del tipo de emulsión según el tipo de trabajo por su aplicación	39
Figura 10. Determinación de la densidad máxima seca y contenido óptimo de humedad.....	51
Figura 11. Gráficos comparativos de las propiedades de diseño de mezcla asfáltica	55
Figura 12. Abaco para determinación de daño relativo.	69
Figura 13. Coeficientes estructurales para sub bases granulares.	79
Figura 14. Coeficientes estructurales para bases estabilizadas con asfalto.....	80
Figura 15. Compactación de la sub rasante.....	82
Figura 16. Nivelación topográfica en sub rasante.....	82
Figura 17. Colocación en pista del material de sub base.	83
Figura 18. Esparcido del material de sub base con motoniveladora.	83

Figura 19. Humedecido del material para sub base granular.	84
Figura 20. Compactación del material de sub base.	84
Figura 21. Depósito de material para preparación de base estabilizada.	86
Figura 22. Humedecimiento del material para conformación de base estabilizada.	87
Figura 23. Adición de emulsión asfáltica CSS-1h y batido con el material humedecido.	87
Figura 24. Esparcido y compactado de base estabilizada con emulsión asfáltica en pista.	87
Figura 25. Riego de liga para colocación de mortero asfáltico.	89
Figura 26. Aplicación y calibración de mezcladora para mortero asfáltico en tramo de prueba.	90
Figura 27. Aplicación final de mortero asfáltico en pista.	90
Figura 28. Modelo de formato para metrados.	108
Figura 29. Modelo de análisis de costos unitarios.	109
Figura 30. Diseño de la investigación.	113
Figura 31. Tramos de intervención en la investigación, Ruta TA-644 y TA-645, límite de la frontera Perú-Chile.	114
Figura 32. Intervención en la Ruta TA-645, progresivas KM 0+700 a 1+200. ...	116
Figura 33. Ubicación de puntos de inspección - Tramo II.	118
Figura 34. Apertura de puntos de exploración y toma de muestras para estudio del material.	119
Figura 35. Preparación para evaluación de deflexiones con viga Benkelman – Tramo II - Los Palos - Tacna 2021.	119

Figura 36. Suposiciones para interpretación de valor p en pruebas estadísticas Minitab.....	121
Figura 37. Gráficos resultantes del ensayo Marshall para diseño de base estabilizada.....	129
Figura 38. Cálculo del número estructural requerido.....	131
Figura 39. Propuestas de paquetes estructurales de pavimentos a comparar.....	132
Figura 40. Interpolación gráfica para hallar coeficiente estructural para base estabilizada low cost.	133
Figura 41. Presupuesto de m ³ de pavimento construido en el 2019.....	134
Figura 42. Presupuesto de un m ³ de pavimento low cost.....	135
Figura 43. Sección transversal del pavimento construido en Tacna-Los Palos 2019.....	136
Figura 44. Deflexiones y radios de curvatura evaluados en la etapa inicial del pavimento Tacna 2019	138
Figura 45. Deflexiones y radios de curvatura evaluados dos años después de la etapa inicial del pavimento Tacna -2021.	138
Figura 46. Prueba de normalidad estabilidad seca.	140
Figura 47. Prueba de homocedasticidad estabilidad seca.	141
Figura 48. Prueba de ANOVA en estado seco utilizando método de Tukey al 0,05 de significancia.....	142
Figura 49. Prueba de normalidad estabilidad saturada.	143
Figura 50. Prueba de homocedasticidad, estabilidad saturada.	143
Figura 51. Prueba de ANOVA en estado saturado utilizando método de Tukey al 0,05 de significancia.....	144

Figura 52. Prueba de normalidad, deflexiones 2019 y 2021.....	145
Figura 53. Prueba de homocedasticidad, deflexiones 2019 - 2021.....	146
Figura 54. Prueba t pareada, para diferencia de deflexiones entre el 2019 y 2021.....	147
Figura 55. Distancia de traslado de material granular a obra, Tacna 2019.....	148
Figura 56. Interacción entre %emulsión, estabilidad y costo por m ³ de base estabilizada low cost.	150

CONTENIDO DE ECUACIONES

	Pág.
Ecuación 1. Coeficiente de uniformidad	16
Ecuación 2. Coeficiente de curvatura.....	16
Ecuación 3. Cálculo del residuo asfáltico de una emulsión.....	29
Ecuación 4. Contenido de asfalto tentativo para bases	44
Ecuación 5. Contenido de asfalto tentativo para carpeta asfáltica	45
Ecuación 6. Contenido de emulsión tentativo para mezclas asfálticas	45
Ecuación 7. Contenido de asfalto tentativo según método Illinois	47
Ecuación 8. Cálculo de gravedad específica húmeda según Illinois.....	55
Ecuación 9. Cálculo de gravedad específica seca según Illinois	55
Ecuación 10. Cálculo de contenido de humedad según Illinois.....	56
Ecuación 11. Cálculo de absorción según Illinois	56
Ecuación 12. Cálculo de máximo contenido de vacíos según Illinois.....	56
Ecuación 13. Cálculo de pérdida de estabilidad según Illinois.....	56
Ecuación 14. Cálculo del número estructural del pavimento flexible con ecuación AASHTO93	58
Ecuación 15. Cálculo del ESAL.....	59
Ecuación 16. Cálculo del Índice Medio Diario Semanal	60
Ecuación 17. Cálculo del Índice Medio Diario Anual	61
Ecuación 18. Cálculo de factor de corrección estacional.....	61
Ecuación 19. Cálculo de factor de daño F_i	63
Ecuación 20. Cálculo de factor G_t	63

Ecuación 21. Cálculo de factor Bx.....	63
Ecuación 22. Cálculo del factor B18.....	63
Ecuación 23. Cálculo de Factor de crecimiento acumulado	67
Ecuación 24. Cálculo de Factor de daño para módulo resiliente	69
Ecuación 25. Cálculo de Modulo resiliente a partir de CBR	70
Ecuación 26. Cálculo del índice de serviciabilidad actual	73
Ecuación 27. Cálculo del número estructural SN requerido de un pavimento.....	76
Ecuación 28. Cálculo del porcentaje retenido para ensayo de granulometría.....	92
Ecuación 29. Cálculo del porcentaje retenido acumulado para ensayo de granulometría	92
Ecuación 30. Cálculo del porcentaje pasante para ensayo de granulometría.....	92
Ecuación 31. Cálculo índice de plasticidad.....	92
Ecuación 32. Cálculo del porcentaje de desgaste por abrasión.....	93
Ecuación 33. Cálculo del equivalente de arena.....	94
Ecuación 34. Cálculo del porcentaje de partículas chatas y alargadas	95
Ecuación 35. Cálculo del porcentaje de partículas fracturadas.....	95
Ecuación 36. Cálculo del contenido de humedad	96
Ecuación 37. Cálculo de la densidad húmeda para ensayo de cono de arena.....	96
Ecuación 38. Cálculo de la densidad seca para ensayo de cono de arena.....	96
Ecuación 39. Cálculo de la densidad seca para ensayo de proctor modificado	97
Ecuación 40. Cálculo del porcentaje de residuo asfáltico.....	98
Ecuación 41. Cálculo del porcentaje retenido para ensayo de granulometría del material extraído de mezcla asfáltica	99

Ecuación 42. Cálculo del porcentaje retenido acumulado para ensayo de granulometría del material extraído de mezcla asfáltica.....	99
Ecuación 43. Cálculo del porcentaje pasante para ensayo de granulometría del material extraído de mezcla asfáltica	99
Ecuación 44. Cálculo de la estabilidad Marshall Corregida	100
Ecuación 45. Cálculo de deflexión con viga Benkelman.....	101
Ecuación 46. Cálculo del radio de curvatura con viga Benkelman.....	101
Ecuación 47. Cálculo de factor de corrección por temperatura	101
Ecuación 48. Cálculo de deflexión corregida	102
Ecuación 49. Cálculo de la deflexión admisible del pavimento	104
Ecuación 50. Cálculo de la deflexión crítica del pavimento	104
Ecuación 51. Cálculo del Índice de Rugosidad Internacional.....	105
Ecuación 52. Cálculo del porcentaje de pérdida por durabilidad en sulfato de sodio y magnesio.....	106
Ecuación 53. Cálculo del tamaño de la muestra	115

CONTENIDO DE APÉNDICES

	Pág.
Apéndice A. Panel fotográfico	169
Apéndice B. Ficha técnica emulsión Asfáltica Catiónica TDM Emultec Css – 1h.....	181
Apéndice C. Ensayos de laboratorio	182
Apéndice D. Diseño de Base Estabiliada Low Cost	222
Apéndice E. Deflexiones en pavimento estabilizado con Emulsión Asfáltica ...	231
Apéndice F. Diseño de Base Estabilizada con Emulsion Asfáltica Css-1h Los Palos-Tacna – 2019	235
Apéndice G. Información complementaria	244
Apéndice H. Costos unitarios.....	246

RESUMEN

El presente proyecto tuvo como finalidad demostrar la aplicación del uso de bases estabilizadas con emulsión asfáltica CSS-1h en materiales con menores exigencias de calidad, con el propósito del mejoramiento de los caminos de bajo tránsito con un ESAL inferior de 10^6 a un costo mucho menor que un pavimento tradicional, para lo cual se dosificó una emulsión catiónica CSS-1h en porcentaje de 2,50 % debidamente sustentado a través de un diseño de mezcla asfáltica con el cual se buscó la estabilización de un material propio con características físicas y mecánicas inferiores comparado frente a un material de base granular, dicha mejora proporciona los parámetros de resistencia con una estabilidad seca de 1000 kg y una estabilidad saturada de 640 kg, valores que son correlacionados con coeficientes estructurales para obtener un valor SN según el diseño con el método AASTHO 93 que satisfaga los requerimientos para el tráfico proyectado, asimismo se realizan pruebas de deflexión a un tramo de pavimento estabilizado con emulsión asfáltica construido en Tacna-2019 obteniendo una deflexión característica de 22×10^{-2} mm menor a la deflexión admisible de 158×10^{-2} mm y deflexión crítica de 155×10^{-2} mm concluyendo que es beneficiosa la aplicación de este líquido asfáltico, otra ventaja de la aplicación de esta metodología en el material propio es la incidencia en costos, los ahorros en la adquisición de material seleccionado y en el traslado de material a obra disminuyen el precio de forma considerable, logrando de esta forma optimizar presupuestos para lograr una mayores tramos de pavimentación.

Palabras clave: base estabilizada, emulsión asfáltica, caminos de bajo tráfico.

ABSTRACT

The purpose of this project was to demonstrate the application of the use of stabilized bases with CSS-1h asphalt emulsion in materials with lower quality requirements, with the purpose of improving low-traffic roads with an ESAL lower than 10^6 at a lower cost. much lower than a traditional pavement, for which a CSS-1h cationic emulsion was dosed in a percentage of 2,50% duly supported through an asphalt mixture design with which the stabilization of a material with inferior physical and mechanical characteristics was sought. Compared to a granular base material, this improvement provides the strength parameters with a dry stability of 1000 kg and a saturated stability of 640 kg, values that are correlated with structural coefficients to obtain an SN value according to the design with the AASTHO method. 93 that meets the requirements for the projected traffic, deflection tests are also carried out on a section of e pavement stabilized with asphalt emulsion built in Tacna-2019, obtaining a characteristic deflection of 22×10^{-2} mm less than the admissible deflection of 158×10^{-2} mm and critical deflection of 155×10^{-2} mm, concluding that the application of this asphaltic liquid, another advantage of the application of this methodology in the own material is the incidence in costs, the savings in the acquisition of selected material and in the transfer of material to work decrease the price considerably, managing to optimize budgets to achieve greater paving sections.

Keywords: stabilized base, asphalt emulsion, roads under traffic.

INTRODUCCIÓN

Actualmente es muy conocido que las principales vías de comunicación entre pueblos y regiones del país son las carreteras, según ComexPerú (2020), con referencia a la data de Provias Nacional del 2018 la red vial nacional estuvo pavimentada en un 79,1%, la red vial departamental en 13,2 % y finalmente la red vial vecinal o rural en 1,6%, lo cual es una cifra preocupante sobre todo en las zonas rurales.

Como es de conocimiento del público en general que las carreteras son vías de comunicación que generan un gran movimiento económico, sobre todo urge hacer hincapié en zonas rurales para poder dar mayor facilidad a las personas que se dedican a la actividad agrícola puedan trasladar sus productos originando así un mercado mucho más dinámico, ayudando a disminuir la pobreza en diferentes pueblos alejados de las ciudades.

Según esta dispuesto los gobiernos locales se hacen cargo de las vías vecinales, los gobiernos regionales de las vías departamentales y las vías nacionales a cargo del Ministerio de Transportes y Comunicaciones, pero debido a la falta de presupuesto por el alto costo que implica la construcción de una carretera tradicional es que el sistema vial se encuentra con un gran retraso para completar la pavimentación en su totalidad.

Este trabajo está enfocado en la construcción de pavimentos económicos de bajo costo y con condiciones de servicio buenas, con la finalidad de poder aumentar la pavimentación en las redes viales críticas de bajo transito del país, siendo estas

las vías en donde el porcentaje de construcción de estas carreteras es demasiado bajo.

La construcción de uno de estos pavimentos se lleva a cabo en la ciudad de Tacna muy cerca de la frontera de Perú – Chile en los caminos vecinales del complejo Santa Rosa y Puente Los Palos en el distrito de la Yarada, esta construcción está enfocada en la utilización del material con menores características que exigiría un pavimento tradicional que implica un ahorro en el costo de adquisición de material mejorado, que junto con la adición de un conglomerante de emulsión asfáltica forman una base estabilizada otorgando un aumento en la resistencia mecánica y durabilidad con el tiempo.

El uso de emulsión asfáltica tiene muchos factores positivos, entre los cuales se resalta su uso ecológico por contener agua en su mayoría lo que no origina un gran impacto de contaminación en el suelo, no emite gases contaminantes porque debido a naturaleza trabaja a temperatura ambiente, no es inflamable lo cual aporta una mayor seguridad al personal que lo manipula y para diluir la emulsión en el material para conformación de capas estructurales se usa nada más que agua sin ningún agente contaminante.

Debido a todos estos beneficios que ofrecen los pavimentos económicos estabilizados se realiza este trabajo con el fin de resaltar y comprobar que es posible la pavimentación de vías de bajo tránsito con el empleo de material con un menor grado de exigencia con respecto a sus propiedades y la adición de emulsiones asfálticas a un costo inferior comparado a un pavimento tradicional.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Descripción de la realidad del problema.

En la actualidad un problema latente que se puede observar en el sistema vial de nuestro país es la deficiencia de carreteras pavimentadas lo que origina un gran problema a la población tanto social como económico sobre todo en las pueblos alejados o difícil acceso originando una deficiencia en su desarrollo.

La prolongación de la vida útil de la carreteras es de gran interés para las entidades del estado porque son normalmente los encargados de su ejecución y mantenimiento posterior, el suelo que se presenta en la ciudad de Tacna que en su mayoría está compuesto por material plástico y arena en la zona costera, los que son normalmente inestables debido a que basta con la presencia o ausencia de agua para que sufran asentamientos o expansiones, este problema descrito ha producido que se lleven muchas investigaciones y experimentos que se ajustan a estas necesidades estructurales, técnicas, mecánicas y económicas.

La metodología tradicional de pavimentos asfálticos con bases granulares según Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2013), demanda que el material empleado en las capas estructurales sea material altamente seleccionado

que junto al difícil acceso y largas distancias adicionando, además, el costo del traslado del material produce inflación en el costo-beneficio del proyecto, es por esto que este trabajo propone una base de pavimento económico sin afectar la resistencia utilizando emulsión asfáltica logrando una estabilidad aceptable, método que fue aplicado en Los Palos – Tacna logrando dar tráfico a vehículos y camiones.

1.2. Definición del problema.

1.2.1. Problema general.

¿Se podrá utilizar el material propio para aplicar pavimentos Low Cost de base estabilizada con emulsión CSS-1h en las carreteras vecinales de Los Palos– La Yarada – Tacna?

1.2.2. Problemas específicos.

¿Los pavimentos estabilizados con emulsión asfáltica CSS-1h en las carreteras vecinales de Los Palos– La Yarada – Tacna mejoran su desempeño?

¿Los pavimentos Low Cost de base estabilizada con emulsión CSS-1h son una solución a la disponibilidad de canteras en Los Palos– La Yarada – Tacna?

¿Los pavimentos Low Cost de base estabilizada con emulsión CSS-1h disminuyen el presupuesto sin afectar la resistencia en las carreteras de Los Palos– La Yarada – Tacna?

1.3. Objetivos de la investigación.

1.3.1. Objetivo general.

Demostrar cómo se utilizará el material propio para aplicar pavimentos Low Cost de base estabilizada con emulsión CSS-1h en las carreteras vecinales de Los Palos– La Yarada – Tacna.

1.3.2. Objetivos específicos.

Examinar si los pavimentos estabilizados con emulsión asfáltica CSS-1h en las carreteras vecinales de Los Palos– La Yarada – Tacna mejoran su desempeño.

Determinar si los pavimentos Low Cost de base estabilizada con emulsión CSS-1h son una solución a la disponibilidad de canteras en Los Palos– La Yarada – Tacna.

Analizar si los pavimentos Low Cost de base estabilizada con emulsión CSS-1h disminuyen el presupuesto sin afectar la resistencia en las carreteras de Los Palos– La Yarada – Tacna.

1.4. Justificación.

El presente trabajo se realiza con la finalidad de proponer una alternativa de solución a la escasez de vías pavimentadas para bajo tráfico en el Perú debido a la falta de presupuesto para este sector para tal fin se expone en el presente trabajo la estabilización de bases con emulsión a un menor costo y con las mismas características de un pavimento tradicional.

1.5. Alcances y limitaciones.

Este trabajo está dirigido a todas los profesionales y personas con nociones e interés a la rama de mecánica de suelos y pavimento, debido a que se expone la construcción de pavimentos low cost con métodos de estabilización relativamente nuevos y poco aplicados en el Perú, otorgando múltiples beneficios al estado y población.

El presente trabajo estará limitado por el tipo y cantidad de tráfico generado traducido en ESAL que corresponda a la vía en estudio, así como también a lo que se proponga por parte de los proyectistas encargados de la construcción de nuevos pavimentos.

1.5.1. Alcance social.

El presente trabajo es de interés para toda persona interesada en la construcción y mejoramiento de pavimentos, así como también personas en general, resultando beneficioso la aplicación de este trabajo tanto en el ámbito social y económico al ser factible la posibilidad de pavimentar mayores tramos a un menor costo.

1.5.2. Alcance económico.

El presente trabajo realizado tiene un importante impacto en el costo de un pavimento tradicional comparado con un pavimento low cost, debido a que en este último se genera un ahorro en el costo del material clasificado que implicaría una base granular habitual y en el transporte de tal material.

1.6. Variables.

1.6.1. Variables independientes.

Emulsión CSS-1h

1.6.2. Variables dependientes.

Pavimento Low Cost de Base estabilizada

1.6.3. Operacionalización de las variables.

Tabla 1

Operacionalización de las variables

Variable	Tipo de variable	Dimensión	Indicador	Unidad de medida	Instrumento de medición
Independiente: Emulsión CSS-1h	Cuantitativa continua	Diseño de base estabilizada	Cantidad de emulsión	%	Ensayos para diseño de mezcla asfáltica
Dependiente: Pavimento Low Cost de Base estabilizada	Cuantitativa continua	Pavimentación de vías	Costo del pavimento	S./	Análisis de costos

1.7. Hipótesis de la investigación.

1.7.1. Hipótesis general.

Se puede utilizar el material propio para aplicar pavimentos Low Cost de base estabilizada con emulsión CSS-1h en las carreteras vecinales de Los Palos– La Yarada – Tacna.

1.7.2. Hipótesis específicas.

Los pavimentos estabilizados con emulsión asfáltica CSS-1h en las carreteras vecinales de Los Palos– La Yarada – Tacna mejoran su desempeño.

Los pavimentos Low Cost de base estabilizada con emulsión CSS-1h son una solución a la disponibilidad de canteras en las carreteras vecinales de Los Palos– La Yarada – Tacna.

Los pavimentos Low Cost de base estabilizada con emulsión CSS-1h disminuyen el presupuesto sin afectar la resistencia en las carreteras de Los Palos– La Yarada – Tacna.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación.

2.1.1. Antecedentes internacionales.

Según Jurado y Clavijo (2016) en su tesis titulada “Estabilización de suelos con cemento MH para mejorar las características físicas y mecánicas del material de subsuelo de la zona de talleres y cocheras de la PMLQ, sector Quitumbre” con la finalidad de poder estabilizar suelos correspondientes a talleres y cocheras pertenecientes a la PMQL los cuales presentan en su mayoría material tipo CL-ML y CL , se demostró que la aplicación de cemento MH influía positivamente en las características mecánicas del suelo disminuyendo su índice plástico, aumentando su cohesión, densidad máxima seca, resistencia entre otros, recomendándose finalmente la adición de un 9% de cemento MH siendo el óptimo que daba los mejores resultados.

Según Murcia y Fonseca (2017) en su tesis que titula “Evaluación del índice de CBR de un suelo arenoso limoso con adición de emulsión asfáltica de rompimiento lento y tirillas de polisombra” expone la reutilización de residuos

sólidos como la polisombra y la adición de emulsión asfáltica como ligante para el aumento de capacidad de CBR, concluyendo finalmente que la adición de polisombra y emulsión disminuye la densidad del suelo haciéndolo mucho más liviano, pero aumenta el índice de vacíos en los especímenes ensayados por tal motivo llevaría a una menor resistencia del suelo comparado con sus características naturales, concluyendo que no es posible estabilizarlo este tipo de suelo con la combinación de estos materiales.

Según Cusme y Tapia (2016) en su tesis titulada “Estudio del comportamiento del material de mejoramiento y tratado con emulsión asfáltica para su utilización como base y subbase en la estructura de pavimentos” hace referencia a la existencia de canteras que no cumplen con las características mecánicas del material para de una base y subbase en las canteras “San José” y “Megarok”, en la tesis expuesta realizan la adición de emulsión asfáltica ASFIER 121 logrando buenos resultados con una dosificación del 7% de emulsión que logran mejorar las características del material en estudio en cuanto a resistencia.

Según Diaz (2016) en su trabajo de tesis titulado “Análisis de los procedimientos constructivos de bases y sub bases granulares para pavimentos flexibles” hace referencia a un profundo análisis de los procedimientos constructivos en pavimentos flexibles para dar a conocer aquellos que resulten más adecuados para la correcta ejecución de pavimentos, así como también hace énfasis en el estudio de la calidad de los materiales, finalmente concluye que es de gran importancia para mejorar la construcción de estas capas estructurales la intervención de laboratorio de mecánica de suelos en obra para el control del

agregado evitando problemas en la compactación que a futuro podrían causar asentamientos diferenciales en el pavimento.

Según Castillo (2017) en su tesis titulada “Estabilización de suelos arcillosos de Macas con valores de CBR menores al 5% y límites líquidos superiores al 100% para la utilización de sub rasantes en carreteras” en su presente tesis hace referencia al mejoramiento de sub rasantes en donde el valor de CBR son menores a 5% con un límite líquido mayor a 100%, con plasticidades variables según el método con el cual se decida secar el material, se optó por realizar una adición de cal con proporciones de 10%, 20%, 30% y 40% obteniendo buenos resultados con una adición de 16% de cal logrando una mejora significativa en el material lo cual reduce el costo que implicaría el reemplazo de la sub rasante existente.

2.1.2. Antecedentes nacionales.

Según Galarreta y Llenque (2019) en su tesis titulada “Influencia de la adición de emulsión asfáltica en la estabilidad de los suelos del centro poblado de Villa Hermosa en el distrito La Esperanza” en el cual el problema que se presenta es poder estabilizar la sub rasante para poder fundar el paquete estructural del pavimento para tal fin se procede a realizar el análisis del material para estimar sus propiedades físicas y mecánicas, en el cual se determina que al agregar al suelo 6% de emulsión asfáltica resulta con resultados favorables de 29,30 % de CBR y 1,61 kg/cm² en ensayo de compresión no confinada, lo cual la transforma en una sub rasante apta para la fundación del pavimento según el autor y las fuentes citadas en su trabajo .

Según De la Torre (2018) en su trabajo de investigación titulado “Evaluación del diseño de pavimentos estabilizados con emulsión asfáltica y cemento portland para el proyecto de conservación vial Puno Tacna tramo Tarata - Capazo – Mazocruz”, en el cual se realiza un análisis de comparación con el empleo de emulsión asfáltica y cemento Portland en los tramos 7 y 8 de un proyecto de conservación vial por niveles en Dv. Humajalso – Desaguadero y Tacna – Tarata – Capazo – Mazocruz”, se propone diferentes configuraciones estructurales según la metodología AASHTO 1993 variando diferentes aportes de configuración estructural, espesores y coeficientes de drenaje con la finalidad de satisfacer el número estructural requerido en cada tramo, concluyéndose finalmente que el uso la estabilización con ambos materiales influye positivamente en la susceptibilidad al agua mejorando al adherencia entre partículas y económicamente el empleo de emulsión asfáltica resulta más factible.

Según Velásquez (2018) en su trabajo titulado “Influencia del cemento portland tipo I en la estabilización del suelo arcilloso de la sub rasante de la avenida Dinamarca, sector la Molina” el cual presenta un escenario para estabilización de suelo arcilloso que por lo general no tienen una adecuada calidad para confirmación de sub rasantes, por tal motivo se propone su mejoramiento con la adición de cemento Portland, según los análisis efectuados se determinó que el tipo de suelo existente era un A-7-6 según AASHTO y OH según SUCS, se realizaron los distintos ensayos para determinar características mecánicas añadiéndose 1, 3 y 5% de cemento en peso, concluyendo que una adición del 5% mejora notablemente el terreno reduciendo su plasticidad del 44% al 15% y aumentando CBR del 1,30% al 13,75 % a un 95% de la máxima densidad seca, el autor recomienda que a pesar de

la mejoría presentada es posible que el suelo pueda sufrir deformaciones proponiendo una reemplazo de terreno en ciertas zonas con material de arcillas orgánicas.

Según Urcia (2017) en su tesis titulada “Estabilización del suelo con la aplicación de Cemento portland tipo I para la mejora de la carretera a nivel de afirmado en el tramo: Izcuchaca - Quichuas. Región Huancavelica, 2017” en el trabajo se buscó determinar el comportamiento estructural que aportaría la adición de cemento tipo I aplicado como un estabilizante de suelos para realizar mantenimiento de vías entre las localidades de Izuchaca km 191+500 y Quichuas km 228+000 concluyéndose que una adición de 3% de cemento aumentan la densidad del afirmado existente de $2,123 \text{ g/cm}^3$ a $2,240 \text{ g/cm}^3$, así como también el CBR de un 30,8 % a 51% al 95% de la máxima densidad seca mejorando la resistencia al esfuerzo cortante, proporcionando resultados positivos la estabilización con cemento tipo I.

Según Jara y Angulo (2018) en su tesis “Análisis y aplicación de emulsiones asfálticas catiónicas para la estabilización en el tramo de 5 km entre el caserío José Gálvez y la ciudad de Otuzco, Provincia de Otuzco, Departamento de La Libertad”, el objetivo de tal trabajo es lograr la estabilización en tramo de 5 km entre San José y Otuzco para dicho fin se realiza una inspección de 10 calicatas para la determinación de las características físicas del suelo entre los ensayos realizados se encuentran: granulometría, límites de Atterberg, sales solubles , contenido de materia orgánica, desgaste por abrasión de los ángeles , ensayo de Proctor modificado, Relación de soporte de California entre otros, para dicho fin se empleó

emulsión asfáltica catiónica realizándose probetas con 0, 4, 8, 12 y 16% determinándose finalmente que un porcentaje de 8% de emulsión lograría satisfactoriamente estabilizar el camino otorgando un 31,1 % de CBR.

2.2. Bases teóricas.

2.2.1. Suelos.

2.2.1.1. Definición.

Según Santa Cruz (2018) define el suelo como la desintegración, alteración física y química de las rocas o suelos transportados por el agua o viento, formando una capa delgada de material heterogéneo sobre la corteza terrestre.

2.2.1.2. Tipos de suelo.

Como menciona Braja (2011) los tipos de suelos pueden dividirse en:

A. Suelos residuales.

Los suelos residuales de originan a partir del intemperismo causado por efectos climáticos predominando los climas cálidos y húmedos en comparación de los climas fríos y secos, los depósitos generados dependerán de la roca madre, los cuales generalmente se componen de una capa de material de arcilla o arcilla limosa, debajo suelo limo o arenoso, a continuación, una roca intemperizada parcialmente y finalmente una capa de roca sana como se observa en la Figura 1.

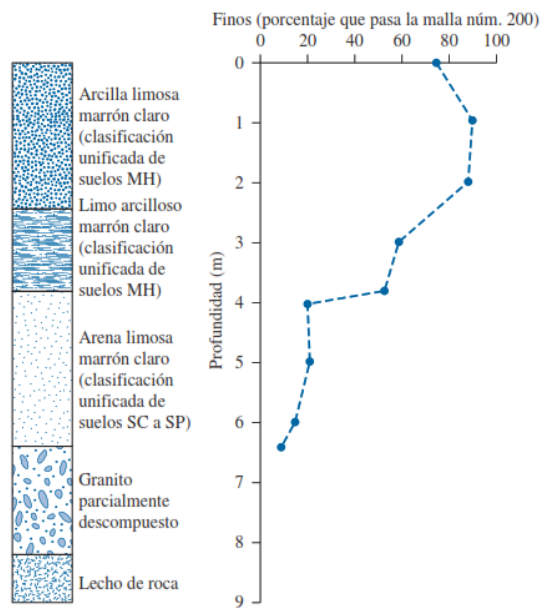


Figura 1. Registro estratigráfico de un suelo residual.

Fuente: Braja, 2011, p. 66.

B. Suelos transportados.

El suelo originado por el intemperismo de las rocas y transportado por un agente físico externo a otros lugares toma como denominación, suelos transportados, los cuales según su agente de transportación pueden ser:

Suelos transportados por gravedad.

Depósitos lacustres, depositados en el fondo de lagos.

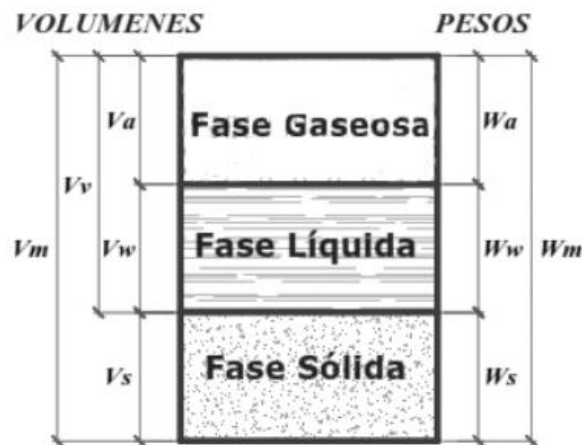
Suelo fluvial, a causa corrientes de agua.

Glaciales, a causa de glaciares.

Eólicos, por acción del viento.

2.2.1.3. Componentes de un suelo.

Los suelos están constituidos por partículas que conectan entre sí pero también por pequeños huecos llamados poros los cuales pueden contener aire con o sin vapor de agua, también pueden incluir agua con otras sustancias disueltas; está compuesto por tres fases sólida, líquida y gaseosa pudiendo existir una cuarta llamada material orgánico, cuando los suelos se encuentran secos o saturados sus fases suelen reducirse a dos, las propiedades del suelo varían bastante según su porosidad y contenido de humedad, se representa de forma gráfica en la Figura 2.



Donde:

- V_m = Volumen total de la muestra del suelo
- V_s = Volumen de la fase sólida de la muestra
- V_v = Volumen de los vacíos de la muestra de suelo
- V_w = Volumen de la fase líquida contenida en la muestra
- V_a = Volumen de la fase gaseosa de la muestra
- W_m = Peso total de la muestra de suelo.
- W_s = Peso total de la fase sólida de la muestra de suelo
- W_w = Peso total de la fase líquida de la muestra
- W_a = Peso total de la fase gaseosa de la muestra

Figura 2. Representación de fases que conforman un suelo.

Fuente: Huanca, s.f, p. 05.

2.2.1.4. Clasificación de los suelos.

Como indica Braja (2011) dos de los métodos más conocidos para la aplicación de clasificación requieren de la granulometría del suelo a analizar y los límites de Atterberg, parámetros primordiales para definir un suelo, los sistemas de clasificación son:

Tabla 2

Tamices requeridos para clasificación de suelos

Tamices	Abertura (mm)
3"	75,000
2"	50,800
1 1/2"	38,100
1"	25,400
3/4"	19,000
3/8"	9,500
N° 4	4,760
N° 10	2,000
N° 20	0,840
N° 40	0,425
N° 60	0,260
N° 140	0,106
N° 200	0,075

Fuente: ASTM International, 2017c, p. 02.

A. Clasificación SUCS.

El sistema unificado de clasificación de suelos es propuesto por Casagrande, en la actualidad se usa para la clasificación de suelos para todos los trabajos geotécnicos, este sistema de clasificación usa la siguiente simbología:

Tabla 3

Simbología sistema clasificación SUCS

Símbolo	G	S	M	C	O	Pt	H	L	W	P
Descripción	Grava	Arena	Limo	Arcilla	Limos orgánicos y arcilla	Turba y suelos altamente orgánicos	Alta plasticidad	Baja plasticidad	Bien graduado	Mal graduado

Fuente: Braja, 2011, p. 19.

Para la clasificación de suelos en el método SUCS como se aprecia en la Figura 03, se recurre al uso de dos fórmulas para proceder a la clasificación de suelos granulares a partir de la granulometría de los suelos, el coeficiente de uniformidad y coeficiente de curvatura, expresados en la Ecuación 01 y Ecuación 02.

$$\text{Coef. de uniformidad} = \frac{D_{60}}{D_{10}} \dots \dots \dots [Ecuación 01]$$

$$\text{Coef. de curvatura} = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}} \dots \dots \dots [Ecuación 02]$$

Donde:

D60 = Tamaño de abertura en mm donde %pasante es 60% según granulometría.

D30 = Tamaño de abertura en mm donde %pasante es 30% según granulometría.

D10 = Tamaño de abertura en mm donde %pasante es 10% según granulometría.

Criterio para asignación de Símbolo de Grupo y Nombre de Grupo utilizando Pruebas de Laboratorio ^A				Clasificación del Suelo	
				Símbolo del Grupo	Nombre del Grupo
SUELOS DE GRANULOMETRÍA GRUESA Más del 50% es retenido en la malla No. 200	Gravas Más del 50% de la fracción gruesa es retenida en la malla No.4	Gravas Limpias	$Cu \geq 4$ y $1 \leq Cc \leq 3^E$	GW	Grava bien graduada ^F
		Menos del 5% de finos ^C	$Cu < 4$ y $1 > Cc > 3^E$	GP	Grava mal graduada ^F
		Gravas con Finos	Finos clasificados como ML ó MH	GM	Grava limosa ^{F,G,H}
	Arenas 50% ó más de la fracción gruesa pasa la malla No.4	Más del 12% de finos ^C	Finos clasificados como CL ó CH	GC	Grava arcillosa ^{F,G,H}
		Arenas Limpias	$Cu \geq 4$ y $1 \leq Cc \leq 3^E$	SW	Arena bien graduada ^I
		Menos del 5% de finos ^D	$Cu < 4$ y $1 > Cc > 3^E$	SP	Arena mal graduada ^I
SUELOS DE GRANULOMETRÍA FINA 50% ó mas pasa la malla No. 200	Arcillas y Limos Limite liquido menor a 50	Arenas con Finos	Finos clasificados como ML ó MH	SM	Arena limosa ^{F,G,H}
		Más del 12% de finos ^C	Finos clasificados como CL ó CH	SC	Arena arcillosa ^{F,G,H}
		Inorgánico	IP > 7 y puntos en ó sobre la línea "A" ^J	CL	Arcilla magra ^{K,L,M}
	Arcillas y Limos Limite liquido de 50 o mas	Orgánico	Limite liquido - secado al horno <0.75 Limite liquido - no secado	OL	Arcilla orgánica ^{K,L,M,N} Limo orgánico ^{K,L,M,O}
		Inorgánico	IP puntos en ó sobre la línea "A"	CH	Arcilla gruesa ^{K,L,M}
		Orgánico	IP puntos debajo de la línea "A"	MH	Limo elástico ^{K,L,M}
		Limite liquido - secado al horno <0.75 Limite liquido - no secado	OH	Arcilla orgánica ^{K,L,M,P} Limo orgánico ^{K,L,M,O}	
SUELOS ALTAMENTE ORGÁNICOS		Sobre todo materia orgánica, color negro, y olor orgánico		PT	Turba

Figura 3. Sistema de clasificación de suelos SUCS.

Fuente: Braja 2011, p. 21.

B. Clasificación AASHTO.

El sistema de clasificación AASHTO fue propuesto por la Highway Research Board's Committee on Classification of Material for Subgrades and Granular Type Roads en el año 1945, creado principalmente para el uso en carreteras, esta clasificación se divide en 8 de grupos siendo los A-1, A-2, A-3 suelos de grano grueso, A-4, A-5, A-6, A-7 de grano fino, y A-8 como suelo orgánico, tal descripción es explicada a detalle en la Figura 04.

Clasificación general	Materiales granulares (35% o menos de la muestra total pasa la malla núm. 200)						
	A-1			A-2			
Clasificación de grupo	A-1-a	A-1-b	A-3	A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7
Análisis por mallas (% que pasa)							
Malla núm. 10	50 máx						
Malla núm. 40	30 máx	50 máx	51 mín				
Malla núm. 200	15 máx	25 máx	10 máx	35 máx	35 máx	35 máx	35 máx
Para la fracción que pasa Malla núm. 40							
Límite líquido (LL)				40 máx	41 mín	40 máx	41 mín
Índice de plasticidad (IP)	6 máx		No plástico	10 máx	10 máx	11 mín	11 mín
Tipo usual de material	Fragmentos de roca, grava y arena		Arena fina	Grava y arena limosa o arcillosa			
Clasificación de la capa	Excelente a buena						

Clasificación general	Materiales de limo y arcilla (más de 35% de la muestra total pasa la malla núm. 200)			
	A-4	A-5	A-6	A-7
Clasificación de grupo				A-7-5 ^a A-7-6 ^b
Análisis por mallas (% que pasa)				
Malla núm. 10				
Malla núm. 40				
Malla núm. 200	36 mín	36 mín	36 mín	36 mín
Para la fracción que pasa Malla núm. 40				
Límite líquido (LL)	40 máx	41 mín	40 máx	41 mín
Índice de plasticidad (IP)	10 máx	10 máx	11 mín	11 mín
Tipo usual de material	Principalmente suelos limosos		Principalmente suelos arcillosos	
Calificación subrasante	Regular a malo			

^aSi $IP \leq LL - 30$, la clasificación es A-7-5.
^bSi $IP > LL - 30$, la clasificación es A-7-6.

Figura 4. Sistema de clasificación SUCS.

Fuente: Braja, 2011, p. 18.

2.2.1.5. Estabilización de suelos.

La estabilización de suelos según Escobar et al., (2020) es una técnica utilizada para mejorar las características mecánicas de un suelo en cuanto a resistencia, permeabilidad, cambios de volumen entre otras, esta técnica es aplicable para suelos en los cuales no es posible fundar los cimientos de un pavimento por la baja capacidad que ofrecen, actualmente los métodos más conocidos son la estabilización mecánicas a través de compactación con rodillos, estabilización con

la adición de cal, estabilización con adición de cemento y estabilización con adición de emulsiones asfálticas, entre otros.

A. Estabilización mecánica.

La estabilización mecánica según Ministerio de vivienda, construcción y saneamiento (2012) se realiza por medio de equipos o maquinaria que ejerza energía de compactación en suelo con la finalidad de poder estabilizar todas aquellas obras en donde se trate con suelo (suelos de cimentación, canales, rellenos, sub rasantes, etc) con la finalidad de conferir al suelo una mayor resistencia al efecto cortante, disminución de posibles asentamientos y deformaciones, además de eliminar vacíos e impermeabilizarlo. Un parámetro importante para la compactación de suelos es tener en cuenta su emulación en laboratorio asumiendo una densidad seca máxima y un óptimo contenido de humedad con el ensayo de proctor, este parámetro de densidad será medido en campo posteriormente con ensayos respectivos como cono de arena, densímetro nuclear u otro que aplique según las condiciones del material a evaluar.

B. Estabilización con cal.

Los suelos que serán estabilizados con este método según Ministerio de vivienda, construcción y saneamiento (2012) se realizan con la mezcla de suelo, cal y agua, esta metodología aplica para suelos de grano fino como arcillas y limos, recomendándose su uso en un 2% al 8% de la masa seca del suelo, debido a que un exceso podría aportar plasticidad al suelo, el efecto de la cal en el suelo proporciona disminución en su índice de plasticidad del suelo y una densidad máxima seca

menor a la densidad natural, pero este efecto no tiene un impacto notable debido a que aumenta su resistencia al corte notablemente.

C. Estabilización con cemento.

La finalidad de la estabilidad con cemento según la norma Ministerio de vivienda, construcción y saneamiento (2012) es mejorar el suelo pero sin llegar a rigidizarlo, para dicho fin se recomienda el empleo de cemento normal tipo I , en caso de que el suelo tenga presencia apreciable de partículas orgánicas se podría emplear un cemento de altas resistencias, para una estabilización flexible se recomienda una edición de 1% a 4% y para estabilizaciones rígidas desde un 6% a 14% todo dichas cantidades se determinaran con pruebas de laboratorio a diferentes dosificaciones de cemento.

D. Estabilización con emulsión asfáltica.

Como menciona Quiroz (2017) este tipo de estabilización consiste en realizar la mezcla de áridos con emulsión asfáltica, con la finalidad de proporcionar mejoras mecánicas en el material presente volviéndolo completamente funcional en caso de que en su estado natural no fuese completamente aprovechable para dicho fin estructural, para una base granular con determinadas características se recomienda adicionar entre 4% a 6% de emulsión asfáltica, para estabilizar suelos que no presenten características especiales la cantidad a dosificar será comprobada a través de ensayos en laboratorio de suelos y pavimentos, la utilización de esta técnica otorga al suelo una cohesión entre las partículas del suelo llegando a obtener un incremento favorable en su resistencia, para que esto tenga éxito se deberá tener control importante en humedad en material a compactar, la energía de

compactación de los rodillos y el control de densidad de campo en obra, siendo una excelente solución en lugares donde hay escasos recursos pétreos de calidad según la normativa establecida o expediente técnico a esto acompañado el precio del producto asfáltico a utilizar.

2.2.2. Pavimentos.

2.2.2.1. Definición.

Tal como afirma Fontalba (2015) se refiere a los pavimentos como un conjunto de capas estructurales conformada por materiales de calidad debidamente compactados que tienen la función de soportar las distintas cargas vehiculares generadas en el transcurso de periodo de vida útil para el cual fue diseñado.

2.2.2.2. Tipos de pavimento.

Según Becerril y Miranda (2016) especifica que hay distintos tipos de pavimentos como:

A. Pavimento flexible.

Los pavimentos flexibles hacen referencia a los que son conformados por capas granulares y un revestimiento asfáltico encargados de absorber los esfuerzos verticales de compresión a causa del tránsito vehicular, la repetición de las cargas de tráfico con el tiempo producirá fisuración por fatiga.

B. Pavimento rígido.

Los pavimentos rígidos están constituidos principalmente por concreto encargado de aliviar los esfuerzos y deformaciones en capas inferiores debido a su alta resistencia a la flexión, por tal característica del concreto se puede permitir que las capas inferiores sean de menor calidad comparadas con las de un pavimento flexible.

C. Pavimento compuesto.

Se denomina así a los pavimentos que están conformados por pavimentos flexibles y rígidos, encontrándose este último en capas inferiores y el primero en capas superiores de rodadura.

2.2.2.3. Partes de un pavimento.

Según Iniciarte (2012) describe las partes de un pavimento tradicional a continuación en la Figura 5.

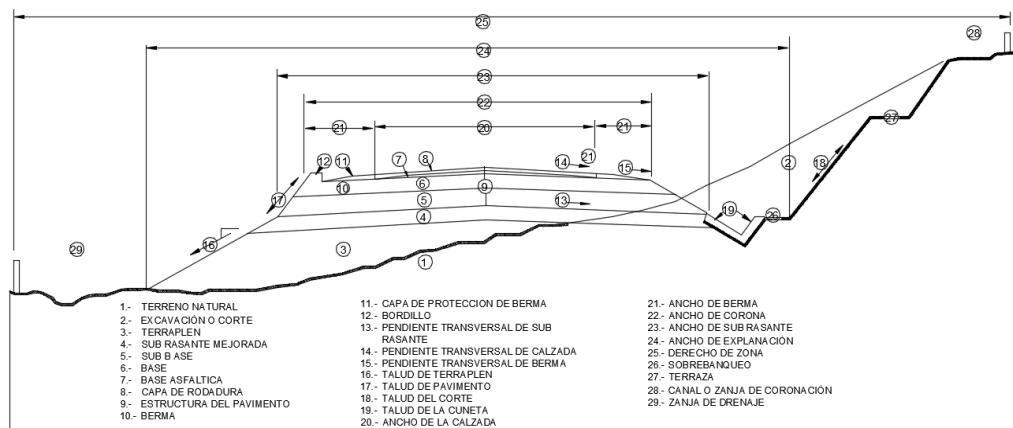


Figura 5. Esquema típico de un pavimento.

Fuente: Becerril y Miranda, 2016, p. 11.

A. Sub rasante.

Esta primera capa es un factor importante para definir el espesor de un pavimento sea flexible o rígido para dicho fin se toma en cuenta el ensayo de relación de soporte de california (CBR), se deberá tomar en cuenta el tipo de material que compone esta capa porque puede presentar asentamientos o hinchamientos que ponen en peligro el paquete estructural que se colocará sobre la sub rasante, en los tipos de suelos con estos problemas se buscará impermeabilizar para evitar que el agua ocasione estos efectos mencionados anteriormente, de igual forma se busca lograr una estabilización con la adición de un aditivo o material para evitar los cambios de volumen.

B. Sub Base.

Suele ser la primera capa que se apoya en la sub rasante, la cual tiene las siguientes características:

Funciona como capa de transición entre la base y sub rasante impidiendo que el material de la sub rasante contamine las capas superiores.

Transmite las cargas producidas en las capas superiores, y las trasmite hacia la sub rasante.

Absorbe las deformaciones que podría sufrir la sub rasante evitando que las capas superiores sufran hinchamiento o asentamientos.

Actúa como capa de drenaje del agua que escurre de la carpeta asfáltica o bermas, así como también evitar la ascensión capilar de agua.

C. Base.

La capa de base está constituida por una calidad de material superior que la sub base, tiene la siguiente función:

Es un elemento resistente que se encarga de la transmisión de cargas de la carpeta asfáltica causadas por acción del tráfico transferidas hacia la sub base y sub rasante.

D. Capa de rodadura.

Es la capa que se encarga de recibir directamente los esfuerzos causados por el tráfico vehicular, tiene las siguientes características:

Impermeabilizante, impedir el paso del agua al interior del pavimento.

Resistencia a la tensión generada por las cargas vehiculares.

Proporcionar una superficie estable y uniforme, rugosa que evite deslizamientos y resistir los efectos abrasivos que provoca el tránsito.

E. Bermas.

Las bermas son espacios aledaños al pavimento que se encuentran en los laterales, con la función de proporcionar un espacio de emergencia para la detención de los vehículos, esta capa por lo general tiene sus dimensiones según la importancia de la vía, normalmente comparten el mismo material de la calzada, su pendiente es mayor a la del pavimento en si para lograr un mayor drenaje en las vías, estas

además deben tener la capacidad suficiente para soportar cargas estáticas de vehículos.

F. Bombeo.

El bombeo es una ligera inclinación o pendiente que tienen los pavimentos con la finalidad que el agua escurra hacia las cunetas o drenes laterales.

G. Bordillos.

Son elementos pequeños en forma de barrera que tienen la función de conducir el agua hacia una bajante, con la finalidad de evitar la erosión y saturación que pueda producir el agua en los taludes.

H. Lavaderos.

Los lavaderos son elementos en forma de canal que tienen escurrimiento de forma transversal a los taludes, con la finalidad de alejar el agua de la estructura del pavimento hasta sitios donde el agua no cause daños.

I. Cunetas.

Las cunetas son canales que se ubican en los laterales de corona de vía, siendo paralelos al pavimento, con la finalidad de recibir el agua que escurre sobre la carpeta asfáltica y que desciende de los taludes.

J. Zanjas de coronación.

Son canales o zanjas que se excavan en la parte superior de los taludes con el fin de evitar que el agua erosione taludes y colmate las cunetas que se encuentran al pie de talud.

K. Alcantarillas.

Las alcantarillas son estructuras usualmente transversales al pavimento encargadas del drenaje de agua a través de la obra.

L. Sub drenes longitudinales.

Los sub drenes son elementos internos drenantes encargados de dispersar el agua a causa de infiltración o de nivel freático que pueda existir.

M. Capas drenantes.

Las capas drenantes están constituidas de material granular que permite el paso del agua, usualmente se construye como primera capa sobre la sub rasante teniendo la función de recolectar el agua de origen interior o de infiltración, siendo conectada a sub drenes que se encuentra a ambos lados del pavimento

2.2.3. Emulsión asfáltica.

Los autores Jimenez et al (2016) definen la emulsión asfáltica como una dispersión de un líquido en otro sin llegar a combinarse entre sí, formado por asfalto y agua que son conglomerados a través de un emulgente, las emulsiones pueden clasificarse según su carga eléctrica como aniónicas, catiónicas y no iónicas, por su

velocidad de rotura se tiene emulsiones tipo de rotura rápida, rotura media y rotura lenta, como se menciona anteriormente existen diferentes formas de poder clasificar emulsiones, se especifica las siguientes características que corresponden a las emulsiones asfálticas:

2.2.3.1. Identificación de emulsiones asfálticas.

Para la identificación de las emulsiones asfálticas se recurre al uso de abreviaturas o nomenclaturas, en las cuales la letra C hace referencia que la emulsión es de carga catiónica en caso de ausencia de esta letra significaría carga aniónica, las letras RS (RR), MS (RM), SS (RL) y QS (RR QS) hacen referencia a emulsiones de rotura rápida, rotura media, rotura lenta y rotura rápida QS respectivamente, las combinaciones de estas letras vienen acompañada de números, mientras el número sea más bajo significara una menor viscosidad comparado a un número más alto que significaría una mayor viscosidad, las letras “h” hace referencia a emulsiones más duras y la letra “s” más blandas, finalmente el uso de la abreviatura HF prevalece en las emulsiones aniónicas indicando que el líquido tiene propiedades de alta flotación.

Tabla 4*Especificaciones normalizadas por la ASTM-International*

Emulsión asfáltica aniónica	Emulsión asfáltica catiónica
RS-1 (RR-1)	CRS-1 (CRR-1)
RS-2	CRS-2
HFRS-2	-
MS-1 (RM-1)	-
MS-2	CMS-2 (CRM-2)
MS-2h	CMS-2h
HFMS-1	-
HFMS-2	-
HFMS-2h	-
HFMS-2s	-
SS-1 (RL-1)	CSS-1 (CRL-1)
SS-1h	CSS-1h

Fuente: ASTM International, 2019b, p. 02 ; ASTM International, 2019d, p. 02.

2.2.3.2. Componentes de la emulsión.

Tal como indica Fernández (2012) como componentes de la emulsión tenemos:

A. Asfalto.

El asfalto tiene un origen a partir de la refinación del petróleo crudo, estando compuesto en su forma básica de moléculas grandes de hidrocarburos siendo variada su composición química. La interacción que sucede entre las moléculas hace no predecible con exactitud cómo se comportará un asfalto que será sometido a emulsificación, por tal motivo en la producción de emulsiones asfálticas se realizan controles de calidad de forma constante, cada fabricante tiene distintas formulaciones las cuales fueron desarrolladas para obtener resultados óptimos con los químicos y cementos asfálticos empleados, asimismo se debe tener en cuenta

que su concentración es conocida también residuo asfáltico es una fracción del total llamado emulsión asfáltica, el cual está dado por la Ecuación 03.

$$Rt = \%e \times \frac{Rd}{100} \dots \dots \dots [Ecuación 03]$$

Donde:

Rt=Residuo Asfáltico total, %.

%e=Cantidad de emulsión asfáltica, %.

Rd=Residuo asfáltico por destilación, %.

B. Agua.

El agua es un elemento dado que sus propiedades contribuyen a un producto final, el origen del agua debe ser seleccionada con cuidado dado que podría contener minerales u otras partículas en suspensión que pueden contribuir a no formar emulsiones asfálticas estables.

Se tiene preocupación por la presencia de iones de calcio y magnesio puesto que contribuyen a una estabilización en las emulsiones catiónicas pero que podrían desestabilizar emulsiones aniónicas, debido a que las sales de magnesio y calcio que no tienen solubilidad en agua, se conforman en la reacción de sales de sodio y potasio que, si son solubles en agua, que tienen la función de ser emulsivos.

C. Agente emulsivo.

Las propiedades encontradas en las emulsiones asfálticas dependerán de los químicos que la conforman, este componente es un tensio-activo que mantiene las

partículas de asfalto en suspensión estable controlando de igual forma el tiempo de rotura, así como también es determinante en la clasificación de emulsión según su carga como puede ser catiónica, aniónica o no aniónicas.

Los agentes emulsivos catiónicos son usualmente aminas grasas como amidoaminas, imidazolininas y diaminas.

Los agentes emulsivos aniónicos más comunes son los ácidos grasos provenientes de resinas de madera, los cuales son convertidos en jabón al reaccionar con hidróxido de potasio o sodio.

2.2.3.3. Rotura de la emulsión asfáltica.

La rotura de la emulsión como indica Otiniano y Paria (2016) se produce cuando el agua que la conforma tiende a evaporarse, este hecho genera que funcione como un ligante, para las emulsiones de rotura rápida y media este proceso de rotura se lleva a cabo de forma electroquímica entre uno y cinco minutos al entrar en contacto con algún agente extraño como un árido, para emulsiones de rotura lenta se lleva a cabo a través de la evaporación del agua lo que proporciona el tiempo necesario para mezclado y compactado de la mezcla final.

2.2.3.4. Curado.

El curado como expresan Otiniano y Paria (2016) se desarrolla cuando el agua abandona la emulsión a través de la evaporación y absorción de los agregados, logrando actuar como ligante desarrollando las propiedades mecánicas del cemento asfáltico, adhiriendo fuertemente las partículas áridas de la mezcla entre sí, la

evaporación del agua puede ser rápida en climas favorables pero lenta en lugares donde predomine la humedad, lluvias y bajas temperaturas.

2.2.3.5. Factores que afectan el curado y rotura de la emulsión.

Existen factores que alteran las velocidades de rotura, así como de curado de las emulsiones asfálticas como los siguientes:

A. Contenido de humedad.

Un alto contenido de humedad retrasa el tiempo de curado debido que se aumenta la cantidad de agua a evaporarse.

B. Absorción de agregado.

Los agregados secos y que presenten altas porosidades absorben el agua de la emulsión acelerando el proceso de rotura.

C. Fuerzas mecánicas.

Las fuerzas mecánicas aplicadas al pavimento a través del tráfico ligero y compactación de rodillos desplazan el agua de la mezcla al exterior acelerando el curado y estabilidad.

D. Superficie del agregado.

A mayor área superficial de los agregados aumentara la velocidad de curado así como también un exceso de material fino o sucio.

E. Temperatura de la emulsión y del agregado.

Si las temperaturas presentes en la emulsión y agregado son bajas retrasaran el tiempo de rotura.

F. Química de las superficies.

La intensidad de carga presente en el agregado y en la emulsión asfáltica influye en el tiempo de rotura.

G. Tipo y cantidad de emulsivo.

El tipo de emulsificante empleado en la fabricación de emulsiones influye en las características de rotura de emulsiones tanto para mezclas y sellados.

H. Condiciones climáticas.

La presencia de viento, variación de la temperatura y humedad influyen en la velocidad que el agua pueda evaporarse lo que se traduce en tiempo de rotura y curado.

2.2.3.6. Clasificación de la emulsión según el emulgente.

Por el tipo de emulgente tal cual plantea Almeida y Sánchez (2011) se menciona :

A. Emulsiones aniónicas.

En este tipo de emulsión el emulgente le otorga una polaridad de carga negativa a los glóbulos de asfalto.

B. Emulsiones catiónicas.

En este tipo de emulsión el emulgente le otorga una polaridad de carga positiva a los glóbulos de asfalto.

2.2.3.7. Clasificación de la emulsión según su rotura.

Como señala Mendoza (2016) describe las emulsiones según su rotura en:

A. De rotura rápida.

Este tipo de emulsión al entrar en contacto con el agregado rápidamente tiende a convertirse de emulsión a ser asfalto, tiene utilización para la labor de riegos de liga, tratamientos superficiales y carpetas con el sistema de riego.

B. De rotura media.

Este tipo de emulsión se recomienda ser utilizado con agregados graduados teniendo una rotura un poco más retardada por su naturaleza, tendrá uso en mezclas en planta donde el porcentaje de finos es menor o igual a 2%, entre otros trabajos como bacheos y nivelación de carpetas.

C. De rotura lenta.

Este tipo de emulsión se usa cuando se requiere un tiempo retardado de rotura con la finalidad que haya una buena mezcla con los agregados, se recomienda su uso con granulometrías cerradas y alto contenido de finos, por lo general tiene una baja viscosidad que suele disminuir aún más con la adición de agua, tiene uso para la

elaboración carpetas asfálticas en frío en planta, para las estabilizaciones asfálticas y sellados con lechadas asfálticas o slurry seal.

D. De rotura rápida QS y Micro-aglomerados.

Este tipo de emulsiones es ampliamente utilizada en los Estados Unidos por su alta utilidad para poder abrir paso en pavimentos en el menor tiempo posible debido a su rápido curado en el uso como lechadas asfálticas (slurry seal), mientras las mezclas micro aglomeradas con este tipo de emulsión permiten la aplicación de capas de slurry seal mucho más gruesas que el tamaño máximo de agregados comparadas a las que se podría lograr con una emulsión de rotura lenta, logrando poner en marcha el tráfico a más tardar en una hora, la compatibilidad de los agregados con este tipo de emulsión se deberá evaluar con precisión en laboratorio.

2.2.3.8. Elaboración de la emulsión asfáltica.

La elaboración de emulsiones asfálticas citando a Otiniano y Paria (2016), se da en las siguientes fases:

A. Proceso de emulsificación.

Durante este proceso de emulsificado se tiene asfalto caliente con la finalidad que obtenga una baja viscosidad, el cual no debe llevarse a altas temperaturas, dicho material entra en un motor coloidal que se encarga de dividirlo en pequeñísimas gotas, el agua que ingresa junto con el emulsivo se ajusta para lograr un proceso óptimo de emulsificación, estas temperaturas van a varias según la compatibilidad entre el asfalto y el agente emulsivo, posteriormente se bombea la mezcla a contenedores a granel los cuales pueden contener agitadores mecánicos para

mantener la uniformidad, para mayor entendimiento se observa la Figura 6 y Figura 7.

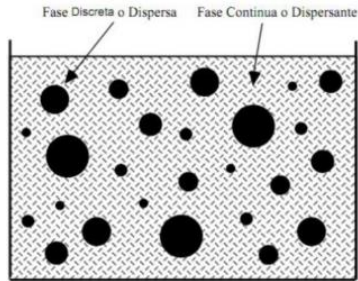


Figura 6. *Tamaño relativo de las partículas de asfalto y su distribución.*

Fuente: Otiniano y Paria, 2016, p. 60.

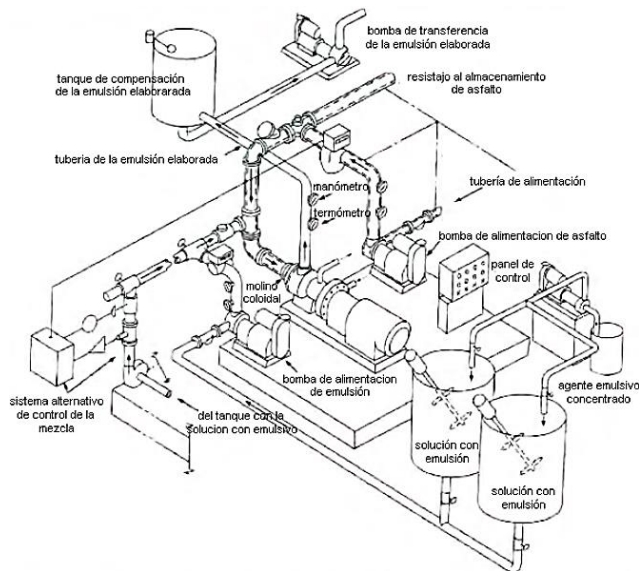


Figura 7. *Diagrama de una planta de elaboración de emulsión asfáltica.*

Fuente: Aliaga y Soriano, 2019, p. 30

El tamaño final de las partículas de asfalto es importante para una emulsión que sea estable, estas gotas diminutas se dispersan en el líquido emulsivo, produciéndose una tensión superficial entre las gotas de asfalto y agua, dado que las partículas de asfalto tienen cargas iguales ayudan a que se mantengan separadas entre sí, tal distribución de tamaños se observa en la Figura 8.

Menor de 0.001 mm (1 um)	28%
0.001 - 0.005 mm (1 - 5 um)	57%
0.005 - 0.010 mm (5 -10 um)	15%

Figura 8. Distribución porcentual aproximada de tamaños de partícula de asfalto en emulsión.

Fuente: Otiniano y Paria, 2016, p. 59.

2.2.3.9. Ensayos en emulsiones asfálticas.

Haciendo referencia Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2013) nos entrega parámetros que deberán cumplir la emulsión asfáltica para poder asegurar que su uso es apto tal como indica el siguiente extracto de la norma en la Tabla 5

Tabla 5

Parámetros para emulsiones asfálticas catiónicas

Tipo	Rotura Lenta			
	CSS-1		CSS-1h	
Grado	máx.	mín.	máx.	mín.
Prueba sobre Emulsiones				
Viscosidad Saybolt Furol a 25 °Cs	20	100	20	100
Viscosidad Saybolt Furol a 50 °Cs	-	-	-	-
Estabilidad de Almacenamiento, 24h,%	-	1	-	1
Demulsibilidad, 35 cm ³ , 0,8% Dioctilsulfosuccinato sódico %	-	-	-	-
Revestimiento y Resistencia al agua	-	-	-	-
Revestimiento agregado seco	-	-	-	-
Revestimiento, agregado seco después del rociado	-	-	-	-
Revestimiento, agregado húmedo	-	-	-	-
Revestimiento, agregado húmedo después del rociado	-	-	-	-
Carga de partícula	Positivo		Positivo	
Prueba de Tamiz %	-	0,10	-	0,10
Mezcla con Cemento %	-	2,00	-	2,00
Destilación				
Destilación de aceite, por volumen de emulsión	-	-	-	-
% Residuo	57	-	57	-
Pruebas sobre el Residuo de destilación:				
Penetración, 25°C, 100 g, 5s	100	250	40	90
Ductilidad , 25°C , 5 cm/min , cm	40	-	40	-
Solubilidad en Tricloretileno, %	97,5	-	97,5	-

Fuente: Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2013, p. 475.

2.2.4. El agua.

El agua es un elemento base en toda ejecución de obra por lo cual se deberá garantizar que su composición no afecte a los demás materiales con los cuales se use, para esto se aplica lo establecido según como indica Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2013), en la cual se establece parámetros de control como su pH entre 5,5 y 8,0 además del contenido de sulfatos el cual no será superior a 3 000 p.p.m, en general se considera adecuado el uso de agua potable, si este último fuese el caso no existiría necesidad de realizar ensayos de calificación establecidos.

2.2.5. Pavimentos económicos “low cost” con emulsión asfáltica.

Se describe una breve reseña por Petroquímica Panamericana (s.f) proveedora de productos asfálticos donde menciona que la estabilización con emulsión asfáltica tiene una amplia aplicación en el sistema vial influyendo positivamente en:

2.2.5.1. Ventajas.

A. Economía.

La aplicación de la estabilización con emulsión asfáltica tiene una serie de beneficios económicos dado que está enfocado en hacer uso del mismo material existente, evitando adquirir otro material de mayor calidad.

B. Fácil aplicación.

Para el uso de estabilización asfáltica con emulsión no es necesario contar con personal capacitado para tal fin, aplica de igual manera para la maquinaria utilizada que puede ser conseguida con facilidad.

C. Ecológico.

Actualmente en todo proyecto se tiene en cuenta el impacto ambiental que puede generar, el uso de este método tiene un bajo impacto ambiental debido a que la emulsión asfáltica solo libera agua al suelo y no es necesario usar calor para su uso.

D. Seguro.

La aplicación de emulsión asfáltica no requiere de calor para que pueda ser mezclada con los áridos, debido a que trabaja en frío, lo que genera mayor seguridad a los trabajadores al no exponerse a quemaduras.

2.2.5.2. *Proceso constructivo.*

A. Mezclado.

Se realiza la escarificación y remoción del material para mezclado de la emulsión, el cual puede realizarse a un costado de vía o en la misma, se debe asegurar que el mezclado sea efectivo para tal fin se agrega agua un poco más por encima de su % de humedad óptimo.

B. Compactación.

La compactación se realizará con rodillos de preferencia neumáticos con la finalidad de alisar y sellar la superficie.

C. Curado.

En estos estabilizados debe evaporarse el agua de mezclado con la finalidad que la capa adquiera una mayor resistencia, lo que se lograra en el periodo de los meses

próximos, la habilitación del tránsito puede realizarse luego de una correcta compactación.

D. Construcción en etapas.

Este procedimiento permite la adición de una capa de rodadura superior como una sellada con arena o un slurry seal, protegiendo la base estabilizada del desgaste superficial a causa de las cargas de tránsito y del agua.

2.2.5.3. Elección del tipo de emulsión según condiciones.

El Otiniano y Paria (2016) proporciona información para la elección del tipo de emulsión tal como se aprecia en la Figura 9 donde se encuentran todos los tipos de emulsión asfáltica normalizadas según nomenclatura.

Tipo de Construcción	ASTM D977 AASHTO M208										ASTM D2397 AASHTO M 140				
	RS-1	RS-2	HFMS-2	MS-1, HFMS-1	MS-2, HFMS-2	MS-2h, HFMS-2	HFMS-2s	SS-1	SS-1h	GRS-1	GRS-2	CMS-2	CMS-2h	CSS-1	CSS-1h
Mezclas de Asfalto y Agregado															
Mezcla en Planta (en Caliente)															
Mezcla en Planta (en Frio)															
Granulometría Abierta				X	X							X	X		
Granulometría Cerrada						X	X	X						X	X
Arena						X	X	X						X	X
Mezclado In-situ															
Granulometría Abierta				X	X							X	X		
Agregado bien Graduado						X	X	X						X	X
Arena						X	X	X						X	X
Suelo Arenoso						X	X	X						X	X
Aplicación de Asfalto y Agregado															
Tratamientos Superficiales (Símpes y Muñ)	X	X	X							X	X				
SaSellado con Arena (Sand Seal)	X	X	X	X						X	X				
Lechada Asfáltica (Slurry Seal)							X	X	X					X	X
Micro-aglomerado (Micro-surfacing)															X
Sellado Doble (Sandwich Seal)		X	X								X				
Cape Seal		X									X				
Aplicaciones Asfálticas															
Riego Pulverizado (Fog Seal)															
Imprimación (Prime Coat)															
Riego de Liga (Tack Coat)															
Palativo de Pobo (Dust Palativo)															
Protección de Asfalto (Mulch treatment)															
Sellado de Fisuras (Crock filler)															
Mezclas de Mantenimiento															
Uso Inmediato															
Acopio															
A pueden emplearse o otros grados que el HFMS-2h cuando la experiencia demuestra que han tenido un comportamiento satisfactorio B diluido en agua por el fabricante C diluido en agua D mezclado solo para imprimación E el polímero debe incorporarse durante o previamente a la emulsión															

Figura 9. Elección del tipo de emulsión según el tipo de trabajo por su aplicación.

Fuente: Otiniano y Paria, 2016, p. 95.

Se recomienda la elección del tipo de emulsión a utilizar teniendo en cuenta varios factores de diseño considerando efectos internos como el diseño del pavimento y externos como el ambiente que lo rodea, en la Figura 9 se especifica el tipo de emulsión a utilizar y el tipo de aplicación o trabajo que se realizará.

2.2.5.4. Mezclas de agregados con emulsiones asfálticas.

Como refiere Fernández (2012), propone que la mezcla de emulsión con agregados se puede presentar en tres escenarios: mezcla con granulometrías abiertas, con granulometrías cerradas y con arena-emulsión, las granulometrías abiertas especificadas en la Tabla 6 tienen utilidad para la creación de capas drenantes, su efectividad a largo plazo es comparable con el asfalto en caliente siendo muy económicamente llamativo para pavimentos de tráfico pesado.

Tabla 6

Granulometría abierta de agregados para mezcla con emulsión asfáltica

Tamaño tamiz	Capa de rodadura de granulometría abierta	Agregados, mezclas con emulsión de granulometría abiertas (Base)		
		Gruesa	Media	Fina
1 1/2" (35,5 mm)	100	100	-	-
1" (25 mm)	80-90	95-100	100	-
3/4" (19mm)	-	-	90-100	-
1/2" (12,5 mm)	-	25-60	-	100
3/8" (9,5 mm)	-	-	20-65	85-100
No. 4 (4,75 mm)	25-85	0-10	0-10	-
No. 8 (2,36 mm)	-	0-5	0-5	0-10
No. 16 (1,18 mm)	-	-	-	0-5
No. 200 (75 um)	3-15	0-2	0-2	0-2
Ensayo Los ángeles, 500 rev.	-	máx. 40	máx. 40	máx. 40
% Caras trituradas.	-	mín. 65	mín. 65	mín. 65

Fuente: Fernández, 2012, p. 39.

Las granulometrías cerradas serán las que se especifican en la Tabla 7 debido a su amplio rango se puede utilizar con una gran variedad granulometrías y clases de agregados, así como también diversas aplicaciones para pavimentos, este tipo de granulometría tiene como característica un bajo volumen de vacíos.

Tabla 7

Granulometría cerrada de agregados para mezcla con emulsión asfáltica.

Tamaño tamiz	Mat. Semi-procesado de trituración de cantera de río	Agregados, mezclas con emulsión de granulometría cerrada				
2" (50 mm)	-	100	-	-	-	-
1 1/2" (35,5 mm)	100	90-100	100	-	-	-
1" (25 mm)	80-90	-	90-100	100	-	-
3/4" (19mm)	-	60-80	-	90-100	100	-
1/2" (12,5 mm)	-	-	60-80	-	90-100	100
3/8" (9,5 mm)	-	-	-	60-80	-	90-100
No. 4 (4,75 mm)	25-85	20-55	25-60	35-65	45-70	60-80
No. 8 (2,36 mm)	-	10-40	15-45	20-50	25-55	35-65
No. 16 (1,18 mm)	-	-	-	-	-	-
No. 30 (600 um)	-	-	-	-	-	-
No. 50 (300 um)	-	2-16	3-18	3-20	5-20	6-25
No. 100 (150 um)	-	-	-	-	-	-
No. 200 (75 um)	3-15	0-5	1-7	2-8	2-9	2-10
Equiv. Arena en %	mín. 30	mín. 35	mín. 35	mín. 35	mín. 35	mín. 35
Ensayo Los ángeles, 500 rev.	-	máx. 40	máx. 40	máx. 40	máx. 40	máx. 40
% Caras trituradas.	-	mín. 65	mín. 65	mín. 65	mín. 65	mín. 65

Fuente: Fernández, 2012, p. 41.

Para el trabajo con arena-emulsión trabajando con el tipo y grado correcto se llega a obtener buenos comportamientos como base y sub base, este tipo de aplicación se limita a arenas finas limpias y arenas con bajo contenido de arcillas,

se recomienda el uso de emulsiones de rotura lenta o media con un grado de dureza mayor, para mayor referencia observamos la Tabla 8.

Tabla 8

Granulometría de arena para mezclas con emulsión

Tamaño tamiz	Porcentaje total que pasa		
	Gruesa	Media	Fina
1/2" (12,5 mm)	100	100	100
No. 4 (4,75 mm)	75-100	75-100	75-100
No. 50 (300 um)	-	15-30	-
No. 100 (150 um)	-	-	15-65
No. 200 (75 um)	0-12	5-12	12-20
Equiv. Arena en %	mín. 40	mín. 40	mín. 40
Índice de plasticidad	máx. 65	máx. 65	máx. 65

Fuente: Fernández, 2012 p. 41.

2.2.5.5. Diseño de mezcla de agregados con emulsión asfáltica.

Como refiere Otiniano y Paria (2016), da a conocer que no existen procedimientos normalizados para el diseño de mezclas con emulsiones asfálticas en frío por lo tanto según lo que expone en su bibliografía las indicaciones recomendadas buscar dar una orientación adecuada el diseño y aplicación de mezclas con emulsiones asfálticas, estos diseños se basan en métodos modificados según el Método Marshall ASTM D 6926 (2020).

Habiendo obtenido un punto de partida referencial con el contenido tentativo de emulsión se procede a preparar tres o más conjuntos de especímenes, teniendo en cuenta que en cada lote se ira variando la cantidad de emulsión añadida en +/- 1% a 0,65% , se tomara una cantidad aproximada de 1200 g de material en

seco al cual se le añadirá el porcentaje de emulsión en estudio, en caso de que tuviese que agregarse agua de mezcla se realizará directamente sobre el agregado removiendo por 10 segundos, finalmente se incorpora la emulsión y se mezclará por el intervalo de 1 minuto.

Se realiza el proceso de compactación de los especímenes, colocando papel filtro en el fondo, se procede vertiendo el material mezclado en el molde para compactación Marshall, se varilla el material con 15 golpes a los costados y 10 golpes en el centro, acto seguido colocar otro papel filtro encima, sobre un pedestal poner el molde y proceder a compactar con el martillo Marshall desde una caída de 18” aplicando la cantidad de golpes según el criterio brindado en la Tabla 9, el molde donde se encuentra el espécimen compactado se colocará en un horno a 22 °C por 72 horas, finalmente retirar el molde del horno y dejar enfriar durante dos horas antes de ser desmoldado.

Finalmente se lleva a cabo el ensayo de estabilidad Marshall según la norma ASTM D6927 (2015) , con la adición de que las muestras compactadas se colocarán en un baño de aire con una temperatura de $22,2^{\circ}\text{C}\pm 1,7^{\circ}\text{C}$, finalmente procede a la compresión de los testigos a una velocidad de 2 pulg/min, en los cuales para pavimentos de bajo a medio tráfico un valor de 2224 N o 230 kg es un valor satisfactorio.

Tabla 9

Criterio de compactación Marshall según tipo de tráfico

Criterio Marshall	Tráfico Ligero ESAL < 10⁴	Tráfico Medio 10⁴ < ESAL < 10⁶	Tráfico pesado ESAL > 10⁶
Compactación Nro. De golpes por espécimen	35	50	75

Fuente: Asphalt Institute, 2014, p. 87.

A. Diseño de mezclas cerradas.

Para el diseño de mezclas cerradas se tendrá en cuenta como recomendación las granulometrías presentadas en la Tabla 7 y/o Tabla 8 considerando el uso de emulsiones de rotura lenta o media según sean las condiciones presentes, este tipo de diseño de mezclas aplica para acopios y mezclas en el camino.

Para la selección de la emulsión según la rotura, se seleccionará una de rotura media en el caso que los agregados contengan poco fino pasante del tamiz N° 200 y para acopiar material, la emulsión de rotura lenta tendrá acción para mezclas con bastante contenido de finos y en mezclas que no están dirigidas para acopio.

Para llevar a cabo el diseño se determinará una cantidad tentativa de emulsión, el cual indica un parámetro de partida confiable a partir de la siguiente fórmula para bases según Ecuación 04:

$$\%emulsión = \frac{((0,06xA) + (0,01xB))x100}{C} \dots \dots \dots [Ecuación 04]$$

Donde:

A= % pasante en el tamiz N°4

B= % retenido en el tamiz N°4

C= % residuo asfáltico inicial

Para la cantidad tentativa de emulsión en carpetas asfálticas se determinará como indica la Ecuación 05:

$$\%emulsión = \frac{((0,07xA) + (0,03xB))x100}{C} \dots \dots \dots [Ecuación 05]$$

Donde:

A= % pasante en el tamiz N°4

B= % retenido en el tamiz N°4

C= % residuo asfáltico inicial

Asimismo Mostejo (2018) da a conocer la siguiente fórmula también para el cálculo tentativo de emulsión asfáltica, referente a la Ecuación 6:

$$E = \frac{0,43(0,05a + 0,10b + 0,5c)}{L} \dots \dots \dots [Ecuación 06]$$

Donde:

E= Emulsión a utilizar, %.

a=Material retenido en el tamiz N°10

b=Material entre tamiz N°10 y N°200

c=Material pasante tamiz N°200

L=Concentración de ligante en emulsión.

Se deberá tener muy en cuenta los ensayos de recubrimiento y adhesión para la evaluación previa del pavimento a utilizar, el ensayo de recubrimiento se estima visualmente debiendo ser mucho más exigente para carpetas de rodadura, se deberá considerar que en la preparación de mezclas en ocasiones se formará acumulación y grumos de material lo cual será solucionado con la adición de agua de pre mezcla, el ensayo de adherencia se dará por concluido cuando el ensayo de recubrimiento sea satisfactorio.

2.2.6. Método de Illinois para diseño de mezclas asfálticas en frío.

De acuerdo con Salgado y Vásquez (2019) la finalidad del método Illinois para mezclas en frío es proporcionar una cantidad de emulsión que pueda satisfacer las condiciones necesarias para otorgar la necesaria estabilidad o resistencia en determinado agregado, así como también reducir el impacto que el agua pueda tener sobre tal, teniendo en cuenta el factor económico, para lo cual se tiene en cuenta los siguientes ítems:

2.2.6.1. Aplicación del método.

El método de Illinois para el diseño de mezclas asfálticas en frío en pavimentos de bajo volumen de tráfico, lo que implica la utilización del método Marshall modificado siendo válido para materiales que presenten un tamaño de hasta de 25 mm, pudiéndose darse su utilización para mezclado en vía o planta a temperaturas ambiente.

2.2.6.2. Cantidad de residuo asfáltico estimado.

Para empezar con una primera cantidad de emulsión a dosificar se recurre a la siguiente fórmula que proporciona un estimado según los siguientes parámetros como se ve en la Ecuación 07:

$$R = 0,00138XY + 6,358 \log_{10} Z - 4,655 \dots \dots \dots [Ecuación 07]$$

Donde:

R= Contenido residual de asfalto aproximando, porcentaje del peso en seco.

X= Porcentaje de agregado retenido en la malla N°4.

Y= Porcentaje de agregado que pasa la malla N°4 y es retenido en la malla N°200.

Z= Porcentaje pasante por la malla N°200.

2.2.6.3. Ensayo en los agregados.

Los agregados a ser utilizados en el diseño de base con emulsión asfáltica deben cumplir con una serie de ensayos para garantizar la durabilidad y desempeño a lo largo del tiempo.

El ensayo granulométrico en agregados según la norma ASTM C 136 (2019a) ó ASTM D 6913 (2017c) hace referencia a la distribución del agregado por su tamaño según porcentajes pasantes de los tamices, dicho ensayo mencionado nos indicará una determinada curva que deberá estar dentro de dos husos recomendados para determinada aplicación.

También se incluye el ensayo de densidad y absorción en agregado fino y grueso especificado en las normas ASTM C127 (2015a) , ASTM C128 (2015b) ó ASTM D854 (2014b) respectivamente, métodos usados para determinar las densidades promedio de agregado que no incluyen los poros huecos en medio de sus partículas, así como su densidad relativa o gravedad específica y absorción de los materiales a ensayar.

Asimismo, el método Illinois cita la norma ASTM D2419 (2014c) referente al ensayo de Equivalente de Arena el cual es una correlación estimada bajo condiciones controladas que mide la relación entre partículas de arcilla o materiales finos que presentan plasticidad con respecto a suelos granulares o agregado fino pasante del tamiz N°4, los cuales en su estado natural están combinados con otros materiales en diferentes proporciones.

Se hace presente también el ensayo de desintegración de los agregados en sulfato de sodio o magnesio referido por la norma ASTM C88 (2018) el cual estima la descomposición de los agregados con el tiempo a través de la acción de los compuestos en los cuales son sumergidos repetidas veces, haciendo simulación con la expansión de sales residuales del ensayo a el agua cuando se congela en los poros de los agregados.

Por último el ensayo de Abrasión de los Ángeles normado por la ASTM C131 (2014a) que hace referencia al desgaste de los agregados por acción mecánica que incluye los acciones de abrasión , impacto y molienda generada por billas metálicas con características especiales que giran den un tambor a determinada velocidad con un número de revoluciones, finalmente este material sometido a

prueba es tamizado y determinado el desgaste por pérdida a través del tamiz con respecto a la cantidad de material ensayada.

A. Ensayo de recubrimiento en agregado.

Este ensayo es de importancia para la evaluación previa de emulsiones asfálticas con la finalidad de poder comprobar si se podrá combinar correctamente con el agregado cubriendo su superficie en un área aceptable, la adición de agua será un factor también importante que influirá en la combinación en especial cuando el material contiene un alto porcentaje de finos pasantes del tamiz N°200 donde la ausencia de agua podría generar grumos de asfalto, con la finalidad de evitar esto se dosifica diferentes cantidades de agua.

Se procede a obtener muestras representativas tanto del agregado y emulsión para realizar las pruebas correspondientes, se preparará el agregado secándolo al aire, lo suficiente para que pueda pasar el tamiz N°4 de forma fluida, se continua con la determinación del contenido de humedad del agregado para poder hallar su humedad natural con el procedimiento ASTM D2216 (2019c), se toma una muestra seca representativa inicial de 500 g , se procede a agregarle agua con un porcentaje inicial recomendado de 3% en emulsión catiónicas, en emulsiones aniónicas se puede proceder sin adicionar agua, acto seguido agregar la emulsión en forma de corriente delgada a fin de evitar grumos y se mezcla vigorosamente por cinco minutos, se procede al secado de esta muestra con ayuda de horno eléctrico a $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, se procederá a preparar otra muestra pero esta vez se adicionara 1 % más de agua según la preparación anterior, si las mezclas se tornan fluidas o segregadas se toman como no aceptables, calificar la muestra obtenida visualmente

observando que el área cubierta por el asfalto en el material sea superior al 50% del total de área en inspección, en caso no lograrse esto con ningún contenido de agua la emulsión será rechazada.

B. Ensayo de Adhesión.

Se procede tomando una muestra de 100 g del ensayo de recubrimiento, a continuación en un recipiente se agrega 400 ml de agua hirviendo, para seguir con la agitación de la muestra mientras esta en ebullición con un agitador por un lapso de 3 minutos realizado una agitación por segundo, se coloca la muestra sobre papel absorbente y se seca la muestra, acto seguido se hace una inspección visual en el agregado donde se observa que el agregado este cubierto de asfalto como mínimo un 60% de su área total, en caso de no cumplirse esta condición es sinónimo de que la emulsión no es compatible con el agregado y se procede realizar el cambio de líquido asfáltico según su tipo de carga aniónica o catiónica.

C. Ensayo de proctor modificado.

Para determinar una humedad óptima de compactación de los especímenes debido a que la cantidad de agua puede variar con respecto a su concentración en la emulsión, humedad de agregado o agua de mezcla, para hallar la humedad óptima se hará referencia a la norma ASTM D 1557 (2012a) que establece el procedimiento el cual consisten en un porcentaje de agua dispersa en un material que ira en incremento en los cuatro especímenes ensayados, para el cual cada muestra es compactada en 3 o 5 capas variando entre 25 o 56 golpes por cada capa según el método utilizado, un apisonador de 10 000 lb-f cayendo de una altura de 18 pulg con una aplicación de energía equivalente a 56 000 ft-lb-f/ft³ para determinar un

peso unitario, este último variará según se vayan incrementando los contenidos de humedad, finalmente se formara una curva cóncava hacia abajo, en donde su punto de inflexión máximo indicara el peso unitario máximo y la óptima humedad del material, para mayor ilustración ver Figura 10.

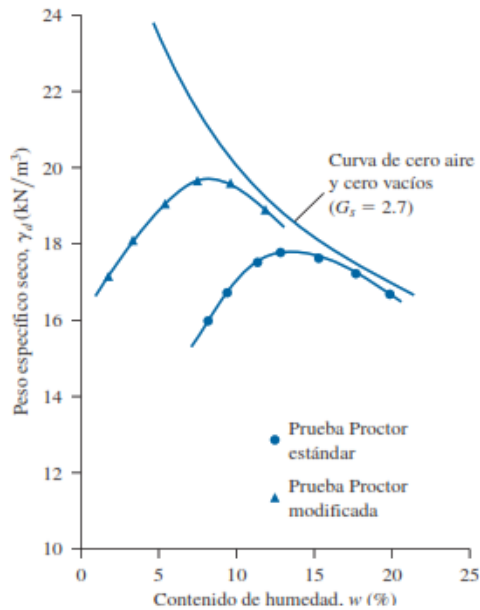


Figura 10. Determinación de la densidad máxima seca y contenido óptimo de humedad.

Fuente: Braja, 2011, p. 725.

D. Ensayo Marshall Modificado.

Una vez que se seleccionó la emulsión a utilizar se sigue con el moldeado de especímenes compactos para el ensayo de Marshall modificado el cual requiere la elaboración de seis muestras con cada aumento de emulsión de 1%, para tal fin se procede seleccionando el material seco al aire a emplear al cual se le agregará la cantidad de agua y emulsión calculadas que satisfagan los ensayos de recubrimiento y adhesión, teniendo cuidado de disolver ambas adiciones por un tiempo prudente, en caso de la emulsión no exceder cinco minutos para evitar pérdida de residuo

asfáltico en la mezcla, en caso el agua de mezcla exceda la humedad óptima de compactación se procederá a airear para obtener un peso que represente el contenido de humedad pérdida, cálculos que serán realizados con los pesos iniciales tomados como se pide a continuación en la Tabla 10:

Tabla 10

Ejemplo de dosificación de agua en mezcla asfáltica

Aporte de agua	%
% Humedad óptima de proctor	5,80 %
% Humedad agregado natural	-1,00 %
% Agua en la emulsión con respecto a la cantidad a dosificar	-2,00 %
Σ % Agua adicionar o airear	2,80 %

Para continuar con el método de compactación de la mezcla, se arma el molde Marshall con su tapa y collar de extensión, se coloca en su interior un molde de papel filtro para evitar que la mezcla se adhiera al fondo, se introduce la mezcla de aproximadamente 1200 g o puede variar y con una espátula se punza 15 veces alrededor y 10 veces al centro del molde, se coloca otro papel filtro para posteriormente proceder a la compactación con el martillo Marshall con una cantidad de golpes según el diseño, se retira la base y el collar de extensión, se invierte el molde se colocan los aditamentos y se compacta con un número igual de golpes.

Se procede con el curado de las muestras por 72 horas a una temperatura de $22,2^{\circ}\text{C} \pm 1,7^{\circ}\text{C}$, retírese las muestras de los moldes dos horas antes de ensayarse para luego tomar las alturas de las pastillas.

E. Ensayo de especímenes secos.

Para obtener los parámetros restantes del diseño y con las pastillas formadas se realiza el ensayo de gravedad específica Bulk según norma ASTM D1188 (2015d), en donde se tomará pesos de la muestra en tres momentos, cuando se encuentra sumergida en agua, cuando se extrae del agua y está en estado saturado superficialmente seco y finalmente en seco.

Acto seguido con el procedimiento de la estabilidad en flujo de las muestras compactadas, para lo cual se realiza la limpieza y engrasado de la mordaza, la temperatura de los especímenes estará entre 21,1 °C y 23,3 °C, se coloca la muestra centrada en la mordaza y dentro de la prensa Marshall, colocándose el cabezal y el medidor de flujo en cero, y se aplica la carga a una velocidad de 2 pulg/min. hasta producir la falla, se tomará nota de la carga máxima soportada y a la vez la fluencia registrada para tal evento con dos decimales como se indica en la norma citada ASTM D 6927 (2015c).

Finalmente colocar la muestra fallada en un recipiente en el cual será destrozada para ser introducida en el horno por un lapso de 24 horas a una temperatura de 110 ± 5 °C y determinar su contenido de humedad.

F. Ensayo de especímenes saturados.

Para ensayar las muestras sometidas a inmersión se procede de la siguiente forma, se desliza las muestras hasta que una de sus caras quede al ras del molde, poniéndose a inmersión solo una pulgada a partir del ras de la muestra por 48 horas tapándose el lado opuesto para evitar pérdida por evaporación, transcurrido ese

periodo se repite el mismo procedimiento deslizando la muestra hacia el lado opuesto del molde, se ensaya las muestras con el método Marshall modificado y se determina su contenido de humedad de los especímenes ensayados.

G. Interpretación de resultados.

Se verificará que la altura de especímenes compactados sea de 2,50 pulgadas o 63,50 mm caso contrario se procederá a dividir la altura actual sobre la altura promedio, y corregir los resultados obtenidos de estabilidad con los factores de la Tabla 11, se tomará promedios de estabilidad y flujo de las pruebas secas y sumergidas, descartando valores fuera de un rango común.

Tabla 11

Factores de corrección para estabilidad Marshall

Volumen del espécimen en cm³	Espesor del espécimen mm	Espesor del espécimen pulg	Correlación
341 - 353	42,90	1,69 (1 11/16)	2,08
354 - 367	44,40	1,75 (1 3/4)	1,92
368 - 379	46,00	1,81 (1 13/16)	1,79
380 - 392	47,60	1,88 (1 7/8)	1,67
393 - 405	49,20	1,94 (1 15/16)	1,56
406 - 420	50,80	2,00 (2)	1,47
421 - 431	52,40	2,06 (2 1/16)	1,39
432 - 443	54,00	2,12 (2 1/8)	1,32
444 - 456	55,60	2,19 (2 3/16)	1,25
457 - 470	57,20	2,25 (2 1/4)	1,19
471 - 482	58,70	2,31 (2 5/16)	1,14
483 - 495	60,30	2,38 (2 3/8)	1,09
496 - 508	61,90	2,44 (2 7/16)	1,04
509 - 522	63,50	2,50 (2 1/2)	1,00
523 - 535	65,10	2,56 (2 9/16)	0,96
536 - 546	66,70	2,62 (2 5/8)	0,93
547 - 559	68,30	2,60 (2 11/16)	0,89
560 - 573	69,80	2,75 (2 3/4)	0,86
574 - 585	71,40	2,81 (2 13/16)	0,83

Fuente: ASTM International, 2015c, p. 06.

Para poder interpretar resultados y elegir un diseño óptimo se realiza la gráfica de estabilidad seca y saturada vs % emulsión, densidad bulk corregida por humedad vs % emulsión, porcentaje total de vacíos vs % emulsión, porcentaje de humedad absorbida vs % emulsión, pérdida de estabilidad en porcentaje vs % emulsión, todas estas graficas se unirán por una curva suave que represente los datos presentados como se observa en la Figura 11.

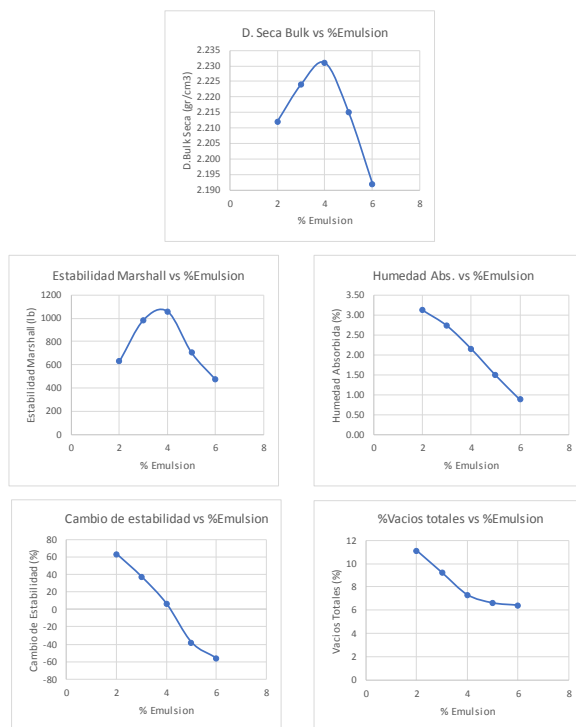


Figura 11. Gráficos comparativos de las propiedades de diseño de mezcla asfáltica.

Con la intención de realizar las gráficas de la Figura 11, según Salgado y Vásquez (2019) se tiene en consideración las Ecuaciones 08,09,10,11,12,13:

$$GSBH = \frac{D}{F - E} \dots \dots \dots [Ecuación 08]$$

$$GSBS = \frac{GSBH}{1 + \frac{CH}{100}} \dots \dots \dots [Ecuación 09]$$

$$CH = \frac{(H - I) - (F - D)}{I - J} \times \frac{1}{1 + \frac{A}{100}} \dots \dots \dots [Ecuación 10]$$

$$ABS = \frac{CH4 + CH5 + CH6}{3} - \frac{CH1 + CH2 + CH3}{3} \dots \dots \dots [Ecuación 11]$$

$$MVS = \frac{\frac{\frac{A}{100} + 1 + \frac{CH}{100}}{GSBH} - \frac{1}{C} - \frac{A}{B}}{\frac{\frac{A}{100} + 1 + \frac{CH}{100}}{BSGH}} \times 100 \dots \dots \dots [Ecuación 12]$$

$$PE = \frac{\frac{L1 + L2 + L3}{3} - \frac{L4 + L4 + L6}{3}}{\frac{L1 + L2 + L3}{3}} \dots \dots \dots [Ecuación 13]$$

Donde:

GSBH=Gravedad específica húmeda del espécimen, g/cm³.

GSBS= Gravedad específica seca del espécimen, g/cm³.

CH=Contenido de humedad del espécimen, %.

ABS= Humedad absorbida por el espécimen, %.

MVS=Máximo contenido de vacíos en el espécimen, %.

PE=Pérdida de estabilidad, %.

A=Porcentaje de asfalto residual en mezcla, %.

B=Gravedad específica del asfalto, g/cm³.

C=Gravedad específica de la combinación de agregados, g/cm³.

D=Peso en aire del espécimen, g.

E=Peso en el agua del espécimen, g.

F=Peso saturado con superficie seca del espécimen, g.

H=Peso del espécimen que ha fallado más recipiente, g.

I=Peso del espécimen fallado seco al horno más recipiente, g.

J=Peso del recipiente, g.

L=Estabilidad corregida, kg.

Para la selección de la cantidad óptima de emulsión se deberá tener en cuenta que el pavimento deberá ser resistente en condiciones humedad por tal motivo la estabilidad saturada debe ser la más adecuada, siendo la diferencia entre la estabilidad seca y húmeda no tan dispersa para disminuir su susceptibilidad a la humedad, los vacíos registrados en la mezcla deberán estar dentro de los parámetros para evitar deformación por exceso de vacíos y exudación del material asfáltico, asimismo la mezcla no deberá absorber humedad en exceso a fin de evitar la desintegración del tal, y por último la mezcla tendrá la cantidad suficiente de emulsión a forma de satisfacer el recubrimiento del agregado.

El contenido de asfalto óptimo se seleccionará de las curvas graficadas a partir de los resultados del ensayo Marshall modificado de la Figura 11, con los criterios presentados en la Tabla 12, teniendo como referencia principal la estabilidad saturada máxima que se obtuvo en el ensayo Marshall.

Tabla 12*Criterios de aceptación mínimos y máximos para mezclas de emulsión y agregado*

Propiedades de ensayo	Mínimo	Máximo
Estabilidad en lb (kg)	500 (230)	-
% Vacíos totales (sin requisitos para arena)	2	8
Pérdida de estabilidad (después de inmersión)	-	50
% Absorción de humedad (después de inmersión)	-	4
% Recubrimiento de agregado	50	-

Fuente: Salgado y Vásquez, 2019, p. 37.

2.2.7. Diseño de pavimentos flexibles por el método AASHTO -93.

Como mencionan Perez y Andagua (2015) la metodología de diseño AASHTO 1993 , proporciona las pautas y procedimiento para el diseño de pavimentos flexibles y rígidos para el cálculo del número estructural SN con el objetivo de poder dimensionar los espesores de las capas estructurales de un pavimento y procedimientos para la restauración de los mismos con distintos materiales que deberán cumplir ciertos requisitos de calidad, el diseño está basado en variables como se explica a continuación en la Ecuación 14:

$$\log_{10} W18 = Z_r S_o + 9,36 \log_{10} (SN+1) - 0,2 + \frac{\log_{10} \left(\frac{\Delta PSI}{4,2-1,5} \right)}{0,4 + \frac{1094}{(SN+1)^{5,19}}} + 2,32 \log_{10} (MR) - 8,07.. \quad [\text{Ecuación 14}]$$

Donde:

W18= Ejes equivalentes proyectados a años.

Zr=Confiabilidad.

So= Desviación Standard.

SN= Número estructural estimado.

Pi= Serviciabilidad inicial menos Serviciabilidad final.

Mr= Modulo resiliente, psi.

2.2.7.1. Tráfico.

Tal como indica Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2014) la estimación del tráfico juega un papel importante en el diseño de pavimentos, proporciona la información para las características que deberá cumplir un pavimento, las cargas que circulen por encima de él podrán representarse como cargas equivalentes de 18 kip o también llamado Equivalent Single Axe Load (ESAL) como se aprecia en la Ecuación 15.

$$ESAL = \sum IMDA \times Fd \times Fc \times Fvp \times Fp \times Fca \times 365 \dots \dots \dots [Ecuación 15]$$

Donde:

ESAL = Número de ejes equivalentes de 18 kip.

Σ = Sumatoria de ejes equivalentes de todos los vehículos contabilizados según el tipo de ejes.

IMDA = Índice Medio Diario Anual (vehículo / día)

Fd = Factor direccional.

Fc = Factor carril de diseño.

Fvpi = Factor de vehículo pesado según su composición de ejes.

Fp = Factor presión de neumáticos.

Fca = Factor de crecimiento acumulado según vehículo pesado.

365 = Días del año.

La evaluación del tráfico consiste en cuantificar diversas cargas y configuraciones de eje de vehículos para transformarlos en una sumatoria que considere Ejes Equivalente de Carga que representen el tráfico en un periodo de tiempo determinado a través de proyecciones para dicho fin se requiere calcular los siguientes datos:

Para la determinación del Índice Medio Diario Anual, como afirma Sarmiento y Arias (2015), indica que para estimar dicho valor se toma en consideración el estudio de tránsito a través de conteo de vehículos por una semana para obtener un Índice Diario Medio Semanal el cual al ser corregido por un Factor de corrección estacionario que considera posibles variaciones del tráfico por temporadas, el cual será tomado con referencia a un peaje cercano que simule el tráfico de la vía en estudio y según el tipo de vehículo.

$$IMDS = \frac{\sum V. dia}{7} \dots \dots \dots [Ecuación 16]$$

Donde:

IMDS = Índice Medio Diario Semanal.

V.día = Cantidad de vehículos por día contados por una semana de lunes a domingo.

$$IMDA = IMDS \times Fce \dots \dots \dots [Ecuación 17]$$

Donde:

IMDA = Índice Medio Diario Anual.

IMDS = Índice Medio Diario Semanal.

Fce = Factor de corrección estacional.

$$Fce = \frac{IMDa}{IMDm} \dots \dots \dots [Ecuación 18]$$

Donde:

Fce = Factor de corrección estacional.

IMDa = Volumen promedio diario anual según control de peaje.

IMDm = Volumen promedio diario, en el mes de estudio según control de peaje.

Como considera Perez y Andagua (2015) factor direccional a la cantidad de vehículos de circulan en una sola dirección, su valor fluctúa en el 0,50 indicando que cada mitad del tráfico total se desplaza en ambas direcciones, o pudiendo tomar valores de 0,30 a 0,70 según la dirección en que más circulen los vehículos, como indica en la Tabla 13.

Asimismo, el factor de distribución por carril tiene efecto cuando se presentan vías con dos o más carriles en una sola dirección, este valor describe el

porcentaje de uso promedio del carril de diseño seleccionado dado que la cantidad de vehículos que circulan por un determinado carril puede variar, según Tabla 13.

Tabla 13

Factor direccional y factor carril para diseño de pavimentos

Nro Calzadas	Número de sentidos	Número de carriles por sentido	Factor Direccional (Fd)	Factor Carril (Fc)	Factor Ponderado Fd x Fc
1 calzada IMDa total de calzada	1 sentido	1	1,00	1,00	1,00
	1 sentido	2	1,00	0,80	0,80
	1 sentido	3	1,00	0,60	0,60
	1 sentido	4	1,00	0,50	0,50
	2 sentidos	1	0,50	1,00	0,50
	2 sentidos	2	0,50	0,80	0,40
2 calzadas con separador central	2 sentidos	1	0,50	1,00	0,50
	2 sentidos	2	0,50	0,80	0,40
	2 sentidos	3	0,50	0,60	0,30
	2 sentidos	4	0,50	0,50	0,25

Fuente: Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2014, p.64.

El factor de vehículo pesado o factor camión como refiere Ccasani y Ferro (2017) describe el daño que ocasiona un vehículo según su cantidad y peso de ejes que se le atribuya, la Ecuación 19 estima el daño que produce una determinada combinación de ejes la cual tiene otros componentes que son calculados en la Ecuación 20, Ecuación 21 y Ecuación 22, el factor obtenido se interpreta como la cantidad de daño que causaría comparado con respecto a un eje simple 8,20 ton o 18 kip, se identifican tres composiciones de ejes por un lado se tiene el eje simple el cual no conforma un conjunto de ejes cuando la distancia entre su centro y centro de otro más cercano es mayor a 2,40 m , eje doble es el conjunto de dos ejes los cuales tienen una distancia entre centros mayor a 1,20 m y menos de 2,40 m , y por último los ejes triples formados por tres ejes los cuales tendrán una distancia entre

centro de ruedas externas superior a 2,40 m y menor a 3,60 m, para comprender mejor este concepto observar la Tabla 14 y Tabla 15.

$$Fi = \frac{1}{10^{4,79 \times \log(18+1) - 4,79 \times \log(Lx+L2) + 4,33 \times \log(L2) + \frac{Gt}{Bx} - \frac{Gt}{B18}}} \dots \dots \dots [Ecuación 19]$$

$$Gt = \log\left(\frac{4,20 - pt}{4,20 - 2,50}\right) \dots \dots \dots [Ecuación 20]$$

$$Bx = 0,40 + \frac{0,08x(Lx + L2)^{3,23}}{(SN + 1)^{5,19} \times L2^{3,23}} \dots \dots \dots [Ecuación 21]$$

$$B18 = 0,40 + \frac{0,08x(18 + 1)^{3,23}}{(SN + 1)^{5,19}} \dots \dots \dots [Ecuación 22]$$

Donde:

Fi = Factor de daño que produce determinada configuración de eje.

Lx = Peso del eje en unidades kip.

L2 = Factor según tipo de eje, 1 para ejes simples, 2 para ejes tándem, 3 para ejes trídem.

pt = Serviciabilidad final del pavimento.

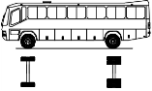
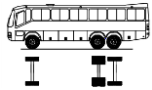



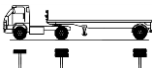
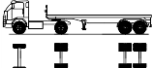
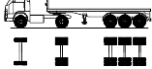


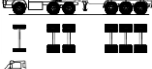
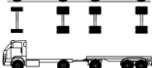

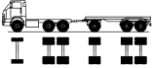
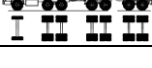

SN = Número estructural estimando del pavimento.

Bx= Factor que depende de peso de eje, tipo de eje y número estructural.

B18= Factor que depende del número estructural.

Tabla 14

Pesos de ejes según tipo de vehículos

Configuración vehicular	Gráfico	Long, Máxima (m)	Peso Máximo en toneladas					Peso Bruto máx.
			Eje delantero	Grupo de ejes posteriores				
				1°	2°	3°	4°	
B2		13,20	7	11	-	-	-	18
B3-1		14,00	7	16	-	-	-	23
C2		12,30	7	11	-	-	-	18
C3		13,20	7	18	-	-	-	25
C4		13,20	7	23	-	-	-	30
T2S1		20,50	7	11	11	-	-	29
T2S2		20,50	7	11	18	-	-	36
T2S3		20,50	7	11	25	-	-	43
T3S1		20,50	7	18	11	-	-	36
T3S2		20,50	7	18	18	-	-	43
T3S3		20,50	7	18	25	-	-	48
C2R2		23	7	11	11	11	-	40
C2R3		23	7	11	11	18	-	47
C3R2		23	7	18	11	11	-	47
C3R3		23	7	18	11	18	-	45
C3R4		23	7	18	18	18	-	48

Fuente: Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2021, p. 83.

El factor de presión de neumático ó Fp, para determinar este valor usaremos la Tabla 16, esta es una variable que toma el efecto de la presión de inflado de las llantas de los vehículos pesados identificados, dichas presiones son afectadas por un valor de 0,90 que determinará la presión de contacto de neumático (PCN) con el pavimento al ser intersecado con el espesor de carpeta asfáltica determinada tal factor Fp siendo este un valor igual o mayor que uno.

Tabla 16

Factor de presión de inflado para pavimentos flexibles

Espesor de capa de rodadura	Presión de contacto de neumático en psi (PCN) PCN = 0,90 x Presión real de neumático en psi						
	80	90	100	110	120	130	140
50	1,00	1,36	1,80	2,31	2,91	3,59	4,37
60	1,00	1,33	1,72	2,18	2,69	2,99	3,53
70	1,00	1,30	1,65	2,05	2,49	2,99	3,53
80	1,00	1,28	1,59	1,94	2,32	2,74	3,20
90	1,00	1,25	1,53	1,84	2,17	2,52	2,91
100	1,00	1,23	1,48	1,75	2,04	2,35	2,68
110	1,00	1,21	1,43	1,66	1,91	2,17	2,44
120	1,00	1,19	1,38	1,59	1,80	2,02	2,25
130	1,00	1,17	1,34	1,52	1,70	1,89	2,09
140	1,00	1,15	1,30	1,46	1,62	1,78	1,94
150	1,00	1,13	1,26	1,39	1,52	1,66	1,79
160	1,00	1,12	1,24	1,36	1,47	1,59	1,71
170	1,00	1,11	1,21	1,31	1,41	1,51	1,61
180	1,00	1,09	1,18	1,27	1,36	1,45	1,53
190	1,00	1,08	1,16	1,24	1,31	1,39	1,46
200	1,00	1,08	1,15	1,22	1,28	1,35	1,41

Fuente: Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2014 , p. 85.

Para la proyección del tráfico se tiene en cuenta el factor de crecimiento acumulado el cual mide la variación que podría sufrir el tráfico para el periodo de diseño para el cual se está proyectando, cabe destacar que este factor será distinto

para cada tipo de vehículo en cuestión, la tasa de crecimiento podrá ser estimada según registros de crecimiento de tránsito o datos poblacionales, para su cálculo recurriremos a la Ecuación 23.

$$Fca = \frac{(1 + r)^n - 1}{r} \dots \dots \dots [Ecuación 23]$$

Donde:

Fca = Factor de crecimiento acumulado

r = Tasa de crecimiento con referencia al tipo de vehículo.

n = Periodo de diseño estimado de la estructura en años.

Para definir un periodo de diseño adecuado se hace referencia a las recomendaciones del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2014) que recomienda un periodo de diseño para pavimentos flexibles de 10 años para caminos de bajo tránsito, dos periodos de diseño de 10 años y un periodo de 20 años, asimismo AASHTO hace informa sobre un periodo de análisis el cual establece la cantidad de años en que el pavimento puede ser cubierto por diferentes estrategias de diseño, dichos valores se representan en la Tabla 17 , el periodo de diseño deberá ser ajustado según las condiciones del proyecto .

Tabla 17

Periodos de análisis según AASHTO 93

Clasificación de vía	Periodo de análisis en años
Urbana de alto volumen de transito	30 - 50
Rural de alto volumen de transito	20 - 50
Pavimentada de bajo volumen de transito	15 - 25
No pavimentada de bajo volumen de transito	10 - 20

Fuente: Perez y Andagua, 2015, p.86.

2.2.7.2. Módulo resiliente.

El módulo resiliente de acuerdo con Montealegre (2014) es un parámetro que describe el comportamiento de un material bajo cargas dinámicas repetitivas, como respuesta a este ciclo el material tiende a conservar una deformación permanente no recuperable denominada “deformación plástica”, y la deformación recuperable se denomina “deformación resiliente”, a partir de muestras cilíndricas moldeadas confinadas en una cámara para ejercer esfuerzos triaxiales de distinta magnitud y duración, registrando las deformaciones producidas para hallar el módulo resiliente, el procedimiento para el cálculo de módulo resiliente se encuentra especificado en Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2016).

Se recomienda que el estudio del módulo resiliente durante toda la estaciones del año debido a que los factores climáticos pueden influir en la variación de este parámetro dando valores bajos en temporadas donde existe presencia de heladas y altos contenidos de humedad en suelo, finalmente se calcula un factor de daño uf ponderado promedio de todas los meses evaluados durante el año, acto seguido se procede a buscar el uf calculado como se describe en la Ecuación 24 para seleccionar el módulo resiliente en la escala presentada en la Figura 12.

Mes	Módulo Resiliente Suelo M_R (psi)	Daño Relativo U_f
Enero		
Febrero		
Marzo		
Abril		
Mayo		
Junio		
Julio		
Agosto		
Septiembre		
Octubre		
Noviembre		
Diciembre		
Sumatoria: $\Sigma U_f =$		

Promedio: $\bar{U}_f = \frac{\Sigma U_f}{n} = \text{-----}$

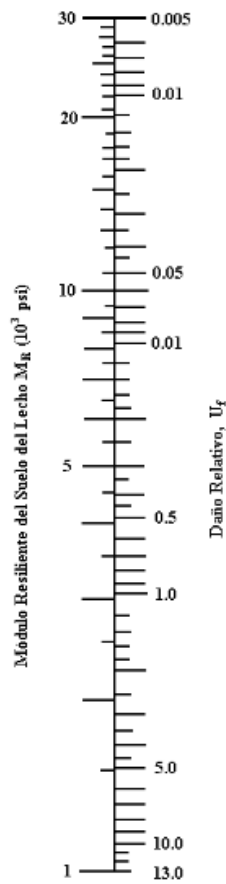


Figura 12. Abaco para determinación de daño relativo.

Fuente: Montealegre, 2014, p.12.

Para el cálculo del daño relativo en cada estación del año se tiene la siguiente

Ecuación 24:

$$uf = 1,18 \times 10^8 \times Mr^{-2,32} \dots \dots \dots [Ecuación 24]$$

Donde:

U_f = Factor de daño

M_r = Módulo Resiliente (psi)

Desde el punto de vista económico y de importancia de la vía realizar el estudio de módulo resiliente a lo largo de un año puede resultar no viable para proyectos pequeños, por este motivo es que tomando como referencia del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2014) en el Manual de carreteras, suelos, geología y pavimentos es que se podría obtener el módulo resiliente a partir del %CBR del material a evaluar con la siguiente Ecuación 25:

$$Mr = 2555 \times CBR^{0,64} \dots \dots \dots [Ecuación 25]$$

Donde:

Mr = Módulo resiliente (psi).

CBR = Valor de soporte de California (%).

2.2.7.3. Confiabilidad.

Por lo que argumenta Ccasani y Ferro (2017) uno de los parámetros para la determinación de las capas de un pavimento es la confiabilidad, que determina la probabilidad para que la estructura cumpla con los requisitos de resistencia al daño generado por el tráfico proyectado que actuara sobre tal y la exposición medio ambiental durante el periodo para el cual fue diseñado, en un rango de 50% y 50% para ambos escenarios, actuando como un factor de seguridad junto con la desviación estándar S_o , se presentan sus valores en la Tabla 18 y Tabla 19.

Tabla 18*Confiabilidad recomendada según la importancia de la vía*

Tipo de Camino	Confiabilidad recomendada	
	Zona Urbana	Zona Rural
Rutas interestatales y autopistas	85 – 99,90	80 – 99,9
Arterias Principales	80 – 99,00	75 - 99
Colectoras	80 – 95	75 - 95
Locales	50 - 80	50 - 80

Fuente: Ccasani y Ferro, 2017, p.94.

Tabla 19*Valores de desviación estándar para una confiabilidad R (%)*

Tipo de caminos	Tráfico	Ejes equivalentes acumulados		Nivel de confiabilidad (R)	Desviación estándar normal (Zr)
Caminos de Bajo Volumen de Tránsito	TP0	100000	150000	65%	-0,385
Caminos de Bajo Volumen de Tránsito	TP1	150001	300000	70%	-0,524
Caminos de Bajo Volumen de Tránsito	TP2	300001	500000	75%	-0,674
Caminos de Bajo Volumen de Tránsito	TP3	500001	750000	80%	-0,842
Caminos de Bajo Volumen de Tránsito	TP4	750001	1000000	80%	-0,842
Resto de Caminos	TP5	1000001	1500000	85%	-1,036
Resto de Caminos	TP6	1500001	3000000	85%	-1,036
Resto de Caminos	TP7	3000001	5000000	85%	-1,036
Resto de Caminos	TP8	5000001	7500000	90%	-1,282
Resto de Caminos	TP9	7500001	10000000	90%	-1,282
Resto de Caminos	TP10	10000001	12500000	90%	-1,282
Resto de Caminos	TP11	12500001	15000000	90%	-1,282
Resto de Caminos	TP12	15000001	20000000	95%	-1,645
Resto de Caminos	TP13	20000001	25000000	95%	-1,645
Resto de Caminos	TP14	25000001	30000000	95%	-1,645
Resto de Caminos	TP15	>30000000		95%	-1,645

Fuente: Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2014, p.133.

2.2.7.4. Desviación standard.

Tal cual afirma Ccasani y Ferro (2017) este parámetro indica un desvío de datos presentes con respecto al valor promedio de un conjunto de valores, en cuanto menor sea la desviación estándar los valores estarán más próximos al valor

promedio , en el diseño de pavimentos existe variabilidad con respecto al proceso constructivo y materiales debido a que el control de calidad puede no ser el adecuado por causa de muchos factores, lo que podría originaria daños no previstos como fisuras, rugosidades, agrietamientos y un comportamiento inferior al estimado en el diseño lo que provoca disminución de su vida útil, según las pruebas realizadas en la carretera experimental AASHO Road Test se determinó valores a partir de análisis de varianza y en base a predicciones futuras de tránsito los siguientes valores de desviación standard (So), para mayor referencia ver la Tabla 20.

Tabla 20

Valores de desviación estándar recomendados por AASHTO -93

Condición de diseño	Desviación Estándar (So) en Pavimentos Flexibles
Cuando la varianza de tráfico futuro proyectado es considerada.	0,49
Cuando la varianza de tráfico futuro proyectado no es considerada.	0,44
Rango de Valores (So) recomendados por AASHTO.	0,40 – 0,50

Fuente: Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2014 , p.157.

2.2.7.5. Serviciabilidad.

La serviciabilidad o índice de serviciabilidad como indica Ccasani y Ferro (2017) en concordancia con la Ecuación 26, es un concepto que se encuentra basado en la percepción, confort y calidad de la transitabilidad que el usuario pueda experimentar en el uso de la vía, este valor se encuentra cuantificado en términos de Índice de Serviciabilidad Actual (PSI) pudiendo ser medido a través de cálculos

a partir de la rugosidad y daños presentes en el pavimento en una escala del cero a cinco donde, cero representa una baja serviciabilidad y cinco óptimas condiciones de serviciabilidad, para proceder con el diseño se debe seleccionar una condición de servicio inicial y una final, estos parámetros están reflejados en la Tabla 21 y Tabla 22.

Una serviciabilidad inicial (p_i) de un pavimento recién construido, según la carretera experimental AASHO considera un valor de 4,20 para pavimentos flexibles y 4,50 en rígidos.

La serviciabilidad final (p_t) es el mínimo al que puede llegar una carretera antes de ser rehabilitada o reconstruida, se recomienda valores entre 2,50 a 3,00 para vías principales, 2,00 para una categorización menor, pudiendo tomarse valores más bajos de 1,50 en caso de que las condiciones económicas limiten a costos iniciales bajos.

$$\Delta PSI = p_i - p_t \dots \dots \dots [Ecuación 26]$$

Donde:

ΔPSI = Índice de Serviciabilidad Actual.

p_i = Serviciabilidad inicial.

p_t = Serviciabilidad final.

Tabla 21*Índices de serviciabilidad y su calificación*

Índice de serviciabilidad (PSI)	Calificación
5 - 4	Muy Buena
4 - 3	Buena
3 - 2	Regular
2 - 1	Mala
1 - 0	Muy Mala

Fuente: Perez y Andagua, 2015, p.91.

Tabla 22*Índices de serviciabilidad inicial y final para pavimentos flexibles*

Tipo de caminos	Tráfico	Ejes equivalentes acumulados		Índice de serviciabilidad inicial (pi)	Índice de serviciabilidad final (pt)
Caminos de Bajo Volumen de Tránsito	TP1	150001	300000	3,80	2,00
Caminos de Bajo Volumen de Tránsito	TP2	300001	500000	3,80	2,00
Caminos de Bajo Volumen de Tránsito	TP3	500001	750000	3,80	2,00
Caminos de Bajo Volumen de Tránsito	TP4	750001	1000000	3,80	2,00
Resto de Caminos	TP5	1000001	1500000	4,00	2,50
Resto de Caminos	TP6	1500001	3000000	4,00	2,50
Resto de Caminos	TP7	3000001	5000000	4,00	2,50
Resto de Caminos	TP8	5000001	7500000	4,00	2,50
Resto de Caminos	TP9	7500001	10000000	4,00	2,50
Resto de Caminos	TP10	10000001	12500000	4,00	2,50
Resto de Caminos	TP11	12500001	15000000	4,00	2,50
Resto de Caminos	TP12	15000001	20000000	4,20	3,00
Resto de Caminos	TP13	20000001	25000000	4,20	3,00
Resto de Caminos	TP14	25000001	30000000	4,20	3,00
Resto de Caminos	TP15	>30000000		4,20	3,00

Fuente: Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2014 , p.137.

2.2.7.6. Coeficiente de drenaje.

Tal como menciona Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2014) uno de los mayores problemas que se enfrenta en la construcción de pavimentos es la presencia de agua, pudiendo ser perjudicial para las capas que conforman el paquete estructural del pavimento, llegando incluso a reducir su módulo de resiliencia en un 50% en los materiales granulares que lo integran, dicho esto se traduciría en una pérdida de serviciabilidad del pavimento en el tiempo, para dar solución a tal problema se realizó experimentos en la carretera experimental AASHO, con el fin de considerar en la ecuación efectos de drenaje en el pavimento, como referencia se propuso valores para un coeficiente de drenaje (m) , para lo cual se clasifica la calidad de drenaje según Tabla 23 y coeficiente de drenaje en la Tabla 24.

Tabla 23

Calidad de drenaje según tiempo de evacuación del agua

Calidad de drenaje	Tiempo que demora el agua en evacuar
Excelente	2 horas
Bueno	1 día
Regular	1 semana
Pobre	1 mes
Muy Pobre	Agua no drena

Fuente: Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2014 , p. 142.

Tabla 24

Coefficientes de drenaje según tiempo de evacuación y exposición al agua

Calidad de drenaje	% tiempo en el que el pavimento está expuesto a niveles de humedad próximos a la saturación.			
	< 1 %	1 – 5 %	5 – 25 %	> 25 %
Excelente	1,40 – 1,35	1,35 – 1,30	1,30 -1,20	1,20
Bueno	1,35 – 1,25	1,25 – 1,35	1,15 – 1,00	1,00
Regular	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: Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2014, p. 142.

2.2.7.7. Determinación del número estructural SN.

Obtenidos los parámetros de diseño, como indica Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2014) se calcula un número estructural SN requerido, el cual deberá ser satisfecho con una combinación de variables como coeficientes estructurales según la Tabla 25 y Tabla 26, coeficientes de drenaje según Tabla 24 y espesores de materiales seleccionados, dicha combinación se representa habitualmente de la siguiente forma en la Ecuación 27:

$$SN = a_1 D_1 + a_2 m_2 D_2 + a_3 m_3 D_3 \dots \dots \dots [Ecuación 27]$$

Donde:

SN= Número estructural requerido

a= Coeficiente estructural

m= Coeficiente de drenaje

D= Espesor de capa (cm)

Tabla 25*Coefficientes estructurales para capa superficial de pavimento*

Capa superficial	Coefficiente	Valor coeficiente estructural a (cm)	Observación
Carpeta Asfáltica en Caliente, módulo 2,965 MPa (430,000 PSI) a 20 °C (68 °F)	a1	0,170 / cm	Capa Superficial recomendada para todos los tipos de Tráfico
Carpeta Asfáltica en Frío, mezcla asfáltica con emulsión.	a1	0,125 / cm	Capa Superficial recomendada para Tráfico $\leq 1'000,000$ EE
Micropavimento 25mm	a1	0,130 / cm	Capa Superficial recomendada para Tráfico $\leq 1'000,000$ EE Capa Superficial recomendada para Tráfico $\leq 500,000$ EE.
Tratamiento Superficial Bicapa.	a1	0,250 (*)	No Aplica en tramos con pendiente mayor a 8%; y, en vías con curvas pronunciadas, curvas de volteo, curvas y contracurvas, y en tramos que obliguen al frenado de vehículos
Lechada asfáltica (slurry seal) de 12mm.	a1	0,150 (*)	Capa Superficial recomendada para Tráfico $\leq 500,000$ EE No Aplica en tramos con pendiente mayor a 8% y en tramos que obliguen al frenado de vehículos
(*) Valor Global (no se considera el espesor)			

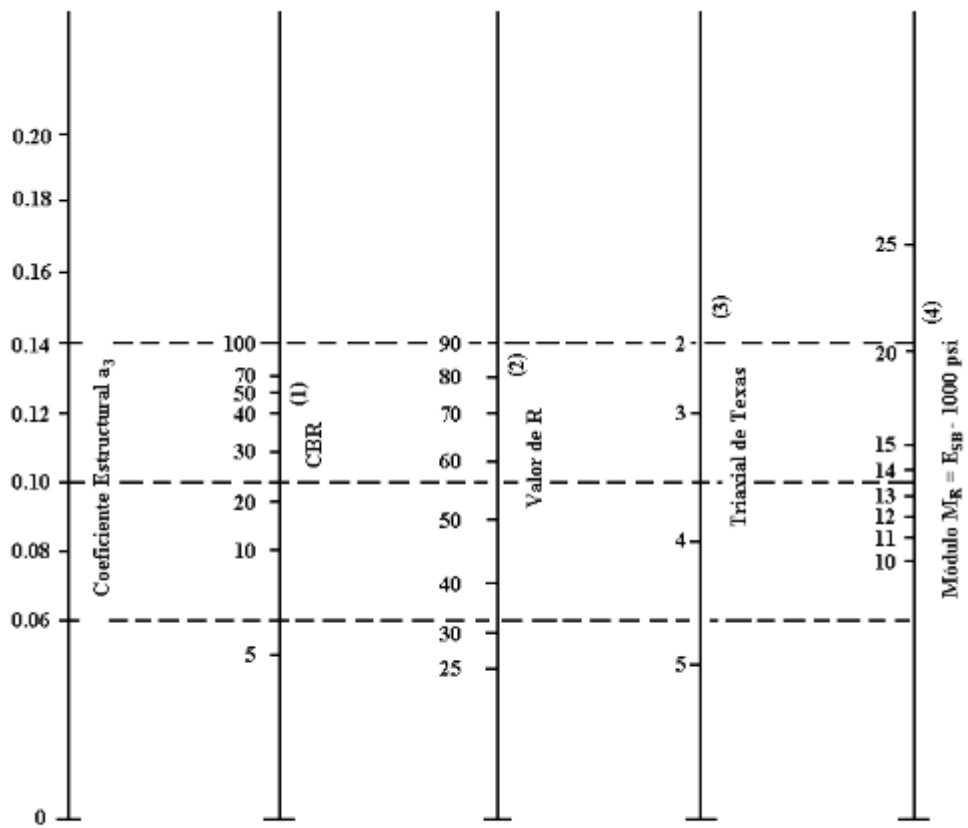
Fuente: Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2014 , p. 162.

Tabla 26*Coefficientes estructurales para capa base y sub base de pavimento*

Capa superficial	Coefficiente	Valor coeficiente estructural a (cm)	Observación
Base Granular CBR 80%, compactada al 100% de la MDS	a2	0,052 / cm	Capa de Base recomendada para Tráfico $\leq 5'000,000$ EE
Base Granular CBR 100%, compactada al 100% de la MDS	a2	0,054 / cm	Capa de Base recomendada para Tráfico $> 5'000,000$ EE
Base Granular Tratada con Asfalto (Estabilidad Marshall = 1500 lb)	a2	0,115 / cm	Capa de Base recomendada para todos los tipos de Tráfico
Base Granular Tratada con Cemento (resistencia a la compresión 7 días = 35 kg/cm ²)	a2	0,070 cm	Capa de Base recomendada para todos los tipos de Tráfico
Base Granular Tratada con Cal (resistencia a la compresión 7 días = 12 kg/cm ²)	a2	0,080 cm	Capa de Base recomendada para todos los tipos de Tráfico
Sub Base Granular CBR 40%, compactada al 100% de la MDS	a3	0,047 / cm	Capa de Sub Base recomendada para Tráfico $\leq 15'000,000$ EE
Sub Base Granular CBR 60%, compactada al 100% de la MDS	a3	0,050 / cm	Capa de Sub Base recomendada para Tráfico $> 15'000,000$ EE

Fuente: Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2014, p. 162.

Asimismo de acuerdo Sánchez y Shoji (2020) se puede obtener coeficientes estructurales más precisos según las características mecánicas que presenten los materiales evaluados, para lo cual se presenta la Figura 13 y Figura 14 en donde se podrán obtener coeficientes en base al valor CBR, Módulo resiliente o Estabilidad Marshall.



- (1) Escala derivada por correlaciones promedios obtenidas de Illinois.
- (2) Escala derivada por correlaciones promedios obtenidas de California, Nuevo Mexico y Wyoming.
- (3) Escala derivada por correlaciones promedios obtenidas de Texas.
- (4) Escala derivada del proyecto NCHRP (3)

Figura 13. Coeficientes estructurales para sub bases granulares.

Fuente: Sánchez y Shoji, 2020, p. 78.

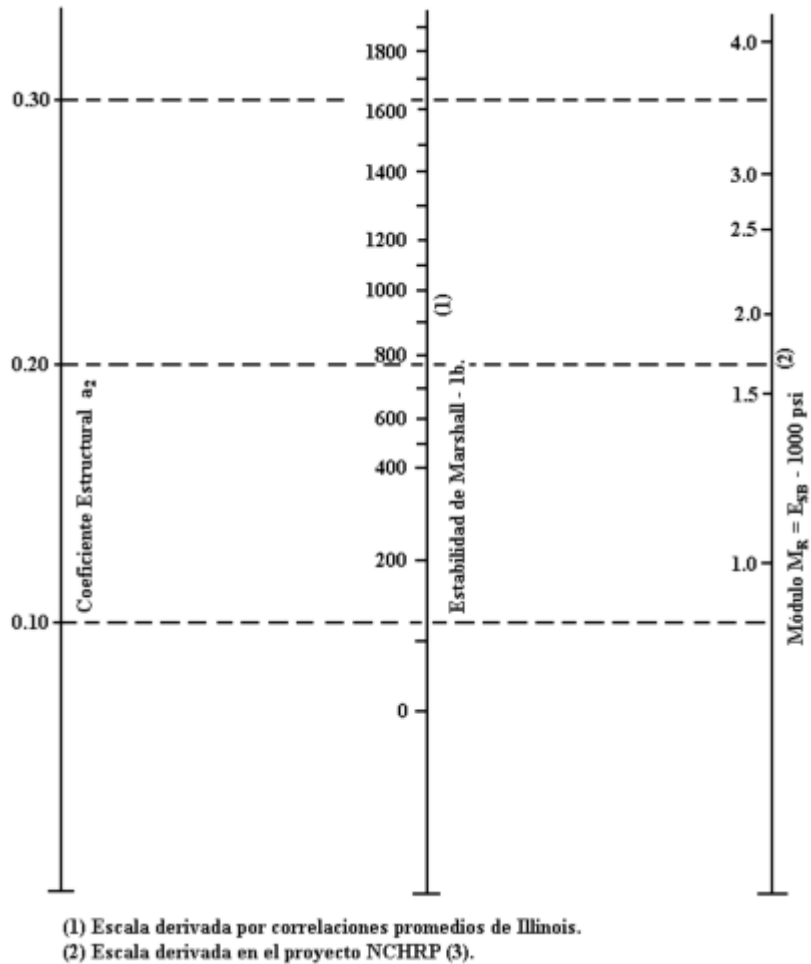


Figura 14. Coeficientes estructurales para bases estabilizadas con asfalto.

Fuente: Sánchez y Shoji, 2020, p. 77.

2.2.8. Proceso constructivo de pavimento estabilizado con emulsión asfáltica CSS-1h.

La construcción del pavimento se lleva a cabo teniendo en cuenta las especificaciones entregadas en el expediente técnico del proyecto en Los Palos - Tacna según Provias Descentralizado (2019), según este documento se describe el proceso empleado para la ejecución del pavimento como se describirá a continuación:

2.2.8.1. Sub rasante.

La sub rasante es la primera capa en donde se apoyará el paquete estructural del pavimento por tal motivo es importante hacer hincapié en identificar sus características para definir su utilidad o poder sugerir su mejoramiento, para tal finalidad se requiere de los ensayos de granulometría, límites de Atterberg, CBR, y perfil estratigráfico del suelo en el que se fundara el pavimento.

Aceptada la sub rasante considerando que es sin ningún tipo de mejora, se procede con el escarificado con tractores oruga o escarificadores a lo largo y ancho de la superficie que ocupara el pavimento con la intención de ablandar el terreno, para proceder a dosificar agua y homogeneizar su superficie, se medirá el contenido de agua con la finalidad de realizar el proceso de compactación con una humedad cercana de más o menos dos por ciento de agua al óptimo contenido de humedad determinado por el ensayo de proctor, en caso exista un exceso de agua en la sub rasante se procederá con a realizar el aireado que consiste en remover el material de un lado a otro con la intención de reducir la humedad en tal.

Finalmente, se procede a la compactación que se realizará con un rodillo compactador de pata de cabra o rodillo vibratorio que dependerá del material en el que se usará, se realiza el ensayo de cono de arena para poder estimar el grado de compactación alcanzado el cual está estipulado en las especificaciones técnicas del proyecto, así también se realiza un control topográfico para controlar los espesores, pendientes, cortes y rellenos, para mayor detalle ver las Figura 15 y Figura 16.



Figura 15. Compactación de la sub rasante.



Figura 16. Nivelación topográfica en sub rasante.

2.2.8.2. Sub base granular.

La sub base granular se conforma encima de la sub rasante que una vez liberada se procede con el depósito de agregado clasificado para sub base el cual debió haber cumplido con los requisitos necesarios para tal fin ordenado en montones a lo largo de la proyección del pavimento, para luego ser esparcido con una motoniveladora, lo que se aprecia en la Figura 17 y Figura 18.



Figura 17. Colocación en pista del material de sub base.



Figura 18. Esparcido del material de sub base con motoniveladora.

Se procede con el humedecido del material esparcido con una cantidad de agua lo suficiente para poder alcanzar el porcentaje de humedad óptimo para compactación en caso de sobrepasar este límite se aireara el material para poder reducir su humedad, conseguido tal objetivo se procede a la compactación de tal con un rodillo vibratorio, hasta alcanzar un grado de compactación del 100% según especificaciones técnicas del proyecto, que será medido con el ensayo de cono de arena, asimismo interviene el control topográfico para asegurar que el la altura de la capa construida cumpla con las alturas solicitadas, estos procedimientos se pueden ver en la Figura 19 y Figura 20.



Figura 19. Humedecido del material para sub base granular.



Figura 20. Compactación del material de sub base.

A. Controles de calidad para sub base.

Para caracterizar y aceptar el material que se utilizara para su construcción se procede al cumplimiento de los siguientes parámetros mínimos dados por Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2013) que son mencionados en las Tablas 27 y 28 como se presenta a continuación:

Tabla 27*Requisitos granulométricos para sub bases granulares*

Tamiz	Porcentaje que pasa en peso			
	Gradación A	Gradación B	Gradación C	Gradación D
2"	100	100	-	-
1"	-	75-95	100	100
3/8"	30-65	40-75	50-85	60-100
N°4	25-55	30-60	35-65	50-85
N°10	15-40	20-45	25-50	40-70
N°40	8-20	15-30	15-30	25-45
N°200	2-8	5-15	5-15	8-15

Fuente: Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2013, p.360.

Tabla 28*Requisitos de ensayos para sub bases granulares*

Ensayo	Norma	Requerimiento	
		< 3000 msnm	≥ 3000 msnm
Abrasión de los ángeles	ASTM C 131	50% máx.	50% máx.
CBR	ASTM D 1883	40% mín.	40% mín.
Límite Líquido	ASTM D 4318	25% máx.	25% máx.
Índice de Plasticidad	ASTM D 4318	6% máx.	4% máx.
Equivalente de arena	ASTM D 2419	25% mín.	25% mín.
Sales solubles	-	1% máx.	1% máx.
Partículas chatas y alargadas	ASTM D 4791	20% máx.	20% máx.
Densidad in situ	ASTM D 1556	Según Especificaciones Técnicas	
Proctor	ASTM D 1557	Según Especificaciones Técnicas	

Fuente: Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2013, p.360.

2.2.8.3. Base estabilizada con emulsión asfáltica.

Para la mezcla de la base estabilizada con emulsión asfáltica similar a otro tipos de mezclas bituminosas se hace mención con respecto a Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2013) en la cual se establece como referencia el proceso constructivo el cual inicia con la determinación del lugar de preparación de la mezcla que puede ser in situ o en un campo de preparación los cuales deberán cumplir con la regularidad de superficie y limpieza como se observa en la Figura 21, los agregados pétreos provenientes de cantera son depositados en volúmenes controlados y en caso de material propio se escarificara previamente a una profundidad establecida propiciando su desintegración.



Figura 21. Depósito de material para preparación de base estabilizada.

Se tendrá en cuenta la humedad natural del agregado para luego proceder a la adición de agua para su humedecimiento con la finalidad cumplir con el grado de recubrimiento deseado, tras un lapso que permita la dispersión del agua en el material se procederá con la adición de emulsión asfáltica en las proporciones según el previo diseño, se tendrá el debido cuidado de no exceder la humedad óptima de compactación y si se presentase el caso de ser así se procederá al aireado de la mezcla hasta obtener la humedad deseada, ver Figura 22 y Figura 23.



Figura 22. Humedecimiento del material para conformación de base estabilizada.



Figura 23. Adición de emulsión asfáltica CSS-1h y batido con el material humedecido.

A consideración se debe tener en cuenta el clima debido a que influirá en la evaporación del agua de la mezcla pudiéndose obtener niveles bajos de humedad no previstos durante el tiempo que demore su colocación y compactado, de igual que en capas anteriores se lleva a cabo un control topográfico para el control de alturas de capas, procedimientos que pueden ser percibidos en la Figura 24.



Figura 24. Esparcido y compactado de base estabilizada con emulsión asfáltica en pista.

A. Controles de calidad para base estabilizada con emulsión asfáltica.

Para caracterizar y aceptar el material que se utilizará para su construcción se procede con referencia de los siguientes parámetros mínimos dados en el expediente técnico del proyecto que son mencionados en la Tabla 29 como se presenta a continuación:

Tabla 29

Requisitos de ensayos para bases estabilizadas con emulsión asfáltica

Ensayo	Norma	Requerimiento
Contenido de asfalto residual	ASTM D 2172	Según Especificaciones Técnicas
Granulometría	AASHTO T30	Según Especificaciones Técnicas
Marshall	ASTM D 6927	Min. 230 kg
Deflexión con Viga Benkelman	D 4695	Según Especificaciones Técnicas
Rugosidad	D 867	Según Especificaciones Técnicas
Densidad in situ	D 1556	Según Especificaciones Técnicas
Proctor	D 1557	Según Especificaciones Técnicas

Fuente: Provias Descentralizado, 2019, p. 09.

2.2.8.4. Mortero asfáltico, Lechada asfáltica o Slurry seal.

Tal como señala el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2013) en su normativa referente a especificaciones generales en carreteras, la finalidad de un motero asfáltico o slurry seal es otorgar un sellado, resistencia al desgaste y extensión de la vida útil del pavimento a través de la colocación de un conglomerado de arena emulsión agua y filler mineral.

Dicho procedimiento se realizó acopiando el agregado mineral para su preparación en una zona libre de material vegetal u orgánico, previa verificación de controles de calidad del agregado, se debe tener lista la emulsión, agua y filler mineral todos con sus ensayos respectivos para aprobación y uso.

Previo a la colocación del slurry seal se realiza un riego de liga que consiste en la aplicación de una película adherente que hará de puente entre la base estabilizada y el mortero asfáltico, para que la aplicación sea exitosa se deberá procurar que la superficie de contacto este limpia sin ningún tipo de polvo, materia orgánica o impureza, procedimiento que se observa en la Figura 25.



Figura 25. Riego de liga para colocación de mortero asfáltico.

Como menciona Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2013) para la preparación y puesta en pista del mortero asfáltico se hace uso de una mezcladora de flujo continuo como se ve en la Figura 26, que carga en su interior todos los materiales que conforman la mezcla y que es abastecido periódicamente a medida que se lleva a cabo la aplicación de la mezcla, la superficie de contacto deberá estar libre de impurezas, se deberá calibrar correctamente la dosificación de la maquina en un tramo de prueba inicial para asegurar que la mezcla es correcta y cumple con

los parámetros establecidos en el diseño del mortero asfáltico, el resultado final se aprecia en la Figura 27.



Figura 26. Aplicación y calibración de mezcladora para mortero asfáltico en tramo de prueba.



Figura 27. Aplicación final de mortero asfáltico en pista.

A. Controles de calidad en mortero asfáltico.

Para aceptar el material que se utilizara para la ejecución del mortero asfáltico se procede con referencia de los siguientes parámetros mínimos dados por Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2013) que son mencionados en la Tabla 30 y Tabla 31 como se presenta a continuación:

Tabla 30*Requisitos de ensayos de agregados para morteros asfálticos*

Ensayo	Norma	Requerimiento
Granulometría	AASHTO T30	Según Especificaciones Técnicas
Pérdida en sulfato de Na y Mg	NTP 400.016	18% máx.
Índice de plasticidad	ASTM D 4318	NP
Adhesividad (Riedel Weber)	MTC E 220	4 mín.
Azul de metileno	AASHTO T 330	8 máx.
Equivalente de arena	D 2419	40% mín.

Fuente: Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2013, p. 531.

Tabla 31*Requisitos para control de calidad en mortero asfáltico*

Ensayo	Norma/Guía	Requerimiento
Tasa de aplicación	MTC 2013	Según Especificaciones Técnicas
Textura- Circulo de arena	ASTM E 965	Mín. 0,6
Rugosidad	D 2419	2,50 m/km

Fuente: Provias Descentralizado, 2019 , p. 07.

2.2.8.5. Ensayos empleados en etapa de construcción del pavimento de base estabilizada con emulsión asfáltica.

A. Ensayo de granulometría de los agregados.

Según la norma ASTM C136 (2019a) o ASTM D6913 (2017c), según sea el caso establece el método para la distribución de partículas de los agregados por tamizado de los agregados gruesos y finos a través de distintas mallas, como resultado se

obtiene los porcentajes retenidos, pasantes con su respectiva curva granulométrica, se ocupan la Ecuación 28, Ecuación 29 y Ecuación 30.

Donde:

$$\%Ret = \frac{Pr}{Pt} \times 100 \dots \dots \dots [Ecuación 28]$$

$$\%Ret_{acum} = \%Ret_n + \%Ret_{n-1} \dots \dots \dots [Ecuación 29]$$

$$\%Pasante = 100 - \%Ret_{acum} \dots \dots \dots [Ecuación 30]$$

Donde:

Pr= Peso retenido en la malla de análisis, g.

Pt= Peso total seco de la muestra analizada, g.

%Ret= Porcentaje retenido en la malla analizada, %.

%Ret_acum= Porcentaje retenido acumulado en la malla en análisis, %.

%Pasante= Porcentaje que pasa la malla en análisis, %.

B. Ensayo de límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad.

Como suscribe la norma ASTM D4318 (2017a), establece los estándares para la determinación del límite líquido el cual se basa en el contenido de humedad para un estado semilíquido y plástico, el límite plástico describe el contenido de humedad de un material que se encuentra en estado plástico y semisólido, con la intención de hallar el índice de plasticidad del elemento a inspeccionar, el cual está dado por la Ecuación 31:

$$IP = LL - LP \dots \dots \dots [Ecuación 31]$$

Donde:

IP= Índice de plasticidad, %

LL= Límite líquido, %

LP= Límite plástico, %

C. Ensayo de Abrasión de los Ángeles.

Por lo descrito en la norma ASTM C131 (2014a), este ensayo contempla la degradación de los agregados de diferentes gradaciones, considerando las acciones de molienda, impacto y desgaste a través de un tambor giratorio, con la intención de obtener una cantidad de agregado degradado que tamizado por el tamiz N°12, describirá el porcentaje de desgaste que sufre el agregado mineral, para mayor referencia ver la Ecuación 32.

$$\%Desgaste = \frac{P_{pasante\ N^{\circ}12}}{P_t} \times 100 \dots\dots\dots [Ecuación\ 32]$$

Donde:

%Desgaste= Porcentaje de pérdida o desgaste del material.

P_pasante N°12= Peso de material pasante del tamiz N°12, g.

Pt= Peso total de la muestra analizada, g.

D. Ensayo de equivalente de arena.

Tal como indica la norma ASTM D2419 (2014c) este método establece un método rápido de correlación en campo que permite discernir el material fino, arcillas y

polvo existente en los agregados minerales pasantes del tamiz N°4, como resultado se obtiene el porcentaje de arena existente que se encuentra en la combinación original del material evaluado, ver Ecuación 33.

$$Eq_{arena} = \frac{L_{Arenas}}{L_{Arcilla}} \times 100 \dots \dots \dots [Ecuación 33]$$

Donde:

Eq_arena=Equivalente de arena en el material analizado, %.

L_Arena= Lectura de arena.

L_Arcilla= Lectura de arcilla.

E. Ensayo de sales solubles.

El ensayo de sales solubles tal como establece INACAL (2015) tiene como objetivo determinar la cantidad de sales presentes tanto en suelo como en aguas, que en cantidades elevadas podrían ejercer daño a los materiales en los que se encuentren presentes.

F. Ensayo de partículas chatas y alargadas.

Según INACAL (2018) estipula la determinación en los materiales pétreos el porcentaje de partículas planas, alargadas y alargadas planas, las partículas de clasificarán en diversos tamaños según su granulometría y se evaluará la relación entre ancho a espesor, largo a ancho y largo a espesor según requieran las especificaciones técnicas del proyecto con la finalidad de evitar la interferencia en

la consolidación de materiales y dificultar su colocación, el cálculo se realiza en la Ecuación 34.

$$\%C_A = \sum \frac{P_{chal}}{P_t} \times 100 \dots \dots \dots [Ecuación 34]$$

Donde:

$\%C_A$ = % de partículas chatas alargadas.

P_{chal} = Peso de partículas chatas / alargadas en la muestra de análisis, g.

P_t = Peso total de la muestra en análisis, g.

G. Ensayo de caras fracturadas.

La norma ASTM D5821 (2017b) este método describe la cantidad de partículas de agregado grueso con superficie angular, rugosa o rota por consecuencia de aplastamiento causas naturales o artificiales, el propósito de estas partículas según ciertas especificaciones es aumentar la resistencia al corte a consecuencia de la fricción entre partículas fracturadas, como se observa en la Ecuación 35.

$$\%C_F = \sum \frac{P_{cf}}{P_t} \times 100 \dots \dots \dots [Ecuación 35]$$

Donde:

$\%C_F$ = % de partículas fracturadas.

P_{cf} = Peso de partículas fracturadas en la muestra de análisis, g.

P_t = Peso total de la muestra en análisis, g.

H. Ensayo de contenido de humedad.

Este procedimiento según la ASTM D2216 (2019c) establece los procedimientos para poder determinar la cantidad de agua por masa de suelo, roca o materiales contenida en los espacios porosos, su valor se expresa en porcentaje, se describe en la Ecuación 36.

$$\%C = \left(\frac{P_{mh} - P_{ms}}{P_{ms}} \right) \times 100 \dots \dots \dots [Ecuación 36]$$

Donde:

%C= Contenido de humedad, %.

Pmh= Peso del material húmedo, g.

Pms= Peso del material seco, g.

I. Ensayo de cono de arena o densidad de campo in situ.

Como establece la ASTM D1556 (2015e) este método determina el procedimiento para poder determinar la densidad in situ o peso unitario del material evaluado, a través de la sustitución de un volumen de material extraído por arena que posee propiedades volumétricas conocidas, este método se usa como control de compactación en las capas del paquete estructural del pavimento, ver Ecuación 37 y Ecuación 38.

$$D_h = \frac{P_{extraido}}{V_{cavidad}} \dots \dots \dots [Ecuación 37]$$

$$D_s = \frac{D_h}{1 + \frac{\%Ch}{100}} \dots \dots \dots [Ecuación 38]$$

Donde:

Dh= Densidad húmeda, g/cm³.

P_extraido= Peso del material extraído de la cavidad de ensayo, g.

V_cavidad= Volumen de la cavidad, cm³.

Ds= Densidad seca, g/cm³.

%Ch= Contenido de humedad, %.

J. Ensayo de proctor modificado.

Según la descripción de la norma ASTM D1557 (2012a) se realiza el ensayo de proctor modificado con la finalidad de poder hallar la cantidad óptima de humedad para encontrar el peso unitario seco máximo de un material dado con la finalidad de realizar la comparación en campo cuando diversos materiales son compactados para poder densificarlos y mejorar sus propiedades, tal parámetro se calcula con la Ecuación 39.

$$Ds = \frac{Dh}{1 + \frac{\%Ch}{100}} \dots \dots \dots [Ecuación 39]$$

Donde:

Ds= Densidad seca, g/cm³.

%Ch= Contenido de humedad, %.

K. Ensayo de CBR.

La normal ASTM D1883 (2016) comenta sobre el uso del ensayo de CBR el cual está destinado a la evaluación de materiales de sub rasantes, subbases y bases para el diseño de pavimentos, el ensayo consiste en la compactación de tres moldes a diferente cantidad de golpes o energía de compactación el cual finalmente luego de ser saturado se realizará penetración al espécimen con un pistón circular a velocidad constante a una profundidad de 0,1 pulg y 0,2 pulg y determinar el esfuerzo necesario para lograr esa penetración el cual es expresado en porcentaje.

L. Ensayo de contenido de asfalto residual.

La norma ASTM D2172 (2011) regula el procedimiento para estimar el contenido de asfalto residual en las mezclas asfálticas luego de ser producidas, a través de la utilización de una centrifuga y un disolvente como tricloroetileno o cloruro de metileno, el contenido de asfalto se expresa como un porcentaje de la masa total ensayada libre de humedad, dicho cálculo se realiza en la Ecuación 40.

$$\%R = \left(\frac{(P1 - P2) - (P3 + P4)}{P1 - P2} \right) \times 100 \dots \dots \dots [Ecuación 40]$$

Donde:

%R= Residuo asfáltico, %.

P1= Peso de muestra de ensayo, g.

P2= Peso de agua en la porción de ensayo, g.

P3= Peso del agregado mineral extraído, g

P4= Peso de agregado adherido en el anillo filtro, g.

M. Ensayo de granulometría para material extraído.

Según como refiere AASHTO (2019) , define el procedimiento para realizar el análisis granulométrico de los agregados que son recuperados de mezclas asfálticas para poder realizar su distribución por tamaños para el control de gradación del material según especificaciones técnicas, ver la Ecuación 41, Ecuación 42 y Ecuación 43.

$$\%Ret = \frac{Pr}{Pt} x 100 \dots \dots \dots [Ecuación 41]$$

$$\%Ret_{acum} = \%Ret_n + \%Ret_{n-1} \dots \dots \dots [Ecuación 42]$$

$$\%Pasante = 100 - \%Ret_{acum} \dots \dots \dots [Ecuación 43]$$

Donde:

Pr= Peso retenido en la malla de análisis, g.

Pt= Peso total seco de la muestra analizada, g.

%Ret= Porcentaje retenido en la malla analizada, %.

%Ret_acum= Porcentaje retenido acumulado en la malla en análisis, %.

%Pasante= Porcentaje que pasa la malla en análisis, %.

N. Ensayo Marshall.

Como hace referencia la norma ASTM D6927 (2015c) se realiza este procedimiento para evaluar el diseño de un pavimento asfáltico tanto en la fase de diseño y en la fase de control durante la ejecución de aplicación de una mezcla asfáltica, para tal

finalidad se realiza idealmente especímenes compactados de 64 mm de espesor y 102 mm de diámetro, que son ensayados en una prensa para medir su resistencia a compresión diametral y estabilidad, los cuales deberán cumplir parámetros según especificaciones técnicas, el valor de estabilidad estará dado por la Ecuación 44.

$$E.M.C = Carga \times Fc \dots \dots \dots [Ecuación 44]$$

Donde:

E.M.C= Estabilidad Marshall corregida, lb.

Carga= Carga que soporta el espécimen ensayado, lb.

Fc=Factor de corrección según el espesor del espécimen ensayado.

O. Ensayo de deflexión con viga Benkelman.

Establece la norma ASTM D 4695 (2015f) o Ministerio de Transportes y Comunicaciones, (2016) el procedimiento para poder estimar las deflexiones recuperables, radio de curvatura y el cuenco de deflexiones en un pavimento que son producidos por una presión determinada a causa de una carga estática por un camión con dimensión de llantas de 10”x20” infladas a 5,6 kg/cm² o 80 psi y con una carga de 8,2 ton en el eje posterior del vehículo, el punto de ensayo será tomado desde el borde exterior del pavimento en función el ancho del carril, para un carril de 2,5 m tomaremos 0,45 m de la distancia del borde, en un carril de 3,00 m una distancia de 0,60 m, para 3,30 m de ancho un total de 0,75 m, finalmente para 3,60 m a más un total de 0,90 m de distancia desde el borde respectivamente, el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2016) establece la Ecuación 45 para determinar los cálculos de deflexión para esto tenemos:

$$D = (L_o - L_{500}) * RB \dots \dots \dots [Ecuación 45]$$

Donde:

D= Deflexión expresada en 0,01 mm

L_o= Lectura inicial en 0,01 mm

L₅₀₀=Lectura final en 0,01 mm

RB= Relación del brazo de viga (1:2 o 1:4)

Así también se calculará el radio de curvatura, según el brazo de la viga que dista a 25 cm de la primera viga, para lo cual tenemos la Ecuación 46:

$$RC = \frac{3125}{(D_o - D_{25})} \dots \dots \dots [Ecuación 46]$$

Donde:

RC= Radio de curvatura

D_o=Lectura inicial en 0,01 mm

D₂₅=Lectura final en 0,01 mm

Al cálculo de las deflexiones calculadas se suman factores de corrección, la temperatura es un factor que interviene en las lecturas de las deflexiones del pavimento a mayor temperatura la deflexión será mayor y viceversa lo cual determinaremos con la ecuación 47.

$$F_{20} = \frac{1}{(K x (T - 20) x e + 1)} \dots \dots \dots [Ecuación 47]$$

Donde:

F20= Factor de corrección de deflexión que se recupera a temperatura de 20 °C.

K= Coeficiente de 0,001 , 1/cm x °C

T= Temperatura del pavimento en el momento de medición

e= Espesor de capa.

Además de un factor de estacionalidad que dependerá del clima y del tipo de sub rasante tal como indica la Tabla 32.

Tabla 32

Factor de corrección por estacionalidad

Tipo de suelo de sub rasante	Estación Lluviosa	Estación Seca
Arenosa-Permeable	1,0	1,1 - 1,3
Arcillo-Susceptible al agua	1,0	1,2 - 1,4

Fuente: Tixe, 2019, pag. 66.

Finalmente podemos obtener una deflexión final la cual estará descrita por la Ecuación 48, esta aplicaremos para corregir el dial de lecturas para deflexiones y el dial para cálculo de radio de curvatura.

$$D_{\text{corregida}} = (L_o - L_{500}) \times R_B \times F_t \times F_e \dots \dots \dots [Ecuación 48]$$

Donde:

D_{corregida}= Deflexión expresada en 0,01 mm

L_o= Lectura inicial en 0,01 mm

L₅₀₀=Lectura final en 0,01 mm

RB= Relación del brazo de viga (1:2 o 1:4)

Ft= Factor de corrección por temperatura

Fe=Factor de corrección por estacionalidad.

Al ejecutar el ensayo y conseguir una data del pavimento muestreado podemos obtener la deflexión característica del pavimento D_c , el cual señala la deflexión estadística en su conjunto de todo el tramo evaluado, las determinaciones de estos valores están dados en la Tabla 33.

Tabla 33

Deflexión característica del pavimento

Tipo de Carretera	Deflexión Característica D_c	Observación
Autopistas: carreteras de IMDA mayor de 6000 veh/día, de calzadas separadas, cada una con dos o más carriles	$D_c = D_m + 1,645xds$	Deflexión característica, para una Confiabilidad de 95%
Carreteras Duales o Multicarril: carreteras de IMDA entre 6000 y 4001 veh/día, de calzadas separadas, cada una con dos o más carriles	$D_c = D_m + 1,645xds$	Deflexión característica, para una Confiabilidad de 95%
Carreteras de Primera Clase: carreteras con un IMDA entre 4000-2001 veh/día, de una calzada de dos carriles.	$D_c = D_m + 1,645xds$	Deflexión característica, para una Confiabilidad de 95%
Carreteras de Segunda Clase: carreteras con un IMDA entre 2000-401 veh/día, de una calzada de dos carriles.	$D_c = D_m + 1,282xds$	Deflexión característica, para una Confiabilidad de 90%
Carreteras de Tercera Clase: carreteras con un IMDA entre 400-201 veh/día, de una calzada de dos carriles.	$D_c = D_m + 1,282xds$	Deflexión característica, para una Confiabilidad de 90%
Carreteras de Bajo Volumen de Tránsito: carreteras con un IMDA \leq 200 veh/día, de una calzada.	$D_c = D_m + 1,036xds$	Deflexión característica, para una Confiabilidad de 85%

Fuente: Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2014 , p. 198.

Las deflexiones obtenidas son comparadas con un deflexión tolerable o admisible límite dentro del cual se obtendrá un buen desempeño en el tiempo, que se calcula de la forma siguiente en la Ecuación 49:

$$D_{adm} = \left(\frac{1,15}{N}\right)^{0,25} \dots \dots \dots [Ecuación 49]$$

Donde:

Dadm= Deflexión admisible, en mm

N=Número de repeticiones equivalentes en millones.

De igual forma existe la deflexión crítica, la cual se define como aquella que alcanza el pavimento al término de su tiempo de servicio una vez soportado el tráfico para el cual fue proyectado como indica la Ecuación 50.

$$D_{cr} = \left(\frac{1,90}{N}\right)^{\frac{1}{5,3}} \dots \dots \dots [Ecuación 50]$$

Donde:

Dcr= Deflexión crítica, en mm

N=Número de repeticiones equivalentes en millones.

Lo que menciona Jinchuña (2020) sobre los parámetros obtenidos de deflexión característica y radio de curvatura pueden ser interpretados de la siguiente forma como describe la Tabla 34.

Tabla 34

Interpretación de deflexiones y radios de curvatura

Tipo	Característica	Descripción
Tipo I	Deflexiones baja y Radio de curvatura grande	Las capas del pavimento superiores e inferiores están en buen estado, de igual forma la sub rasante.
Tipo II	Deflexiones baja y Radio de curvatura pequeño	La capa superior del problema presenta problemas en los materiales, compactación, CBR, etc, se concluye que el problema no es la sub rasante porque las deflexiones son bajas, requiere investigación
Tipo III	Deflexiones altas y Radio de curvatura grande	Las altas deflexiones se dan a causa de problemas en la sub rasante, compactación o problemas de humedad, se dice que la capa superficial es aceptable por el radio de curvatura grande.
Tipo IV	Deflexiones altas y Radio de curvatura pequeño	Se clasifica como el peor escenario donde se deduce que la capacidad del pavimento no es suficiente tanto en sus capas estructurales o en la sub rasante, puede ser por problemas en materiales, mala compactación o drenaje.

Fuente: Jinchuña, 2020, p. 43.

P. Ensayo para determinación de IRI.

Según la norma ASTM E867 (2012b) define la rugosidad de un camino como la desviación de una superficie determinada del pavimento con respecto a una superficie plana teórica, que afectan el confort de manejo del conductor, este parámetro llamado IRI o Índice de rugosidad internacional, puede ser estimado con el rugosímetro de Merlín en unidades de m/km, para su cálculo se considera la Ecuación 51..

$$IRI = 0,593 + 0,0471 D \dots \dots \dots [Ecuación 51]$$

Donde:

IRI= Índice de rugosidad internacional, m/km

D= Rugosidad en unidades de Merlin, mm.

Q. Ensayo de durabilidad en sulfato de sodio y magnesio.

Este método descrito por la INACAL (2011) establece el procedimiento para la inmersión de agregados en soluciones de sodio y magnesio por una cantidad repetitiva se ciclos para determinar su desintegración, este ensayo hace una simulación de la desintegración que podrían sufrir los agregados en la intemperie, ver la Ecuación 52.

$$\%P = \sum Gr \frac{P_{p_e}}{P_i} \dots \dots \dots [Ecuación 52]$$

Donde:

%P= Porcentaje de pérdida, %.

Gr = Gradación de la muestra original.

P_{p_e}= Peso de las fracciones pasantes después del ensayo, g.

P_i= Peso inicial de la muestra, g.

R. Ensayo de adhesividad Riedel Weber.

Tal ensayo normado por Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2016) tiene la finalidad se medir la adhesividad de los ligantes bituminosos a los agregados finos, este método es aplicable a todo tipo de aglomerante asfáltico.

S. Ensayo de azul de metileno.

Este procedimiento de ensayo dado por AASHTO (2019) establece la medición de material indeseable y dañino entre arcillas u orgánico que pueda presentarse en el material fino de la muestra.

T. Tasa de aplicación.

Según Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2013) indica el procedimiento para la cuantificación de la tasa de aplicación en peso sobre área de mortero asfáltica, que deberá cumplir parámetros mínimos según la importancia de uso.

U. Ensayo de círculo de arena.

El objetivo del ensayo determinado por la norma ASTM E 965 (2015g) es medir la macro textura de la superficie evaluada con la aplicación de un volumen conocido de arena y la medición del área total ocupada por este al momento de ser esparcida en forma circular, este ensayo evalúa también el contacto del neumático con el pavimento con respecto a la rugosidad presentada por la superficie.

2.2.8.6. Análisis económico del pavimento.

La construcción de un pavimento low cost con emulsión asfáltica y un pavimento tradicional guardan bastantes similitudes en su proceso constructivo, pero diferencias en sus materiales empleados, para ello se propone realizar un análisis económico de ambos para ver la opción más viable económicamente con determinada intención se desarrollará un análisis de costos unitarios.

Según Seminario (s.f) define la siguientes definiciones con forman parte de un análisis de costos y presupuesto:

A. Partida.

Se denomina partida a cada una de las actividades requeridas para desarrollar un proyecto, el objetivo de expresarlo en un conjunto de actividades es para poder

llevar a cabo un correcto control con respecto a la evaluación, medición y pago.

B. *Metrado.*

Los metrados hacen referencia a la cuantificación de lecturas acotadas con la finalidad de estimar la cantidad de obra por realizar o ejecutada, el cual al ser multiplicado por un respectivo costo unitario representara parte del costo directo de obra, en la Figura 28 se puede ver un típico modelo de metrado.

METRADO								
Obra:		Hoja N°:						
Propietario:		Plano N°:						
Fecha:		Hecho por:						
		Revisado :						

Partida N°	Especificaciones	N° de veces	Medidas			Parcial	Total	Und
			Largo	Ancho	Altura			

Figura 28. Modelo de formato para metrados.

Fuente: Seminario, s.f, p.11.

C. *Costo unitario.*

Describe el costo total para ejecutar una unidad de medida de alguna partida específica del proyecto, para tal fin se detalla los aportes unitarios necesarios de mano de obra, materiales y maquinaria para llevar a cabo tal propósito, la Figura 29 describe un modelo tradicional de costo unitario.

Los trabajos efectuados por la mano de obra están dados por el personal humano y es cuantificado y medido en costo horas – hombre, medición que variara según la cantidad de horas requeridas por la dificultad del trabajo y productividad del personal para determinada partida efectuada, en el caso de los materiales se

determinará el aporte unitario necesario correspondiente para ejecutar una unidad de la partida correspondiente, por último se realiza el análisis del aporte necesario de los equipos y herramientas estará en función a los costos de operación y de posesión que demanden, los cuales son cuantificados en costo hora – maquina.

Se recomienda para un correcto análisis de costos unitarios sea ejecutado por personal con experiencia laboral en el tema para obtener resultados más cercanos posible a la realidad, se deberá tener en cuenta los requerimientos particulares de las especificaciones técnicas para, así como también no sobre estimar recursos o repetir materiales que ya están considerados de forma general en el presupuesto.

ANÁLISIS DE COSTO UNITARIO						
Obra :			Hoja Nro :			
Propietario :			Hecho por :			
Ubicación :			Revisado por :			
			Fecha :			
Partida Nro.:	Columnas de f.c - 210 kg/cm ²			Unidad :	m ³	
Especificaciones :	Preparado con mezcladora de 9-11 p ² , vibrador a gasolina de 4HP winche eléctrico					
Cuadrilla :	Prep y vaciado 0.2 capataz + 2 operarios + 2 oficiales + 10 peones Curado = 0.1 capataz + 1 peón					
Rendimiento :	Preparado y vaciado: 10 cm ³ /día Curado: 20 m ³ /día					
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Parcial	Total	I.U.
MATERIALES						
Cemento	bis	10.21				21
Arena Gruesa	m ³	0.55				4
Piedra Chancada de 1/2"	m ³	0.56				5
			Costo de Material			
MANO DE OBRA						
Capataz	H-H	0.20				47
Operario	H-H	1.60				47
Oficial	H-H	1.60				47
Peón	H-H	8.40				47
Operador equipo liviano	H-H	2.40				47
			Costo de Mano de Obra			
EQUIPO, HERRAMIENTAS						
Mezcladora de 9-11 p ² (1)	H-M	0.8				48
Vibrador de 4 Hp (1)	H-M	0.8				49
Winche eléctrico de 2 tambores (1)	H-M	0.8				48
Herramientas: 3% M.O	% M.O	3%				37
			Costo de Equipo, Herramientas			
			Total			

Figura 29. Modelo de análisis de costos unitarios.

Fuente: Seminario, s.f, p. 35.

D. Costo Directo.

Se define como el costo directo a aquel resultante del uso los recursos necesarios para la ejecución de la obra es decir de la multiplicación de los metrados por los costos unitarios en obra.

E. Costo Indirecto.

Hace referencia a todo costo que tiene incidencia global en obra para su ejecución, y que no pueden aplicarse a una partida específica, está conformado por gastos generales y utilidades, pudiéndose agregar excepcionalmente otros.

2.3. Definición de términos.

Pavimento: Se define como una o más capas de material apropiado o debidamente acondicionado, colocado sobre el terreno con la finalidad de aumentar la resistencia para la circulación de carga vehicular.

Emulsión Asfáltica: Mezcla de finas gotas de asfalto que son estabilizadas en una fase acuosa a través de un emulsificante.

Base: Capa perteneciente al paquete estructural del pavimento encargada de transmitir los esfuerzos producidos sobre el pavimento a capas inferiores.

Estabilización: Tratamiento de un material para mejorar su resistencia reduciendo su deformación como consecuencia aumenta su durabilidad en el tiempo.

Low Cost: Término que hace referencia a la reducción de costos para ofrecer un producto básico sin sacrificar su funcionalidad ni calidad en el proceso.

Análisis de costos unitarios: Es el costo que conlleva la ejecución de una actividad por unidad de medida según análisis, se compone, de mano de obra, equipos y herramientas.

Esal: Es un parámetro que describe la cantidad de repeticiones pronosticadas en las que un eje equivalente de 8,10 ton pasará por un pavimento en un tiempo determinado.

Óptimo contenido de asfalto: Cantidad de asfalto añadida que expondrá las mejores características físicas y mecánicas en el material adicionado.

Deflexión característica: Expresa y representa la deflexión representativa de un tramo de pavimento a partir de un conjunto de datos.

Deflexión admisible: Asentamiento máximo permitido que asegura que la capa estructural o pavimento cumpla con su propósito según el tráfico de diseño proyectado.

Deflexión crítica: Asentamiento límite una vez que el pavimento llegó a su periodo de servicio soportando todo el tráfico para el cual fue proyectado.

CAPÍTULO III

MÉTODO

3.1. Tipo de la investigación.

Con la finalidad de proponer un tipo de pavimento básico de bajo costo con material propio clasificado como arena limosa sin disminuir la resistencia ni calidad de tal, se propone demostrar con este trabajo de investigación si esta metodología expuesta será favorable o no, por lo tanto, el tipo de investigación será del tipo experimental.

3.2. Diseño de la investigación.

Para el diseño de la investigación, en primer lugar planteamos el problema, hipótesis y objetivos, se recurre a la información disponible de libros y otros autores como referencia para iniciar la recolección de datos e investigación, para el desarrollo la tesis expuesta se recolectara datos en campo en el lugar de estudio, se abrirá puntos de exploración y extraerá material propio de la zona en lugares establecidos según sea conveniente también se realiza una evaluación del pavimento existente estabilizado con emulsión asfáltica para evaluar su comportamiento en el tiempo según la data inicial del proyecto.

Las muestras son enviadas a un laboratorio de mecánica de suelos y pavimentos donde bajo un ambiente controlado con el propósito de poder analizar sus características y proponer un diseño de base estabilizada según la metodología estudiada en el presente trabajo.

Habiéndose culminado los ensayos en laboratorio, se realizan análisis en los datos para buscar relación con las variables de estudio, se realiza el procesamiento de la información a través de métodos estadísticos y concluir una respuesta para la validación de hipótesis planteadas, el procedimiento se detalla mejor en la Figura 30.

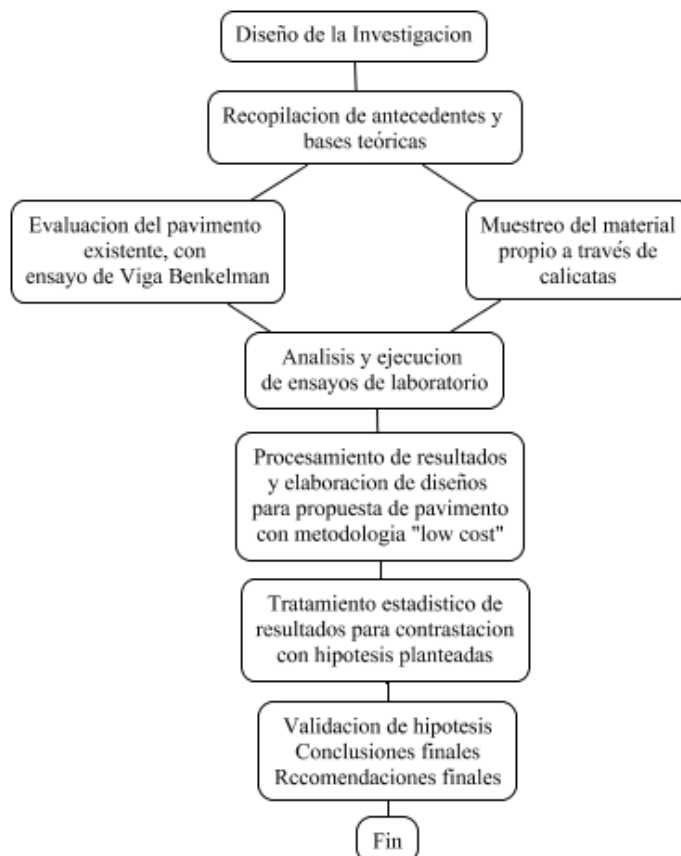


Figura 30. Diseño de la investigación.

3.3. Población y muestra.

3.3.1. Población.

La población en estudio corresponde a los 16 km correspondientes a los caminos vecinales de la carretera Los Palos– La Yarada – Tacna en donde se empleó base estabilizada con emulsión asfáltica para su construcción en el 2019, exactamente perteneciente a la Ruta N° TA-645 (Complejo Aduanero Santa Rosa – Balneario Santa Rosa) el cual tiene 9 km de longitud y el tramo de la Ruta N° TA-644 (Los Palos – El Faro – Balneario Santa Rosa) de 7 km de longitud, dichos tramos formaron parte del proyecto mencionado en el presente trabajo como se aprecia en la Figura 31.



Figura 31. Tramos de intervención en la investigación, Ruta TA-644 y TA-645, límite de la frontera Perú-Chile.

Fuente: Google Earth, 2021.

3.3.2. Muestra.

Siendo el tamaño de la población 16 km de base estabilizada con emulsión asfáltica, el tamaño de la muestra se elegirá según Ecuación 53 y datos presentados en la Tabla 35.

$$n = \frac{Z^2 \times \sigma^2 \times N}{e^2 \times (N - 1) + Z^2 \times \sigma^2} \dots \dots \dots [Ecuación 53]$$

Donde:

n=Tamaño de la muestra.

N=Tamaño de la población.

σ =Desviación estándar de la población, García (2021) expone que en caso no conocerse se supone el peor de los casos usándose un valor de 0,50.

e =Límite de error muestral, el valor estándar para investigaciones es 0,05.

$$n = \frac{1,96^2 \times 0,5^2 \times 16000}{0,05^2 \times (16000 - 1) + 1,96^2 \times 0,5^2} = 375$$

Tabla 35

Determinación del tamaño de la muestra n

Parámetros	Valores
N	16 000 m
σ	0,50
e	0,050
n	375 m
n elegido	500 m

Para seleccionar los individuos de la muestra según Hernández et al. (2014) “Este procedimiento de selección es muy útil e implica elegir dentro de una población N un número de n elementos a partir de un intervalo K” (p.174), por lo tanto se recurrirá a un muestreo sistemático de elementos muestrales según los requerimientos del investigador, contrastando la data obtenida en campo actual y pasada producto de la construcción del pavimento, con el objetivo de comparar resultados, se seleccionara como lugar de estudio la Ruta TA-645 mostrada en la Figura 32, desde la progresiva km 0+700 a 1+200 que abarca la muestra n obtenida en la Tabla 35.

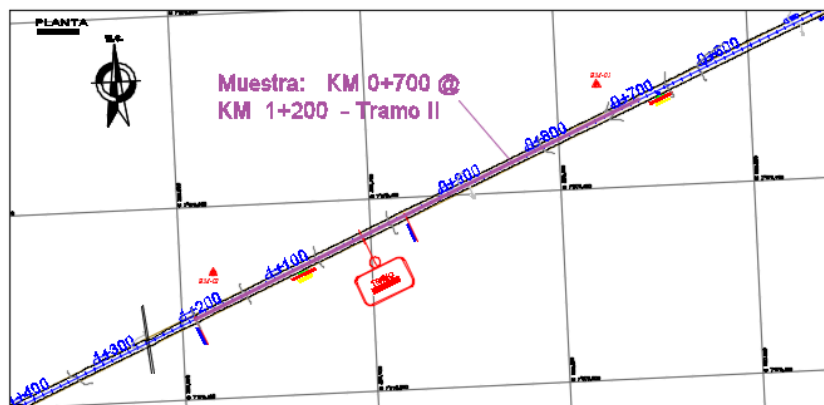


Figura 32. Intervención en la Ruta TA-645, progresivas KM 0+700 a 1+200.

Para la toma de puntos de análisis del material propio presente en la zona de experimento, como indica el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2014) en su Manual de Carreteras: Suelos, Geología y Pavimentos, indica la frecuencia de muestreo según un IMDA de 121 veh/día el cual se encuentra calculado en el Apéndice G, para esto observamos la Tabla 36 , donde por el IMDA calculado obtenemos 1 calicata por kilómetro, en nuestro estudio tomaremos 2 puntos.

Tabla 36*Número de calicatas para exploración de suelos*

Tipo de Carretera	Profundidad (m)	Número mínimo de Calicatas	Observación
Autopistas: carreteras de IMDA mayor de 6000 veh/día, de calzadas separadas, cada una con dos o más carriles	1,50m respecto al nivel de subrasante del proyecto	-Calzada 2 carriles por sentido: 4 calicatas x km x sentido -Calzada 3 carriles por sentido: 4 calicatas x km x sentido -Calzada 4 carriles por sentido: 6 calicatas x km x sentido	
Carreteras Duales o Multicarril: carreteras de IMDA entre 6000 y 4001 veh/día, de calzadas separadas, cada una con dos o más carriles	1,50m respecto al nivel de subrasante del proyecto	-Calzada 2 carriles por sentido: 4 calicatas x km x sentido -Calzada 3 carriles por sentido: 4 calicatas x km x sentido -Calzada 4 carriles por sentido: 6 calicatas x km x sentido	
Carreteras de Primera Clase: carreteras con un IMDA entre 4000-2001 veh/día, de una calzada de dos carriles.	1,50m respecto al nivel de subrasante del proyecto	-4 calicatas x km	Las calicatas se ubicarán longitudinalmente y en forma alternada
Carreteras de Segunda Clase: carreteras con un IMDA entre 2000-401 veh/día, de una calzada de dos carriles.	1,50m respecto al nivel de subrasante del proyecto	-3 calicatas x km	
Carreteras de Tercera Clase: carreteras con un IMDA entre 400-201 veh/día, de una calzada de dos carriles.	1,50m respecto al nivel de subrasante del proyecto	-2 calicatas x km	
Carreteras de Bajo Volumen de Tránsito: carreteras con un IMDA \leq 200 veh/día, de una calzada.	1,50m respecto al nivel de subrasante del proyecto	-1 calicata x km	

Fuente: Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2014, p. 26.

Los puntos de muestreo están localizados en las siguientes coordenadas según la Tabla 37 así como en la Figura 33 y Figura 34.

Tabla 37

Ubicación de puntos de inspección

Descripción	Ubicación	Coordenada Este	Coordenada Sur	Zona
C-01	0+750	360355,11 m E	7975493,56 m S	19 K
C-02	1+000	360088,27 m E	7975377,05 m S	19K

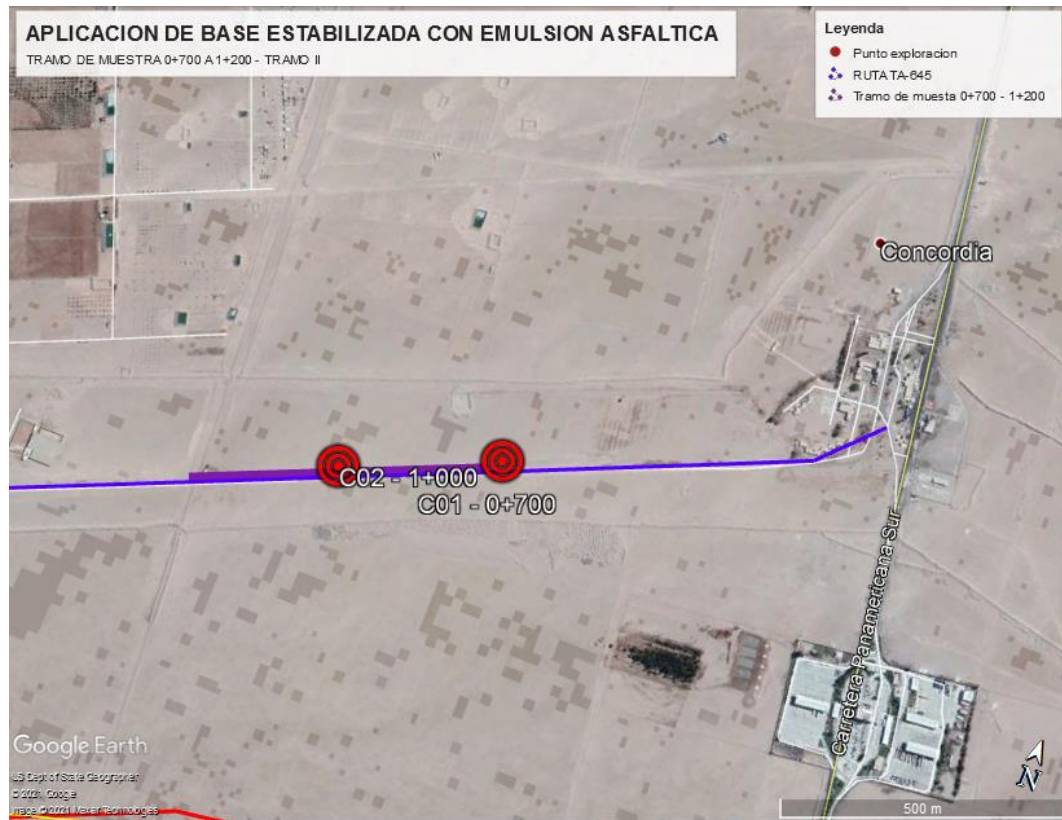


Figura 33. Ubicación de puntos de inspección - Tramo II

Fuente: Google Earth, 2021.



Figura 34. Apertura de puntos de exploración y toma de muestras para estudio del material.

También cabe precisar que se realiza la medición de deflexiones en pavimento con uso de Viga Benkelman con una frecuencia de 25 m de distancia según Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2013), para realizar su comparación con data perteneciente al tiempo de puesta en servicio año 2019, con el objetivo de evaluar su comportamiento en el tiempo, procedimiento que se puede observar en la Figura 35.



Figura 35. Preparación para evaluación de deflexiones con viga Benkelman - Tramo II - Los Palos - Tacna 2021.

3.4. Descripción de los instrumentos para la recolección de datos.

3.4.1. Instrumentos directos.

3.4.1.1. Recolección.

Puntos de exploración: Se abrirá puntos de exploración en la vía de estudio para caracterización y recolección de material propio.

Observación experimental: Se registrarán las características visibles del lugar y de los puntos de exploración.

Ensayos de laboratorio y campo: Se utilizará instrumentos y equipos de laboratorio para dar extraer información sobre las propiedades físicas y mecánicas de los materiales analizados.

Formatos de laboratorio y campo: Registran todos los eventos suscitados en el proceso de experimentación con los materiales.

3.4.1.2. Sistematización.

Microsoft Word: Editor de texto empleado para elaboración y presentación de textos.

Microsoft Excel: Se utilizará para el procesamiento de cálculo de los obtenidos de los ensayos realizados y diseños realizados.

Programa estadístico Minitab: Para el procesamiento, comparación y gráfica de resultados del procesamiento estadístico de datos obtenidos u otro según sea el

caso de análisis, obteniendo de esta forma información para concluir y validar las hipótesis planteadas.

Se utilizara diferentes pruebas estadísticas entre las cuales se incluye Prueba de normalidad, Prueba de Levene u homocedasticidad, Prueba de t pareada o correlacionada y prueba de Anova, con una significancia al 0,05, en el cual según (Soporte Minitab, 2019) indica que si el valor de p es menor que el valor de significancia establecido de 0,05 se rechaza la hipótesis nula (H_0) y se puede aceptar la hipótesis alterna (H_a), caso contrario si el valor de p es mayor que el valor de significancia 0,05 no se puede rechazar (H_0), tal como se ve en la Figura 36.

Método

Hipótesis nula Todas las medias son iguales
Hipótesis alterna No todas las medias son iguales
Nivel de significancia $\alpha = 0.05$

Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.

Figura 36. Suposiciones para interpretación de valor p en pruebas estadísticas Minitab.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS E INTERPRETACION DE RESULTADOS

4.1. Presentación de resultados.

Se tomó como una muestra un total de 500 m de pavimento comprendidos entre las progresivas 0+700 a 1+200 correspondientes al tramo II que corresponde a la Ruta TA-645 referenciados en las Figura 31 y Figura 32, en el cual se obtuvo los siguientes datos:

4.1.1. Ensayos de laboratorio para caracterización de materiales.

Con el material muestreado de las prospecciones en calicatas, obtenemos la caracterización del suelo, con el cual confirmamos que se trata de arena limosa no plástica, con los datos presentados en las Tabla 38, Tabla 39, Tabla 40 y Tabla 41 se realiza el diseño de base estabilizada low cost que se puede apreciar en el Apéndice A y el diseño del paquete estructural, para más detalle de los ensayos se puede consultar el Apéndice C .

Tabla 38*Caracterización de sub rasante 0+750 - Tramo II*

Ensayo	Unidad	Cantidad	
		E-01 - 0,70 m	E-02 - 0,80 m
Clasificación			
SUCS	símbolo	SM	SP SM
AASHTO	símbolo	A-2-4(0)	A-3(1)
Granulometría			
Ag. Grueso	%	3,03	4,85
Ag. Fino	%	81,50	86,67
Pas. N°200	%	15,47	8,48
Humedad natural	%	1,11	1,30
Límites Atterberg	%	No plástico	No plástico

Tabla 39*Caracterización de material propio 0+750 - Tramo II*

Ensayo	Unidad	Cantidad
		E-01 - 0,70 m
Sales	%	1,24
P.U Suelto	kg/m ³	1460
P.U Compacto	kg/ m ³	1629
Peso Especifico		
Dens. Relativa Seca	g/cm ³	2,38
Dens. Relativa SSD	g/cm ³	2,47
Dens. Rel. Aparente	g/cm ³	2,61
Absorción	%	3,76
P. Chatas/Alargadas	%	No presenta
Caras fracturadas	%	No presenta
Proctor		
MDS	g/cm ³	1,89
Humedad óptima	%	9,50
Proctor CBR		
MDS	g/cm ³	1,892
Humedad óptima	%	9,500
CBR		
95% (MDS)	%	14,5

Tabla 40*Caracterización de sub rasante 1+000 - Tramo II*

Ensayo	Unidad	Cantidad	
		E-01 / 0,80 m	E-02 / 0,70 m
Clasificación			
SUCS	símbolo	SM	SP SM
AASHTO	símbolo	A-2-4(0)	A-3(1)
Granulometría			
Ag. Grueso	%	4,88	5,64
Ag. Fino	%	80,52	86,38
Pas. N°200	%	14,60	7,98
Humedad natural	%	1,10	1,37
Límites Atterberg	%	No plástico	No plástico

Tabla 41*Caracterización de material propio 1+000 - Tramo II*

Ensayo	Unidad	Cantidad
		E-01 / 0,80 m
Sales	%	1,21
P.U Suelto	kg/m ³	1457
P.U Compacto	kg/m ³	1631
Peso Especifico		
Dens. Relativa Seca	g/cm ³	2,39
Dens. Relativa SSD	g/cm ³	2,48
Dens. Rel. Aparente	g/cm ³	2,62
Absorción	%	3,65
P. Chatas/Alargadas	%	No presenta
Caras fracturadas	%	No presenta
Proctor		
MDS	g/cm ³	1,888
Humedad óptima	%	9,60
Proctor CBR		
MDS	g/cm ³	1,890
Humedad óptima	%	9,600
CBR		
95% (MDS)	%	13,4

4.1.2. Diseño de base estabilizada low cost.

Para el diseño de base estabilizada según Otiniano y Paria (2016) en general no existe un método normalizado para su diseño, pero lo que si recomiendan es un punto de partida para ello se proporciona diferentes ecuaciones para obtener una cantidad tentativa de emulsión como referencia, procede al desarrollo de las Ecuación 04, Ecuación 07, Ecuación 06 tomando datos de los ensayos granulométricos del Apéndice C se obtiene los datos de la Tabla 42.

Tabla 42

Contenido tentativo de emulsión asfáltica para el diseño

Ecuación	Fórmula	%Emulsión
04	$\frac{(0,06x97 + 0,01x3) * 100}{60}$	9,75%
07	$\frac{0,00138x3x81,5 + 6,358x\log(15,5) - 4,655}{0,60}$	5,42%
06	$\frac{0,43(0,05x4,3 + 0,1x80,2 + 0,5x15,5)}{0,60}$	11,46%

Según la Tabla 42 obtenemos diferentes porcentajes teóricos como punto de partida para la dosificación de emulsión, pero tal como se menciona son solo recomendaciones, en coherencia con el enfoque low cost, se empezará la dosificación desde 1% hasta 4%, con variaciones porcentuales de 1%, el tipo de emulsión empleada será CSS-1h de rotura lenta debido a que otorga el tiempo necesario para su mezclado, colocación antes de su rotura además que el material posee una cantidad de finos aproximada de 15% , se hace tal recomendación para

la aplicación deseada en la Figura 9, para más detalle se adjunta ficha técnica de la emulsión en el Apéndice B.

A continuación se prepara el material en proporciones a dosificar teniendo en cuenta el aporte de agua, se procede a realiza una prueba visual de recubrimiento y adherencia del agregado para verificar que exista compatibilidad de los materiales , luego se procede con el ensayo Marshall con un total de 50 golpes para el tipo de trafico especificado en la Tabla 9, entonces para la elaboración de especímenes cilíndricos comenzamos con tener en cuenta el porcentaje de humedad óptimo de compactación según la Tabla 39 y Tabla 41, con la finalidad de obtener la máxima densidad posible y por ende resistencia, el cual será determinado por el ensayo de Proctor modificado, teniendo esta información procedemos a variar la cantidad de emulsión, teniendo en cuenta el agua propia de material, la que es aportada por la emulsión y la que se adiciona para llegar al óptimo de humedad descrito de 9,50 %, las dosificaciones usadas para confección de pastillas para la combinación de arena con emulsión se presentan en la Tabla 43.

Tabla 43*Dosificación para elaboración de pastillas para diseño de base estabilizada low cost*

Dosificación de pastillas				
Peso muestra seca (g)	960,0			
Humedad del material (%)	1,1			
Peso muestra húmeda (g)	970,6			
Peso de agua en muestra (g)	10,6			
Contenido asfáltico	0,6			
Emulsión (%)	1	2	3	4
Peso emulsión (g)	9,6	19,2	28,8	38,4
Agua aportada por emulsión (g)	3,8	7,7	11,5	15,4
Contenido óptimo de humedad (%)	9,5	9,5	9,5	9,5
Cantidad de agua para óptimo contenido de humedad (g)	91,2	91,2	91,2	91,2
Peso de agua en la muestra (g)	-10,6	-10,6	-10,6	-10,6
Peso de agua en emulsión (g)	-3,8	-7,7	-11,5	-15,4
Peso de agua para adicionar (g)	76,8	73,0	69,1	65,3

Teniendo en cuenta que la emulsión es una composición de asfalto, agua y emulsificante, se realiza el ensayo ASTM D 2172 (2011) para la estimación cuantitativa de aglutinante asfáltico, con la finalidad de corroborar que la emulsión asfáltica teórica añadida concuerde con la dosificación y el residuo asfáltico de la ficha técnica, el cual corresponde a 60 % de residuo por destilación, tales resultados se presentan en la Tabla 44.

Tabla 44*Análisis de dosificación de emulsión y contenido de asfalto residual*

Contenido de emulsión teórico	Residuo Asfáltico por destilación	Residuo asfáltico ASTM D2172	Contenido de emulsión real
1,00%	60%	0,62%	1,03%
2,00%	60%	1,21%	2,01%
3,00%	60%	1,83%	3,05%
4,00%	60%	2,41%	4,02%

Con los especímenes compactados, luego del tiempo prudente de curado de 72 horas a 22°C , procedemos a tomar datos de sus medidas y pesos para hallar su densidad, para finalmente ser acondicionados para su ensayo tanto en seco como saturado, procedemos a someterlos a la compresión diametral con el ensayo Marshall para poder medir sus resistencia, con lo cual obtenemos lo que se presenta en la Tabla 45.

Tabla 45

Resultados del Ensayo Marshall para diseño de base estabilizada

Propiedades	Resultados promedio			
	1%	2%	3%	4%
% Emulsión	1%	2%	3%	4%
Estabilidad Seca (kg)	702,8	960,8	996,9	878,1
Estabilidad Saturada (kg)	216,9	569,2	628,9	588,8
D.Bulk Seca (g/cm ³)	1,856	1,869	1,865	1,832
Humedad Absorbida (%)	2,94	2,10	1,91	1,63
Pérdida de Estabilidad (%)	69,1	40,8	36,9	32,9
Vacíos Totales (%)	21,7	21,2	21,4	22,7

Con la información presentada se puede seleccionar un porcentaje de emulsión asfáltica que podrá satisfacer las condiciones mínimas de resistencia las cuales tomaremos en función a lo que nos indica según Salgado y Vásquez (2019) en la Tabla 46:

Tabla 46

Criterios mínimos para diseños de emulsión con agregado

Propiedad	Mínimo	Máximo
Estabilidad (kg)	230	-
Vacíos (%)	-	-
Pérdida de Estabilidad (%)	-	50
Humedad absorbida (%)	-	4

Comprendido esto observaremos los gráficos resultantes del ensayo Marshall en la Figura 37, en donde se puede percibir que efectivamente hay variación en la cantidad de emulsión añadida y las propiedades obtenidas, siguiendo

las recomendaciones mínimas de la Tabla 45, podemos afirmar que un contenido óptimo de emulsión será un 2,5 % el cual cumple con los requisitos mínimos.

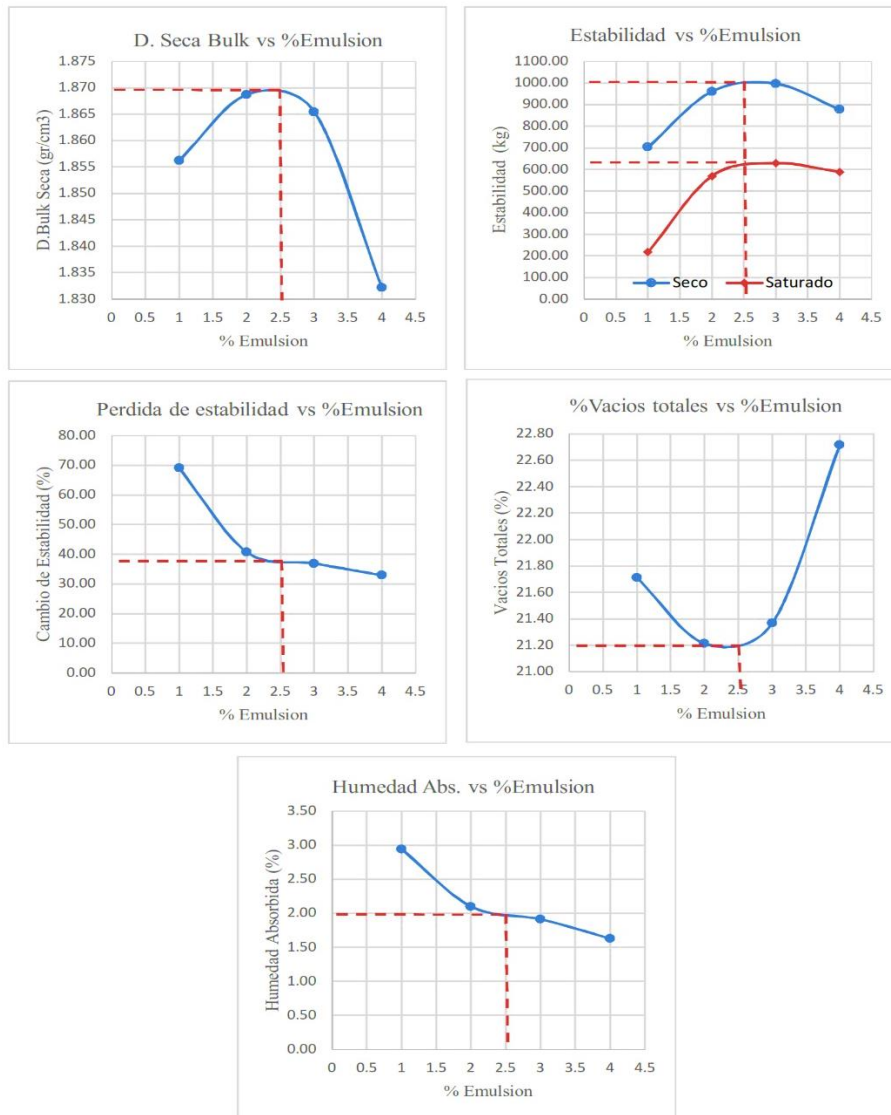


Figura 37. Gráficos resultantes del ensayo Marshall para diseño de base estabilizada.

Fianalmente de la interpretacion de los graficos obtennemos las siguientes caractersiticas presentadas en la Tabla 47 que seran de utilidad para poder desarrollar una propuesta de pavimento.

Tabla 47

Resultados de diseño de base estabilizada con emulsión asfáltica para un óptimo de 2,5% de emulsión asfáltica

Propiedad	Resultado	Mínimo	Máximo	Estado
Porcentaje óptimo de asfalto %	2,5	-	-	-
Óptimo contenido de humedad %	9,5	-	-	-
Densidad Bulk(g/cm ³)	1,87	-	-	-
Estabilidad Seca (kg)	1000	230	-	Cumple
Estabilidad Saturada (kg)	640	230	-	Cumple
Pérdida de Estabilidad (%)	38	-	50	Cumple
Humedad absorbida (%)	2	-	4	Cumple

4.1.3. Propuesta de diseño de pavimento.

Como se expone en los objetivos la idea del presente trabajo es poder demostrar que se puede utilizar el material propio para la construcción de una base estabilizada en el pavimento a un menor costo, teniendo clara esta intención se toma como partida los parámetros de diseño del pavimento ya construido en Tacna en el 2019 los cuales están plasmados en la Tabla 48, con la diferencia que se hará uso del presente diseño desarrollado según resultados presentados en la Tabla 47, se verifico que el CBR de la sub rasante concuerde con la información del expediente técnico resultado que es muy similar según Tabla 39 y Tabla 41, el diseño será efectuado mediante la metodología AASHTO 93, dichos resultados se presentan en la Tabla 48 y Figura 38.

Tabla 48

Parámetros de diseño para pavimento tomados de pavimento construido en Tacna-2019

Variables	Descripción	Unidad	Valor	Fuente
Zr	Confiabilidad	-	-1,645	Tabla 19
So	Desviación standard So	-	0,45	Tabla 20
Pi	Serviciabilidad inicial	-	4	Tabla 22
Pf	Serviciabilidad final	-	2	Tabla 22
CBR	Ensayo de CBR al 95% de MDS	%	13,4	Dato expediente
Mr	Módulo resiliente	psi	13450,5	Ecuación 25
W18	Ejes equivalentes en n años	Ejes	180000	Dato expediente
a1	Coefficiente estructural base estabilizada	-	0,115	Tabla 26
a2	Coefficiente estructural sub base	-	0,047	Tabla 26
m1	Coefficiente de drenaje base estabilizada	-	1	Tabla 24
m2	Coefficiente de drenaje sub base	-	1	Tabla 24
SN	Número estructural	-	2,21	Ecuación 14

Figura 38. Cálculo del número estructural requerido.

Según nos indica el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2014) el espesor mínimo para capas superficiales con asfalto en caliente será de 4 cm y para

capas de Base y Sub base será de 15 cm, teniendo en cuenta estos datos evaluamos las siguientes propuestas de diseño:

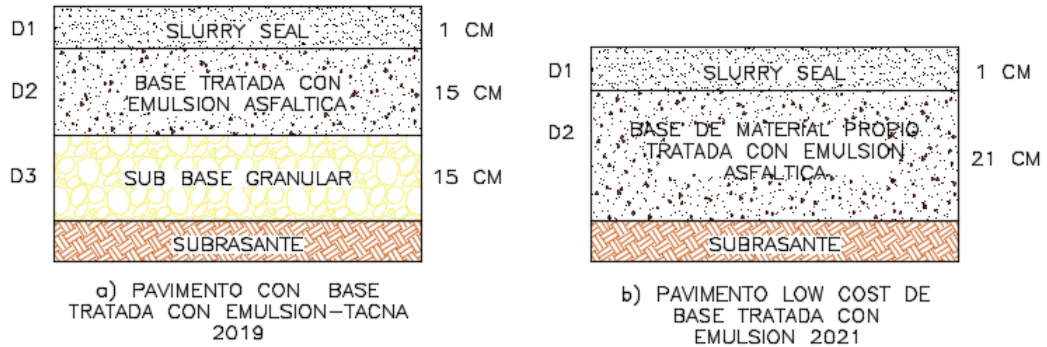


Figura 39. Propuestas de paquetes estructurales de pavimentos a comparar.

Se propone en la Figura 39 y Tabla 49 dos siguientes diseños los cuales cumplen con satisfacer el número estructural de pavimento requerido, las dos alternativas son válidas, pero es ideal escoger la que nos otorgue el mismo desempeño a un menor costo para lo cual se realizará un respectivo análisis, los coeficientes estructurales serán definidos en base a las Tabla 26, también de la Figura 13 y Figura 14.

A partir de la Tabla 47 tomamos el valor más crítico de estabilidad Marshall para encontrar un coeficiente estructural que se relacione a la propuesta de base estabilizada low cost, este valor corresponde a la estabilidad saturada donde se simula que la base se encontrara en contacto con el agua , para esto se obtuvo un valor de 640 kg equivalente a 1408 lb de resistencia, a partir de la Figura 40 realizaremos un proceso de interpolación obteniendo , obteniendo un valor de coeficiente estructural para base estabilizada de 0,273/pulg equivalente a 0,107/cm.

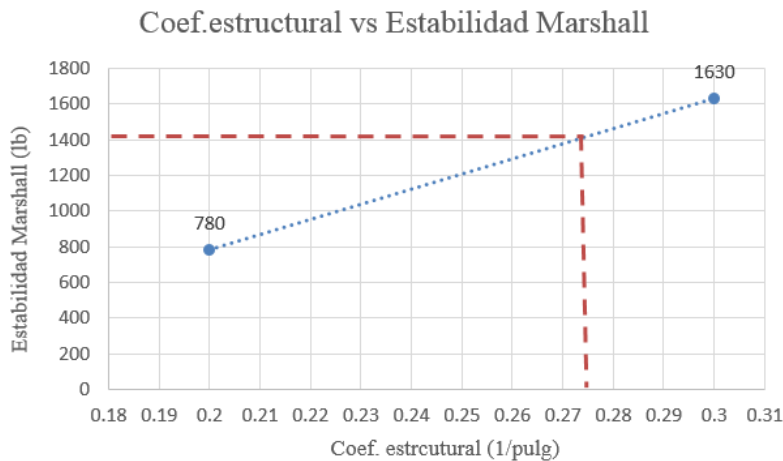


Figura 40. Interpolación gráfica para hallar coeficiente estructural para base estabilizada low cost.

Obteniendo un coeficiente estructural para la base propuesta podemos probar espesores que puedan satisfacer el número estructural requerido dicha información se presenta en la Tabla 49 y se tiene en consideración la Ecuación 27.

Tabla 49

Propiedades y dimensionamiento de propuestas de paquetes estructurales

Pavimento con base tratada con emulsión				Pavimento Low Cost de base tratada con emulsión			
Espesor (cm)	Coef. (a)	Drenaje (m)	SN	Espesor (cm)	Coef. (a)	Drenaje (m)	SN
D1=1,0	Sin aporte	-	-	D1=1,0	Sin aporte	-	-
D2=15,0	0,115	1	1,73	D2=21,0	0,107	1	2,25
D3=15,0	0,047	1	0,71				
	SN obtenido=2,43				SN obtenido=2,25		
	SN requerido = 2,21				SN requerido = 2,21		

4.1.4. Comparación de presupuesto de un pavimento.

Analizando la Figura 39 observamos dos configuraciones de pavimentos, en el primer caso se observa el pavimento proyectado construido en el año 2019 en los Palos - Tacna, en la segunda imagen vemos la propuesta de pavimento low cost,

uno de los objetivos de esta tesis es demostrar que esta propuesta tiene un costo menor sin afectar su resistencia a comparación de otros paquetes estructurales, para lo cual tenemos el siguiente análisis de precios, para mayor detalle podemos observar el Apéndice H.

Para el primer caso tenemos el siguiente presupuesto reflejado en la Figura 41, el cual contempla para un 3,3 % de emulsión según el diseño ejecutado en Tacna 2019 que se puede encontrar a mayor detalle en el Apéndice F, que será añadido a un material granular el cual es adquirido y transportado a obra desde canteras proveedoras con un costo de S./ 201,16 por m³ base estabilizada.

Partida: 1.1 BASE ESTABILIZADA CON EMULSION ASFALTICA-2019 Rendimiento:374 m³/Dia

						Costo unitario por m ³	201.16
Código	Descripción	Unid.	Recursos	Cantidad	Precio	Parcial	
MANO DE OBRA							1.85
470010001	CAPATAZ	hh	1.0000	0.0214	26.5900	0.57	
470010002	PEÓN	hh	4.0000	0.0856	14.9600	1.28	
MATERIALES							119.82
130010001	EMULSION ASFALTICA DE ROTURA LENTA	gln	-	16.9000	7.0900	119.82	
EQUIPO							5.71
490010001	RODILLO LISO VIBR AUTOP 70-100 HP 7-9 T.	hm	1.0000	0.0214	98.6600	2.11	
370010001	HERRAMIENTAS MANUALES	%mo	-	3.0000	1.8500	0.06	
490010002	MOTONIVELADORA DE 125HP	hm	1.0000	0.0214	165.3700	3.54	
SUB-PARTIDAS							73.78
CU0010001	AGUA PARA RIEGO	m ³	-	0.1200	33.4100	4.01	
CU0010002	MATERIAL GRANULAR PARA BASE ASFALTICA	m ³	-	1.0000	69.7700	69.77	

Figura 41. Presupuesto de m³ de pavimento construido en el 2019.

Para la propuesta planteada se tiene en consideración los ensayos y diseños realizados previamente según Figura 37 y Tabla 47 en el cual se obtuvo un óptimo contenido de emulsión de 2,5%, además sabiendo que se debe llegar a una densidad de 1890 kg/m³ para obtener un 100% de compactación, se estima un total de 12,45 galones para producir 1 m³ de base estabilizada low cost, a esto le restaremos la adquisición y transporte de material granular debido a que se reutilizara el material propio con lo cual obtenemos un costo de S/.99,84 el m³ base estabilizada low cost,

esto se estima en la Figura 42, además podemos ver los costos de producción de forma más detallada en la Tabla 50.

Partida: 1.4 BASE LOW COST ESTABILIZADA CON EMULSION ASFALTICA - 2.5% EMULSION		Rendimiento: 374 m ³ /Dia				
Costo unitario por m ³						99.84
Código	Descripción	Unid.	Recursos	Cantidad	Precio	Parcial
MANO DE OBRA						1.85
470010001	CAPATAZ	hh	1.0000	0.0214	26.5900	0.57
470010002	PEÓN	hh	4.0000	0.0856	14.9600	1.28
MATERIALES						88.27
130010001	EMULSION ASFALTICA DE ROTURA LENTA	gln	-	12.4500	7.0900	88.27
EQUIPO						5.71
490010001	RODILLO LISO VIBR AUTOP 70-100 HP 7-9 T.	hm	1.0000	0.0214	98.6600	2.11
370010001	HERRAMIENTAS MANUALES	%mo	-	3.0000	1.8500	0.06
490010002	MOTONIVELADORA DE 125HP	hm	1.0000	0.0214	165.3700	3.54
SUB-PARTIDAS						4.01
CU0010001	AGUA PARA RIEGO	m ³	-	0.1200	33.4100	4.01

Figura 42. Presupuesto de un m³ de pavimento low cost.

Tabla 50

Análisis de costo de producción de base estabilizada low cost

%Emulsión	Peso unitario compactado de material propio kg/m ³	Emulsión en peso (kg)	Densidad de la emulsión (kg/lit)	Emulsión en lit/m ³	Gal/m ³ de emulsión	Costo por m ³
1,00	1890	18,90	1,003	18,84	4,98	S/ 46,88
2,00	1890	37,80	1,003	37,69	9,96	S/ 82,19
2,50	1890	47,25	1,003	47,11	12,45	S/ 99,84
3,00	1890	56,70	1,003	56,53	14,94	S/ 117,49
4,00	1890	75,60	1,003	75,37	19,91	S/ 152,73

Asimismo, para entender mejor los beneficios económicos que puede brindar el pavimento low cost propuesto se realiza la proyección de costo por un km, para lo cual se tiene en cuenta la sección del pavimento construido en Tacna 2019, observando la Figura 43 tomaremos un ancho de 9 m que incluye la berma, una longitud de análisis de 1 km y los espesores de diseño propuestos en la Tabla 49.



Figura 43. Sección transversal del pavimento construido en Tacna-Los Palos 2019.

Realizado el análisis se obtiene los resultados de la Tabla 51, en donde se aprecia claramente que el costo por km del pavimento construido en Tacna 2019 es de S./ 271 566,00 y el precio de pavimento low cost de S./188 697,60, teniendo una relación de 1,44 es decir que por cada 1 km del pavimento construido en Tacna 2019 se podría construir 1,44 km de pavimento low cost, solo en términos de base estabilizada.

Tabla 51

Análisis de costo por km para aplicación de propuestas de base estabilizada

Análisis de costo por km							
Propuesta	Largo	Ancho	Altura	Volumen	Costo m ³	Total	Relación
Pavimento Tacna 2019	1000 m	9 m	0,15 m	1350 m ³	S/ 201,16	S/ 271,566,00	
							1,44
Pavimento Low Cost 2021	1000 m	9 m	0,21 m	1890 m ³	S/ 99,84	S/ 188,697,60	

4.1.5. Ensayos en campo para determinar la deflexión en pavimento.

Con el propósito de demostrar que la aplicación de emulsión asfáltica en la base del pavimento contribuye a estabilizar y disminuir asentamientos, se realizó un ensayo de viga Benkelman dos años después de su construcción en el 2019, demostrando que a lo largo del tiempo el uso de emulsión en la base aporta la estabilidad

necesaria otorgando resistencia ante las deformaciones en el tiempo, para lo cual se compara las deflexiones tomadas al momento de la construcción del pavimento en 2019 como se aprecia en la Figura 44, y lecturas tomadas dos años después de su construcción en el 2021 según Figura 45, observándose que la deflexión característica anterior fue de 47×10^{-2} mm y la actual de 22×10^{-2} mm, se observa que los valores de deformación son menores que los anteriores, asimismo podemos observar que los radios de curvatura se han elevado siendo mayores a 300, obteniendo un panorama de deflexiones menores y radios de curvatura mayores, lo cual demuestra que el pavimento se encuentra en buen estado actualmente, tal como indica Jinchuña (2020), dichos resultados se ven reflejados en la Tabla 52 y para mayor detalle en el Apéndice E.

Tabla 52

Ensayo de Viga Benkelman para determinación de deflexiones y radio de curvatura

Ítems	Ensayo de Viga Benkelman			
	Resultado 2019		Resultado 2021	
	Deflexión $\times 10^{-2}$ mm	Radio Curvatura	Deflexión $\times 10^{-2}$ mm	Radio Curvatura
Promedio	40	238	17	356
Desviación Estándar	6,2	76	5,0	82
CV	15,4	32	29,1	23
Deflexión característica	47	-	22	-
Máximo	52	390	28	520
Mínimo	32	130	10	260

Tal como indica el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2014) la deflexión característica del pavimento es comparada con la deflexión admisible según Ecuación 49 y la deflexión crítica Ecuación 50, valores límites que garantizan un buen desempeño del pavimento, esto lo vemos reflejado en la Tabla 53.

Tabla 53

Comparación entre deflexiones tomadas en distintos años en pavimento de base estabilizada Los Palos- Tacna

Ítems	Ensayo de Viga Benkelman (10^{-2} mm)			
	Resultado 2019 Deflexión	Resultado 2021 Deflexión	Deflexión admisible	Deflexión crítica
Promedio	40	17	158	155
Deflexión característica	47	23		

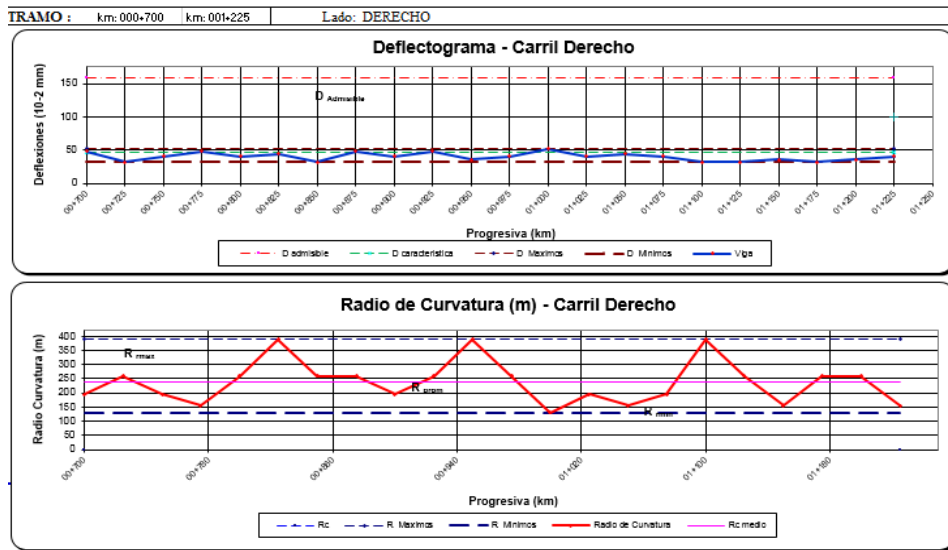


Figura 44. Deflexiones y radios de curvatura evaluados en la etapa inicial del pavimento Tacna 2019

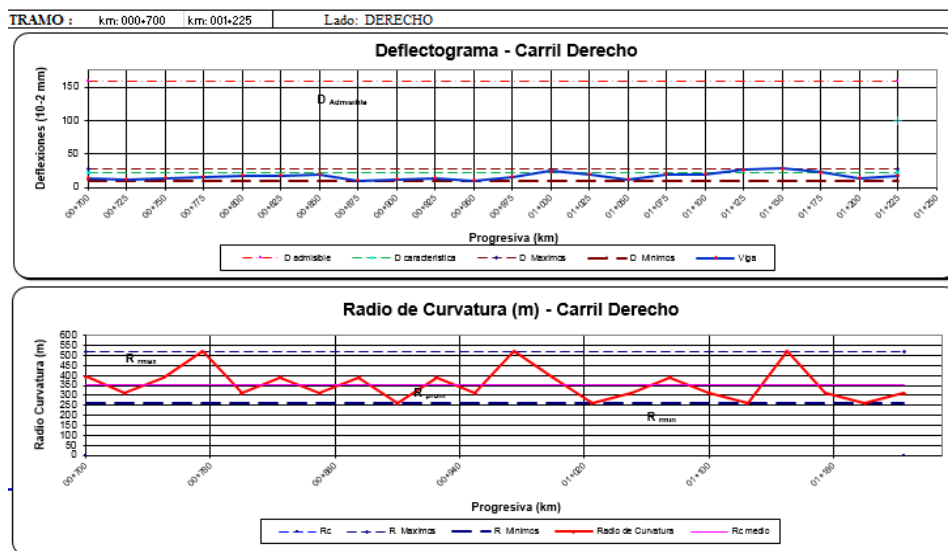


Figura 45. Deflexiones y radios de curvatura evaluados dos años después de la etapa inicial del pavimento Tacna -2021.

4.2. Contrastación de hipótesis.

4.2.1. Hipótesis General.

Ho: No se puede utilizar el material propio para aplicar pavimentos Low Cost de base estabilizada con emulsión CSS-1h en las carreteras vecinales de Los Palos– La Yarada – Tacna.

Ha: Se puede utilizar el material propio para aplicar pavimentos Low Cost de base estabilizada con emulsión CSS-1h en las carreteras vecinales de Los Palos– La Yarada – Tacna.

Se demuestra que se puede utilizar el material propio para aplicar pavimentos Low Cost de base estabilizada con emulsión CSS-1h en las carreteras vecinales de Los Palos– La Yarada – Tacna, para tal fin se realizó un diseño de base estabilizada con el método Illinois, el cual consiste en añadir un 2,5% de emulsión asfáltica al material propio el cual se caracteriza por ser arena limosa según su clasificación , dicho material será compactado con una humedad óptima del 9,50 % , al realizar este proceso obtenemos una base estabilizada con criterios mínimos de aceptación presentados en la Tabla 47 que cumplen satisfacer el número estructural del diseño de pavimento por el método AASTHO 93.

Como se aprecia en la Tabla 45 y Apéndice D se realizó el ensayo con diferentes grados de emulsion para poder observar mejor las variaciones obtenidas en el ensayo de especimenes realizaremos un analisis de varianza para observar mejor si hay significancia en la modificacion del porcentaje de emulsion añadido y

las resistencias obtenidas, antes de ello se comprueba que los resultados cumplan con las pruebas de normalidad y homocedasticidad.

En la Figura 46 que refleja la prueba de normalidad para la estabilidad seca, observamos el valor-p con un resultado de 0,795 mayor al nivel de significancia de 0,05, lo cual indica que no hay pruebas para indicar que no existe normalidad en los resultados.

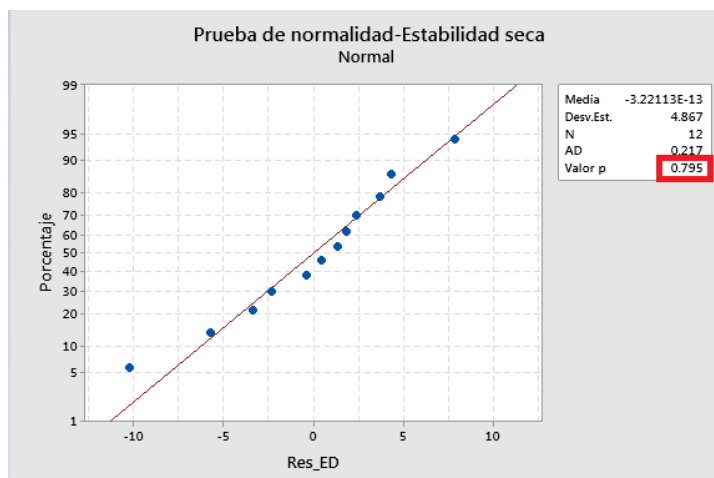


Figura 46. Prueba de normalidad estabilidad seca.

En la Figura 47 que refleja la prueba de Levene, homocedasticidad o varianza constante para la estabilidad seca, se observa que el valor-p tiene un resultado de 0,136 mayor al nivel de significancia de 0,05, lo cual indica que no hay pruebas para afirmar que no existe homocedasticidad o varianza constante en los valores evaluados.

Prueba de Levene-Homocedasticidad-Estabilidad Seca

Método

Hipótesis nula	Todas las medias son iguales
Hipótesis alterna	No todas las medias son iguales
Nivel de significancia	$\alpha = 0.05$

Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.

Información del factor

Factor	Niveles	Valores
Grupo_est	4	D1, D2, D3, D4

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Sec.	Contribución	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Grupo_est	3	47.48	48.08%	47.48	15.826	2.47	0.136
Error	8	51.27	51.92%	51.27	6.408		
Total	11	98.74	100.00%				

Figura 47. Prueba de homocedasticidad estabilidad seca.

Confirmando los criterios anteriores, de la Figura 48 del análisis de varianza (ANOVA) realizado obtenemos un valor p de 0,000 menor al nivel de significancia de 0,05, lo que nos llevaría a aceptar la hipótesis alterna y decir que si hay significancia o diferencia entre las cantidades de emulsión añadidas y las estabilidades secas obtenidas lo cual es confirmado por la comparación de grupos de Tukey con una confiabilidad del 95%, en el cual las distintas dosificaciones no comparten una letra de grupo similar, asimismo se pone en primer lugar que un 3% de emulsión otorga las mejor resistencia y en último lugar el 1% el cual se obtiene la menor resistencia.

ANOVA - Estabilidad seca

Método

Hipótesis nula	Todas las medias son iguales
Hipótesis alterna	No todas las medias son iguales
Nivel de significancia	$\alpha = 0.05$

Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.

Información del factor

Factor	Niveles	Valores
Factor	4	1%_D, 2%_D, 3%_D, 4%_D

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC	Sec.	Contribución	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	3	154536		99.83%	154536	51512.1	1581.54	0.000
Error	8	261		0.17%	261	32.6		
Total	11	154797		100.00%				

Resumen del modelo

S	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. PRESS (pred)
5.70709	99.83%	99.77% 586.275 99.62%

Medias

Factor	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
1%_D	3	702.83	9.28	(695.24, 710.43)
2%_D	3	960.83	2.14	(953.24, 968.43)
3%_D	3	996.93	5.19	(989.34, 1004.53)
4%_D	3	878.07	3.56	(870.47, 885.66)

Desv.Est. agrupada = 5.70709

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

Factor	N	Media	Agrupación
3%_D	3	996.93	A
2%_D	3	960.83	B
4%_D	3	878.07	C
1%_D	3	702.83	D

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Figura 48. Prueba de ANOVA en estado seco utilizando método de Tukey al 0,05 de significancia

También podemos apreciar el mismo comportamiento donde todas las dosis de emulsión presentan significancia cuando se realiza las pruebas estadísticas en el estado saturado.

En la Figura 49 que refleja la prueba de normalidad para la estabilidad saturada, observamos el valor-p con un resultado de 0,173 mayor al nivel de significancia de 0,05, lo cual indica que no hay pruebas para indicar que no existe normalidad en los resultados

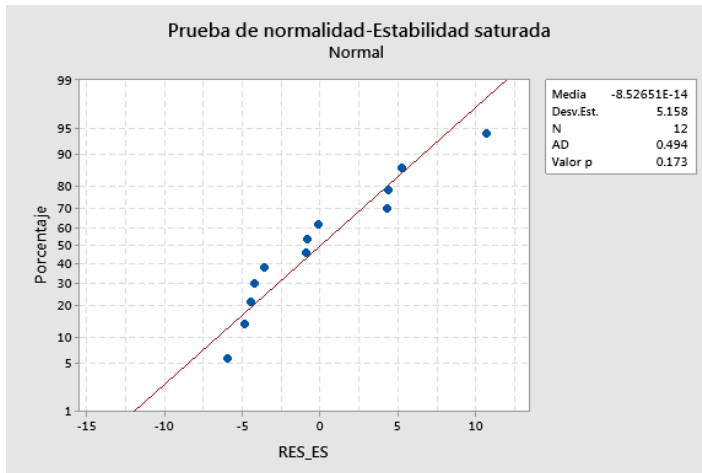


Figura 49. Prueba de normalidad estabilidad saturada.

En la Figura 50 que refleja la prueba de Levene, homocedasticidad o varianza constante para la estabilidad saturada, se observa que el valor-p tiene un resultado de 0,189 mayor al nivel de significancia de 0,05, lo cual indica que no hay pruebas para afirmar que no existe homocedasticidad o varianza constante en los valores evaluados.

Prueba de Levene-Homocedasticidad-Estabilidad Saturada

Método

Hipótesis nula Todas las medias son iguales
 Hipótesis alterna No todas las medias son iguales
 Nivel de significancia $\alpha = 0.05$

Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.

Información del factor

Factor	Niveles	Valores
Grupo_est_1	4	S1, S2, S3, S4

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Sec.	Contribución	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Grupo_est_1	3	37.61	43.16%	37.61	12.537	2.02	0.189
Error	8	49.53	56.84%	49.53	6.191		
Total	11	87.14	100.00%				

Figura 50. Prueba de homocedasticidad, estabilidad saturada.

Realizando la prueba de ANOVA cumpliendo con los requisitos anteriores , de la Figura 51 del análisis de varianza realizado obtenemos un valor p de 0,000 menor al nivel de significancia de 0,05, lo que nos llevaría a aceptar la hipótesis alterna y decir que si hay significancia o diferencia entre las cantidades de emulsión añadidas y las estabilidades saturadas obtenidas lo cual es confirmado por la comparación de grupos de Tukey con una confiabilidad del 95%, en el cual las distintas dosificaciones no comparten una letra de grupo similar, asimismo se pone en primer lugar que un 3% de emulsión otorga las mejor resistencia y en último lugar el 1% el cual se obtiene la menor resistencia

ANOVA - Estabilidad saturada

Método

Hipótesis nula Todas las medias son iguales
 Hipótesis alterna No todas las medias son iguales
 Nivel de significancia $\alpha = 0.05$

Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.

Información del factor

Factor	Niveles	Valores
Factor	4	1%_S, 2%_S, 3%_S, 4%_S

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC	Sec.	Contribución	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	3	328243		99.91%	328243	109414	2990.41	0.000
Error	8	293		0.09%	293	37		
Total	11	328535		100.00%				

Resumen del modelo

	R-cuad.	R-cuad.
S R-cuad. (ajustado)	PRESS	(pred)
6.04883	99.91%	99.88% 658.59 99.80%

Medias

Factor	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
1%_S	3	216.93	4.30	(208.88, 224.99)
2%_S	3	569.23	4.90	(561.18, 577.29)
3%_S	3	628.87	4.07	(620.81, 636.92)
4%_S	3	588.83	9.34	(580.78, 596.89)

Desv.Est. agrupada = 6.04883

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

Factor	N	Media	Agrupación
3%_S	3	628.87	A
4%_S	3	588.83	B
2%_S	3	569.23	C
1%_S	3	216.93	D

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Figura 51. Prueba de ANOVA en estado saturado utilizando método de Tukey al 0,05 de significancia

Se concluye que es posible usar el material propio para la construcción de un pavimento low cost de base estabilizada con emulsión, asimismo se comprueba que hay diferencia estadística entre las cantidades de emulsión añadida, por tal motivo se acepta la hipótesis alterna.

4.2.2. Hipótesis alternativas.

Ho: Los pavimentos estabilizados con emulsión asfáltica CSS-1h en las carreteras vecinales de Los Palos– La Yarada – Tacna no mejoran su desempeño.

Ha: Los pavimentos estabilizados con emulsión asfáltica CSS-1h en las carreteras vecinales de Los Palos– La Yarada – Tacna mejoran su desempeño.

En la Figura 52 que refleja la prueba de normalidad para las deflexiones en el pavimento construido en Tacna tomadas en el 2019 y 2021, observamos el valor-p con un resultado de 0,132 mayor al nivel de significancia de 0,05, lo cual indica que no hay pruebas para indicar que no existe normalidad en los resultados

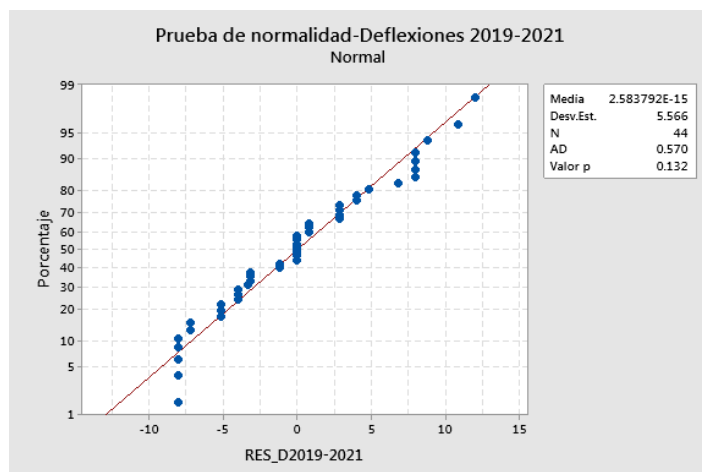


Figura 52. Prueba de normalidad, deflexiones 2019 y 2021.

En la Figura 53 que refleja la prueba de Levene, homocedasticidad o varianza constante para las deflexiones en el pavimento construido en Tacna tomadas en el 2019 y 2021, se observa que el valor-p tiene un resultado de 0,533 mayor al nivel de significancia de 0,05, lo cual indica que no hay pruebas para afirmar que no existe homocedasticidad o varianza constante en los valores evaluados.

Prueba de Levene- Homocedasticidad-Deflexiones 2019-2021

Método

Hipótesis nula	Todas las medias son iguales
Hipótesis alterna	No todas las medias son iguales
Nivel de significancia	$\alpha = 0.05$

Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.

Información del factor

Factor	Niveles Valores
Grupo_abs_Def	2 D_2019, D_2021

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Sec.	Contribución	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Grupo_abs_Def	1	4.390	0.93%	4.390	4.390	0.39	0.533
Error	42	467.351	99.07%	467.351	11.127		
Total	43	471.742	100.00%				

Figura 53. Prueba de homocedasticidad, deflexiones 2019 - 2021.

Se realiza una prueba comparativa de t pareada o t correlacionada según Figura 54, para determinar las diferencias entre las deflexiones obtenidas al inicio de la construcción del pavimento y dos años de servicio después 2019 y 2021 respectivamente, según la prueba ejecutada se tiene un p –valor de 0,000 menor al nivel de significancia de 0,05, lo que indica que si hay significancia o diferencia entre las deflexiones obtenidas.

Prueba t pareada- Deflexiones 2019 - 2021

Estadísticas descriptivas

Muestra	N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media
D_2019	22	40.09	6.19	1.32
D_2021	22	17.21	5.02	1.07

Estimación de la diferencia pareada

Media	Desv.Est.	Error estándar de la media	IC de 95% para la diferencia_μ
22.88	8.92	1.90	(18.92, 26.83)

diferencia_μ: media de (D_2019 - D_2021)

Prueba

Hipótesis nula	$H_0: \text{diferencia}_\mu = 0$
Hipótesis alterna	$H_1: \text{diferencia}_\mu \neq 0$
Valor T	12.03
Valor p	0.000

Figura 54. Prueba t pareada, para diferencia de deflexiones entre el 2019 y 2021.

Entonces se puede afirmar que los pavimentos estabilizados con emulsión asfáltica CSS-1h en las carreteras vecinales de Los Palos– La Yarada – Tacna mejoran su desempeño, lo que se puede evidenciar mejor con el ensayo de viga Benkelman realizado en la etapa inicial del pavimento en el año 2019 y dos años después en el 2021, si observamos la Tabla 52 , vemos que la deflexión característica del 2019 fue de 47×10^{-2} mm y la del 2021 de 22×10^{-2} mm , deflexiones mucho menores a la deflexión admisible de 158×10^{-2} mm y la deflexión crítica de 155×10^{-2} mm, resaltando sobre todo la última deflexión del 2021, lo que evidencia un estado saludable del pavimento, entonces podemos aceptar la hipótesis alternativa como válida.

Ho: Los pavimentos Low Cost de base estabilizada con emulsión CSS-1h no son una solución a la disponibilidad de canteras en las carreteras vecinales de Los Palos– La Yarada – Tacna.

Ha: Los pavimentos Low Cost de base estabilizada con emulsión CSS-1h son una solución a la disponibilidad de canteras en las carreteras vecinales de Los Palos– La Yarada – Tacna.

Los pavimentos Low Cost de base estabilizada con emulsión CSS-1h son una solución a la disponibilidad de canteras en las carreteras vecinales de Los Palos– La Yarada – Tacna, tal inconveniente se tuvo en la construcción de pavimento con base estabilizada en Tacna en el 2019, alrededor de la zona de construcción presentaba solo suelos arenosos, el transporte de material granular se realizó desde cantera ubicada a una distancia de 35,7 km aproximadamente según la Figura 55, lo que aumento el costo del presupuesto, con esta alternativa presentada se puede prescindir de las canteras y tomar el material propio para su construcción abaratando costos y disminuyendo tiempos, por tal motivo se confirma que la hipótesis alterna es válida.

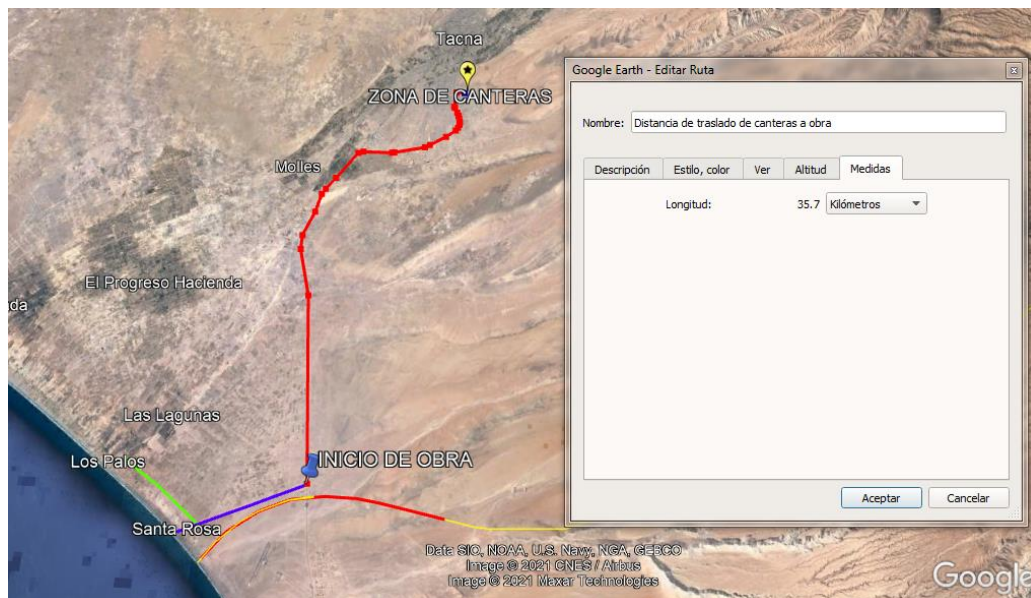


Figura 55. Distancia de traslado de material granular a obra, Tacna 2019.

Fuente: Google Earth, 2021.

Ho: Los pavimentos Low Cost de base estabilizada con emulsión CSS-1h no disminuyen el presupuesto sin afectar la resistencia en las carreteras de Los Palos– La Yarada – Tacna.

Ha: Los pavimentos Low Cost de base estabilizada con emulsión CSS-1h disminuyen el presupuesto sin afectar la resistencia en las carreteras de Los Palos– La Yarada – Tacna.

Los pavimentos Low Cost de base estabilizada con emulsión CSS-1h disminuye el presupuesto sin afectar la resistencia en las carreteras de Los Palos– La Yarada – Tacna, a comparación del pavimento construido en el 2019 el cual ocupa un 3,30% de emulsión con adquisición y traslado de material granular a un costo de S./201,16 la producción de 1 m^3 , la reciente propuesta del pavimento low cost de base estabilizada con emulsión asfáltica ocupa un 2,5% de emulsión asfáltica a un costo de S./99,84 y contempla el uso de material propio como consecuencia tenemos disminución de costos, además de obtener una estabilidad seca de 1000 kg y una estabilidad saturada de 640 kg, resistencia suficiente para satisfacer las demandas del pavimento según el modelo planteado en la Figura 39.

Para poder comprender mejor la interacción entre porcentaje de emulsión añadido, estabilidad o resistencia y costo por m^3 observemos la Figura 56, haciendo el respectivo análisis del grafico se concluye que existe un punto de inflexión en donde la emulsión en vez de aportar resistencia a la mezcla hace lo contrario disminuir, lo cual es perjudicial para la base estabilizada, de igual forma se aprecia que su incremento encarece su costo de producción, comprendiendo esto se puede afirmar que la hipótesis alternativa es válida.

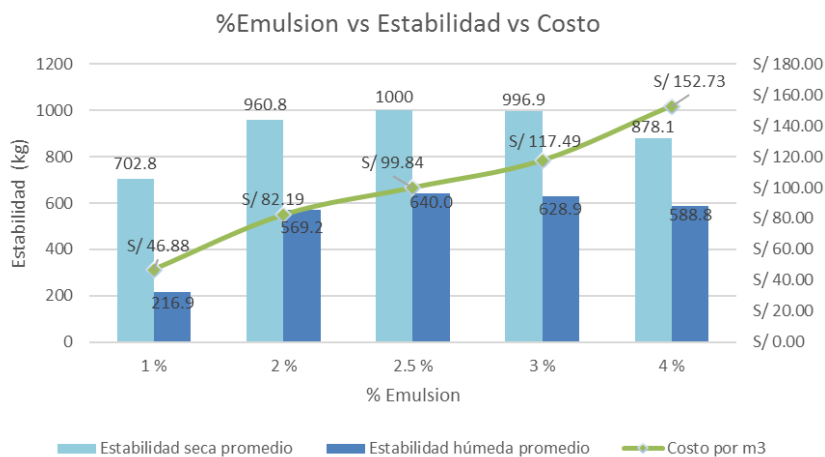


Figura 56. Interacción entre %emulsión, estabilidad y costo por m³ de base estabilizada low cost.

4.3. Discusión de resultados.

A partir de los hallazgos encontrados en el desarrollo del presente trabajo se acepta la hipótesis general alteran la cual afirma que se puede utilizar el material propio para aplicar pavimentos Low Cost de base estabilizada con emulsión CSS-1h en las carreteras vecinales de Los Palos– La Yarada – Tacna.

Estos resultados guardan relación con lo que encontraron Galarreta y Llenque (2019) en donde afirman que con un 6% de emulsión asfáltica logran estabilizar una sub rasante arenosa, al igual que Jara y Angulo (2018) quienes indican que con un 8% de emulsión asfáltica estabilizan un material de arena arcillosa, en este punto se puede apreciar que tales autores usan porcentajes de emulsión relativamente altos a los hallados en la presente investigación donde se obtuvo 2,5% y el usado en Tacna 2019 de 3,30% diseño adjunto en el Apéndice F, otorgando resultados alentadores para su construcción, tales variaciones de cantidad de emulsión pueden deberse al tipo de emulsión, calidad y concentración de residuo asfáltico en las emulsiones utilizadas.

Con respecto a las mejoras presentadas en el pavimento estabilizado con emulsión asfáltica en Tacna 2019, se puede evidenciar que las deflexiones obtenidas en su etapa inicial son mayores a las obtenidas dos años después las cuales son menores, normalmente debería las lecturas deberían ser contrarias, es decir las lecturas iniciales menores a las actuales, pero cabe mencionar que se realizó la toma de lecturas en un periodo de 2 semanas a la conformación de la base estabilizada tiempo en el cual posiblemente no se llegó a la rigidez total de dicha estructura, esto puede ser justificado debido a la naturaleza del trabajo debido a que se tiene un tiempo de ejecución de obra que debe ser cumplido en su plazo por lo tanto se procede a liberar la estructura con anticipación pero cumpliendo con los parámetros de aceptación, tal como es el caso que en ambos escenarios la deflexión característica es menor a la deflexión admisible lo que garantiza que el pavimento de cierta forma soportara el tráfico para el cual fue diseñado, asimismo hubiese sido interesante comprar deflexiones obtenidas con otros autores pero no es posible debido a que las características presentadas en los materiales no serían las mismas, así como el ambiente de evaluación.

Sobre el tema de la disponibilidad de canteras en efecto la utilización del material propio aplicándole un agente estabilizador es una alternativa totalmente válida para solucionar este problema debido a que muchas veces por la geología de la zona no se cuenta con canteras con material de base o sub base granular o estas se encuentran demasiado lejos como es el caso mencionado a 35,7 km encareciendo el costo del proyecto por el flete de transporte tal como indica Mostejo (2018).

Refiriéndonos a la ideología de low cost, la intención es lograr un pavimento de bajo costo sin sacrificar características de resistencia, es lo que se obtuvo con la aplicación de 2,50% de emulsión y con la reutilización del material propio arenoso de la zona, con el que se obtiene el m³ de base estabilizada low cost a S./99,84 dicho precio es referencial con respecto al expediente realizado para la ejecución de la carretera en los Palos – Tacna, es claro que este precio puede elevarse o dejar de ser rentable en caso que los hidrocarburos eleven su precio, asimismo se puede ver según la Tabla 51 , que por cada 1 km de base estabilizada del año 2019 se podría construir 1,44 km de base estabilizada low cost, con lo cual se podría generar mayores tramos de pavimentación.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones.

Primera. Es factible utilizar el material propio para aplicar pavimentos Low Cost de base estabilizada con emulsión CSS-1h lo cual dependerá del material propio, en este caso con el uso de arena limosa predominante en Tacna se obtuvo buenos resultados de 1000 kg de estabilidad seca y 640 kg de estabilidad saturada, teniéndose en cuenta esta última.

Segunda. Los pavimentos estabilizados con emulsión CSS-1h en las carreteras vecinales de Los Palos– La Yarada – Tacna mejoran su desempeño, la deflexión característica del pavimento dos años después de su construcción es de 23×10^{-2} mm menor que la deflexión admisible de 158×10^{-2} mm y la deflexión crítica de 155×10^{-2} mm.

Tercera. Al ser posible la reutilización de material propio para la aplicación de bases estabilizadas low cost, es prescindible la disponibilidad de canteras de material granular de base o sub base.

Cuarta. Al realizar un análisis en la interacción de %emulsión, estabilidad y costo, con un 2,50% de emulsión, se logró una estabilización seca de 1000 kg y una estabilización saturada de 640 kg a un costo de S/99,84 menor que el de Tacna 2019 con S./201,16, cumpliendo con los requisitos mínimos de aceptación y de diseño según AASHTO 93.

5.2. Recomendaciones.

Primera. Sobre la construcción de este tipo de pavimentos con estabilizaciones de emulsión asfáltica es importante respetar la cantidad de agua en mezcla, debido a que un exceso de agua al realizar la compactación formará una especie de acolchonamiento a causa del agua atrapada en la base estabilizada, como solución se puede airear hasta llegar óptima humedad.

Segunda. En la Tabla 42 varios autores recomiendan diferentes porcentajes tentativos de emulsión, se debe tener en cuenta que no todas las emulsiones son iguales, asimismo no tienen el mismo porcentaje de residuo asfáltico, se deberá revisar las fichas técnicas del producto o en su defecto comprobar con ensayos sus propiedades.

Tercera. Para ampliar el estudio sobre los materiales propios estabilizados con emulsiones asfálticas sería ideal la construcción de tramos de prueba con materiales arenosos o arenosos limosos y monitorear su comportamiento en el tiempo, dicho estudio a largo plazo podría ser económicamente beneficioso obteniendo mayores tramos pavimentados.

Cuarta. Se deberá tenerse en cuenta que el agregado sea compatible con la emulsión asfáltica, es decir que se realice correctamente la combinación o unión entre ambos y que al secar por completo no haya separación o disgregación, de presentarse dicha incompatibilidad cabe la posibilidad de usar una emulsión aniónica o cambiar de agregados.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO. (2019). *AASHTO T 330—Método de prueba para la determinación del valor de azul de metileno de finos y agregados minerales.*
- Aliaga, F, y Soriano, C. (2019). *Análisis comparativo de estabilización con cemento portland y emulsión asfáltica en bases granulares* (Tesis de pregrado). Universidad Ricardo Palma, Lima, Perú. Recuperado de: <https://repositorio.urp.edu.pe/handle/URP/2673>
- Almeida, F. y Sánchez, E. (2011). *Estabilización de suelos con el uso de emulsiones asfálticas cationicas de rotura lenta, caso de estudio via Las Mercedes—Puerto Nuevo, Provincia de Santo Domingo de las Tsachilas* (Tesis de Pregrado). Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Quito, Ecuador. Recuperado de: <http://repositorio.puce.edu.ec/handle/22000/2653>
- Asphalt Institute. (2014). *Asphalt Mix Design Methods*. United States, United States: Asphalt Institute.
- ASTM International. (2011). *ASTM D2172—Método de prueba estándar para la extracción cuantitativa de aglutinante de asfalto de mezclas asfálticas.*
- ASTM International. (2012a). *ASTM D1557—Método de ensayo normalizado para las características de compactación de suelos en laboratorio usando una energía modificada.*
- ASTM International. (2012b). *ASTM E867—Terminología estándar relacionada con los sistemas de pavimentos vehiculares.*

ASTM International. (2014a). *ASTM C131—Método de prueba estándar para la resistencia a la degradación de agregado grueso de tamaño pequeño por abrasión e impacto en la máquina de Los Ángeles.*

ASTM International. (2014b). *ASTM D854—Métodos de prueba estándar para la gravedad específica de los sólidos del suelo por el picnómetro de agua.*

ASTM International. (2014c). *ASTM D2419—Método de ensayo estándar para valor equivalente de arena de suelos y agregado fino.*

ASTM International. (2015a). *ASTM C127—Método de prueba estándar para densidad relativa (gravedad específica) y absorción de agregado grueso.*

ASTM International. (2015b). *ASTM C128—Método de prueba estándar para densidad relativa (gravedad específica) y absorción de agregado fino.*

ASTM International. (2015c). *ASTM D 6927—Método de prueba estándar para la estabilidad Marshall y el flujo de mezclas asfálticas.*

ASTM International. (2015d). *ASTM D1188—Método de prueba estándar para la densidad y gravedad específica a granel de mezclas bituminosas compactadas utilizando muestras recubiertas.*

ASTM International. (2015e). *ASTM D1556—Método de ensayo estándar para la densidad y peso unitario para la densidad y peso in situ mediante el método de cono de arena.*

ASTM International. (2015f). *ASTM D4695—Guía estándar para mediciones generales de deflexiones de pavimento.*

ASTM International. (2015g). *ASTM E965- Método de prueba estándar para medir la profundidad de la macrotextura del pavimento usando una técnica volumétrica.*

ASTM International. (2016). *ASTM D1883—Método de prueba estándar para California Bearing Ratio (CBR) de suelos compactados en laboratorio.*

ASTM International. (2017a). *ASTM D4318—Método de prueba estándar para límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad.*

ASTM International. (2017b). *ASTM D5821-Método de prueba estándar para determinar el porcentaje de partículas fracturadas en el agregado grueso.*

ASTM International. (2017c). *ASTM D6913—Método de prueba estándar para la distribución del tamaño de partícula (gradación) de los suelos mediante análisis de tamiz.*

ASTM International. (2018). *ASTM C88- Método de prueba estándar para la solidez de los agregados mediante el uso de sulfato de sodio o sulfato de magnesio.*

ASTM International. (2019a). *ASTM C136 -Método de ensayo normalizado para la determinación granulométrica de agregados gruesos y finos.*

ASTM International. (2019b). *ASTM D977- Especificaciones estándar para emulsión asfáltica.*

ASTM International. (2019c). *ASTM D2216—Método de prueba estándar para la determinación de laboratorio del contenido de agua (humedad) del suelo y la roca en masa.*

ASTM International. (2019d). *ASTM D2397- Especificaciones estándar para emulsión asfáltica catiónica.*

ASTM International. (2020). *ASTM D 6926—Preparación estándar para la preparación de muestras de mezclas asfálticas usando un aparato Marshall.*

Becerril, A. y Miranda, D. (2016). *Procedimiento constructivo de pavimentos flexibles en la carretera: Barranca Larga en el estado de Oaxaca* (Tesis de Pregrado). Universidad Autónoma de México, México DF, México.
Recuperado de:
<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/handle/132.248.52.100/9771>

Braja, D. (2011). *Fundamento de ingeniería de cimentaciones*. México DF, México: Cengage Learning.

Castillo, B. (2017). *Estabilización de suelos arcillosos de Macas con valores de CBR menores al 5% y límites líquidos superiores al 100% para la utilización de subrasantes en carreteras* (Tesis de Maestría). Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador. Recuperado de: .
<http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/26917>

Ccasani, M. y Ferro, Y. (2017). *Evaluación y análisis de pavimentos en la ciudad de Abancay, para proponer una mejor alternativa estructural en el diseño*

de pavimentos (Tesis de Pregrado). Universidad Tecnológica de Los Andes, Apurímac, Perú. Recuperado de: <http://repositorio.utea.edu.pe/bitstream/handle/utea/107/Tesis-Evaluaci%C3%B3n%20y%20an%C3%A1lisis%20de%20pavimentos%20en%20la%20ciudad%20de%20Abancay%201.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

ComexPerú. (2020). *Infraestructura vial: Gobiernos subnacionales estancados*. Recuperado de: <https://www.comexperu.org.pe/articulo/infraestructura-vial-gobiernos-subnacionales-estancados>

Cusme, W. y Tapia, R. (2016). *Estudio del comportamiento del material de mejoramiento y tratado con emulsión asfáltica para su utilización como base/subbase en la estructura de pavimentos* (Tesis de Pregrado). Universidad Técnica de Manabí, Manabí, Ecuador. Recuperado de: <http://repositorio.utm.edu.ec/bitstream/123456789/419/1/ESTUDIO%20DEL%20COMPORTAMIENTO%20DEL%20MATERIAL%20DE%20MEJORAMIENTO%20TRATADO%20CON%20EMULSION%20ASFALTICA%20PARA%20SU%20UTILIZACION%20COMO%20BASESUB-BASE%20EN%20LA%20ESTRUCTURA%20DE%20PAVIMENTOS.pdf>

De la Torre, M. (2018). *Evaluación del diseño de pavimentos estabilizados con emulsión asfáltica y cemento portland para el proyecto de conservación vial Puno-Tacna, tramo Tarata—Capazo – Mazocruz* (Tesis de Pregrado). Universidad San Ignacio de Loyola, Lima, Perú. Recuperado de:

http://repositorio.usil.edu.pe/bitstream/USIL/3786/1/2018_De-La-Torre-Illesca.pdf

Díaz, J. (2016). *Análisis de los procedimientos constructivos de bases y sub bases granulares para pavimentos flexibles* (Tesis de Maestría). Universidad Autónoma de México, México DF, México. Recuperado de: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/10835/tesis.%20pdf.pdf?sequence=1>

Escobar, J. Quispe, G. Quispe, F. y Arana, J. (2020). *Estabilización de una subrasante arcillosa de baja plasticidad con cenizas de cascaras de arroz* (Tesis de Pregrado). Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú. Recuperado: <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/18221>

Fernández, V. (2012). *Reciclado en frío de pavimentos flexibles, con el uso de emulsiones asfálticas catiónicas* (Tesis de Pregrado). Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú. Recuperado de: <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/3414>

Fontalba, E. (2015). *Diseño de un pavimento alternativo para la avenida Circunvalación Sector Guacamayo 1ºEtapa* (Tesis de Pregrado). Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile. Recuperado de: <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2015/bmfcif678d/doc/bmfcif678d.pdf>

Galarreta, W. y Llenque, S. (2019). *Influencia de la adición de emulsión asfáltica en la estabilidad de los suelos del centro poblado de Villa Hermosa en el*

distrito La Esperanza (Tesis de Pregrado). Universidad Nacional de Trujillo, La Libertad, Perú. Recuperado de: <http://dspace.unitru.edu.pe/handle/UNITRU/13423>

García, F. (2021). *Tamaño de la muestra y teoría estadística*. Recuperado de: <http://webdelprofesor.ula.ve/economia/gsfra/Asignaturas/EvaluacionFinEconProyec/MUESTRA.pdf>.

Google Earth. (2021). *Caminos vecinales de Los Palos—La Yarada -Tacna*.

Hernández, R. Fernández, C. y Baptista, P. (2014). *Metodología de la Investigación*. México DF, México: Mc-GRAW-HILL.

Huanca, A. (s.f). *Mecánica de suelos y cimentaciones*. Ica, Perú: Universidad Nacional San Luis Gonzaga.

INACAL. (2011). *NTP 400.016—Determinación de la inalterabilidad de los agregados por medio de sulfato de sodio o sulfato de magnesio*.

INACAL. (2015). *NTP 339.152—Método de ensayo normalizado para la determinación del contenido de sales solubles en suelos y agua subterránea*.

INACAL. (2018). *NTP 400.040—Métodos de ensayo para determinar partículas planas, partículas alargadas o partículas planas y alargadas en agregado grueso*.

Iniciarte, C. (2012). *Análisis comparativo de métodos de diseño y construcción de pavimentos de concreto hidráulico según normas aplicadas en México, Reino Unido y España* (Tesis de Maestría). Universidad Autónoma de

México, México DF, México. Recuperado de:
https://ru.dgb.unam.mx/handle/DGB_UNAM/TES01000704824

Jara, S. y Angulo, A. (2018). *Análisis y aplicación de emulsiones asfálticas catiónicas para la estabilización en el tramo de 5 Km entre el caserío José Galves y la ciudad de Otuzco, Provincia de Otuzco, Departamento de La Libertad* (Tesis de Pregrado). Universidad Privada Antenor Orrego, La Libertad, Perú. Recuperado de:
<http://repositorio.upao.edu.pe/handle/upaorep/4444>

Jimenez, M. Ulloa, A. y Múnera, J. (2016). *Guía de diseño de mezcla de laboratorio para sellos de lechada asfáltica*. San José, Costa Rica: LanammeUCR.

Jinchuña, M. (2020). *Evaluación por deflectometría y la rugosidad del pavimento flexible para mejorar la transitabilidad vehicular en la Av. Billinghamst, Tramo: Av. Bolognesi—Av. Tarapacá-Tacna, 2019* (Tesis de Pregrado). Universidad Privada de Tacna, Tacna, Perú. Recuperado de:
<https://repositorio.upt.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12969/1583/Jinchuna-Alanoca-Miguel.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Jurado, C. y Clavijo, D. (2016). *Estabilización de suelos con cemento MH para mejorar las características físicas y mecánicas del material del material de subsuelo de la zona de talleres y cocheras de la PMLQ, sector Quitumbre* (Tesis de Pregrado). Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Quito, Ecuador. Recuperado de:
<http://repositorio.puce.edu.ec/handle/22000/13191>

Mendoza, C. (2016). *Propuesta de utilización de emulsión asfáltica modificada en el mantenimiento de la carretera Lucma-09 de Octubre, para mejorar la transitabilidad vehicular en el distrito de Lacma, Provincia Gran Chimú—La Libertad, 2016* (Tesis de Pregrado). Universidad Privada de Trujillo, La Libertad, Perú. Recuperado de: <http://repositorio.uprit.edu.pe/handle/UPRIT/29>

Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2013). *Especificaciones Generales*. Lima, Perú: MTC.

Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2014). *Manual de carreteras, suelos, geología y pavimentos*. Lima, Perú: MTC.

Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2016). *Manual de ensayo de materiales*. Lima, Perú: MTC.

Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2021). *Compendio normativo sobre pesos y medidas*. Lima, Perú: MTC.

Ministerio de vivienda, construcción y saneamiento. (2012). *Ce 0.20—Estabilización de suelos y taludes*. Lima, Perú: Ministerio de vivienda, construcción y saneamiento.

Montealegre, M. (2014). *Determinación del módulo resiliente de diseño de pavimentos mediante criterios AASHTO 1993 y 2002* (Tesis de Maestría). Universidad de Piura, Lima, Perú. Recuperado de: https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/2018/MAS_ICIV-L_025.pdf

Mostejo, A. (2018). *Estabilización de suelos*. Bogotá, Colombia: Ediciones de la U.

Murcia, C. y Fonseca, I. (2017). *Evaluación del índice de CBR de un suelo arenoso limoso con adición de emulsión asfáltica de rompimiento lento y tirillas de polisombra* (Tesis de Pregrado). Universidad de La Salle, Bogotá, Ecuador. Recuperado de: https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1317&context=ing_civil

Otiniano, M. y Paria, M. (2016). *Análisis de las propiedades físico-mecánicas presentes en las mezclas asfálticas en frío utilizando emulsiones asfálticas catiónicas y agregados petros de la localidad-Nvo. Chimbote—2015* (Tesis de Pregrado). Universidad Nacional del Santa, Ancash, Perú. Recuperado de: <http://repositorio.uns.edu.pe/handle/UNS/2719>

Perez, G. y Andagua, K. (2015). *Evaluación de las técnicas de diseño de pavimentos básicos para la conservación vial del tramo V de la carretera Acobamba-Puente Alcomachay en el departamento de Huancavelica* (Tesis de Pregrado). Universidad Ricardo Palma, Lima, Perú. Recuperado de: <http://repositorio.urp.edu.pe/handle/URP/2178>

Petroquímica Panamericana. (s.f). *Estabilizados*. Recuperado de: <http://www.emulsionesasfalticas.com/estabilizadosdoc.htm>

Provias Descentralizado. (2019). *Expediente “Mejoramiento del camino vecinal puente Los Palos—Santa Rosa—Complejo Aduanero Santa Rosa, Distrito La Yarada—Los Palos, provincia de Tacna—Tacna.*

Quiroz, W. (2017). *Comparación entre las estabilización de suelos con emulsión asfáltica, y la estabilización de suelos con asfalto y diesel para determinar cual estabilización proporciona mayor densidad aparente y relación de soporte CBR* (Tesis de Pregrado). Universidad Técnica de Ambato, Ambato, Ecuador. Recuperado de: <https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/25753>

Salgado, A. y Vásquez, S. (2019). *Diseño de mezcla asfáltica en frío como alternativa para el bacheo de pavimentos flexibles con aplicación en la vía Rafael Carvajal Parroquia de Carcelén, cantón Quito* (Tesis de Pregrado). Universidad Central del Ecuador, Quito, Ecuador. Recuperado de: <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/18645>

Sánchez, J. y Shoji, N. (2020). *Propuesta de solución de estabilización en un pavimento sustituyendo la capa granular espumada por una emulsionada para condiciones críticas en el proyecto de conservación vial Puno-Tacna, tramo Tarata -Capazo* (Tesis de Pregrado). Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Lima, Perú. Recuperado de: <https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/652275>

Santa Cruz, D. (2018). *Zonificación de la capacidad portante del suelo de la localidad de Soritor del Distrito de Soritor-Provincia de Moyobamba-Region San Martín* (Tesis de Pregrado). Universidad Nacional de San

Martín, San Martín, Perú. Recuperado de:
<http://repositorio.unsm.edu.pe/handle/11458/2928>

Sarmiento, J. y Arias, T. (2015). *Análisis y diseño vial de la avenida Martir Olaya Ubicada en el Distrito de Lurín del departamento de Lima* (Tesis de Pregrado). Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Lima, Perú.
Recuperado de:
<https://repositorioacademico.upc.edu.pe/bitstream/handle/10757/528141/Tesis%20Arias%20-%20Sarmiento.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Seminario, M. (s.f). *Costos y presupuesto de obra*. Lima, Perú: ICG.

Soporte Minitab. (2019). *Ejemplo de como obtener e interpretar un valor p*.
Recuperado de: <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/statistics/basic-statistics/supporting-topics/basics/example-of-getting-and-interpreting-a-p-value/>

Tixe, E. (2019). *Implementación del proceso de conservación de la estructura de la capa de rodadura de la vía Patate—Píllaro en el tramo km 7+600 al km 11+400 de la provincia de Tungurahua* (Tesis de Pregrado). Universidad Técnica de Ambato, Ambato, Ecuador. Recuperado de:
<https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/29780>

Urcia, F. (2017). *Estabilización del suelo con la aplicación de Cemento portland tipo I para la mejora de la carretera a nivel de afirmado en el tramo: Izcuchaca—Quichuas. Región Huancavelica, 2017* (Tesis de Pregrado).

Universidad César Vallejo, Lima, Perú. Recuperado de:
<http://repositorio.ucv.edu.pe/handle/UCV/23128>

Velásquez, P. (2018). *Influencia del cemento portland tipo I en la estabilización del suelo arcilloso de la subrasante de la avenida Dinamarca, sector la Molina* (Tesis de Pregrado). Universidad Nacional de Cajamarca, Cajamarca, Perú.
Recuperado de: <http://repositorio.unc.edu.pe/handle/UNC/2534>