

UNIVERSIDAD RICARDO PALMA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE TITULACIÓN POR TESIS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



**DOSIFICACIÓN EN PORCENTAJE DEL CEMENTO PORTLAND
PARA EL MEJORAMIENTO DE LAS PROPIEDADES DE LOS
SUELOS EN CARRETERAS DE BAJO VOLUMEN DE TRÁNSITO**

TESIS
PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERA CIVIL

PRESENTADA POR:

Bach. ARELLANO DELGADO, GABRIELA ALESSANDRA

Bach. GONZALES DIAZ, ELIZABETH GERALDINE

ASESOR: Mg. Ing. ARÉVALO LAY, VÍCTOR ELEUTERIO

LIMA - PERÚ

2021

DEDICATORIA

La presente tesis está dedicada a Jehová; a mi mamá y abuela, por su esfuerzo continuo, apoyo económico y moral. Este logro es por y para ustedes.

Gabriela Alessandra Arellano Delgado

La presente tesis está dedicada a Dios; a mi abuelo que, aunque no esté presente en cuerpo, siempre está acompañándome; a mis padres, por sus consejos, dedicación y sobre todo paciencia. A toda mi familia que es lo más importante en mi vida.

Elizabeth Geraldine Gonzales Diaz

AGRADECIMIENTO

Nuestro sincero agradecimiento a Dios, por su amor y bondad infinita, por dirigir nuestro camino, brindarnos la sabiduría y fuerza necesaria en cada etapa de nuestras vidas. Al Mag. Ing. Víctor Eleuterio, Arévalo Lay, por habernos guiado en el desarrollo del proyecto de investigación en base a su experiencia y sabiduría. A nuestras familias, por apoyarnos en cada decisión y proyecto de nuestra vida profesional.

Gabriela Arellano y Elizabeth Gonzales

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	xi
ABSTRACT.....	xii
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
1.1 Descripción y formulación del problema general y específicos	2
1.1.1 Problema general.....	6
1.1.2 Problemas específicos	6
1.2 Objetivo general y específicos	7
1.2.1 Objetivo general	7
1.2.2 Objetivos específicos.....	7
1.3 Delimitación de la investigación.....	7
1.3.1 Delimitación espacial	8
1.3.2 Delimitación temporal.....	8
1.3.3 Delimitación poblacional	8
1.4 Justificación e importancia	8
1.4.1 Importancia.....	8
1.4.2 Justificación teórica.....	9
1.4.3 Justificación metodológica	9
1.4.4 Justificación práctica	9
1.4.5 Justificación social	9
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	10
2.1 Antecedentes del estudio de investigación	10
2.1.1 Marco histórico	10
2.1.2 Investigaciones Internacionales.....	14
2.1.3 Investigaciones Nacionales	16
2.2 Estructura teórica y científica que sustenta el estudio	17
2.2.1 Suelos	17
2.2.2 Carreteras de Bajo Volumen de Tránsito	30
2.2.3 Estabilización de suelos	34
2.2.4 Cemento Portland.....	36
2.2.5 Estabilización con cemento Portland	38
2.2.6 Coeficiente estructural o CBR del suelo estabilizado con cemento.....	48

2.2.7	Espesor de reemplazo del material de subrasante	50
2.2.8	Diseño estructural de la carretera	51
2.3	Definición de términos básicos	56
	CAPÍTULO III: SISTEMA DE HIPÓTESIS	58
3.1	Hipótesis	58
3.1.1	Hipótesis general	58
3.1.2	Hipótesis específicas	58
3.2	Variables	58
3.2.1	Definición conceptual de las variables	58
3.2.2	Operacionalización de las variables	58
	CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	59
4.1	Tipo y nivel.....	59
4.1.1	Tipo	59
4.1.2	Nivel.....	59
4.2	Diseño de investigación	59
4.3	Población y muestra.....	59
4.3.1	Población de estudio.....	59
4.3.2	Diseño muestral.....	60
4.4	Técnicas e instrumentos de recolección de datos	60
4.4.1	Tipos de técnicas e instrumentos.....	60
4.4.2	Criterios de validez y confiabilidad de los instrumentos	60
4.4.3	Procedimientos para la recolección de datos.....	60
4.5	Técnicas para el procesamiento y análisis de la información.....	60
	CAPÍTULO V: PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	61
5.1	Resultados de las características físico-mecánicas del material de subrasante.....	63
5.2	Resultados de la dosificación en porcentaje del cemento Portland	66
5.3	Resultados del espesor de reemplazo del material de subrasante.....	72
5.4	Resultados del espesor de la capa de afirmado.....	109
5.5	Análisis de las características físico-mecánicas del material de subrasante.....	114
5.6	Análisis de la dosificación en porcentaje del cemento Portland.....	116
5.7	Análisis del espesor de reemplazo del material de subrasante	119
5.8	Análisis del espesor de la capa de afirmado	120
5.9	Contrastación de hipótesis	122
5.9.1	Hipótesis específica 1	122

5.9.2 Hipótesis específica 2.....	123
5.9.3 Hipótesis específica 3.....	124
5.9.4 Hipótesis específica 4.....	125
5.9.5 Hipótesis general	126
CONCLUSIONES	127
RECOMENDACIONES	128
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	129
ANEXOS.....	135
Anexo 1: Matriz de Consistencia.....	135
Anexo 2: Operacionalización de variables	136
Anexo 3: Resumen del Proyecto de Investigación PI1	137
Anexo 4: Resumen del Proyecto de Investigación PI2.....	138
Anexo 5: Resumen del Proyecto de Investigación PI3.....	140
Anexo 6: Resumen del Proyecto de Investigación PI4.....	141
Anexo 7: Resumen del Proyecto de Investigación PI5.....	142
Anexo 8: Resumen del Proyecto de Investigación PI6.....	143
Anexo 9: Resumen del Proyecto de Investigación PI7.....	144
Anexo 10: Resumen del Proyecto de Investigación PI8.....	145
Anexo 11: Resumen del Proyecto de Investigación PI9.....	150
Anexo 12: Resumen del Proyecto de Investigación PI10.....	151
Anexo 13: Resumen del Proyecto de Investigación PI11.....	153
Anexo 14: Resumen del Proyecto de Investigación PI12.....	154
Anexo 15: Resumen del Proyecto de Investigación PI13.....	155
Anexo 16: Resumen del Proyecto de Investigación PI14.....	156

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Sistema de clasificación AASHTO	19
Tabla 2. Sistema de clasificación SUCS.....	20
Tabla 3. Tipo de material de acuerdo al tamaño de las partículas	21
Tabla 4. Coeficiente de permeabilidad	30
Tabla 5. Clasificación de la carretera por orografía.....	31
Tabla 6. Clasificación de la carretera por demanda.....	31
Tabla 7. Clasificación de las carreteras de acuerdo al tráfico.....	34
Tabla 8. Clasificación de tráfico de acuerdo a los EE	34
Tabla 9. Dosificación en función del tipo de suelo.....	41
Tabla 10. Características claves de los productos suelo-cemento	47
Tabla 11. Resistencia a compresión no confinada de varios tipos de suelos no tratados y mezclas suelo-cementos.....	49
Tabla 12. Categorías de subrasante.....	52
Tabla 13. Factores de Distribución Direccional y de Carril para determinar el Tránsito en el carril del diseño	54
Tabla 14. Configuración de Ejes.....	54
Tabla 15. Factores de Crecimiento Acumulado (Fca) para el cálculo de número de repeticiones de EE	55
Tabla 16. Relación de Cargas por Eje para determinar Ejes Equivalentes (EE) para Afirmados, Pavimentos.....	55
Tabla 17. Resumen de los Proyectos de Investigación consolidados	62
Tabla 18. Resumen de las características físico-mecánicas del material de subrasante continúa.....	64
Tabla 19. Tipos de suelos de los Proyectos de Investigación.....	66
Tabla 20. Resumen de la dosificación en porcentaje del cemento Portland.....	68
Tabla 21. Resumen de categorías de la subrasante	73
Tabla 22. Variación porcentual del Producto Bruto Interno Anual	74
Tabla 23. Coeficiente estructural de subrasante mejorada	75
Tabla 24. Demanda volumétrica de tráfico vial del PI1	76
Tabla 25. Ejes Equivalentes por cada tipo de vehículo pesado del PI1	76
Tabla 26. Factor de crecimiento acumulado del PI1	76
Tabla 27. Número de repeticiones de ejes equivalentes (Nrep de EE 8.2 tn) del PI1	77

Tabla 28. Módulo resiliente de la subrasante del PI1	77
Tabla 29. Variables de diseño de la estructura del pavimento sin adición de cemento Portland del PI1	78
Tabla 30. Variables de diseño de la estructura del pavimento con adición de cemento Portland del PI1	79
Tabla 31. Espesor de reemplazo del material de subrasante del PI1	80
Tabla 32. Demanda volumétrica de tráfico vial del PI2	80
Tabla 33. Ejes Equivalentes por cada tipo de vehículo pesado del PI2.....	81
Tabla 34. Factor de crecimiento acumulado del PI2	81
Tabla 35. Número de repeticiones de ejes equivalentes (Nrep de EE 8.2 tn) del PI2	81
Tabla 36. Módulo resiliente de la subrasante del PI2.....	82
Tabla 37. Variables de diseño de la estructura del pavimento sin adición de cemento Portland del PI2	82
Tabla 38. Variables de diseño de la estructura del pavimento con adición de cemento Portland del PI2	83
Tabla 39. Espesor de reemplazo del material de subrasante del PI2	84
Tabla 40. Demanda volumétrica de tráfico vial del PI6	85
Tabla 41. Ejes Equivalentes por cada tipo de vehículo pesado del PI6.....	85
Tabla 42. Factor de crecimiento acumulado del PI6	85
Tabla 43. Número de repeticiones de ejes equivalentes (Nrep de EE 8.2 tn) del PI6	86
Tabla 44. Módulo resiliente de la subrasante del PI6.....	86
Tabla 45. Variables de diseño de la estructura del pavimento sin adición de cemento Portland del PI6	87
Tabla 46. Variables de diseño de la estructura del pavimento con adición de cemento Portland del PI6	88
Tabla 47. Espesor de reemplazo del material de subrasante del PI6	89
Tabla 48. Demanda volumétrica de tráfico vial del PI7	89
Tabla 49. Ejes Equivalentes por cada tipo de vehículo pesado del PI7.....	90
Tabla 50. Factor de crecimiento acumulado del PI7	90
Tabla 51. Número de repeticiones de ejes equivalentes (Nrep de EE 8.2 tn) del PI7	90
Tabla 52. Módulo resiliente de la subrasante del PI7	91
Tabla 53. Variables de diseño de la estructura del pavimento sin adición de cemento Portland del PI7	91

Tabla 54. Variables de diseño de la estructura del pavimento con adición de cemento	
Portland del PI7	92
Tabla 55. Espesor de reemplazo del material de subrasante del PI7	93
Tabla 56. Demanda volumétrica de tráfico vial del PI8	94
Tabla 57. Ejes Equivalentes por cada tipo de vehículo pesado del PI8.....	94
Tabla 58. Factor de crecimiento acumulado del PI8	95
Tabla 59. Número de repeticiones de ejes equivalentes (Nrep de EE 8.2 tn) del PI8	95
Tabla 60. Módulo resiliente de la subrasante del PI8	95
Tabla 61. Variables de diseño de la estructura del pavimento sin adición de cemento	
Portland del PI8	96
Tabla 62. Variables de diseño de la estructura del pavimento con adición de cemento	
Portland del PI8	97
Tabla 63. Espesor de reemplazo del material de subrasante del PI8	98
Tabla 64. Demanda volumétrica de tráfico vial del PI12	98
Tabla 65. Ejes Equivalentes por cada tipo de vehículo pesado del PI12.....	99
Tabla 66. Factor de crecimiento acumulado del PI12	99
Tabla 67. Número de repeticiones de ejes equivalentes (Nrep de EE 8.2 tn) del PI12 ..	99
Tabla 68. Módulo resiliente de la subrasante del PI12	100
Tabla 69. Variables de diseño de la estructura del pavimento sin adición de cemento	
Portland del PI12	100
Tabla 70. Variables de diseño de la estructura del pavimento con adición de cemento	
Portland del PI12	101
Tabla 71. Espesor de reemplazo del material de subrasante del PI12	102
Tabla 72. Demanda volumétrica de tráfico vial del PI14	103
Tabla 73. Ejes Equivalentes por cada tipo de vehículo pesado del PI14.....	103
Tabla 74. Factor de crecimiento acumulado del PI14	104
Tabla 75. Número de repeticiones de ejes equivalentes (Nrep de EE 8.2 tn) del PI14	104
Tabla 76. Módulo resiliente de la subrasante del PI14	104
Tabla 77. Variables de diseño de la estructura del pavimento sin adición de cemento	
Portland del PI14	105
Tabla 78. Variables de diseño de la estructura del pavimento con adición de cemento	
Portland del PI14	106
Tabla 79. Espesor de reemplazo del material de subrasante del PI14	107
Tabla 80. Resumen de los espesores de reemplazo del material de subrasante.....	108

Tabla 81. Resumen del número de repeticiones de ejes equivalentes (Nrep de EE)....	109
Tabla 82. Espesor de la capa de afirmado del PI1	110
Tabla 83. Espesor de la capa de afirmado del PI2	110
Tabla 84. Espesor de la capa de afirmado del PI6	111
Tabla 85. Espesor de la capa de afirmado del PI7	111
Tabla 86. Espesor de la capa de afirmado del PI8	112
Tabla 87. Espesor de la capa de afirmado del PI14	112
Tabla 88. Resumen de los espesores de la capa de afirmado	113
Tabla 89. Comparación de las características físico-mecánicas	114
Tabla 90. Contenido de cemento por tipo de aplicación.....	116
Tabla 91. Comparación de los espesores de reemplazo del material de subrasante	119
Tabla 92. Comparación de los espesores de la capa de afirmado	121

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Infraestructura Vial de Perú	3
Figura 2: Carretera No Pavimentada de Bajo Volumen de Tránsito	5
Figura 3: Trayectorias de filtración en el suelo	27
Figura 4: Definición de la ley de Darcy.....	29
Figura 5: Base sin estabilizar VS estabilizada con cemento.....	38
Figura 6: Esparcimiento de suelo cemento sobre carretera en pendiente	45
Figura 7: Comparación de CSS con eliminación y reemplazo	46
Figura 8: Número estructural (SNe) de la subrasante de material de suelo natural del PI1	78
Figura 9: Número estructural (SNm) de la subrasante de material de suelo estabilizado del PI1	79
Figura 10: Número estructural (SNe) de la subrasante de material de suelo natural del PI2.....	83
Figura 11: Número estructural (SNm) de la subrasante de material de suelo estabilizado del PI2	84
Figura 12: Número estructural (SNe) de la subrasante de material de suelo natural del PI6.....	87
Figura 13: Número estructural (SNm) de la subrasante de material de suelo estabilizado del PI6.....	88
Figura 14: Número estructural (SNe) de la subrasante de material de suelo natural del PI7.....	92
Figura 15: Número estructural (SNm) de la subrasante de material de suelo estabilizado del PI7	93
Figura 16: Número estructural (SNe) de la subrasante de material de suelo natural del PI7.....	96
Figura 17: Número estructural (SNm) de la subrasante de material de suelo estabilizado del PI8.....	97
Figura 18: Número estructural (SNe) de la subrasante de material de suelo natural del PI12.....	101
Figura 19: Número estructural (SNm) de la subrasante de material de suelo estabilizado del PI12.....	102

Figura 20: Número estructural (SNe) de la subrasante de material de suelo natural del PI14.....	105
Figura 21: Número estructural (SNm) de la subrasante de material de suelo estabilizado del PI14.....	106

RESUMEN

En el presente proyecto, se planteó determinar la dosificación en porcentaje del cemento Portland para el mejoramiento de las propiedades de los suelos en carreteras de bajo volumen de tránsito, la cual dependió del tipo de suelo a estabilizar y de las propiedades ingenieriles del agregado. Por ser una investigación de tipo descriptiva y explicativa, se realizó la recopilación de investigaciones relacionadas con el tema, que registraron información geotécnica del suelo en su estado natural y del suelo habiendo sido tratado mediante la adición de cantidades variables de cemento. Se identificaron las características físico-mecánicas del material, encontrándose suelos regulares a excelentes, aptos para la construcción de vías, cuya clasificación de suelos basada en AASHTO correspondió a los A-1, A-2 y A-3; y suelos inadecuados e insuficientes, de uso riesgoso en una estructura de pavimento por su gran sensibilidad al agua, como los A-4, A-5, A-6 y A-7; por lo que, requirieron ser mejorados mediante la adición del agente estabilizador, cuyos rangos se implementaron en dosificaciones desde 1% hasta 20%, mejorando así la resistencia del suelo y reduciendo el índice de plasticidad. Se calculó el espesor de reemplazo del material de subrasante, en suelos cuyo valor CBR de diseño no superó el 6% y finalmente, se determinó el espesor de la capa de afirmado obtenido sin y con adición de cemento Portland en vías con Nrep de hasta 300,000 EE.

Palabras clave: Dosificación, cemento Portland, mejoramiento, propiedades de los suelos.

ABSTRACT

In this project, it was proposed to determine the percentage dosage of Portland cement for the improvement of the properties of the soils in highways with low traffic volume, which depended on the type of soil to be stabilized and the engineering properties of the aggregate. As it is a descriptive and explanatory type of investigation, a compilation of investigations related to the subject was carried out, which recorded geotechnical information of the soil in its natural state and of the soil having been treated by adding variable amounts of cement. The physical-mechanical characteristics of the material were identified, finding regular to excellent soils, suitable for road construction, whose soil classification based on AASHTO corresponded to A-1, A-2 and A-3; and inadequate and insufficient soils, of risky use in a pavement structure due to its great sensitivity to water, such as A-4, A-5, A-6 and A-7; Therefore, they required to be improved by adding the stabilizing agent, whose ranges were implemented in dosages from 1% to 20%, thus improving the resistance of the soil and reducing the plasticity index. The replacement thickness of the subgrade material was calculated, in soils whose design CBR value did not exceed 6% and finally, the thickness of the affirmed layer obtained without and with the addition of Portland cement on roads with Nrep of up to 300,000 EE.

Keywords: Dosage, Portland cement, improvement, soil properties.

INTRODUCCIÓN

La estabilización de suelos con cemento Portland es una tecnología basada en el mezclado íntimo y homogéneo con el suelo a tratar según las especificaciones técnicas propias del producto, y cuyo objetivo es transferir al suelo tratado, ciertas propiedades tendientes a mejorar y, por ende, proporcionar una plataforma de trabajo estable.

Históricamente, la planeación, diseño y construcción de caminos resistentes y seguros de bajo flujo vehicular, ha sido poco abordado en las planificaciones de obras viales; por lo que, es necesario analizar la efectividad de la aplicación de una técnica de mejoramiento de suelos para optimizar el desempeño del pavimento a largo plazo.

El presente proyecto aborda la técnica de mezcla suelo-cemento, con esto se busca evaluar la dosificación en porcentaje del cemento Portland para el mejoramiento de las propiedades de los suelos en carreteras de bajo volumen de tránsito. Para tal fin, se efectúa la búsqueda de investigaciones realizadas que dispongan información sobre las características físicas y mecánicas de los suelos antes y después de la adición de cemento.

Este estudio está organizado en los siguientes capítulos:

El Capítulo I describe el planteamiento del problema, el cual orienta y justifica el desarrollo de la presente investigación.

El Capítulo II contiene el marco teórico que sustenta el estudio, el cual menciona investigaciones relacionadas con el tema y bases teóricas.

El Capítulo III establece un sistema de hipótesis, que se presenta de forma anticipada y posteriormente es validada.

El Capítulo IV presenta la metodología de la investigación, la cual contempla la recopilación de datos y resultados obtenidos en investigaciones precedentes, además del uso de fuentes bibliográficas que definen y explican el proceso de Estabilización de suelos con cemento Portland.

El Capítulo V expone la presentación y análisis de resultados, organizados mediante tablas y gráficos estadísticos.

Finalmente, se detallan las conclusiones y recomendaciones, las cuales destacan los hallazgos más importantes del estudio y permiten dar un mayor alcance a futuras investigaciones.

CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Descripción y formulación del problema general y específicos

En términos de infraestructura vial, las carreteras constituyen uno de los pilares claves en el crecimiento y desarrollo de cualquier país, puesto que generan conexiones y comunicaciones entre distintos puntos nacionales e internacionales, facilitan el desplazamiento y/o movilización de personas e información, reducen tiempos y costos destinados al transporte de mercancías, y elevan la competitividad económica satisfaciendo las condiciones básicas para el progreso de las actividades productivas. En ese sentido, es indispensable disponer de un eficiente sistema de comunicación vial compuesto por vías seguras, transitables y con óptimo nivel de servicio; a fin de brindar mayor impulso económico a las zonas por donde atraviesan y, en consecuencia, garantizar el desarrollo de una nación.

Según el Informe Multianual de Inversiones en Asociaciones Público Privadas del Ministerio de Transportes y Comunicaciones, la infraestructura vial de Perú está constituida por una red vial que comprende: la Red Vial Nacional, la Red Vial Departamental y la Red Vial Vecinal (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2020).

Dicho informe menciona que, la infraestructura vial total existente durante el año 2019 alcanzó una extensión de 168,953.9 km, donde la Red Vial Nacional comprende 27,053.7 km (16%), la Red Vial Departamental 27,639.6 km (16%) y la Red Vial Vecinal 114,260.5 (68%).

Con respecto a la Red Vial Nacional, el 82% de las vías existentes se encuentran pavimentadas, equivalente a 22,172.5 km, y el 18% restante se encuentran no pavimentadas, equivalente a 4,881.2 km.

Referente a la Red Vial Departamental, el 15% de las vías existentes se encuentran pavimentadas, equivalente a 4,261.3 km, y el 85% restante se encuentran no pavimentadas, equivalente a 23,378.3 km.

La situación se agrava si nos centramos en la Red Vial Vecinal, donde únicamente el 2% de las vías existentes se encuentran pavimentadas, equivalente a 2,335.8 km, de un total de 114,260.5 km, y el 98% restante se encuentran no pavimentadas, equivalente a 111,924.7 km, por lo que la brecha en infraestructura vial en diversos

sectores del país es considerablemente amplia, lo cual advierte la necesidad de ejecutar obras viales que permitan mejorar la conectividad y, por ende, fomentar nuevas oportunidades a las regiones más desconectadas del país.

A continuación, en la Figura 1 se presenta el resumen de la estadística anteriormente mencionada referente a la infraestructura vial total existente de Perú durante el año 2019.



Figura 1: Infraestructura Vial de Perú

Fuente: Elaboración Propia

La infraestructura vial es uno de los soportes fundamentales para el desarrollo económico y social de Perú, especialmente las carreteras de bajo volumen de tránsito que interconectan diversas poblaciones rurales, las cuales son de gran importancia en el desarrollo local, regional y nacional, y muchas de las cuales se encuentran localizadas en las zonas más alejadas del país.

En ese contexto, el Ministerio de Transportes y Comunicaciones de Perú (MTC), mediante Resolución Ministerial N° 303-2008-MTC/02 de fecha 04 de abril del 2008, aprobó el Manual para el Diseño de Carreteras No Pavimentadas de Bajo Volumen de Tránsito, el cual establece las técnicas y criterios de diseño vial de aquellos caminos que conforman el mayor porcentaje del Sistema Nacional de Carreteras (SINAC), y que se caracterizan por presentar una superficie de rodadura de material granular con Índice Medio Diario Anual IMDA < 50 veh/día que difícilmente llegan hasta un IMDA = 200 veh/día. Dicho manual proporciona normas de diseño de superficies de rodadura y guías para el diseño de elementos que protejan

y otorguen estabilidad a la plataforma de la carretera y a su estructura de rodadura (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2008).

Durante ese mismo año el MTC, mediante Resolución Ministerial N° 305-2008-MTC/02 de fecha 04 de abril, aprobó el Manual para el Diseño de Carreteras Pavimentadas de Bajo Volumen de Tránsito, el cual proporciona criterios técnicos de aquellos caminos que se caracterizan por presentar un IMD de hasta 350 veh/día que corresponderán al Sistema Nacional de Carreteras. Dicho manual está orientado a establecer criterios para el diseño de carreteras existentes mejorando su trazo sin provocar movimientos grandes de tierra (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2008).

Por otro lado, la Dirección General de Caminos y Ferrocarriles, mediante Resolución Directoral N° 31-2013-MTC/14 de fecha 18 de diciembre del 2013, inicialmente aprobó el Manual de Carreteras: Diseño Geométrico DG-2013, misma que fue publicada el día 16 de enero del 2014, posteriormente actualizada por el Manual de Diseño Geométrico de Carreteras (DG-2014), y encontrándose vigente a la fecha el Manual de Diseño Geométrico de Carreteras (El Peruano, 2014).

El 21 de marzo del 2014, mediante Resolución Ministerial N° 137-2014-MTC/02, el MTC dejó sin efecto los Manuales para el Diseño de Carreteras Pavimentadas y No Pavimentadas de Bajo Volumen de Tránsito, y declaró que el Manual de Carreteras: Diseño Geométrico DG-2013 comprendía todos los conceptos, procedimientos y documentos técnicos de las normas citadas en el considerando anterior; en tanto, las mismas perdieron vigencia.

Según el vigente Manual de Carreteras: Diseño Geométrico (DG-2018), las carreteras de Perú en función a la demanda, se clasifican en: i) Autopistas de Primera Clase ($IMDA > 6,000$ veh/día), ii) Autopistas de Segunda Clase ($4,001$ veh/día $< IMDA < 6,000$ veh/día), iii) Carreteras de Primera Clase ($2,001$ veh/día $< IMDA < 4,000$ veh/día), iv) Carreteras de Segunda Clase (400 veh/día $< IMDA < 2,000$ veh/día), v) Carreteras de Tercera Clase ($IMDA < 400$ veh/día), y vi) Trochas Carrozables ($IMDA < 200$ veh/día). (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2018).

Con respecto a las Carreteras de Tercera Clase, el manual menciona que las vías pueden desempeñarse con soluciones básicas o económicas, las cuales consisten

en el uso y aplicación de estabilizadores de suelos, emulsiones asfálticas y/o micro pavimentos; o en afirmado, en la superficie de rodadura. En caso de ser pavimentadas, deberán cumplirse las condiciones geométricas estipuladas para las Carreteras de Segunda Clase; todo esto con el fin de mejorar el comportamiento de la estructura de la carretera y que ésta sea lo suficientemente resistente y duradera.

A continuación, en la Figura 2 se observa una Carretera No Pavimentada de Bajo Volumen de Tránsito del departamento de Cajamarca, con un estado de vía altamente deteriorado, con baches y ahuellamientos, por lo que es necesario aplicar soluciones básicas y, consecuentemente, mejorar las condiciones de transitabilidad del camino.



Figura 2: Carretera No Pavimentada de Bajo Volumen de Tránsito

Fuente: Góngora, 2019

Según lo anteriormente expuesto, surge la necesidad de aplicar tecnologías y opciones para el mantenimiento oportuno de las vías de bajo volumen de tránsito del país, que permitan mejorar la calidad y desempeño del suelo y vayan más allá de una nivelación de superficie de rodadura y/o reemplazo de material granular que, aunque resulten económicos en primera instancia, requieren de un mantenimiento periódico en tiempos previsibles. (Elizondo & Sibaja, 2008).

Frente a ello, se ha difundido el uso de estabilizadores de suelos para el mejoramiento de las características físicas y propiedades mecánicas del material granular. Existen distintos métodos de estabilización, entre ellos: i) Estabilización física, ii)

Estabilización mecánica, iii) Estabilización química, iv) Estabilización por combinación de suelos y v) Estabilización por sustitución de suelos. (Castillo, 2018)

Entre las aplicaciones utilizadas en la Estabilización mecánica se encuentran los productos estabilizantes tales como: cal, cemento, enzimas, productos químicos, etc.

Desde el punto de vista técnico, el uso de estabilizadores de suelos para superficies de rodadura en carreteras no pavimentadas, y capas granulares o subrasantes en carreteras pavimentadas, permite el mejoramiento del nivel de servicio, evitando su rápido deterioro, ampliando los plazos de mantenimiento periódico, y con ello, incrementando la vida útil del pavimento (Ministerio de Economía y Finanzas, 2015).

Desde el punto de vista económico, el empleo de estabilizadores de suelos implica un nivel de inversión más alto por la incorporación de un aditivo estabilizador al material; sin embargo, dichos mayores costos iniciales, se pueden revertir por la disminución de costos de mantenimiento, así como mayores periodos de operación del camino en épocas de lluvia.

En consecuencia, es importante disponer de obras viales bien planificadas, puesto que éstas constituyen la columna vertebral del transporte, asimismo, resulta prioritario brindar atención a aquellas vías de bajo volumen de tránsito que conectan distintos puntos del país, y ocupan gran extensión en todo el territorio nacional. Esto es posible, aplicando diversas técnicas de estabilización de suelos, que generan efectos positivos no solo a nivel económico, sino también social y ambiental.

1.1.1 Problema general

¿Cómo es la dosificación en porcentaje del cemento Portland para el mejoramiento de las propiedades de los suelos en carreteras de bajo volumen de tránsito?

1.1.2 Problemas específicos

- a) ¿Cuáles son las características físico-mecánicas del material de subrasante en carreteras de bajo volumen de tránsito?
- b) ¿Cuál es la dosificación en porcentaje del cemento Portland para el mejoramiento de las propiedades de los suelos en carreteras de bajo volumen de tránsito?

- c) ¿Cuál es el espesor de reemplazo del material de subrasante en carreteras de bajo volumen de tránsito?
- d) ¿Cuál es el espesor de la capa de afirmado de pavimentos con subrasante de suelo adicionado con cemento Portland en carreteras de bajo volumen de tránsito?

1.2 Objetivo general y específicos

1.2.1 Objetivo general

Evaluar la dosificación en porcentaje del cemento Portland para el mejoramiento de las propiedades de los suelos en carreteras de bajo volumen de tránsito, año 2021.

1.2.2 Objetivos específicos

- a) Identificar las características físico-mecánicas del material de subrasante en carreteras de bajo volumen de tránsito.
- b) Determinar la dosificación en porcentaje del cemento Portland para el mejoramiento de las propiedades de los suelos en carreteras de bajo volumen de tránsito.
- c) Calcular el espesor de reemplazo del material de subrasante, aplicando la normativa vigente del MTC, en carreteras de bajo volumen de tránsito.
- d) Calcular el espesor de la capa de afirmado de pavimentos con subrasante de suelo adicionado con cemento Portland, aplicando el método NASSRA, en carreteras de bajo volumen de tránsito.

1.3 Delimitación de la investigación

Para el desarrollo de la presente investigación, se tomaron datos y resultados de diversos estudios e investigaciones realizadas; puesto que, la coyuntura mundial relacionada a la pandemia de COVID-19 impide la recopilación de información de manera presencial. Todo esto, con el fin de acatar las disposiciones y restricciones establecidas por el Gobierno Peruano y la Universidad Ricardo Palma, para evitar la propagación del virus y salvaguardar la salud de los estudiantes.

1.3.1 Delimitación espacial

La investigación se desarrolló a partir de estudios e investigaciones realizadas, referentes a la Estabilización de suelos con cemento Portland aplicado a carreteras de bajo volumen de tránsito.

1.3.2 Delimitación temporal

La recopilación de información para el desarrollo de la presente investigación fue proveniente de manuales, libros, tesis, guías y artículos científicos publicados desde el año 1984 hasta la actualidad, los mismos que definen y explican el proceso de Estabilización de suelos con diversos aditivos estabilizantes, como el cemento Portland, para el mejoramiento de las propiedades físico-mecánicas de los suelos existentes en carreteras.

1.3.3 Delimitación poblacional

El área de estudio de la presente investigación, comprendió a los suelos existentes en carreteras de bajo volumen de tránsito.

1.4 Justificación e importancia

1.4.1 Importancia

El presente trabajo de investigación surge debido a que, por muchos años en nuestro país, las vías de alto volumen de tránsito han sido objeto de estudio de múltiples proyectos e investigaciones, además, de ser ampliamente abordadas en el área de Educación de los Centros Universitarios, congresos y ponencias temáticas; sin embargo, las vías de bajo volumen de tránsito, que conforman el mayor porcentaje en la infraestructura vial total existente y muchas de las cuales son inseguras o de construcción deficiente, no captan la atención necesaria y, por consiguiente, las entidades de la gestión vial no concentran esfuerzos en el mejoramiento del nivel de servicio de las mismas.

Con esta investigación se busca aplicar una técnica constructiva, eficiente y económica que ha de contribuir al desarrollo de las vías terciarias, por ejemplo, la Estabilización de suelos con cemento Portland, que es una buena práctica constructiva mundialmente conocida en la estructura vial. La incorporación de

este estabilizador químico al material de suelo, favorecerá en la mayor durabilidad y resistencia de las carreteras de bajo volumen de tránsito.

1.4.2 Justificación teórica

Esta investigación busca aportar al conocimiento existente referente a la Estabilización química de suelos con cemento Portland, como un tipo de estabilizador químico, cuya aplicación y posterior mezclado íntimo con el suelo a tratar, permite a este último mejorar sus propiedades de comportamiento ya sea en la etapa de construcción y/o servicio.

1.4.3 Justificación metodológica

Esta investigación plantea iniciar con la búsqueda de información bibliográfica nacional e internacional, tales como, manuales, libros, tesis, guías y artículos científicos que definen y explican el proceso de Estabilización de suelos con cemento Portland, asimismo, se dispondrá de datos y resultados de ensayos de laboratorio realizados en investigaciones precedentes, los cuales dan a conocer las propiedades de comportamiento inicial y final de los suelos, y serán utilizados a fin de establecer la dosificación en porcentaje del cemento Portland para el mejoramiento de las propiedades de los suelos en carreteras de bajo volumen de tránsito.

1.4.4 Justificación práctica

Surge el interés de realizar esta investigación; puesto que, en el caso específico de proyectos viales, gran parte de las carreteras de bajo tránsito se encuentran en mal estado y, consecuentemente, se ha determinado la necesidad de aplicar una alternativa básica que resulte económica, social y ambiental para el mejoramiento de las condiciones de transitabilidad de las vías.

1.4.5 Justificación social

El desarrollo de esta investigación se fundamenta en la necesidad de optimizar el desempeño de las carreteras de bajo tránsito; puesto que, la situación actual y futura de nuestra infraestructura vial terrestre es de suma importancia no solo a nivel económico sino también en el ámbito de inclusión social, mejorando la conectividad y desarrollo de los lugares más desconectados del país.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes del estudio de investigación

2.1.1 Marco histórico

En los últimos años, el transporte ha ido ganando una importancia cada vez mayor en los países desarrollados e industrializados, en los cuales se ha transformado en una actividad necesaria y básica en los sectores económico y social. Desde el punto de vista económico, el transporte tiene como principal función poner en contacto a productos y consumidores, generando la especialización productiva y el libre acceso de los consumidores a una mayor y mejor variedad de productos. Además, cumple con una función social, ya que el transporte permite el normal y próspero desarrollo de las relaciones humanas (Analistas Económicos de Andalucía, 2001).

Es por ello que cada vez es mucho más importante tener carreteras de calidad para la seguridad vial de todos. Para obtener carreteras de calidad, se necesita diseñar adecuadamente la estructura del pavimento. Muchas veces, el problema radica en el material que conforma dichas capas, por lo cual, el uso de estabilizantes se vuelve necesario para obtener un pavimento que perdure en el tiempo.

Cedeño (2013), menciona que las vías de menor transitabilidad vehicular con los sistemas tradicionales ha intervenido a la red vial del mundo, teniendo una lista de limitaciones que afecta al presupuesto para la construcción de vías donde tiene que ver todos los materiales que se necesitaran para la obra de vías. Los materiales se pueden encontrar cerca de la obra, pero no cumplen las especificaciones técnicas establecidas, esto quiere decir que vamos a tener problemas en la condición climatológicas y colocando en riesgo la obra y todos los problemas afectan al costo de la construcción vial.

En los últimos años en el entorno internacional se ha venido investigando para poder mejorar las propiedades físicas – mecánicas de las vías afirmadas. Realizando dicha elección que no resulte muy costosa su construcción de vías (Gutiérrez, 2010).

El uso de estabilizantes de suelos para mejorar las propiedades físico – mecánicas del suelo de carreteras está ampliamente difundido. En el mundo, existen diversos métodos para la estabilización de los materiales usados en la construcción de pavimentos. Existe la estabilización física, la estabilización mecánica y la estabilización química. Esta última consiste en la adición de sustancias o agentes estabilizantes como la cal, cemento Portland, emulsiones asfálticas, enzimas, y polímeros (Rico & Del Castillo, 2005)

La estabilización de suelos en el que consiste en someter el suelo natural a ciertos tratamientos, que podemos aprovechar sus mejores propiedades, obteniendo un suelo firme que es capaz de soportar la transitabilidad vehicular y las condiciones climatológicas (Gutiérrez, 2010).

Según Barrera, Picaron y Rojas (2007), países de Sudamérica, vienen empleando la investigación de productos estabilizadores de suelos con poca resistencia, obtenido grandes tipos de resultados para la mejora de carreteras con suelos inestables (vías afirmadas), en los países como Colombia, Argentina, Brasil, Chile, Ecuador y Perú tienen grandes áreas de suelos muy inestables; por ello se viene aplicando productos químicos y ecológicos para que las propiedades físico mecánicas de suelos alcanzando una mejor estabilidad y vida útil de las carreteras de bajo volumen de tránsito.

En España, dependiendo del tipo de conglomerante, las estabilizaciones de suelos son principalmente realizadas con cemento Portland, cal aérea, o de forma mixta (mezclando ambos). Estos tipos de estabilizantes están contemplados dentro de la normativa vigente española. Sin embargo, en casos particulares se puede hacer uso de otros estabilizantes o la mezcla de cal o cemento Portland con otros materiales que permitan que su acción conglomerante sea reforzada. Por ejemplo, al mezclar cal con algunas escorias, cenizas volantes y otros tipos de residuos, estas últimas se activan y tienen propiedades cementantes. De este modo, el suelo es estabilizado por un método más económico y valorizando un residuo (Minguela & Rodríguez, 2008)

En Chile, los aditivos que se utilizan comúnmente para la estabilización de suelos de carreteras son: cal, cemento Portland y asfalto. Acorde a estudios realizados en dicho país, la estabilización de suelos produce una mejora en los

materiales marginales, mejora la resistencia y durabilidad del suelo, lo cual genera una reducción en cuanto a los requerimientos de espesor de los pavimentos, reduce el polvo y, por lo tanto, mejora la estabilidad de la estructura completa del pavimento.

Otros países como Argentina, además de utilizar los estabilizadores químicos más tradicionales, han buscado nuevas tecnologías para la estabilización de suelos de carreteras. En este país, existe la estabilización iónica, la cual resulta bastante económica en suelos especialmente arcillosos, a los cuales modificará sus características físicas y químicas, facilitando su compactación y capacidad portante.

En nuestro país, el uso de estabilizadores químicos se inició en el año 1995, con el fin de mejorar las características físico – mecánicas de los suelos para subrasante de carreteras, con la aplicación de productos en tramos experimentales inicialmente y posteriores evaluaciones en laboratorio.

Tradicionalmente, se utilizan como aditivos para la estabilización de suelos de carreteras la cal, el cemento Portland y el asfalto. Sin embargo, en carreteras de Junín, Puno y Pasco, se han utilizado nuevas tecnologías, como el uso de estabilizantes iónicos, donde los suelos son principalmente arcillosos. Con ello, se ha logrado la reducción del índice de plasticidad de los mismos, el aumento de la máxima densidad seca y el aumento del CBR.

Según Roziawati y Mohamad (2019), identificó a la estabilización de suelos como un método alternativo para facilitar el diseño. Sin embargo, no era popular entre los actores de la industria de la construcción de Malasia debido a la ausencia de especificación para este procedimiento, por lo cual presentaron un documento donde mostraban las experiencias en la implementación del cemento como estabilizador de suelos en proyectos de construcción de carreteras para carreteras rurales y de bajo volumen. Este tuvo como objetivo describir el proceso de la implementación del suelo con cemento: el diseño, la adquisición y la construcción de un proyecto.

El sitio del proyecto está ubicado en el distrito de Kuala Lipis, Pahang Darul Makmur. Se realizó una investigación del sitio que incluyó sondas Mackintosh, para determinar los perfiles de suelo existentes y su capacidad de

carga, mientras que se realizaron pruebas de clasificación del suelo en el laboratorio para obtener las propiedades del suelo (arcilla arenosa con poca grava). Luego a la sección de investigación se dividió en cuatro segmentos en los que cada segmento se estabilizó con un porcentaje diferente 3% ,4%, 5% y 6% del estabilizador para identificar cómo se comporta el suelo estabilizado en el campo real cuando el contenido de cemento era insuficiente o superior al contenido óptimo.

El trabajo de estabilización incluyó esparcir el aglutinante, mezclar, compactar, dar forma, probar y curar. Durante el proceso de mezclado, se utilizó la máquina estabilizadora para mezclar los materiales de suelo existentes con cemento y agua al espesor de diseño. Después del proceso de mezcla, se utilizó el motor graduado para nivelar y formar la caída transversal deseada, así como para lograr los niveles de superficie terminada. Finalmente se llevaron a cabo pruebas de campo para identificar el desempeño de la estructura del pavimento estabilizado antes y después de la construcción. Como resultado, mostró que el CBR de la subrasante se incrementó hasta un 400% después de un mes estabilizado; y, por consiguiente, se concluyó que la estabilización del suelo con cemento aumenta la subrasante existente después de que se completa la construcción y tiene buen desempeño. A partir de ello, se puede decir que el uso del cemento mejora las propiedades del suelo.

Según Bandara, Mampearachchi y Sampath (2017), explica en su artículo que, en Sri Lanka, isla ubicada en el sur de Asia, las carreteras B60 y B424 se han construido según las pautas disponibles de tipo de suelo arenoso. Sin embargo, el desempeño de estos dos caminos ha sido insatisfactorio debido a varias fallas que ocurrieron durante sus períodos de construcción y operación, para lo cual se debía incurrir en un alto costo en el mantenimiento de los caminos.

Por consiguiente, se tuvo como objetivos identificar y desarrollar una relación entre el contenido de cemento, CBR y SUCS de una base estabilizada con cemento, identificar un método adecuado para medir la fuerza de una base estabilizada con cemento, y desarrollar una tabla de diseño de pavimento para base estabilizada con cemento para varias clases de tráfico y subrasante.

Se determinó de las propiedades de los suelos, se comprobó las propiedades de los suelos disponibles para ver si están dentro de los límites de especificación;

se preparó de muestras de base estabilizadas con cemento elaboradas con suelos disponibles y determinación de sus propiedades; se desarrolló las relaciones entre el contenido de cemento en intervalo de 0.5% desde el 1.5% al 5%, CBR y SUCS; se analizó la fatiga, surcos y estimación de la demanda de tráfico con espesores de 200 mm y 175 mm con un 8% de CBR de subrasante y se desarrolló una Tabla de Diseño de Pavimentos.

Lo cual mostró que la fuerza de una base estabilizada con cemento debe medirse utilizando el SUCS, el agrietamiento por fatiga es más crítico que el surco y proporcionó una guía para seleccionar un pavimento base estabilizada con cemento apropiado hecho de suelos disponibles.

Según Hoppe y Nair (2017), su estudio tuvo como propósito explorar la efectividad de las prácticas de estabilización química en caminos sin pavimentar, para lo cual consideraron un medio alternativo de estabilización del cemento a través del proceso de recuperación de profundidad total. Se seleccionó para la prueba un segmento de 167.64m (550 pies) de largo de Hurley Lane, un camino de grava en el condado de London.

Para lograr los objetivos del estudio se identificó la ubicación de una sección de prueba adecuada, se identificó la geología subyacente del sitio, se seleccionaron un método y parámetros de estabilización adecuados, se ejecutó la adquisición del contrato para el trabajo de FDR, se construyó la sección de prueba. se monitoreó el trabajo de campo y se probaron los materiales, y se evaluó el desempeño posterior a la construcción. La sección de la carretera sin pavimentar existente se pulverizó a una profundidad de 0.3048m (12 pulgadas) y posteriormente se mezcló con cemento al 5% en peso utilizando equipo de recuperación de carreteras. Antes de la estabilización, la sección de prueba en Hurley Lane requería actividades de mantenimiento frecuentes; pero al incorporar el cemento, el estudio concluyó que la estabilización con cemento utilizando el enfoque FDR es una opción viable para mejorar algunas carreteras sin pavimentar.

2.1.2 Investigaciones Internacionales

Según Almeida (2021), el propósito de la investigación fue diseñar una mezcla cemento-suelo en una cantidad óptima en la zona de Zapan, ubicado en

Ecuador. De acuerdo con los requisitos de la norma MTOP para la construcción de carreteras locales en la zona de Zapan del estado de Samborondón, se determinó el volumen de tráfico por la vía analizando las propiedades mecánicas del suelo en función de la cantidad de cemento. Se calculó el volumen de vehículo (TDA) para 7 días. Además, se realizó el ensayo de suelo natural y se añadió el cemento con los siguientes porcentajes 2%, 6% y 8%. Los cuales obtuvieron resultados muy satisfactorios, cumpliendo con los requisitos de mejora de CBR dando los siguientes porcentajes respectivamente 16.72%, 17.5% y 20%; y su resistencia alcanzando 26.99%, 32.18% y 40.48%. Por tanto, se puede ver la mejora de las propiedades al realizar la estabilización de suelos con cemento.

Según Golfín (2019), tuvo como objetivo lograr mejorar el suelo plástico aplicar cemento hidráulico al lecho de la carretera en caminos sin pavimentar, buscando mejorar el desempeño mecánico estos suelos para ello se tuvo en cuenta tres tipos de materiales de subrasantes, los cuales son ubicados en tres zonas distintas alrededor del país: la zona de Los Santos, en Nicoya y en la zona de Pocosol.

En un inicio se realizó diversos ensayos al suelo natural tales como los ensayos de análisis granulométrico, ensayos de Límites de Atterberg, ensayos de Proctor Modificado y ensayo de CBR. Luego se incorporó el cemento hidráulico, asimismo se realizó nuevamente el ensayo de Proctor modificado para hallar su dosificación y teniendo de dato estas proporciones se procedió a realizar el ensayo de resistencia a la compresión confinada para obtener la resistencia en cada zona. Por lo cual se pudo observar el incremento de más del 700% en la resistencia conforme los especímenes vírgenes y al 7% de cemento hidráulico. Además, se apreció el incremento en resistencia en las zonas de Los Santos, Nicoya y Pocosol, de 0,37 kg/cm², 0,05 kg/cm² y 0,17 kg/cm² respectivamente, a 7% de cemento hidráulico, fue en 2,73 kg/cm², 2.10 kg/cm² y 3,97 kg/cm² respectivamente; y la plasticidad disminuye. Con esta investigación se demuestra la mejora de propiedades aplicando el cemento en la estabilización.

Según García (2019), se analizó la importancia en tecnología de suelos cementos en suelos finos tipo caolín, porque esta es la composición de muchas tierras del país, por estar ubicadas en regiones tropicales. Por ello su objetivo fue estudiar el comportamiento físico-mecánico de una mezcla suelo-cemento en laboratorio, por medio de ensayos de respuesta a la carga monotónica con el fin de establecer los valores de resistencia para un suelo fino tipo caolín y su posible implementación en vías terciarias del país de similar composición. Se utilizó diferentes porcentajes de cemento de 4%, 8%, 10 y 12% sobre la resistencia mecánica. muestra. La razón de esta investigación es que, al implementar la tecnología de suelo de cemento en suelos blandos, puede proporcionar una alternativa al desarrollo de carreteras en áreas rurales. Concluyendo que los porcentajes superiores al 8 % de cemento en la mezcla mejoran considerablemente la resistencia ante cargas monotónicas, además se obtiene la mayor resistencia con un contenido de 12%.

Los beneficios de esta alternativa incluyeron tiempos de viaje más cortos, vehículos de mayor capacidad, más acceso de los residentes a servicios que satisfagan sus necesidades y costos de transporte más bajos en general, lo que puede mejorar la calidad de vida de los agricultores.

2.1.3 Investigaciones Nacionales

Según Góngora (2019), tuvo como objetivo determinar la influencia de la cal y el cemento Portland tipo I en la subrasante de la trocha del distrito de Chillia. Por consiguiente, se realizó ensayos de laboratorio en 4 calicatas las cuales fueron obtenidas de 4km de la vía para conocer las propiedades físicas del suelo y conocer el tipo de suelo natural. Luego se evalúa mediante el ensayo de CBR en la calicata 3 en sus dos estratos al incorporar la cal y el cemento con los siguientes porcentajes 2% y 4% en cada estabilizador. Se concluyó que la cal no fue un buen estabilizador para este tipo de suelo en cambio el cemento convirtió la subrasante de inadecuada a excelente.

Según Pezo (2018), tuvo como objetivo determinar el efecto de la aplicación de suelo-cemento para el mejoramiento de la carretera mencionada. De tal manera que se empleó como muestra de estudio la extensión longitudinal de 8.520 Km en donde realizó el estudio tráfico; ensayos para conocer las

propiedades del suelo natural; por lo que utilizaron 18 calicatas; y obtener el CBR. Lo cual permitió establecer el espesor del afirmado por el método NAASRA. Asimismo, utilizaron 5 calicatas incorporando diferentes porcentajes de cemento obteniéndose resultados satisfactorios con el 10% de cemento.

Según Urcia (2017), debido a la situación de peligro a la seguridad de los usuarios en las carreteras altoandinas tramo Izcuchaca – Quichuas ya sea por las bache o erosiones provocados por efectos de la lluvia la investigación tuvo como objetivo determinar de qué manera la estabilización de suelos con cemento Portland tipo I aplicado como estabilizador influye para mejorar la carretera a nivel de afirmado en el tramo: Izcuchaca-Quichuas, Región Huancavelica en el 2017. Para lo cual se determinó las propiedades del suelo sin cemento y con cemento como la capacidad portante y la MDS. Utilizándose en la investigación 3% de cemento.

El procedimiento adecuado se realizó el ensayo de California Bearing Ratio (CBR) se concluyó que CBR sin cemento, para el 100 % de la MDS al 70.7% y para el 95 % de la MDS 30.8 %; con el CBR con cemento, para el 100 % de la MDS al 70.7% y para el 95 % de la MDS 51 %. Concluyendo que el cemento Portland tipo I aplicado como estabilizador de afirmado en los diseños de caminos, mejoró la resistencia al esfuerzo cortante en el tramo del tipo de suelo A- 2- 6 según AASHTO y mejoró el comportamiento estructural. Esta investigación demuestra que la aplicación del cemento modifica sus características físicas y mecánicas del suelo alargando de esta manera su tiempo de vida útil.

2.2 Estructura teórica y científica que sustenta el estudio

2.2.1 Suelos

Se llama suelo a todo agregado natural de partículas minerales separables por medios mecánicos de poca intensidad, como agitación en agua. (Terzagui & Peck, 1973)

Las condiciones de los suelos del lugar donde ha de construirse una estructura son comúnmente exploradas por medio de sondeos, perforaciones o excavaciones a cielo abierto.

Se define suelo como la descomposición y alteración que sufren las rocas y los residuos que se desarreglan al pasar el tiempo; los suelos están constantemente sufriendo cambios, modificaciones y procesos físicos y biológicos los cuales ocasionan la existencia de diferentes tipos de suelos. (De la Cruz & Salcedo, 2016)

a) Tipos de suelos

Terzagui y Peck (1973), describen los suelos más comunes, con los nombres generalmente utilizados para su clasificación en el terreno:

- Las arenas y las gravas son agregados sin cohesión de fragmentos granulares o redondeados, poco o no alterados, de rocas y minerales. Las partículas menores de 2 milímetros se clasifican como arena, y aquellas de mayor tamaño hasta 15 o 20 centímetros, como grava.
- Los limos inorgánicos son suelos de grano fino con poca o ninguna plasticidad.
- Los limos orgánicos son suelos de granos finos más o menos plásticos, con una mezcla de partículas de materia orgánica finamente dividida.
- Las arcillas son agregados de partículas microscópicas derivadas de la descomposición química que sufren los constituyentes de las rocas.

b) Clasificación de los suelos

Sistema de clasificación AASHTO:

En 1929, en Estados Unidos, nace uno de los primeros sistemas de clasificación, desarrollado por Terzaghi y Hogentogler, creado para evaluar los suelos que se utilizaban en carreteras. (Crespo, 2004)

Este sistema divide a los suelos en siete grupos, determinados a partir de ensayos de laboratorio de granulometría, límite líquido e índice de plasticidad. A la vez, son evaluados a través de un índice de grupo, el cual se calcula a partir de una ecuación empírica:

$$IG = (F - 35)[0.2 + 0.005(LL - 40)] + 0.01(F - 15)(IP - 10)$$

Donde:

F: porcentaje que pasa por el tamiz N° 200

LL: límite líquido

IP: índice de plasticidad

El Índice de Grupo se expresa en números enteros positivos, y cuando este salga negativo, se expresará como $IG = 0$.

Tabla 1. Sistema de clasificación AASHTO

Clasificación general	Materiales granulares (35% o menos pasa el tamiz N.° 200)							Materiales limo-arcillosos (más de 35% pasa el tamiz N.° 200)				
	A-1		A-3 ^a	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5 A-7-6	
Clasificación de grupo	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7					
Tamizado, % que pasa												
N.° 10 (2.00 mm)	50 máx.
N.° 40 (425 µm)	30 máx.	50 máx.	51 mín.
N.° 200 (75 µm)	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 mín.	36 mín.	36 mín.
Consistencia												
Límite líquido	B	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.	...
Índice de plasticidad	6 máx.	...	N.P.	B	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.	11 mín. ^b
Tipos de materiales característicos								Suelos limosos		Suelos arcillosos		
Clasificación	Excelente a bueno							Regular a malo				

Nota: ^a La colocación de A3 antes de A2 en el proceso de eliminación de izquierda a derecha no necesariamente indica superioridad de A3 sobre A2.

^b El índice de plasticidad del subgrupo A-7-5 es igual o menor que LL-30. El índice de plasticidad del subgrupo A-7-6 es mayor que LL-30.

Fuente: AASHTO M-145 (2008)

Sistema de clasificación SUCS:

El sistema de clasificación SUCS fue presentado por Arthur Casagrande como una adaptación más general al sistema de clasificación que propuso anteriormente en 1942 para la construcción de pistas de aterrizaje. Los suelos son designados por símbolos de grupo, consistentes de un prefijo que indica las iniciales de los nombres ingleses de los seis principales tipos de suelos (grava, arena, limo, arcilla, suelos orgánicos de grano fino y turba) y un sufijo que indica las subdivisiones en dichos grupos (Crespo, 2004).

Tabla 2. Sistema de clasificación SUCS

Criterios para la asignación de símbolos de grupo y nombre de grupo con el uso de ensayos de laboratorio				Clasificación de suelos			
				Símbolo de grupo	Nombre del grupo		
Suelos de partículas gruesas más del 50% es retenido en la malla N.º 200	Gravas Más del 50% de la fracción gruesa es retenida en la malla N.º 4	Gravas limpias Menos del 5% pasa la malla N.º 200	$Cu \geq 4$ y $1 \leq Cc \leq 3$	GW	Grava bien gradada		
			$Cu < 4$ y $1 > Cc > 3$	GP	Grava mal gradada		
		Gravas con finos Más del 12% pasa la malla N.º 200	IP < 4 o debajo de la línea "A" en la carta de plasticidad	GM	Grava limosa		
			IP > 7 o arriba de la línea "A" en la carta de plasticidad	GC	Grava arcillosa		
		Gravas limpias y con finos Entre el 5% y 12% pasa malla N.º 200	Cumple con los criterios para GW y GM	GW-GM	Grava bien gradada con limo		
			Cumple con los criterios para GW y GC	GW-GC	Grava bien gradada con arcilla		
			Cumple con los criterios para GP y GM	GP-GM	Grava mal gradada con limo		
			Cumple con los criterios para GP y GC	GP-GC	Grava mal gradada con arcilla		
			Arenas El 50% o más de la fracción gruesa pasa la malla N.º 4	Arenas limpias Menos del 5% pasa la malla N.º 200	$Cu \geq 6$ y $1 \leq Cc \leq 3$	SW	Arena bien gradada
					$Cu < 6$ y $1 > Cc > 3$	SP	Arena mal gradada
Arenas con finos Más del 12% pasa la malla N.º 200	IP < 4 o debajo de la línea "A" en la carta de plasticidad	SM	Arena limosa				
	IP > 7 o arriba de la línea "A" en la carta de plasticidad	SC	Arena arcillosa				
Arenas limpias y con finos Entre el 5% y 12% pasa malla N.º 200	Cumple con los criterios para SW y SM	SW-SM	Arena bien gradada con limo				
	Cumple con los criterios para SW y SC	SW-SC	Arena bien gradada con arcilla				
	Cumple con los criterios para SP y SM	SP-SM	Arena mal gradada con limo				
	Cumple con los criterios para SP y SC	SP-SC	Arena mal gradada con arcilla				
Suelos de partículas finas El 50% o más pasa la malla N.º 200	Limos y arcillas Límite líquido menor que 50	Inorgánicos	IP > 7 y se grafica en la carta de plasticidad arriba de la línea "A"	CL	Arcilla de baja plasticidad		
			IP < 4 y se grafica en la carta de plasticidad abajo de la línea "A"	ML	Limo de baja plasticidad		
		Orgánicos	$\frac{\text{Límite líquido-secado al horno}}{\text{Límite líquido-no secado}} < 0.75$	OL	Arcilla orgánica Limo orgánico		
		Inorgánicos	IP > 7 y se grafica en la carta de plasticidad arriba de la línea "A"	CH	Arcilla de alta plasticidad		
	Limos y arcillas Límite líquido mayor que 50		IP < 4 y se grafica en la carta de plasticidad abajo de la línea "A"	MH	Limo de alta plasticidad		
		Orgánicos	$\frac{\text{Límite líquido-secado al horno}}{\text{Límite líquido-no secado}} < 0.75$	OH	Arcilla orgánica Limo orgánico		
		Principalmente materia orgánica de color oscuro		PT	Turba		
		Suelos altamente orgánicos					

Fuente: Matus y Blanco (2017)

c) Propiedades físicas de los suelos

Braja (2011), firmó que las propiedades geotécnicas de un suelo, como su distribución granulométrica, plasticidad, compresibilidad y resistencia cortante, se pueden evaluar mediante pruebas de laboratorio adecuadas.

A continuación, se muestra un repaso de las propiedades geotécnicas básicas de los suelos, tales como: granulometría, plasticidad, clasificación de suelos, y demás.

➤ Granulometría

En cualquier masa de suelo, los tamaños de los granos varían en gran medida. Para clasificar apropiadamente un suelo, se debe conocer su distribución granulométrica. La distribución granulométrica de un suelo de grano grueso se determina por lo general mediante un análisis granulométrico con mallas. (Braja, 2011)

La granulometría consiste en la distribución de las partículas de un suelo de acuerdo a su tamaño, expresándolo como un porcentaje respecto al peso total de la muestra seca. El tamaño de las partículas del suelo está dado por los diámetros de los granos que lo conforman, una vez que estos sean indivisibles bajo la acción de una fuerza moderada. (Cedeño, 2013)

Teniendo en cuenta el tamaño de las partículas de suelo, se tienen los siguientes tipos de materiales:

Tabla 3. Tipo de material de acuerdo al tamaño de las partículas

Tipo de material		Tamaño de las partículas
Grava		75 mm – 4.75 mm
Arena		Arena gruesa: 4.75 mm – 2.00 mm
		Arena media: 2.00 mm – 0.425 mm
		Arena fina: 0.425 mm – 0.075 mm
Material Fino	Limo	0.075 mm – 0.005 mm
	Arcilla	Menor a 0.005 mm

Fuente: Cedeño (2013)

➤ Límite líquido (LL)

El límite líquido está definido como el porcentaje de contenido de humedad con respecto al peso seco de la muestra. Viene a ser el contenido de humedad con el que el suelo cambia de estado plástico a estado líquido. Es por ello que, en el límite líquido, los suelos plásticos tienen una resistencia muy pequeña al esfuerzo al corte. (Crespo, 2004)

$$L.L. = w_N \cdot \left(\frac{N}{25}\right)^{\tan\beta}$$

Donde:

L.L. es el Límite Líquido

WN es el contenido de humedad natural

N es el número de golpes

$\tan\beta$ es la pendiente de la línea de flujo

➤ Límite plástico (LP)

El límite plástico está definido como el porcentaje de contenido de humedad con respecto al peso seco de la muestra. Viene a ser el contenido de humedad con el que el suelo cambia de un estado semisólido a un estado plástico (Crespo, 2004).

$$L.P. = \frac{P_h - P_s}{P_s} \times 100 = \frac{P_w}{P_s} \times 100$$

Donde:

L.P. es el Límite Plástico

Ph es el peso de los trocitos de filamentos húmedos en gramos.

Ps es el peso de los trocitos de filamentos secos en gramos.

Pw es el peso del agua contenida en los filamentos pesados en gramos

➤ Índice de plasticidad (IP)

El índice plástico indica el margen en porcentaje, en el que el suelo mantiene condiciones plásticas, lo que equivale a decir que mide la plasticidad del suelo. (Crespo, 2004)

Se denomina índice plástico a la diferencia entre los límites líquido y plástico:

$$IP = LL - LP$$

Donde:

IP es el Índice de plasticidad

LL es el límite líquido

LP es el límite plástico

a) Gravedad Específica

El peso específico del suelo (γ_s) está definido como la relación entre el peso de las partículas sólidas del suelo y el peso del agua, considerando el mismo volumen y temperatura. La gravedad específica de un suelo (G_s) está definido como la relación entre el peso unitario del material, en este caso del suelo, y el peso unitario de agua destilada y libre de gas a 4°C. (Crespo, 2004)

$$G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_m}$$

Donde:

γ_s es el peso específico de los sólidos (g/cm³)

γ_m es el peso específico del agua destilada a 4°C (g/cm³)

➤ Contenido de humedad

El contenido de humedad es la relación del peso del agua al peso de los sólidos en una determinada masa de suelo y que está expresada generalmente en porcentaje. (Crespo, 2004)

La fórmula que lo define es la siguiente:

$$W = \frac{W_w}{W_s} \times 100$$

Donde:

W es el contenido de humedad expresado en porcentaje (%)

Ww es el peso de agua contenido en el suelo

Ws es el peso del suelo seco

➤ Densidad seca máxima – Humedad óptima

El ensayo tiene como objetivo determinar la relación entre la humedad y densidad de un suelo compactado. Esto se realizará en un molde mediante un pisón en caída libre bajo una energía específica de compactación. Las dimensiones del molde, la masa del pisón, así como la energía de compactación están estandarizados de acuerdo a norma. La compactación es el proceso mecánico con el que se busca disminuir la cantidad de vacíos de una masa de suelo, lo que facilitará el contacto más íntimo entre las partículas del mismo, generando un aumento de la densidad del suelo. Las variables que influyen en el nivel de compactación de un suelo son la humedad del mismo y el nivel de energía de compactación (Terzagui & Peck, 1973).

➤ Ensayo Proctor Modificado

El ensayo de compactación Proctor es uno de los procedimientos más importantes para el estudio y control de calidad de la compactación de un terreno. El ensayo fue desarrollado por Ralph R. Proctor en la década de los años 30, con el fin de determinar el contenido de humedad óptimo y la Densidad Seca Máxima. Gracias a este ensayo es posible determinar la compactación máxima de un terreno respecto a su contenido de humedad. Esto permitirá optimizar costos y el desarrollo estructural e hidráulico al inicio de una obra. Actualmente, la AASHTO ha estandarizado tanto el “Ensayo Proctor Normal” como el “Ensayo Proctor Modificado”. La principal diferencia entre ellos es la energía utilizada, debido al peso del pisón y la altura, características que son mayores en magnitud en el Ensayo Proctor Modificado. En el ensayo

se compacta en un molde de volumen estandarizado muestras de un mismo suelo, las cuales tendrán diferentes humedades, pero serán sometidos a la misma energía de compactación. Luego, se registran las densidades secas y el contenido de humedad de cada uno de los moldes, mediante una gráfica. En dicha gráfica, el punto más alto de la curva representa la Máxima Densidad seca y su proyección en la abscisa la humedad óptima. Para obtener la curva humedad – densidad seca, se debe realizar el ensayo en varias muestras del suelo. Estos nos brindarán los puntos de dicha curva. Por lo general, con cinco de estos puntos es posible dibujar la curva y, por ende, obtener la densidad máxima Proctor y la humedad óptima correspondiente (Terzagui & Peck, 1973).

d) Propiedades mecánicas de los suelos

➤ Resistencia

Esta propiedad, es en general más baja en cuanto a mayor sea su contenido de humedad. En el caso de los suelos arcillosos al secarse cuando se calientan a temperaturas elevadas, presenta la condición más alta de resistencia. Como se muestra en la fabricación de ladrillos y tabiques.

Sin embargo, se han presentado casos donde la humedad disminuye y la resistencia igualmente. Esto se muestra cuando las arcillas que fueron secadas y se agrietaron tuvo el comportamiento de un suelo friccionante provocándose así deslizamientos de tierra.

Por otro lado, para lograr que el suelo arcilloso logre un comportamiento relativamente elástico y la resistencia relativamente alta será compactado de lado seco en la curva de compactación, con humedad de compactación. Mientras que este mismo suelo compactado con una alta humedad, no obstante que su peso volumétrico seco sea alto, presentaría resistencias bajas y comportamiento plástico o viscoso debido a los efectos de repulsión de partículas propiciando que la cohesión sea menor (Montejo, 2002).

Algunos de los principales procedimientos para incrementar el peso volumétrico de un suelo son los siguientes:

- Compactación mediante amasado, vibración o impactos.
- Vibroflotación.
- Precarga.
- Drenaje.
- Adición de agentes que reduzcan la fricción y cohesión entre las partículas.

➤ Estabilidad volumétrica

Esta propiedad es la cual se muestra las variaciones causadas por los cambios de la humedad provocando la expansión y contracción de muchos suelos. Por tanto, si las expansiones que se desarrollan debido a un incremento de humedad no se controlan en alguna forma, estas presiones pueden ocasionar graves deformaciones y rupturas en el pavimento y, en general, en cualquier obra. Es por ello que resulta necesario detectar los suelos expansivos, su composición y el tratamiento más adecuado.

Una de las soluciones en suelos expansivos es introducir humedad al suelo en forma periódica, aplicar cargas que equilibren la presión de expansión, utilizar membranas impermeables y apoyar la estructura a profundidades tales, que no se registre variación estacional en la humedad. Otro medio podría consistir en modificar la arcilla expansiva transformándola en una masa rígida o granular cuyas partículas estén lo suficientemente ligadas para resistir la presión expansiva interna de la arcilla, lo cual puede lograrse por medios químicos o térmicos (Montejo, 2002).

➤ Durabilidad

A este concepto están involucrados factores que se refieren a la resistencia al intemperismo, a la erosión o a la abrasión del tráfico; de esta manera, los problemas de durabilidad en las vías terrestres suelen estar muy asociados a suelos situados relativamente cerca de la superficie de rodamiento. Estos problemas pueden afectar tanto a los suelos naturales como a los estabilizados

Actualmente, una deficiencia importante en los estudios de las estabilizaciones es la carencia de pruebas adecuadas para estudiar la durabilidad. Esto se

muestra en las pruebas de intemperismo, las cuales no son adecuadas para el estudio de agregados para pavimentos. En las pruebas con aplicación de efectos cíclicos, no se tiene aún una correlación precisa entre el tránsito y las pruebas en que se somete a los especímenes a efectos de secado y humedecimiento.

La durabilidad es, pues, uno de los aspectos más difíciles de cuantificar y la reacción común ha sido la de sobrediseñar, lo cual a veces puede no ser lo más adecuado (Montejo, 2002).

e) Propiedades hidráulicas de los suelos

➤ Permeabilidad

Propiedad mediante la cual se transmite el agua y el aire debido a la existencia de huecos o poros interconectados. La mayor o menor facilidad para que se produzca flujo será función de la granulometría del suelo.

Así, un suelo granular como una arena posee partículas de tamaño considerable, de forma que las dimensiones de los poros entre partículas también lo serán, el agua fluirá con facilidad a su través y las pérdidas de carga serán discretas. Sin embargo, en un suelo fino como una arcilla, el tamaño de las partículas es muy pequeño, del orden de micras, y sus poros resultan también extremadamente pequeños. En estas condiciones, el agua encontrará muchas más dificultades para circular y las pérdidas de carga serán muy considerables (Ingeniería geológica, 2002).

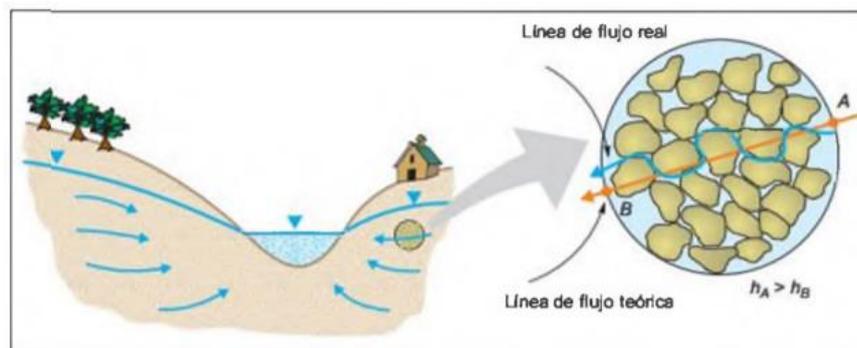


Figura 3: Trayectorias de filtración en el suelo
Fuente: González et al. (2002)

Según Montejo (2002), en los suelos la permeabilidad se plantea, en términos generales, en dos problemas básicos, como lo son el relacionado con la disipación de las presiones de poro y el relacionado con el flujo del agua a través del suelo. El tener presiones de poro excesivas puede originar deslizamientos en explanaciones y el flujo de agua puede originar tubificaciones y arrastres.

Si se compacta un suelo arcilloso con humedades muy bajas o prácticamente en seco, se obtendrá finalmente una alta permeabilidad en el suelo debido a los grumos que no se disgregan, resistiendo al esfuerzo de compactación y permitiendo con ello que se forme una gran cantidad de vacíos intersticiales. Mientras más alta sea la humedad de compactación se producirán menores permeabilidades en el suelo compactado, ya que éste tiene mayores oportunidades de deformarse, eliminándose así grandes vacíos.

Conocer esta propiedad es indispensable para el diseño de presas de tierra, para determinar la cantidad de filtraciones debajo de estructuras hidráulicas y para desaguar cimentaciones antes y después de su construcción (Braja, 2011).

Darcy (1856) propuso la ecuación siguiente para calcular la velocidad del flujo de agua a través de un suelo:

$$v = ki$$

En esta ecuación,

v = velocidad de descarga (unidad: cm/s)

k = permeabilidad hidráulica del suelo (unidad: cm/s)

i = gradiente hidráulico El gradiente hidráulico se define como

El gradiente hidráulico se define como:

$$i = \frac{\Delta h}{L}$$

donde

Δh = diferencia de carga piezométrica entre las secciones AA y BB

L = distancia entre las secciones AA y BB

(Nota: Las secciones AA y BB son perpendiculares a la dirección del flujo.)

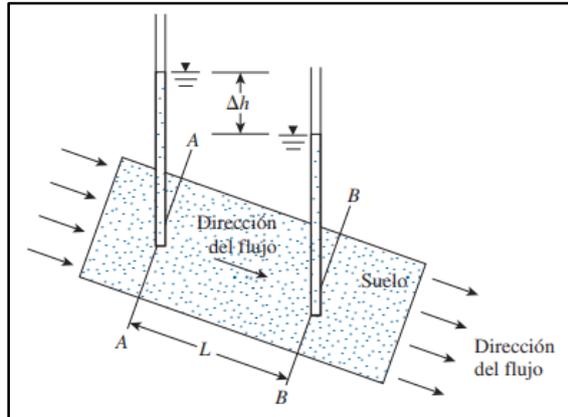


Figura 4: Definición de la ley de Darcy

Fuente: Braja D. (2012)

La ley de Darcy es válida para una gran variedad de suelos. Sin embargo, con materiales como grava limpia y pedraplenes de graduación abierta, esta ley no funciona debido a la naturaleza turbulenta del flujo a través de ellos.

El valor de la permeabilidad hidráulica de los suelos varía en gran medida. En el laboratorio se puede determinar por medio de pruebas de permeabilidad con carga constante o carga variable. La prueba con carga constante es más adecuada para suelos gruesos. En suelos granulares, el valor depende principalmente de la relación de vacíos.

La ecuación más utilizada para hallar la permeabilidad hidráulica es la siguiente:

$$k \propto \frac{e^3}{1 + e}$$

Donde:

k = permeabilidad hidráulica

e = relación de vacíos

Aunque Chapuis (2004) propuso una relación empírica para k en conjunto con la ecuación como

$$k(\text{cm/s}) = 2.4622 \left[D_{10}^2 \frac{e^3}{(1+e)} \right]^{0.7825}$$

donde

D = tamaño efectivo (mm).

Tabla 4. Coeficiente de permeabilidad

Tipo de suelo	Permeabilidad hidráulica, k (cm/s)
Grava media a gruesa	Mayor que 10^{-1}
Arena gruesa a fina	10^{-1} a 10^{-3}
Arena fina, arena limosa	10^{-3} a 10^{-5}
Limo, limo arcilloso, arcilla limosa	10^{-4} a 10^{-6}
Arcillas	10^{-7} o menor

Fuente: Braja D. (2012)

2.2.2 Carreteras de Bajo Volumen de Tránsito

Se conoce como carreteras a aquellos caminos de características modernas que cumplen con lo que indica el MTC, el ancho, alineamiento y pendiente; además deben contar con características que permitan un tránsito eficiente y la movilización ordenada de un alto volumen de vehículos (Menendez, 2012).

a) Clasificación de carreteras

➤ Clasificación de carreteras por orografía y demanda

En el Perú, se clasifica a las carreteras de la siguiente por dos maneras, por demanda que están las autopistas de primera y segunda clase, también las carreteras de primera, segunda y tercera clase, por último, se tiene a trochas carrózales. La otra manera es por orografía que es dependiendo el tipo de terreno, teniendo entre estos un terreno plano, ondulado, accidentado y escarpado (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2014).

A continuación, se visualiza la clasificación de carreteras:

Tabla 5. Clasificación de la carretera por orografía

TIPO	DESCRIPCIÓN
TERRENO PLANO (TIPO 1)	Poseen pendientes transversales $\leq 10\%$ y pendientes longitudinales $< 3\%$.
TERRENO ONDULADO (TIPO 2)	Poseen pendientes transversales entre 11% y 50% y pendientes longitudinales que se encuentran entre 3% y 6% .
TERRENO ACCIDENTADO (TIPO 3)	Poseen pendientes transversales entre 51% y 100% y pendientes longitudinales que se encuentran entre 6% y 8% .
TERRENO ESCARPADO (TIPO 4)	Poseen pendientes transversales $> 100\%$ y pendientes longitudinales $> 8\%$.

Fuente: Manual de Diseño Geométrico de Carreteras (2014)

Tabla 6. Clasificación de la carretera por demanda

TIPO	DESCRIPCIÓN
AUTOPISTAS DE PRIMERA CLASE	Poseen un IMDA > 6000 veh/día, con un separador central > 6.00 m., además consta de 2 o más calzadas, y dos o más carriles por calzada. Su ancho min. de carril es de 3.60 m. y su superficie de rodadura de esta carretera es pavimentada.
AUTOPISTAS DE SEGUNDA CLASE	Poseen un IMDA entre $4001 - 6000$ veh/día, con un separador central de 1.00 m hasta 6.00 m., además consta de 2 o más calzadas, y 2 o más carriles por calzada. Su ancho min. de carril es de 3.60 m. y la superficie de rodadura de esta carretera es pavimentada.
CARRETERAS DE PRIMERA CLASE	Poseen un IMDA entre $2001 - 4000$ veh/día, con una sola calzada la cual tiene 2 carriles. Su ancho min. de carril es de 3.60 m. y la superficie de rodadura de esta carretera es Pavimentada.
CARRETERAS DE SEGUNDA CLASE	Poseen un IMDA entre $400 - 2000$ veh/día, con una sola calzada la cual tiene 2. Su ancho min. de carril es de 3.30 m. y la superficie de rodadura es pavimentada
CARRETERAS DE TERCERA CLASE	Poseen un IMDA < 400 veh/día, con una sola calzada la cual tiene 2 carriles. Su ancho min. de carril es de 3.00 m. y la superficie de rodadura puede ser pavimentada o afirmada.
TROCHAS CARROZABLES	Poseen un IMDA < 200 veh/día, con una sola calzada la cual tiene 4.00 m, min. de calzada y la superficie de rodadura puede ser afirmada o sin afirmar.

Fuente: Manual de Diseño Geométrico de Carreteras (2014)

➤ Clasificación de carreteras por superficie de rodadura

De acuerdo al Manual del MTC (2014) se clasifica:

- Carreteras Pavimentadas

Carretera cuya superficie de rodadura, está conformada por mezcla bituminosa (flexible) o de concreto Portland (rígida).

- Carreteras No Pavimentadas

Carretera cuya superficie de rodadura está conformada por gravas o afirmado, suelos estabilizados o terreno natural.

Las carreteras no pavimentadas con revestimiento granular en sus capas superiores y superficie de rodadura corresponden en general a carreteras de bajo volumen de tránsito y un número de repeticiones de Ejes Equivalentes de hasta 300,000 EE en un periodo de diez años; estas carreteras no pavimentadas pueden ser clasificadas como sigue:

- Carreteras de tierra constituidas por suelo natural y mejorado con grava seleccionada por zarandeo y finos ligantes.
- Carreteras gravosas constituidas por una capa de revestimiento con material natural pétreo sin procesar, seleccionado manualmente o por zarandeo, de tamaño máximo de 75 mm.
- Carreteras afirmadas constituidas por una capa de revestimiento con materiales de cantera, dosificadas naturalmente o por medios mecánicos (zarandeo), con una dosificación especificada, compuesta por una combinación apropiada de tres tamaños o tipos de material: piedra, arena y finos o arcilla, siendo el tamaño máximo 25 mm. Pudiendo ser estos: Afirmados con gravas naturales o zarandeadas, o Afirmados con gravas homogenizadas mediante chancado.
- Carreteras con superficie de rodadura tratada con materiales industriales:
Caso1: Afirmados con superficie tratada para el control de polvo, con materiales como: cloruros, aditivos, productos asfálticos (imprimación reforzada o diferentes tipos de sello asfáltico), cemento, cal u otros estabilizadores químicos.
Caso2: Suelos naturales estabilizados con: emulsión asfáltica, cemento, cal, cloruros, geosintéticos y otros aditivos que mejoren las propiedades del suelo.

- Carreteras con pavimento económico

Las carreteras con pavimentos económico se refieren a alternativas técnicas, económicas y ambientales, que consisten principalmente en la aplicación de estabilizadores de suelos, recubrimientos bituminosos y otros, posibilitando que las capas de rodadura de las carreteras no pavimentadas, tengan una mayor vida útil y presten un mejor nivel de servicio (Ministerio de Economía y Finanzas, 2015).

Se puede presentar los siguientes casos:

- Caminos afirmados estabilizados sin recubrimiento: los cuales están a nivel de superficie de rodadura compuestos por afirmados estabilizados con productos químicos o caminos a nivel de superficie de rodadura con suelos estabilizados.
- Caminos afirmados estabilizados con recubrimiento: los cuales están a nivel de superficie de rodadura compuestos por afirmados o suelos estabilizados con productos químicos, con una capa de protección bituminosa.
- Caminos con soluciones básicas pavimentadas: estos presentan pavimentos compuestos por capas granulares y base estabilizada, con una superficie de rodadura bituminosa en frío como: tratamiento superficial monocapa, lechada asfáltica o mortero asfáltico, micropavimento en frío, carpetas de mezclas asfálticas en frío, etc.

b) Definición de Carreteras de Bajo Volumen

Según el Manual de Diseño Geométrico (2018), considera a las carreteras de tercera clase con IMDA menores a 400 veh/día y a las trochas carrozables cuyo IMDA es menor a 200 veh/día como carreteras de bajo volumen presentadas en la clasificación en función a la demanda.

Por otro lado, en el Manual de la Sección Suelos y Pavimentos, con un número de repeticiones de Ejes Equivalentes de hasta 300,000 EE a las carreteras no pavimentadas; y pavimentadas comprendido en el rango de 150,001 hasta 1'000,000 EE.

De acuerdo al Manual de Especificaciones Técnicas, las carreteras de acuerdo al tráfico se clasifican en los siguientes:

- Tráfico ligero, si es menor a 10^4
- Tráfico mediano, si es mayor o igual a 10^4 y menor de 10^6
- Tráfico pesado, mayor o igual a 10^6

Tabla 7. Clasificación de las carreteras de acuerdo al tráfico

Tipo de Tráfico	Número de aplicaciones de carga
Tráfico Ligero	>10000
Tráfico Medio	≥ 10000 y < 1000000
Tráfico Pesado	≥ 1000000

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a AASHTO, para pavimentos flexibles, considera bajo volumen de 5×10^4 hasta 3×10^5 ; tráfico mediano, de 4×10^5 a 6×10^5 ; y tráfico alto de 7×10^5 a 1×10^6

Tabla 8. Clasificación de tráfico de acuerdo a los EE

Tipo de Tráfico	Rangos de tráfico expresado en EE
Tráfico Ligero	$\geq 50000EE \leq 300000EE$
Tráfico Medio	$\geq 400000EE \leq 600000EE$
Tráfico Pesado	$\geq 700000EE \leq 1000000EE$

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a NAASRA de 103 a 105

2.2.3 Estabilización de suelos

Según Montejo, “el propósito de estabilizar suelos es alterar sus propiedades físicas, incrementar su resistencia y su durabilidad con el fin de obtener un material de fundación satisfactorio” (2002, pág. 99)

En el Manual de Estabilización de suelos con cemento o cal, expone que, con los suelos estabilizados, se persigue fundamentalmente un aumento de su capacidad de soporte y una disminución de su sensibilidad frente al agua y otras condiciones medioambientales desfavorables, así como en muchos casos su incremento de su resistencia mecánica. Si la fracción granular del suelo es

importante, un porcentaje moderado de conglomerante es suficiente para obtener un material insensible al agua, estable y capaz de resistir a largo plazo las deformaciones producida por el tráfico (2008).

“Se define como el mejoramiento de las propiedades físicas de un suelo a través de procedimientos mecánicos e incorporación de productos químicos, naturales o sintéticos” según el Manual de Carreteras, Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2014)

Los factores que se considerarán al seleccionar el método más conveniente de estabilización son:

- a) Tipo de suelo a estabilizar
- b) Uso propuesto del suelo estabilizado
- c) Tipo de aditivo estabilizador de suelos
- d) Experiencia en el tipo de estabilización que se aplicará
- e) Disponibilidad del tipo de aditivo estabilizador
- f) Disponibilidad del equipo adecuado
- g) Costos comparativos

➤ Tipos de Estabilización

Entre los principales tipos de Estabilización de suelos se tiene:

a. Estabilización química

Se logra mezclando productos químicos, como cemento, cal, cenizas volantes, betún o combinaciones de estos materiales, con tierra para formar un material compuesto más fuerte. La selección del tipo y porcentaje de aditivo es una función de la clasificación del suelo (Kestler, 2009, p. 9).

b. Estabilización mecánica

Implica la mezcla (dos o más suelos para obtener un material de la especificación deseada), drenaje y / o compactación del suelo. Alternativamente, fibroso u otros materiales de refuerzo no biodegradables, como geosintéticos / geocompuestos / fibras, se pueden mezclar o colocado físicamente con el geomaterial para mejorar la resistencia (Kestler, 2009, p. 9).

Según Menendez (2012), consiste en mejorar las propiedades del suelo por densificación mediante la mezcla con otro material. En el Perú es el método de estabilización más difundido convencional que suele estar disponible como motoniveladora, rodillo compactador y tractor.

Con la Estabilización Mecánica de Suelos se pretende mejorar el material del suelo existente, sin cambiar la estructura y composición básica del mismo. Como herramienta para lograr este tipo de estabilización se utiliza la compactación, con la cual se reduce el volumen de vacíos presentes en el suelo (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2014).

c. Estabilización por sustitución de los suelos

Pueden presentarse dos situaciones, sea que la capa se construya directamente sobre el suelo natural existente o que éste deba ser excavado previamente de acuerdo al espesor que, de reemplazado, luego de ser conformado y compactado se procederá a la colocación y compactación hasta las cotas exigidas por el material de adición (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2014).

d. Estabilización por combinación de suelos

Considera la combinación o mezcla de los materiales del suelo existente con materiales de préstamo. El suelo existente se disgregará o escarificará, en una profundidad de quince centímetros (15 cm) y luego se colocará el material de préstamo o de aporte. Luego se procederá a un mezclado de ambos suelos, se conformará y compactará cumpliendo las exigencias de densidad y espesores hasta el nivel de subrasante fijado en el proyecto (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2014).

2.2.4 Cemento Portland

➤ Definición de cemento Portland

Se define al cemento portland tipo I como un producto obtenido por la pulverización del clinker portland con la adición eventual de sulfato de calcio. Se admite la adición de otros productos que no excedan del 1% en peso del

total siempre que la norma correspondiente establezca que su inclusión no afecta las propiedades del cemento resultante. Todos los productos adicionados deberán ser pulverizados conjuntamente con el Clinker. Utilizado generalmente para suelos arenosos o gravas finas, la mayor ventaja es el incremento de la resistencia, también se puede usar para suelos arcillosos, pero implica mayor porcentaje de este (De la Cruz & Salcedo, 2016).

El cemento Portland se puede utilizar para modificar y mejorar la calidad del suelo o transformar el suelo en una masa cementada con mayor resistencia y durabilidad. La cantidad de cemento utilizada depender de si el suelo se va a modificar o estabilizado.

➤ Componentes

Este cemento Portland tipo I está compuesto por Silicato dicálcico (32%), Silicato tricálcico (40%), Aluminato tricálcico (10%), Ferroaluminato tetra cálcico (9%), Sulfato de calcio (2- 3%), en estos compuestos el magnesio puede reemplazar al calcio; existen también silicatos y ferroaluminatos de sodio y potasio. Obtenido el Clinker se mueve adicionando 2% a 3% de yeso para evitar que fragüe rápido.) (Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones, 2016)

➤ Objetivos de la aplicación del cemento

Permitir el aprovechamiento de suelos de la traza de deficiente calidad, evitando su extracción y transporte a vertedero, así como el tener que aportar otros diferentes que en ocasiones pueden hallarse a distancias importantes. Reducir la sensibilidad al agua de los suelos y con ellos aumentar su resistencia a la erosión, a la helada, a otros agentes climáticos.

➤ Efectos del cemento

El cemento Portland se puede utilizar para modificar y mejorar la calidad del suelo o transformar el suelo en una masa cementada con mayor resistencia y durabilidad. La cantidad de cemento utilizada depender de si el suelo se va a modificar o estabilizado (TM, 1994).

Al estabilizar un suelo con cemento Portland lo que se consigue principalmente es un cambio en el estado hídrico del suelo, pues este sufre un secado por el hecho de que se le está adicionando una cierta cantidad de materia seca y

también por la pérdida de agua que supone la hidratación del conglomerante. La adición de cemento Portland ayuda a generar en el suelo una resistencia mecánica, esta puede variar ampliamente y es función principalmente del tipo de cemento que se aplique y su dosificación.

En suelos finos, limosos o arcillosos con una plasticidad baja, la hidratación del cemento va a crear unos enlaces resistentes entre las partículas formando una estructura en forma de panal en las de las cuales dependerá la resistencia de la mezcla. El efecto que produce el cemento es que reduce la plasticidad y aumenta la resistencia al esfuerzo cortante; produce además una reducción de la afinidad del suelo por agua, con eso disminuye la capacidad del suelo de retener agua. Debido a esto el potencial de hinchamiento del suelo se ve reducido al igual que se disminuyen los efectos de congelación y deshielo (Gross & Adaska, 2020).

2.2.5 Estabilización con cemento Portland

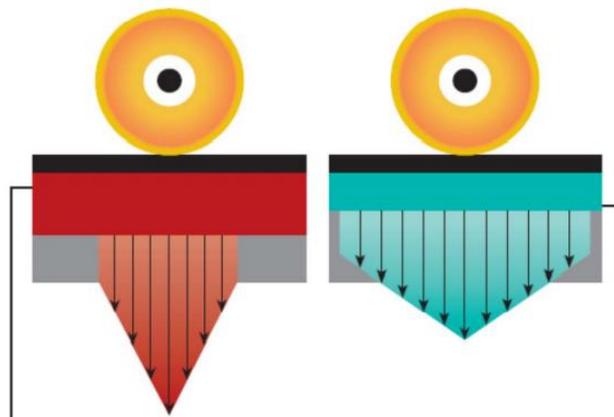


Figura 5: Base sin estabilizar VS

Fuente: Sahoo et al. (2019)

En la “Guía Suelos de subrasante estabilizados con cemento”. el suelo-cemento se refiere a una mezcla de ingeniería compactada de suelo, cemento y agua diseñado y construido para diversas aplicaciones de pavimentos y geotécnicos y características (Gross & Adaska, 2020).

Según Hicks (2002), la reacción principal es con el agua en el suelo que conduce a la formación de un material cementoso. Estas reacciones ocurren casi independientemente de la naturaleza del suelo y por esta razón el cemento Portland puede ser utilizado para estabilizar una amplia gama de materiales.

Aunque existen varios tipos de suelos estabilizados con cemento, existen dos tipos asociados con construcción de carreteras:

- **Suelo-cemento**: contiene suficiente cemento (generalmente > 3%) para pasar la durabilidad estándar prueba y logra una fuerza significativa incrementar.
- **Suelo modificado con cemento**: un suelo sin endurecer o mezcla semi-endurecida de tierra, agua y pequeñas cantidades de cemento (2002, p. 24).

La acción estabilizadora del cemento consta de varias etapas, la primera de las cuales es la acción de la naturaleza fibrosa del silicato de calcio que se forma cuando los granos del cemento entran en contacto con el agua. Debido a esta reacción se forman masas de fibras minúsculas que se traban fuertemente unas con otras y con otros cuerpos. La solución formada por la mezcla del cemento y agua reacciona con las partículas del suelo, reacción en la que los iones de calcio tienden a agrupar las partículas de suelo cargada negativamente produciéndose su floculación por acción de la gravedad. Por último, se compacta la mezcla, se produce una reacción de calcio con la sílice y alúmina de tamaños coloidales produciéndose complejos compuestos de silicatos y aluminatos que aumentan lentamente la resistencia de la mezcla con el tiempo.

El material llamado suelo-cemento se obtiene por la mezcla íntima de un suelo suficientemente disgregado con cemento, agua y otras eventuales adiciones, seguida de una compactación y un curado adecuados. De esta forma, el material suelto se convierte en otro endurecido, mucho más resistente. A diferencia del concreto, sin embargo, los granos de los suelos no están envueltos en pasta de cemento endurecido, sino que están puntualmente unidos entre sí. Por ello, el suelo-cemento tiene una resistencia inferior y un módulo de elasticidad más bajo que el concreto (Menendez, 2012)

Según el American Concrete Institute (2009), define al suelo-cemento como una mezcla de suelo y cantidades medidas de cemento Portland y agua compactado a una alta densidad. Se distingue del suelo modificado con

cemento en que el suelo-cemento o normalmente satisface la durabilidad y la resistencia a la compresión, o ambas, de modo que puede resistir eficazmente cargas estructurales (por ejemplo, cargas de vehículos cuando se usa como base de pavimento) y fuerzas ambientales (por ejemplo, congelación y descongelación).

a) Base de cemento tratado

Es una forma de cemento de suelo que usa agregado graduado, en lugar de suelo, para servir como material inerte unido por cemento más, posiblemente, puzolanas. Tal como se muestra en el gráfico 1. También se conoce como base agregada tratada con cemento, base agregada estabilizada con cemento u otros términos similares (American Concrete Institute, 2009).

Las propiedades del suelo-cemento dependen de:

- Tipo y cantidad de suelo, cemento y agua.
- Ejecución.
- Edad de la mezcla compactada y tipo de curado.

Los suelos más adecuados para estabilizar con cemento son los granulares tipos A-1, A-2 y A-3, con finos de plasticidad baja o media ($LL < 40$, $IP < 18$).

La resistencia del suelo-cemento aumenta con el contenido de cemento y la edad de la mezcla. Al añadir cemento a un suelo y antes de iniciarse el fraguado, su IP disminuye, su LL varía ligeramente y su densidad máxima y humedad-óptima aumenta o disminuyen ligeramente, según el tipo de suelo (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2014).

b) Porcentaje óptimo de cemento Portland

Definido que, el suelo es el adecuado para el tratamiento con Cemento, se determina la composición suelo-Cemento en diferentes proporciones, lo cual permite conseguir mejorar las propiedades de este. Para ello tendremos en consideración la clasificación de suelo a realizar según el sistema SUCS Y ASSTHO.31 Según el resultado del tipo de suelo que obtendremos en el laboratorio, se procederá a determinar el porcentaje de cemento en base a las recomendaciones del PCA y del MTC 2014 (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2014)

La dosificación de cemento para Suelo Cemento puede fijarse aproximadamente en función del tipo de suelo, según lo siguiente:

Tabla 9. Dosificación en función del tipo de suelo

Clasificación de suelos AASHTO	Rango usual de cemento requerido Porcentaje del peso de los suelos
A-1-a	3 - 5
A-1-b	5 - 8
A-2	5 - 9
A-3	7 - 11
A-4	7 - 12
A-5	8 - 13
A-6	9 - 15
A-7	10 - 16

Fuente: MTC 2014

c) Procedimiento de dosificación de cemento

Elizondo y Sibaja (2008), explican el siguiente procedimiento para determinar el contenido de cemento Portland de diseño para suelo cemento estabilizado.

- Paso 1: Determinar la granulometría y clasificación del suelo original a estabilizar mediante los procedimientos ASTM D 2487 y ASTM D 2444, respectivamente.
- Paso 2: Utilizando la clasificación del suelo, seleccionar un contenido de cemento estimado para realizar ensayos de humedad densidad, los contenidos de cemento se obtienen mediante la Tabla 9 anteriormente mencionada.
- Paso 3: Utilizando el contenido de cemento estimado, realizar el ensayo de densidad-humedad para determinar la densidad máxima seca y el contenido de humedad óptima de la mezcla de suelo cemento. El procedimiento establecido en ASTM D 558 deberá ser utilizado para preparar las mezclas de suelo cemento y realizar los cálculos necesarios; el procedimiento ASTM d1557 será utilizado para realizar en ensayo de humedad densidad.
- Paso 4: Preparar muestras por triplicado de la mezcla de suelo cemento para los ensayos de compresión y durabilidad. Los contenidos de cemento a los cuales se deben de preparar las mezclas serán: el contenido de cemento determinado en el paso 2 y al 2% de cemento por arriba y por debajo de esta dosificación. Las muestras deberán ser preparadas a la densidad y contenido de humedad que se prevé estará presente en el campo. Los especímenes deben de prepararse de acuerdo con el ASTMD 1632, exceptuando cuanto más del 35%

del material esté retenido en el tamiz N° 4 para el cual se deberían de utilizar moldes de 4 pulgadas de diámetro por 6 pulgadas de altura. Los especímenes preparados se deberán de curar por un periodo de 7 días en un cuarto de humedad controlada antes de ser ensayados.

Tres especímenes se deberán de fallar a compresión inconfiada de acuerdo con el procedimiento ASTM D1633, y otros tres especímenes deberán ser sometidos al ensayo de durabilidad, este ensayo podrá ser realizado mediante ciclos de humedecido y secado (ASTM D559) o congelamiento y descongelamiento (ASTM D560).

- Paso 5: Se deberán de comparar los resultados obtenidos con los requerimientos solicitados de acuerdo con las especificaciones recomendadas. El contenido de cemento más bajo, el cual cumpla con los requerimientos para los resultados de compresión y durabilidad requerida, será el contenido de cemento de diseño.

En caso de que la mezcla cumpla con los requerimientos de durabilidad no así con los requerimientos de resistencia se dirá que el suelo está en una condición modificada o mejorada. En caso de no cumplir los requerimientos de resistencia y durabilidad, se deberá de seleccionar contenidos de cemento mayores y repetir los pasos del 1 al 4.

d) Propiedades de los suelos estabilizados con cemento Portland

- **Naturaleza de Suelos**

Los suelos que se estabilizan con cemento pueden tener la siguiente clasificación:

- Los suelos tratados con cemento: en los que una vez descompuesto se le añade a un suelo cierta cantidad mínima de cemento para así enriquecer sus cualidades como su vulnerabilidad a las variaciones de humedad y luego del proceso sigan formando un material suelto.
- Estabilización de los suelos con cemento: como resultado final tendremos fraguado con una ligera resistencia mecánica.

Los suelos estabilizados con cemento para planicies a diferencia de los utilizados en capaz de firme es el contenido más alto de cemento de los

segundos, lo que refiere a una mayor resistencia mecánica y una gran uniformidad (Hoppe & Nair, 2017).

- **Propiedades en Estado Fresco**

- Plazo de trabajabilidad: es de mucha importancia ya que involucra en la puesta de materiales en obra como en su conducta a largo plazo. Para su determinación, lo más fácil consiste en elaborar ensayos de compactación, elaborando probetas luego de transcurrido un periodo cada vez más grande debido a la combinación de los compuestos y calculando la consistencia de las mismas.
- Estabilidad inmediata: es fundamental para poder tener una resistencia con el tránsito de los automóviles sin producirse deformaciones graves que puedan afectar un posterior comportamiento. Cuando es suelo este compactado, deberá tener una buena estabilidad. Para realizar el cálculo de esta se usará el nominado índice de capacidad de soporte, que se calcula imponiendo un tubo de ensayo que esta compactada recientemente a un ensayo de penetración, sin hidratación y sin algún exceso anular. La estimación de CBR, es el índice de capacidad de soporte. Este es una guía de la posibilidad de 22 transitar los equipos de obra sobre el material. Este último es muy inconstante si es que es inferior a 25. Para datos establecidos entre 25 y 50, la conducta del material es cambiante dependiendo de los requisitos de ejecución. (Hoppe & Nair, 2017)

- **Propiedades Físicas y Mecánicas**

- Densidad: los elementos tratados con cemento presentan una curva densidad seca-humedad, previa de la hidratación del conglomerante, que se consigue adhiriendo una energía de compactación normalizada a diferentes modelos de inicio en las que se va cambiando su contenido de humedad. Esta curva suele presentar un diseño algo parabólico, con una densidad máxima para un contenido de humedad que se llama humedad óptima.
- Permeabilidad: el aplicar cemento a los suelos presentan coeficientes de permeabilidad entre $1,7 \cdot 10^{-7}$ y 10^{-9} m/s. Las cifras más pequeñas pertenecen a suelos con una proporción considerable de compuestos arcillosas. A diferencia con la del suelo de inicio, la absorción baja considerablemente al combinarse

con cemento en suelos granulares, por otro lado, puede incrementar en alguna situación si se trata de suelos limosos o arcillosos.

Cuando es bajo la absorción aumenta el contenido de cemento, lo mismo pasa con los demás factores.

- Resistencias mecánicas Para que exista necesita esencialmente del:
 - i. El contenido de humedad
 - ii. La densidad lograda en la compactación.
 - iii. La humedad del compuesto
 - iv. La naturaleza del suelo
 - v. El tiempo de vida del material
 - vi. Las temperaturas por las que ha tenido que pasar
- Durabilidad
 - i. Comportamiento frente a heladas y ciclos de humedad – sequedad: el inicio del endurecimiento de los materiales tratados con cemento y el fraguado pueden tener retrasos o parados cuando estos presentan heladas, debido a la labor expansiva del agua intersticial, que restringe el desarrollo normal de estos procesos. En algunas ocasiones, la transformación de hielo puede generarse una des compactación del material. Pero, en algunas circunstancias, la transformación de fraguado se continúa transformando con normalidad cuando la temperatura logre valores normales.
 - ii. La densidad Comportamiento en ambientes agresivos: esta situación se da en lugares y aguas subterráneas con sulfatos presentes como pueden ser el magnesio, sodio o potasio) provocando una lucha entre ellos mismos con el cemento. Este conflicto se podría generar al responder los sulfatos con el aluminato tricálcico que se hace durante la hidratación del cemento. Por eso, hace que haya una respuesta que acelera y conlleva la separación de la cubierta aplicada con cemento. Los ataques se acrecientan a medida que se incrementan la concentración de sulfatos en las aguas subterráneas.

e) Utilización del suelo-cemento

El uso principal del suelo-cemento es como material base debajo de pavimentos bituminosos y de hormigón. Otros usos incluyen protección de taludes aguas

arriba para presas; protección de las riberas de los ríos y estructuras asociadas de control de leyes; revestimientos para canales, embalses y lagunas; y colocación masiva de cemento en el suelo para diques y estabilización de cimientos. (American Concrete Institute, 2009)

El suelo cemento es utilizado como base para pavimentación de carreteras, calles, industrias y aeropuertos. Una base de suelo-cemento proporciona un soporte fuerte y uniforme al pavimento que no se consolidará bajo el tráfico. Y Cuando se usa en un pavimento flexible, normalmente se coloca un sello de viruta bituminosa doble o una superficie de desgaste bituminosa de mezcla en caliente sobre la base de cemento del suelo Debajo de los pavimentos de hormigón, el suelo-cemento se utiliza como subbase para mejorar el soporte entre las capas de hormigón y subrasante. Para mejorar la transferencia de carga en las juntas y para evitar el bombeo de suelos de subrasante de grano fino en condiciones de humedad y tráfico pesado de camiones.

Los pavimentos flexibles defectuosos se han reciclado con materiales cementosos, lo que ha dado como resultado una nueva base de suelo-cemento. Portland Cement Association (PCA) recomienda que, para los pavimentos flexibles reciclados, el material mezclado pulverizado debe cumplir con una gradación del 100% pasando el tamiz de 3 pulgadas (75 mm), al menos el 95% pasando el de 2 pulgadas (50 mm) tamiz, y al menos el 55% pasa el tamiz No. 4 (2020).



Figura 6: Esparcimiento de suelo cemento sobre carretera en pendiente

Fuente: American Concrete Institute (2009)

f) Beneficios medioambientales de subrasante estabilizada con cemento (CSS)

La Asociación del Cemento Portland expresa que, en comparación con la eliminación y el reemplazo de suelos, la CSS también reduce los impactos ambientales. El aumento del tráfico de camiones causado por los métodos de remoción y reemplazo impacta sobre el medio ambiente y la comunidad local a través de un mayor tiempo de construcción, y una reducción de la seguridad (Gross & Adaska, 2020).

A continuación, en la Figura 7 se resume los beneficios del CSS frente a la eliminación y sustitución de suelos.

Subrasante estabilizada con cemento	
Menos tiempo	
Menos costo	
Reducción del impacto ambiental	
Remoción y reemplazo	
Más tiempo	
Más costo	
Mayor impacto ambiental	

Figura 7: Comparación de CSS con eliminación y reemplazo

Fuente: Portland Cement Association (PCA, 2020)

La Tabla 10 enumera los propósitos, los materiales y las prácticas de construcción utilizadas para los cuatro principales productos de suelo-cemento tratados en este capítulo: CMS, CSS, CTB y FDR. Aunque el CSS tiene aplicaciones que van más allá de la estabilización de suelos pobres, resulta necesario precisar que uso del cemento es importante para mejorar las propiedades de los suelos de la subrasante debajo de los pavimentos rígidos y flexibles, así como de las losas de los edificios.

Tabla 10. Características claves de los productos suelo-cemento

TIPOS DE SUELO-CEMENTO	Suelo modificado con cemento (CMS)	Subrasante estabilizada con cemento (CSS)	Base tratada con cemento (CTB)	Recuperación de profundidad total (FDR)
Propósito	<ul style="list-style-type: none"> • Promueve el secado del suelo • Aporta una mejora significativa a la plataforma de trabajo • Proporciona una modificación permanente del suelo. (no se filtra) 	<ul style="list-style-type: none"> • Proporciona todos los beneficios de CMS más lo siguiente: <ul style="list-style-type: none"> - Potencialmente permite una reducción en el espesor del pavimento o una mayor vida útil del pavimento - Aumenta la capacidad de carga para losas de construcción, zapatas y otros elementos estructurales. 	<ul style="list-style-type: none"> • Proporciona una base fuerte y resistente a las heladas para pavimentos de asfalto u hormigón 	<ul style="list-style-type: none"> • Proporciona una base fuerte y resistente a las heladas para pavimentos de asfalto u hormigón
Materiales	<ul style="list-style-type: none"> • Suelos principalmente de grano fino • 2% -4% cemento 	<ul style="list-style-type: none"> • Suelos principalmente de grano fino • 3% -6% cemento 	<ul style="list-style-type: none"> • Principalmente de grano grueso fabricado materiales • 3% -6% cemento 	<ul style="list-style-type: none"> • Asfalto pulverizado mezclado con existente base, sub-base y / o subrasante de pavimento • 3% -6% cemento
Propiedades de los materiales	<ul style="list-style-type: none"> • Humedad reducida susceptibilidad 	<ul style="list-style-type: none"> • Resistencia a la compresión de 100 a 300 psi (0,7 a 2,1 MPa) durante siete días 	<ul style="list-style-type: none"> • Resistencia a la compresión de 300–600 psi (2,1–4,1 MPa) durante siete días 	<ul style="list-style-type: none"> • Resistencia a la compresión de 300–600 psi (2,1–4,1 MPa) durante siete días
Construcción/ Prácticas	<ul style="list-style-type: none"> • Mínimo 95% de densidad máxima • Mezclado en su lugar 	<ul style="list-style-type: none"> • Mínimo 95% de densidad máxima • Mezclado en su lugar 	<ul style="list-style-type: none"> • Mínimo 95% - 98% de máxima densidad • Mezclado en el lugar o en una planta 	<ul style="list-style-type: none"> • Mínimo 95% - 98% de máxima densidad • Mezclado en el lugar o en una planta

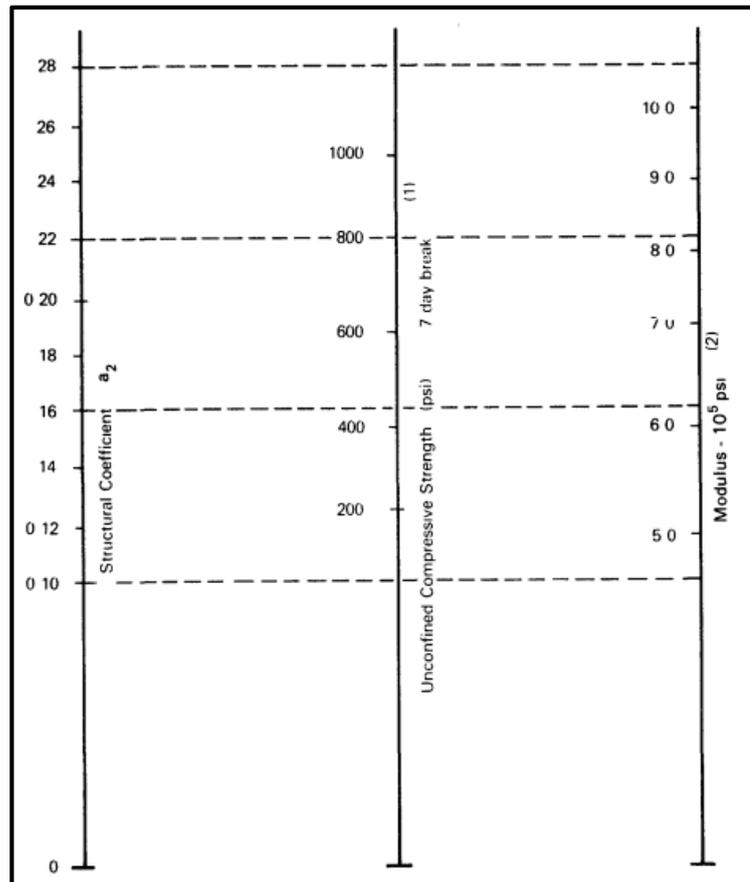
Fuente: Elaboración propia

2.2.6 Coeficiente estructural o CBR del suelo estabilizado con cemento

La guía de AASTHO sostiene que el coeficiente representa la capacidad estructural del material para resistir las cargas solicitantes. Estos coeficientes están basados en correlaciones obtenidas a partir de la prueba AASTHO 1958-60 y ensayos posteriores que se han extendido de otros materiales y otras condiciones para generalizar la aplicación del método.

Además, proporciona un gráfico que se puede utilizar para estimar un material base (a_2) tratado con cemento a partir de su módulo de elasticidad o su resistencia a la compresión inconfiada, después del proceso de 7 días (1993).

Gráfico 1 Coeficiente estructural a_2



Fuente: Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transportes

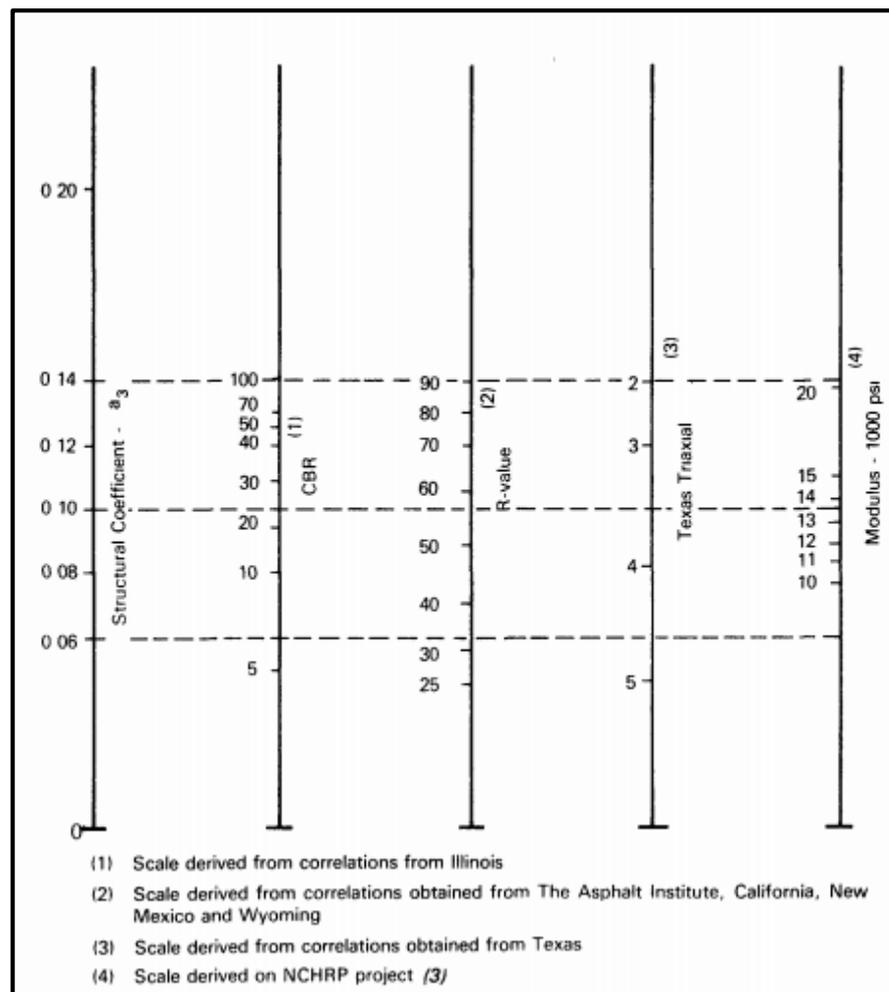
Tabla 11. Resistencia a compresión no confinada de varios tipos de suelos no tratados y mezclas suelo-cementos

Material	Rango de la resistencia a compresión no confinada	
	lb/pulg ²	(kN/m ²) ^b
<i>Suelo no tratado:</i>		
Arcilla, turba	Menor que 50	Menor que 350
Arcilla arenosa bien compactada	10-40	70-280
Grava, arena y mezclas arcillosas, bien compactadas	40-100	280-700
<i>Suelo-cemento (10% de cemento por peso):</i>		
Arcilla, suelos orgánicos	Menor que 50	Menor que 350
Limos, arcillas limosas, arenas muy mal graduadas, suelos ligeramente orgánicos	50-150	350-1050
Arcillas limosas, arcillas arenosas, arenas muy mal graduadas y gravas	100-250	700-1730
Arenas limosas, arcillas arenosas, arenas y gravas	250-500	1730-3460
Mezclas de arena-arcilla o grava-arena-arcilla bien graduadas y arenas y gravas	500-1500	3460-10,350

Fuente: Mitchell y Freitag (1959)

Y para el cálculo de la sub-base, el coeficiente a_3 se obtiene así:

Gráfico 2 Coeficiente estructural a_3



Fuente: Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transportes

2.2.7 Espesor de reemplazo del material de subrasante

Este procedimiento de cálculo para determinar en sectores localizados, el espesor de material a reemplazar aplicado en casos de sub rasantes pobres, con suelos de plasticidad media, no expansivos y con $\text{CBR} \geq 3\%$ y $\text{CBR} < 6\%$, y se calcula de la siguiente manera:

- a) Se calculará el SN (número estructural) del pavimento para un periodo de 20 años, el material a emplear tendrá un $\text{CBR} \geq 10\%$ e IP menor a 10, o en todo caso ha de ser similar. Cuando en los sectores adyacentes al sector de sustitución de suelos presentan un $\text{CBR} > 10\%$, para el cálculo del SN se utilizará el mayor valor de CBR, que representa el material de reemplazo, este número estructural SN calculado se denominará SNm (mejorado), luego se calculará el SN del pavimento para el CBR del material de subrasante existente (menor a 6%), que se denominará SNe (existente).
- b) Se realizará la diferencia algebraica de números estructurales

$$\Delta \text{SN} = \text{SNe} - \text{SNm}$$

- c) Habiéndose escogido el material de reemplazo ($\text{CBR} \geq 10\%$) a colocar (según SNm calculado), se obtendrán los valores correspondientes de coeficiente estructural (a_i) y coeficiente de drenaje (m_i), luego de obtener dichos valores se procederá a obtener el espesor E, según:

$$E = \frac{\Delta \text{SN}}{a_i \times m_i}$$

Siendo:

E: Espesor de reemplazo en cm.

a_i : Coeficiente estructural del material a colocar / cm

m_i : Coeficiente de drenaje del material a colocar.

2.2.8 Diseño estructural de la carretera

El diseño de la carretera se realizará con el dimensionamiento de los espesores del afirmado con la siguiente ecuación del método NAASRA.

$$e = [219 - 211 \times (\log_{10} \text{CBR}) + 58 \times (\log_{10} \text{CBR})^2] \times \log_{10} (\text{Nrep}/120)$$

Donde:

e = espesor de la capa de afirmado en mm.

CBR = valor del CBR de la sub rasante.

Nrep = número de repeticiones de EE para el carril de diseño.

Para el cálculo del espesor, está influenciado por dos parámetros básicos que será la estimación del CBR y el cálculo de Nrep, como se muestra en la ecuación anterior.

Luego de clasificar el suelo por AASHTO y SUCS, se selecciona el CBR considerando lo siguiente:

En los sectores con 6 o más valores de CBR realizados por tipo de suelo representativo o por sección de características homogéneas de suelos, se determinará el valor de CBR de diseño de la sub rasante considerando el promedio del total de los valores analizados por sector de características homogéneas.

En los sectores con menos de 6 valores de CBR realizados por tipo de suelo representativo o por sección de características homogéneas de suelos, se determinará el valor de CBR de diseño de la sub rasante en función a los siguientes criterios:

- Si los valores son parecidos o similares, tomar el valor promedio.
- Si los valores no son parecidos o no son similares, tomar el valor crítico (el más bajo) o en todo caso subdividir la sección a fin de agrupar subsectores con valores de CBR parecidos o similares y definir el valor promedio. La longitud de los subsectores no será menor a 100 m.

Son valores de CBR parecidos o similares los que se encuentran dentro de un determinado rango de categoría de sub rasante, según:

Tabla 12. Categorías de subrasante

CATEGORÍAS DE SUB RASANTE	CBR
S ₀ : Sub rasante Inadecuada	CBR < 3%
S ₁ : Sub rasante insuficiente	De CBR ≥ 3% A CBR < 6%
S ₂ : Sub rasante Regular	De CBR ≥ 6% A CBR < 10%
S ₃ : Sub rasante Buena	De CBR ≥ 10% A CBR < 20%
S ₄ : Sub rasante Muy Buena	De CBR ≥ 20% A CBR < 30%
S ₅ : Sub rasante excelente	CBR ≥ 30%

Fuente: Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones (2014)

Para poder asignar la categoría de sub rasante indicada en el Tabla 12, los suelos de la explanación debajo del nivel superior de la sub rasante, deberán tener un espesor mínimo de 0.60 m del material correspondiente a la categoría asignada, caso contrario se asignará a la categoría inmediata de calidad inferior.

Según el Manual de Carreteras (2014), las subrasantes aptas para pavimenta considera los siguientes puntos:

- Las capas de subrasante con CBR ≥ 6%
- El nivel superior de la sub rasante debe quedar encima del nivel de la napa freática como mínimo a 0.60 m cuando se trate de una sub rasante excelente - muy buena (CBR ≥ 20 %); a 0.80 m cuando se trate de una sub rasante buena - regular (6% ≤ CBR < 20%); a 1.00 m cuando se trate de una sub rasante Insuficiente (3% ≤ CBR < 6%); y, a 1.20 m cuando se trate de una sub rasante inadecuada (CBR < 3%).

Una vez seleccionado el valor del valor del CBR, considerando la Tabla 12 se tendrá que calcular el Nrep de EE_{8.2ton} mediante la siguiente fórmula:

$$\boxed{\text{Nrep de EE}_{8.2\text{ ton}} = \sum [\text{EE}_{\text{día-carril}} \times \text{Fca} \times 365]}$$

De acuerdo al MTC, las cargas de tráfico vehicular impuestas al pavimento, están expresadas en ESALs, Equivalent Single Axle Loads 18-kip o 80-kN o 8.2 t, que en el presente Manual se denominan Ejes Equivalentes (EE). La sumatorias de ESALs durante el período de diseño es referida como (W18) o

ESALD, en el presente Manual se denominan Número de Repeticiones de EE de 8.2 t.

Donde:

Nrep de EE 8.2t: Número de Repeticiones de Ejes Equivalentes de 8.2 ton

Fca: Factor de crecimiento acumulado por tipo de vehículo pesado

EEdía-carril: Ejes Equivalentes por cada tipo de vehículo pesado, por día para el carril de diseño. Resulta del IMD por cada tipo de vehículo pesado, por el Factor Direccional, por el Factor Carril de diseño, por el Factor Vehículo Pesado del tipo seleccionado y por el Factor de Presión de neumáticos.

El valor de EEdía-carril también se calculará mediante fórmula que está a continuación:

$$EE_{\text{día-carril}} = IMD_{pi} \times Fd \times Fc \times Fv_{pi} \times Fp_i$$

Donde:

IMD_{pi}: corresponde al Índice Medio Diario según tipo de vehículo pesado seleccionado

Fd: Factor Direccional

Fc: Factor Carril de diseño

Fv_{pi}: Factor vehículo pesado del tipo seleccionado (i) calculado según su composición de ejes. Representa el número de ejes equivalentes promedio por tipo de vehículo pesado (bus o camión), y el promedio se obtiene dividiendo el total de ejes equivalentes (EE) de un determinado tipo de vehículo pesado entre el número total del tipo de vehículo pesado seleccionado.

Fp: Factor de Presión de neumáticos

El factor direccional y el factor carril se estimarán usando la Tabla 13:

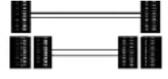
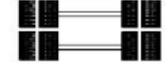
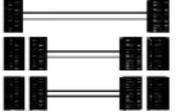
Tabla 13. Factores de Distribución Direccional y de Carril para determinar el Tránsito en el carril del diseño

Número de calzadas	Número de sentidos	Número de carriles por sentido	Factor Direccional (Fd)	Factor Carril (Fc)	Factor Ponderado Fd x Fc para carril de diseño
1 calzada (para IMDa total de la 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 (para IMDa total de las dos calzadas)	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 Telecomunicaciones (2014)

Finalmente, para estimar el valor de Fca se empleará la Tabla 14; y el Fvpi se considerará la configuración de ejes y la Relación de Cargas por Eje para determinar Ejes Equivalentes (EE) para Afirmados, Pavimentos Flexibles y Semirrígidos.

Tabla 14. Configuración de Ejes

Conjunto de Eje (s)	Nomenclatura	Nº de Neumáticos	Grafico
EJE SIMPLE (Con Rueda Simple)	1RS	02	
EJE SIMPLE (Con Rueda Doble)	1RD	04	
EJE TANDEM (1 Eje Rueda Simple + 1 Eje Rueda Doble)	1RS + 1RD	06	
EJE TANDEM (2 Ejes Rueda Doble)	2RD	08	
EJE TRIDEM (1 Rueda Simple + 2 Ejes Rueda Doble)	1RS + 2RD	10	
EJE TRIDEM (3 Ejes Rueda Doble)	3RD	12	

Fuente: Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones

Tabla 15. Factores de Crecimiento Acumulado (Fca) para el cálculo de número de repeticiones de EE

Período de Análisis (años)	Factor sin Crecimiento	Tasa anual de crecimiento (r)							
		2	3	4	5	6	7	8	10
1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2	2.00	2.02	2.03	2.04	2.05	2.06	2.07	2.08	2.10
3	3.00	3.06	3.09	3.12	3.15	3.18	3.21	3.25	3.31
4	4.00	4.12	4.18	4.25	4.31	4.37	4.44	4.51	4.64
5	5.00	5.20	5.19	5.42	5.53	5.64	5.75	5.87	6.11
6	6.00	6.31	6.47	6.63	6.80	6.98	7.15	7.34	7.72
7	7.00	7.43	7.66	7.90	8.14	8.39	8.65	8.92	9.49
8	8.00	8.58	8.89	9.21	9.55	9.90	10.26	10.64	11.44
9	9.00	9.75	10.16	10.58	11.03	11.49	11.98	12.49	13.58
10	10.00	10.95	11.46	12.01	12.58	13.18	13.82	14.49	15.94
11	11.00	12.17	12.81	13.49	14.21	14.97	15.78	16.65	18.53
12	12.00	13.41	14.19	15.03	15.92	16.87	17.89	18.98	21.38
13	13.00	14.68	15.62	16.63	17.71	18.88	20.14	21.50	24.52
14	14.00	15.97	17.09	18.29	19.16	21.01	22.55	24.21	27.97
15	15.00	17.29	18.60	20.02	21.58	23.28	25.13	27.15	31.77
16	16.00	18.64	20.16	21.82	23.66	25.67	27.89	30.32	35.95
17	17.00	20.01	21.76	23.70	25.84	28.21	30.84	33.75	40.55
18	18.00	21.41	23.41	25.65	28.13	30.91	34.00	37.45	45.60
19	19.00	22.84	25.12	27.67	30.54	33.76	37.38	41.45	51.16
20	20.00	24.30	26.87	29.78	33.06	36.79	41.00	45.76	57.28

Fuente: Tabla D-20 AASHTO Guide for Design of Pavement Structures 1993

$$\text{Factor Fca} = \frac{(1+r)^n - 1}{r}$$

Donde

r = Tasa anual de crecimiento
n = Período de diseño

Ejemplo:

$$\text{Factor} = \frac{(1+0.05)^{10} - 1}{0.05} = 12.58$$

r = Tasa anual de crecimiento 5%
n = Período de diseño 10 años

Fuente: Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones (2014)

Tabla 16. Relación de Cargas por Eje para determinar Ejes Equivalentes (EE) para Afirmados, Pavimentos

Tipo de Eje	Eje Equivalente (EE _{8.2 ton})
Eje Simple de ruedas simples (EE _{S1})	EE _{S1} = [P / 6.6] ^{4.0}
Eje Simple de ruedas dobles (EE _{S2})	EE _{S2} = [P / 8.2] ^{4.0}
Eje Tandem (1 eje ruedas dobles + 1 eje rueda simple) (EE _{TA1})	EE _{TA1} = [P / 14.8] ^{4.0}
Eje Tandem (2 ejes de ruedas dobles) (EE _{TA2})	EE _{TA2} = [P / 15.1] ^{4.0}
Ejes Tridem (2 ejes ruedas dobles + 1 eje rueda simple) (EE _{TR1})	EE _{TR1} = [P / 20.7] ^{3.9}
Ejes Tridem (3 ejes de ruedas dobles) (EE _{TR2})	EE _{TR2} = [P / 21.8] ^{3.9}
P = peso real por eje en toneladas	

Fuente: Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones (2014)

2.3 Definición de términos básicos

De acuerdo al Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2018) en el "GLOSARIO DE TÉRMINOS" se define los siguientes conceptos:

- **Agregado:** Material granular de composición mineralógica como arena, grava, escoria, o roca triturada, usado para ser mezclado en diferentes tamaños.
- **Capacidad de soporte:** resistencia que presenta el material subrasante con fines de diseño de pavimentos.
- **Carretera:** Camino para el tránsito de vehículos motorizados de por lo menos dos ejes, cuyas características geométricas, tales como: pendiente longitudinal, pendiente transversal, sección transversal, superficie de rodadura y demás elementos de la misma, deben cumplir las normas técnicas vigentes del Ministerio de Transportes y Comunicaciones.
- **Carreteras no pavimentadas:** Carretera cuya superficie de rodadura está conformada por gravas o afirmado, suelos estabilizados o terreno natural.
- **CBR (California Bearing Ratio):** Valor relativo de soporte de un suelo o material, que se mide por la penetración de una fuerza dentro de una masa de suelo.
- **Cemento:** Es un producto obtenido por la pulverización del Clinker portland con la adición eventual de yeso natural.
- **Conglomerado:** Roca sedimentaria clástica, compuesta de cantos rodados cementados en una matriz fina que puede ser calcárea o silicosa.
- **Dosificación:** Proceso de medición por peso o por volumen de los ingredientes y su introducción en la mezcladora para una cantidad de concreto y mortero.
- **Estabilización:** proceso físico o químico, mediante el cual se mejora las condiciones mecánicas de un suelo.
- **Estabilización mecánica:** produce por compactación un entrelazamiento de partículas de suelo y agregado.
- **Índice Medio Diario (IMD):** Numero promedio de vehículos medido en un periodo de 24 horas, del total de vehículos que pasan por una sección determinada de una vía.
- **Índice Medio Diario Anual (IMDA):** El volumen de transito promedio ocurrido en un periodo de 24 horas promedio del año.
- **Limite liquido:** Contenido de agua del suelo entre el estado plástico y el líquido de un suelo

- **Limite plástico:** Contenido de agua de un suelo entre el estado plástico y el semi-sólido.
- **Red Vial Vecinal:** Conformada por las carreteras que constituyen la red vial circunscrita al ámbito local, cuya función es articular las capitales de provincia con capitales de distrito, éstas entre sí, con centros poblados o zonas de influencia local y con las redes viales nacional y departamental o regional
- **Suelo cemento:** mezcla de suelo y cantidades medidas de cemento Portland y agua compactada a alta densidad
- **Suelos estabilizados:** son suelos pobres o inadecuados de baja estabilidad a los cuales es necesario adicionales un estabilizador como cal, cemento o un aditivo químico o iónico.

CAPÍTULO III: SISTEMA DE HIPÓTESIS

3.1 Hipótesis

3.1.1 Hipótesis general

La dosificación en porcentaje del cemento Portland para el mejoramiento de las propiedades de los suelos depende de los tipos de suelos existentes en carreteras de bajo volumen de tránsito.

3.1.2 Hipótesis específicas

- a) Identificando las características físico-mecánicas del material de subrasante se evalúa la aplicación del cemento Portland para el mejoramiento de las propiedades de los suelos en carreteras de bajo volumen de tránsito.
- b) Determinando la dosificación en porcentaje del cemento Portland se relaciona el contenido del agente estabilizador en función a la clasificación de los suelos para el mejoramiento de sus propiedades en carreteras de bajo volumen de tránsito.
- c) El espesor de reemplazo del material de subrasante de suelos con CBR < 6% supera los 20 cm en carreteras de bajo volumen de tránsito.
- d) El espesor de la capa de afirmado de pavimentos con subrasante de suelo adicionado con cemento Portland es menor al espesor de pavimentos con subrasante de suelo natural en carreteras de bajo volumen de tránsito.

3.2 Variables

3.2.1 Definición conceptual de las variables

La presente investigación considera las siguientes variables:

- a) Variable Independiente
X1: Propiedades de los suelos
- b) Variable Dependiente
Y1: Dosificación en porcentaje del cemento Portland

3.2.2 Operacionalización de las variables

En el Anexo 2 se presenta la operacionalización de variables, las cuales fueron detalladas en el ítem 3.2.1 del presente proyecto de investigación.

CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

4.1 Tipo y nivel

4.1.1 Tipo

La presente investigación contempló los siguientes tipos y/o alcances:

- ✓ Descriptiva; puesto que, se recogió y analizó información de manera conjunta sobre el cemento Portland, como un aditivo estabilizador de suelos, a partir de la caracterización y comportamiento de los mismos.
- ✓ Explicativa; puesto que, se explicó el proceso de aplicación de cemento Portland en los suelos existentes de las carreteras de bajo volumen de tránsito.

4.1.2 Nivel

La presente investigación contempló un nivel descriptivo; puesto que, se describió el mecanismo de funcionamiento del aditivo químico (cemento Portland) en función al tipo de suelos predominante en las carreteras de bajo volumen de tránsito.

4.2 Diseño de investigación

La presente investigación consideró los siguientes diseños:

- ✓ Según el propósito del estudio es observacional, por lo que no fue posible manejar y/o manipular de manera intencional la variable independiente (dosificación en porcentaje del cemento Portland).
- ✓ Según el número de mediciones es longitudinal, por lo que en las investigaciones que sirvieron de apoyo para el desarrollo del presente estudio, se realizó más de una medición en cuanto a dosificaciones de cemento Portland y ensayos de laboratorio.
- ✓ Según la cronología de las observaciones es retrospectivo; puesto que, se recopilaron datos y resultados ya registrados con anterioridad.

4.3 Población y muestra

4.3.1 Población de estudio

La población de estudio estuvo constituida por 14 carreteras de bajo volumen de tránsito a nivel Nacional e Internacional, las cuales registraron información para el desarrollo del presente proyecto de investigación.

4.3.2 Diseño muestral

La muestra estuvo constituida por el registro de datos y resultados de ensayos de laboratorio realizados a las muestras de suelo extraídas de las carreteras de bajo volumen de tránsito, los cuales fueron determinados por los autores de 14 proyectos de investigación y, posteriormente, analizados y discutidos en el presente estudio.

4.4 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

4.4.1 Tipos de técnicas e instrumentos

La presente investigación realizó un análisis documental; puesto que, la información fue adquirida de diverso material bibliográfico, tales como: tesis, libros, manuales y/o guías.

4.4.2 Criterios de validez y confiabilidad de los instrumentos

La selección y recopilación del material bibliográfico, fue adquirido de diversas fuentes académicas mundialmente reconocidas que cuentan con respaldo institucional.

4.4.3 Procedimientos para la recolección de datos

La presente investigación desarrolló los siguientes procedimientos para la recolección de datos:

- ✓ Búsqueda bibliográfica referente al tema de investigación en estudio.
- ✓ Recopilación de material bibliográfico referente a la Estabilización de suelos con cemento Portland.
- ✓ Selección de los proyectos de investigación a considerar para el desarrollo del objetivo del presente proyecto de tesis.
- ✓ Identificación y análisis de la información obtenida con anterioridad en los 14 proyectos de investigación.

4.5 Técnicas para el procesamiento y análisis de la información

La presente investigación se basó en la recopilación, clasificación y organización de información en una matriz bibliográfica, para su rápido entendimiento e interpretación.

CAPÍTULO V: PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

La infraestructura vial es uno de los soportes fundamentales para el crecimiento económico y social de cualquier país, especialmente las carreteras de bajo volumen de tránsito que interconectan diversas poblaciones rurales, siendo de gran importancia para el desarrollo local, regional y nacional, y muchas de las cuales se encuentran localizadas en las zonas más alejadas y desconectadas del país.

En ese sentido, la construcción de carreteras eficientes y sólidas se vuelve indispensable, ya que permiten tener acceso a necesidades básicas, como alimentación, educación, salud y trabajo. Sin embargo, la baja calidad e inestabilidad de los suelos existentes en las vías, sumado a la ineficiente gestión y construcción de las mismas, influye negativamente en su conservación y durabilidad.

La infraestructura vial de Perú está constituida por una red vial que comprende: la Red Vial Nacional (RVN), la Red Vial Departamental (RVD) y la Red Vial Vecinal (RVV). Asimismo, gran parte de la infraestructura vial total existente corresponde a vías de bajo tránsito, las cuales pueden encontrarse pavimentadas o no pavimentadas y, cuya condición de servicio es deficiente.

Según lo anteriormente expuesto, el presente estudio custodia información de diversos Proyectos de Investigación realizados sobre la Estabilización de suelos con cemento Portland aplicado en vías de bajo volumen, a fin de analizar los procedimientos llevados a cabo en la obtención de resultados y, por consiguiente, determinar la dosificación en porcentaje del cemento Portland para el mejoramiento de las propiedades de los suelos; favoreciendo entonces su durabilidad, resistencia y contribuyendo al desarrollo de las vías de menor tránsito en el país.

En tal sentido, se seleccionaron 14 Proyectos de Investigación, los cuales fueron objeto de observación y análisis del presente estudio. Del total de proyectos de investigación seleccionados, se consolidaron 10 Proyectos de Investigación Nacionales y 4 Proyectos de Investigación Internacionales.

A continuación, en la Tabla 17 se presenta el resultado anteriormente mencionado.

Tabla 17. Resumen de los Proyectos de Investigación consolidados

PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN	UBICACIÓN
PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PI1	PASCO
PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PI2	CAJAMARCA
PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PI3	GUAYAQUIL
PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PI4	HUANCAVELICA
PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PI5	LORETO
PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PI6	TRUJILLO
PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PI7	LIMA
PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PI8	TARAPOTO
PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PI9	TRUJILLO
PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PI10	TRUJILLO
PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PI11	LIMA
PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PI12	ECUADOR
PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PI13	COLOMBIA
PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PI14	ECUADOR
PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN NACIONALES	10
PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN INTERNACIONALES	4

Fuente: Elaboración propia

El proceso continuó con la recolección de información obtenida en cada Proyecto de Investigación, la cual contempló datos y resultados de ensayos de laboratorio realizados a las muestras de suelo extraídas de las vías de bajo volumen de tránsito. Es decir, se consolidaron las características físicas, tales como: humedad natural, granulometría, límite líquido, límite plástico, índice de plasticidad y clasificación de los suelos y, las características mecánicas, tales como: máxima densidad seca, humedad óptima y resistencia sobre las muestras de suelo en su estado natural.

Seguidamente se consolidaron las características físico-mecánicas sobre las mismas muestras de suelo mejoradas por la adición del cemento Portland en diversas dosificaciones.

Después de eso se agruparon ambos resultados, los cuales fueron analizados, comparados y discutidos en el presente estudio.

Más adelante se determinó el espesor de reemplazo del material de subrasante sobre muestras de suelo de subrasante con $\text{CBR} < 6\%$, y cuya categoría corresponde a una subrasante inadecuada ($\text{CBR} < 3\%$) o subrasante insuficiente ($\text{CBR} \geq 3\%$ y $\text{CBR} < 6\%$).

Finalmente, se obtuvo el espesor de la capa de afirmado de las vías de bajo volumen de tránsito, aplicado sobre muestras de suelo en su estado natural ($\text{CBR}_{\text{subrasante}}$ de suelo natural) y muestras de suelo tratadas con cemento Portland ($\text{CBR}_{\text{subrasante}}$ de suelo estabilizado).

5.1 Resultados de las características físico-mecánicas del material de subrasante

Se recopiló la información obtenida de diferentes Proyectos de Investigación, referente a las características físico-mecánicas de las muestras de suelo natural extraídas a nivel de subrasante de diversas carreteras de bajo volumen de tránsito, con la finalidad de identificar qué propiedades de los suelos requieren ser mejoradas mediante la adición de un estabilizador químico como el cemento Portland, dependiendo del uso del suelo en la estructura del pavimento (sea mejorando la subrasante o el material de capa granular para subbase, base y/o afirmado).

A continuación, en la Tabla 18 se presenta el resumen de las características físico-mecánicas de los suelos en materia de estudio por cada Proyecto de Investigación. Las características físicas tomadas en cuenta fueron: humedad natural, límites de consistencia, clasificación de los suelos basada en Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) y American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), asimismo las características mecánicas tomadas en cuenta fueron: máxima densidad seca, humedad óptima y valor soporte o resistencia del suelo (CBR).

Tabla 18. Resumen de las características físico-mecánicas del material de subrasante

continúa

CARACTERÍSTICAS FÍSICO-MECÁNICAS DE LOS MATERIALES DE SUBRASANTE							
CARACTERÍSTICAS DE LOS SUELOS	PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN						
	PI1	PI2	PI3	PI4	PI5	PI6	PI7
CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LOS SUELOS							
HUMEDAD NATURAL (%)	29.37	32.78	15.90	10.93	32.78	5.77	12.51
LÍMITE LÍQUIDO	66.10	73.00	32.30	30.52	29.61	30.35	30.00
LÍMITE PLÁSTICO	26.90	29.00	11.76	14.61	21.85	23.83	23.00
ÍNDICE DE PLASTICIDAD	39.20	44.00	20.54	15.92	7.76	6.51	7.00
CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS:							
CLASIFICACIÓN SUCS	CH	OH	CL	SC	SC	SP-SC	ML
CLASIFICACIÓN AASHTO	A-7-6	A-7-6	-	A-6	A-2-4	A-2-4	A-4
CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DE LOS SUELOS							
PROCTOR MODIFICADO:							
MÁXIMA DENSIDAD SECA (gr/cm ³)	1.827	1.615	1.852	2.123	1.878	1.600	1.804
HUMEDAD ÓPTIMA (%)	14.30	18.90	11.29	8.40	12.44	6.66	16.50
CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR):							
CBR (100% MDS Y 0.1" DE PENETRACIÓN) (%)	3.30	1.44	-	70.70	44.44	-	7.20
CBR (95% MDS Y 0.1" DE PENETRACIÓN) (%)	2.60	1.30	14.02	30.80	22.60	2.13	4.90

Fuente: Elaboración propia

Tabla 18. Resumen de las características físico-mecánicas del material de subrasante

CARACTERÍSTICAS FÍSICO-MECÁNICAS DE LOS MATERIALES DE SUBRASANTE							
CARACTERÍSTICAS DE LOS SUELOS	PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN						
	PI8	PI9	PI10	PI11	PI12	PI13	PI14
CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LOS SUELOS							
HUMEDAD NATURAL (%)	23.44	6.24	2.80	6.10	79.48	10.47	33.46
LÍMITE LÍQUIDO	59.79	46.00	24.70	22.00	86.00	31.60	38.00
LÍMITE PLÁSTICO	30.23	24.94	18.40	18.40	66.67	20.09	26.00
ÍNDICE DE PLASTICIDAD	29.56	21.06	6.30	3.60	19.33	11.51	12.00
CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS:							
CLASIFICACIÓN SUCS	CH	OL	GC-GM	GP-GM	CH	CL	ML
CLASIFICACIÓN AASHTO	A-7-5	A-7-6	A-1-a	A-1-a	-	A-2-6	A-6
CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DE LOS SUELOS							
PROCTOR MODIFICADO:							
MÁXIMA DENSIDAD SECA (gr/cm ³)	1.764	1.300	2.170	2.292	1.483	1.900	1.705
HUMEDAD ÓPTIMA (%)	15.60	8.20	6.98	6.30	35.40	13.32	16.73
CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR):							
CBR (100% MDS Y 0.1" DE PENETRACIÓN) (%)	6.96	27.55	36.50	65.10	-	-	-
CBR (95% MDS Y 0.1" DE PENETRACIÓN) (%)	4.69	24.05	28.20	48.30	2.05	27.00	3.00

Fuente: Elaboración propia

Respecto a los resultados anteriormente mencionados (Tabla 18) obtenidos por cada Proyecto de Investigación, se determinó el siguiente resultado (Ver Tabla 19).

Tabla 19. Tipos de suelos de los Proyectos de Investigación

TIPOS DE SUELOS DE LOS PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN			
CLASIFICACIÓN DE SUELOS AASHTO	CANTIDAD DE PI	CLASIFICACIÓN DE SUELOS SUCS	CANTIDAD DE PI
A-1-a	2	G, GP, GM, SW, SP, SM	-
A-1-b	-	GM, GP, SM, SP	2
A-2	3	GM, GC, SM, SC	3
A-3	-	SP	-
A-4	1	CL, ML	3
A-5	-	ML, MH, CH	1
A-6	2	CL, CH	-
A-7	4	OH, MH, CH	5
TOTAL	12	TOTAL	14

Fuente: Elaboración propia

Según el considerando previamente señalado, y de acuerdo a la información teórica referente a la Estabilización de suelos con cemento Portland, se determinó que, del total de Proyectos de Investigación consolidados, 9 Proyectos de Investigación presentan muestras de suelo ineficientes y, por consiguiente, requieren ser mejorados mediante la adición del agente estabilizador.

5.2 Resultados de la dosificación en porcentaje del cemento Portland

Los Proyectos de Investigación recopilados dispusieron información acerca de la calidad del material de subrasante y permitió verificar si los agregados fueron o no aptos para el tipo de obra a emplear.

Los resultados de los ensayos de laboratorio aplicados a las muestras de suelo natural extraídas de las vías de bajo volumen de tránsito, detallaron que los suelos naturales obtuvieron un valor soporte o resistencia del suelo, referido al 95% de la MDS y a una penetración de carga de 2.54 mm, en rangos de $1.30\% \leq \text{CBR} \leq 4.90\%$ para algunos tipos de suelos y, $14.02\% \leq \text{CBR} \leq 48.30\%$ para otros.

En ese sentido, considerando los requisitos mínimos que se deben cumplir para el diseño de los proyectos de carreteras y caminos, los suelos deben presentar un CBR

$\geq 6\%$; es decir, si los suelos no cumplen esta condición por tratarse de suelos pobres e inadecuados o de mala calidad, con $\text{CBR} < 6\%$; se considerará la estabilización, como una de las alternativas de solución para el mejoramiento de las propiedades de los suelos.

Según el considerando señalado, los tesisistas realizaron una estabilización química de suelos (suelo-cemento) para dotar a los mismos, de resistencia mecánica y permanencia en el tiempo. Las dosificaciones del cemento Portland para suelo-cemento utilizadas en función del tipo de suelo, variaron desde 1% como mínimo hasta 20% como máximo.

A continuación, en la Tabla 20 se presenta el resumen de las dosificaciones en porcentaje del cemento Portland y las características físico-mecánicas de las muestras de suelo mejoradas por la adición del agente estabilizador.

Tabla 20. Resumen de la dosificación en porcentaje del cemento Portland

continúa

DOSIFICACIÓN EN PORCENTAJE DEL CEMENTO PORTLAND												
DOSIFICACIÓN (%)	PI1				PI2				PI3			
	0%	10%	15%	20%	0%	1%	3%	5%	0%	2%	6%	8%
CARACTERÍSTICAS DE LOS SUELOS												
CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LOS SUELOS												
HUMEDAD NATURAL (%)	29.37	-	-	-	32.78	-	-	-	15.90	-	-	11.99
LÍMITE LÍQUIDO	66.10	-	-	-	73.00	71.00	66.00	63.00	32.30	-	-	24.79
LÍMITE PLÁSTICO	26.90	-	-	-	29.00	35.00	43.00	48.00	11.76	-	-	10.16
ÍNDICE DE PLASTICIDAD	39.20	-	-	-	44.00	36.00	23.00	15.00	20.54	-	-	14.63
CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS:												
CLASIFICACIÓN SUCS	CH	-	-	-	OH	-	-	-	CL	-	-	-
CLASIFICACIÓN AASHTO	A-7-6	-	-	-	A-7-6	-	-	-	-	-	-	-
CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DE LOS SUELOS												
PROCTOR MODIFICADO:												
MÁXIMA DENSIDAD SECA (gr/cm ³)	1.827	1.831	1.832	1.833	1.615	1.680	1.708	1.735	1.852	1.900	1.970	2.030
HUMEDAD ÓPTIMA (%)	14.30	14.60	15.00	15.20	18.90	17.90	17.04	16.40	11.29	10.00	-	-
CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR):												
CBR (100% MDS) (%)	3.30	130.80	116.70	153.60	1.44	4.45	7.70	15.70	-	-	-	-
CBR (95% MDS) (%)	2.60	105.40	108.00	138.70	1.30	3.50	6.63	13.75	14.02	16.72	17.50	19.63

Fuente: Elaboración propia

Tabla 20. Resumen de la dosificación en porcentaje del cemento Portland

continúa

DOSIFICACIÓN EN PORCENTAJE DEL CEMENTO PORTLAND											
DOSIFICACIÓN (%)	PI4		PI5				PI6		PI7		
	0%	3%	0%	4%	6%	8%	0%	2%	4%	0%	1%
CARACTERÍSTICAS DE LOS SUELOS											
CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LOS SUELOS											
HUMEDAD NATURAL (%)	10.93	5.28	32.78	-	-	-	5.77	-	-	12.51	-
LÍMITE LÍQUIDO	30.52	31.88	29.61	-	-	-	30.35	-	-	30.00	-
LÍMITE PLÁSTICO	14.61	N.P.	21.85	-	-	-	23.83	-	-	23.00	-
ÍNDICE DE PLASTICIDAD	15.92	N.P.	7.76	-	-	-	6.51	-	-	7.00	-
CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS:											
CLASIFICACIÓN SUCS	SC	SC	SC	-	-	-	SP-SC	-	-	ML	-
CLASIFICACIÓN AASHTO	A-6	A-2-6	A-2-4	-	-	-	A-2-4	-	-	A-4	-
CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DE LOS SUELOS											
PROCTOR MODIFICADO:											
MÁXIMA DENSIDAD SECA (gr/cm ³)	2.123	2.240	1.878	1.893	1.890	1.880	1.600	-	-	1.804	1.865
HUMEDAD ÓPTIMA (%)	8.40	5.40	12.44	11.97	12.86	12.59	6.66	-	-	16.50	15.60
CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR):											
CBR (100% MDS) (%)	70.70	80.00	44.44	213.51	224.29	276.24	-	-	-	7.20	71.80
CBR (95% MDS) (%)	30.80	51.00	22.60	138.00	148.00	258.00	2.13	29.07	50.37	4.90	20.70

Fuente: Elaboración propia

Tabla 20. Resumen de la dosificación en porcentaje del cemento Portland

continúa

DOSIFICACIÓN EN PORCENTAJE DEL CEMENTO PORTLAND															
DOSIFICACIÓN (%)	PI8					PI9			PI10		PI11		PI12		
	0%	10%	12%	14%	16%	0%	10%	0%	5%	0%	5%	0%	5%	10%	
CARACTERÍSTICAS DE LOS SUELOS															
CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LOS SUELOS															
HUMEDAD NATURAL (%)	23.44	-	-	-	-	6.24	-	2.80	-	6.10	-	79.48	-	-	
LÍMITE LÍQUIDO	59.79	50.32	49.74	47.70	44.57	46.00	-	24.70	-	22.00	-	86.00	88.60	85.00	
LÍMITE PLÁSTICO	30.23	39.43	40.28	39.42	38.40	24.94	-	18.40	-	18.40	-	66.67	71.63	70.48	
ÍNDICE DE PLASTICIDAD	29.56	10.89	9.47	8.28	6.17	21.06	-	6.30	-	3.60	-	19.33	16.97	14.52	
CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS:															
CLASIFICACIÓN SUCS	CH	MH	ML	ML	ML	OL	-	GC-GM	-	GP-GM	-	CH	-	-	
CLASIFICACIÓN AASHTO	A-7-5	A-7-5	A-5	A-5	A-5	A-7-6	-	A-1-a	-	A-1-a	-	-	-	-	
CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DE LOS SUELOS															
PROCTOR MODIFICADO:															
MÁXIMA DENSIDAD SECA (gr/cm ³)	1.764	1.730	1.724	1.737	1.720	1.300	1.400	2.170	2.180	2.292	2.303	1.483	1.1976	1.180	
HUMEDAD ÓPTIMA (%)	15.60	15.20	15.00	15.10	15.30	8.20	7.40	6.98	5.98	6.30	7.10	35.40	36.80	38.00	
CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR):															
CBR (100% MDS) (%)	6.96	27.56	40.29	47.03	50.32	27.55	63.10	36.50	73.00	65.10	153.50	-	-	-	
CBR (95% MDS) (%)	4.69	21.57	32.13	37.67	40.09	24.05	59.25	28.20	56.40	48.30	126.00	2.05	5.37	7.65	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 20. Resumen de la dosificación en porcentaje del cemento Portland

DOSIFICACIÓN EN PORCENTAJE DEL CEMENTO PORTLAND								
DOSIFICACIÓN (%)	PI13			PI14				
	0%	6%	7%	0%	2%	4%	6%	8%
CARACTERÍSTICAS DE LOS SUELOS								
CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LOS SUELOS								
HUMEDAD NATURAL (%)				33.46	-	-	-	-
LÍMITE LÍQUIDO	CL	-	-	38.00	31.08	31.39	30.40	32.34
LÍMITE PLÁSTICO	A-2-6 (2)	-	-	26.00	26.97	30.85	27.54	28.52
ÍNDICE DE PLASTICIDAD	10.47	-	-	12.00	4.11	0.54	2.86	3.82
CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS:								
CLASIFICACIÓN SUCS	20.09	20.22	23.37	ML	-	-	-	-
CLASIFICACIÓN AASHTO	11.51	10.95	9.03	A-6	-	-	-	-
CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DE LOS SUELOS								
PROCTOR MODIFICADO:								
MÁXIMA DENSIDAD SECA (gr/cm^3)	1.900	1.830	1.840	1.705	1.471	1.374	1.409	1.439
HUMEDAD ÓPTIMA (%)	13.32	13.40	13.48	16.73	18.60	18.20	18.60	19.00
CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR):								
CBR (100% MDS) (%)	-	-	-	-	-	-	-	-
CBR (95% MDS) (%)	27.00	72.00	98.80	3.00	22.00	26.50	33.50	39.00

Fuente: Elaboración propia

5.3 Resultados del espesor de reemplazo del material de subrasante

Una vez definidos y recopilados los valores soporte o resistencias del suelo (CBR de diseño), referidos al 95% de la MDS (Máxima Densidad Seca) y a una penetración de carga de 2.54 mm, se procedió a clasificar las categorías de subrasante por cada muestra de suelo de los Proyectos de Investigación (PI).

A continuación, en la Tabla 21 se presenta el resumen de las categorías de la subrasante determinadas a partir del estado de las muestras de suelo natural.

Tabla 21. Resumen de categorías de la subrasante

UBICACIÓN	PROYECTO DE INVESTIGACIÓN	CBR < 3% (INADECUADA)	3% ≤ CBR < 6% (INSUFICIENTE)	6% ≤ CBR < 10% (REGULAR)	10% ≤ CBR < 20% (BUENA)	20% ≤ CBR < 30% (MUY BUENA)	CBR ≥ 30% (EXCELENTE)
CAJAMARCA	PI2	1.30%					
COLOMBIA	PI13					27.00%	
ECUADOR	PI12	2.05%					
	PI14		3.00%				
GUAYAQUIL	PI3				14.02%		
HUANCAVELICA	PI4						30.80%
LIMA	PI7		4.90%				
	PI11						48.30%
LORETO	PI5					22.60%	
PASCO	PI1	2.60%					
TARAPOTO	PI8		4.69%				
TRUJILLO	PI6	2.13%					
	PI9					24.05%	
	PI10					28.20%	
TOTAL DE PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN							14
PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN CUYO SUELO NATURAL POSEE CBR ≥ 6%							7
PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN CUYO SUELO NATURAL POSEE CBR < 6%							7

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a los resultados anteriormente citados, se seleccionaron 7 Proyectos de Investigación, cuyos valores soporte o resistencias del suelo no cumplen con las condiciones mínimas para el diseño de proyectos viales.

En ese sentido, se determinó el espesor de material de subrasante a reemplazar, calculándose según lo siguiente:

- i. Inicialmente, se recabó la información de demanda volumétrica de tráfico vial facilitada en cada Proyecto de Investigación. El estudio de tráfico proporcionó la información del Índice Medio Diario Anual (IMDA) para los tramos de estudio.
- ii. En segundo lugar, se calculó el total de Ejes Equivalentes según el tipo de vehículo pesado circulante por día en el carril de diseño. Dicho valor resultó del IMD por cada tipo de vehículo pesado, por el Factor Carril de diseño, por el Factor Vehículo Pesado del tipo seleccionado y por el Factor de Presión de neumáticos.
- iii. En tercer lugar, se calculó el Factor de Crecimiento Acumulado (Fca) considerando la tasa anual de crecimiento (r) y el periodo de diseño (n) en años. La tasa anual de crecimiento del tránsito se determinó asociándola con la tasa anual del crecimiento de la economía expresada como el Producto Bruto Interno (PBI). Asimismo, el periodo de diseño empleado para la obtención de resultados fue de 10 años, por tratarse de caminos de bajo volumen de tránsito.

A continuación, en la Tabla 22 se presenta la variación porcentual del PBI anual.

Tabla 22. Variación porcentual del Producto Bruto Interno Anual

VARIACIÓN PORCENTUAL DEL ÍNDICE DE VOLUMEN FÍSICO (%)						
AÑO	PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN					
	PI1	PI2	PI6	PI7	PI8	PI12 - PI14
(2011-2020)	PASCO	CAJAMARCA	LA LIBERTAD	LIMA	SAN MARTÍN	ECUADOR
2011	-1.3	4.5	4.5	8.0	5.2	7.9
2012	5.1	6.4	7.7	6.8	11.9	5.6
2013	0.1	-1.6	4.4	5.5	1.6	4.9
2014	3.3	-2.1	1.5	3.9	7.1	3.8
2015	3.3	-0.5	2.3	3.2	5.7	0.1
2016	2.3	-2.0	0.9	2.9	2.2	-1.2
2017	0.1	3.0	1.7	2.0	6.4	2.4
2018	0.1	2.8	5.0	4.3	2.0	1.3
2019	2.0	2.4	3.7	3.0	0.4	0.0
2020	-18.3	-9.9	-6.2	-12.4	-3.4	-7.8
PROMEDIO	-0.3	0.3	2.6	2.7	3.9	1.7

Fuente: Instituto Nacional de Estadística e Informática (2021)

- iv. En cuarto lugar, se calculó el Número de Repeticiones de Ejes Equivalentes de 8.2 tn (Nrep de EE 8.2 tn). Dicho valor resultó de la sumatoria de Ejes Equivalentes de todos los tipos de vehículos pesados, por día para el carril de diseño, por Factor de Crecimiento Acumulado y por 365 días del año.
- v. En quinto lugar, se calculó el Módulo Resiliente (M_R) de la subrasante aplicado sobre el material de suelo natural y suelo estabilizado con cemento Portland.
- vi. En sexto lugar, se procedió a realizar el diseño de la estructura del pavimento, aplicando el método AASHTO 93. El propósito del desarrollo del modelo fue el cálculo del Número Estructural (SN) aplicado sobre el material de suelo natural y suelo estabilizado con cemento Portland.
- vii. Finalmente, se determinó el espesor de material a reemplazar aplicado solo en casos de subrasantes, cuyos valores soporte o resistencia del suelo sea $CBR < 6\%$. El procedimiento de cálculo del espesor de mejoramiento, involucró valores correspondientes de coeficiente estructural de subrasante mejorada (a_4) y coeficiente de drenaje (m_4).

A continuación, la Tabla 23 presenta valores recomendados de coeficientes estructurales de subrasantes mejoradas, los cuales dependen del tipo de mejoramiento a realizar, aplicados en casos de coeficientes de drenaje " m_4 " = 1.

Tabla 23. Coeficiente estructural de subrasante mejorada

DESCRIPCIÓN	a_4
PARA REEMPLAZAR SUBRASANTE MUY POBRE Y POBRE, POR UNA SUBRASANTE REGULAR CON CBR DE 6% - 10%	0.061/PULG
PARA REEMPLAZAR SUBRASANTE MUY POBRE Y POBRE, POR UNA SUBRASANTE BUENA CON CBR DE 10% - 20%	0.076/PULG
PARA REEMPLAZAR SUBRASANTE MUY POBRE Y POBRE, POR UNA SUBRASANTE REGULAR CON CBR MAYOR A 20%	0.094/PULG
PARA REEMPLAZAR SUBRASANTE MUY POBRE Y POBRE, POR UNA SUBRASANTE REGULAR, CON UNA ADICIÓN MÍNIMA DE 3% DE CAL EN PESO DE SUELO	0.089/PULG

Fuente: Guía de diseño AASHTO (1993)

Para el cálculo del espesor de reemplazo de material de subrasante de los 7 Proyectos de Investigación seleccionados, se realizó el procedimiento anteriormente mencionado. Los resultados obtenidos se describen a continuación:

Proyecto de Investigación PI1

La Tabla 24 presenta el resultado de demanda volumétrica de tráfico vial registrado.

Tabla 24. Demanda volumétrica de tráfico vial del PI1

DEMANDA VOLUMÉTRICA DE TRÁFICO VIAL		
TIPO DE VEHÍCULO	SÍMBOLO	IMDCORREGIDO
AUTOMÓVIL	1	16 veh/día
CAMIONETA	2	12 veh/día
BUS MEDIANO	B2	8 veh/día
CAMIÓN DE DOS EJES	C2	10 veh/día
CAMIÓN DE TRES EJES	C3	3 veh/día
TRACTOCAMIÓN DE DOS EJES	T2S1	8 veh/día
TOTAL ÍNDICE MEDIO DIARIO ANUAL (IMDA)		57 veh/día

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 25 presenta el resultado de Ejes Equivalentes por cada tipo de vehículo pesado.

Tabla 25. Ejes Equivalentes por cada tipo de vehículo pesado del PI1

EJES EQUIVALENTES POR CADA TIPO DE VEHÍCULO PESADO						
$EE_{\text{día-carril}} = IMD_{pi} \times F_d \times F_c \times F_{vp} \times F_p$						
TIPO DE VEHÍCULO	IMD	F _d	F _c	F _{vp}	F _p	EE _{día-carril}
AUTOMÓVIL	16	0.50	1.00	0.0001	1.00	0.001
CAMIONETA	12	0.50	1.00	1.1500	1.00	6.900
BUS MEDIANO	8	0.50	1.00	4.5037	1.00	18.015
CAMIÓN DE DOS EJES	10	0.50	1.00	4.5037	1.00	22.518
CAMIÓN DE TRES EJES	3	0.50	1.00	3.2846	1.00	4.927
TRACTOCAMIÓN DE DOS EJES	8	0.50	1.00	7.7419	1.00	30.968
TOTAL EE_{día-carril} =						83.328

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 26 presenta el resultado del Factor de Crecimiento Acumulado (Fca).

Tabla 26. Factor de crecimiento acumulado del PI1

FACTOR DE CRECIMIENTO ACUMULADO (Fca)	
$\text{Factor Fca} = ((1+r)^n - 1)/r$	
Donde:	Tasa anual de crecimiento (r) = -0.3 % Periodo de diseño (n) = 10 años
Reemplazando:	
Factor Fca = 9.85	

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 27 presenta el resultado del Número de Repeticiones de Ejes Equivalentes.

Tabla 27. Número de repeticiones de ejes equivalentes (Nrep de EE 8.2 tn) del PI1

NÚMERO DE REPETICIONES DE EJES EQUIVALENTES (Nrep de EE 8.2 tn)				
Nrep de EE 8.2 tn = Σ (EE_{día-carril} x Fca x 365)				
TIPO DE VEHÍCULO	EE_{día-carril}	Fca	Año (días)	Nrep de EE
AUTOMÓVIL	0.001	9.85	365	2.88
CAMIONETA	6.900	9.85	365	24,814.27
BUS MEDIANO	18.015	9.85	365	64,785.45
CAMIÓN DE DOS EJES	22.518	9.85	365	80,981.81
CAMIÓN DE TRES EJES	4.927	9.85	365	17,718.36
TRACTOCAMIÓN DE DOS EJES	30.968	9.85	365	111,368.49
TOTAL Nrep de EE 8.2 tn =				299,671.27

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 28 presenta el resultado del Módulo Resiliente (M_R) de la subrasante aplicado sobre: i) material de suelo natural y ii) material de suelo natural con adición de cemento Portland.

Tabla 28. Módulo resiliente de la subrasante del PI1

MÓDULO RESILIENTE DE LA SUBRASANTE		
M_R (psi) = $2555 \times CBR^{0.64}$		
	SUELO NATURAL	SUELO ESTABILIZADO
$CBR_{\text{subrasante}}$	2.60	105.40
MÓDULO RESILIENTE (M_R)	4,709.49	50,351.09

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 29 presenta las variables consideradas en el diseño de la estructura del pavimento aplicado sobre una subrasante de material de suelo natural.

Tabla 29. Variables de diseño de la estructura del pavimento sin adición de cemento Portland del PI1

DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DE UN PAVIMENTO - MÉTODO AASHTO 93		
REQUISITOS DE DISEÑO DEL PAVIMENTO SIN ADICIÓN DE AGENTE ESTABILIZANTE		
Variables:	PERIODO DE DISEÑO	10 años
	NÚMERO DE EJES EQUIVALENTES (W18)	299,671.27
	MÓDULO RESILIENTE (M _R)	4,709.49 psi
	NIVEL DE CONFIABILIDAD (R)	70 %
	DESVIACIÓN ESTÁNDAR NORMAL (Z _r)	-0.524
	DESVIACIÓN ESTÁNDAR COMBINADA (S _o)	0.45
	ÍNDICE DE SERVICIABILIDAD INICIAL (P _i)	3.80
	ÍNDICE DE SERVICIABILIDAD FINAL (P _t)	2.00
	DIFERENCIA DE SERVICIABILIDAD (ΔPSI)	1.80
Reemplazando:	NÚMERO ESTRUCTURAL (S_{Ne})	2.97

Fuente: Elaboración propia

La Figura 8 presenta el resultado del Número Estructural (S_{Ne}) aplicado sobre subrasante de material de suelo natural.

The screenshot shows the 'Ecuación AASHTO 93' software interface. It is configured for a flexible pavement design. The 'Tipo de Pavimento' section has 'Pavimento flexible' selected. The 'Confianza (R) y Desviación estándar (S_o)' section shows R = 70% and S_o = 0.45. The 'Serviciabilidad inicial y final' section shows PSI inicial = 3.8 and PSI final = 2. The 'Módulo resiliente de la subrasante' section shows M_r = 4709.49 psi. The 'Tipo de Análisis' section has 'Calcular SN' selected, resulting in W18 = 299671.27 and SN = 2.97. The 'Número Estructural' section displays the final result SN = 2.97. Buttons for 'Calcular' and 'Salir' are visible at the bottom.

Figura 8: Número estructural (S_{Ne}) de la subrasante de material de suelo natural del PI1
Fuente: Ecuación de diseño AASHTO (1993)

La Tabla 30 presenta las variables consideradas en el diseño de la estructura del pavimento aplicado sobre subrasante de material de suelo natural con adición de cemento Portland.

Tabla 30. Variables de diseño de la estructura del pavimento con adición de cemento Portland del PI1

REQUISITOS DE DISEÑO DEL PAVIMENTO CON ADICIÓN DE AGENTE ESTABILIZANTE		
Variables:	PERIODO DE DISEÑO	10 años
	NÚMERO DE EJES EQUIVALENTES (W18)	299,671.27
	MÓDULO RESILIENTE (M _R)	50,351.09 psi
	NIVEL DE CONFIABILIDAD (R)	70 %
	DESVIACIÓN ESTÁNDAR NORMAL (Z _r)	-0.524
	DESVIACIÓN ESTÁNDAR COMBINADA (S _o)	0.45
	ÍNDICE DE SERVICIABILIDAD INICIAL (P _i)	3.80
	ÍNDICE DE SERVICIABILIDAD FINAL (P _t)	2.00
	DIFERENCIA DE SERVICIABILIDAD (ΔPSI)	1.80
Reemplazando:	NÚMERO ESTRUCTURAL (SN_m)	1.14

Fuente: Elaboración propia

La Figura 9 presenta el resultado del Número Estructural (SN_m) aplicado sobre subrasante de material de suelo natural con adición de cemento Portland.

Figura 9: Número estructural (SN_m) de la subrasante de material de suelo estabilizado del PI1

Fuente: Ecuación de diseño AASHTO (1993)

La Tabla 31 presenta el resultado del espesor de reemplazo del material de subrasante.

Tabla 31. Espesor de reemplazo del material de subrasante del PI1

ESPESOR DE REEMPLAZO DEL MATERIAL DE SUBRASANTE	
$E = (S_{ne} - S_{Nm}) / (a_i \times m_i)$	
Donde:	$S_{Ne} = 2.97$
	$S_{Nm} = 1.14$
	$a_i = 0.094$
	$m_i = 1.000$
Reemplazando:	
	E (pulg) = 19.47
	E (cm) = 49.45
	E (cm) = 50.00

Fuente: Elaboración propia

Proyecto de Investigación PI2

La Tabla 32 presenta el resultado de demanda volumétrica de tráfico vial registrado.

Tabla 32. Demanda volumétrica de tráfico vial del PI2

DEMANDA VOLUMÉTRICA DE TRÁFICO VIAL		
TIPO DE VEHÍCULO	SÍMBOLO	IMD_{CORREGIDO}
AUTOMÓVIL	1	21 veh/día
CAMIONETA	2	9 veh/día
BUS MEDIANO	B2	9 veh/día
BUS GRANDE	B3-1	6 veh/día
CAMIÓN DE DOS EJES	C2	13 veh/día
CAMIÓN DE TRES EJES	C3	6 veh/día
TRACTOCAMIÓN DE DOS EJES	T2S1	2 veh/día
TOTAL ÍNDICE MEDIO DIARIO ANUAL (IMDA)		66 veh/día

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 33 presenta el resultado de Ejes Equivalentes por cada tipo de vehículo pesado.

Tabla 33. Ejes Equivalentes por cada tipo de vehículo pesado del PI2

EJES EQUIVALENTES POR CADA TIPO DE VEHÍCULO PESADO						
$EE_{\text{día-carril}} = \text{IMD}_{\text{pi}} \times F_d \times F_c \times F_{\text{vpi}} \times F_{\text{pi}}$						
TIPO DE VEHÍCULO	IMD	F_d	F_c	F_{vpi}	F_{pi}	EE_{día-carril}
AUTOMÓVIL	21	0.50	1.00	0.0001	1.00	0.001
CAMIONETA	9	0.50	1.00	1.1500	1.00	5.175
BUS MEDIANO	9	0.50	1.00	4.5037	1.00	20.266
BUS GRANDE	6	0.50	1.00	2.6313	1.00	7.894
CAMIÓN DE DOS EJES	13	0.50	1.00	4.5037	1.00	29.274
CAMIÓN DE TRES EJES	6	0.50	1.00	3.2846	1.00	9.854
TRACTOCAMIÓN DE DOS EJES	2	0.50	1.00	7.7419	1.00	7.742
TOTAL EE_{día-carril} =						80.206

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 34 presenta el resultado del Factor de Crecimiento Acumulado (Fca).

Tabla 34. Factor de crecimiento acumulado del PI2

FACTOR DE CRECIMIENTO ACUMULADO (Fca)	
Factor Fca = $((1+r)^n - 1) / r$	
Donde:	Tasa anual de crecimiento (r) = 0.3 % Periodo de diseño (n) = 10 años
Reemplazando:	
Factor Fca = 10.14	

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 35 presenta el resultado del Número de Repeticiones de Ejes Equivalentes.

Tabla 35. Número de repeticiones de ejes equivalentes (Nrep de EE 8.2 tn) del PI2

NÚMERO DE REPETICIONES DE EJES EQUIVALENTES (Nrep de EE 8.2 tn)				
$N_{\text{rep de EE 8.2 tn}} = \Sigma (EE_{\text{día-carril}} \times F_{\text{ca}} \times 365)$				
TIPO DE VEHÍCULO	EE_{día-carril}	F_{ca}	Año (días)	Nrep de EE
AUTOMÓVIL	0.001	10.14	365	3.88
CAMIONETA	5.175	10.14	365	19,145.80
BUS MEDIANO	20.266	10.14	365	74,979.17
BUS GRANDE	7.894	10.14	365	29,204.96
CAMIÓN DE DOS EJES	29.274	10.14	365	108,303.25
CAMIÓN DE TRES EJES	9.854	10.14	365	36,455.60
TRACTOCAMIÓN DE DOS EJES	7.742	10.14	365	28,642.64
TOTAL Nrep de EE 8.2 tn =				296,735.30

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 36 presenta el resultado del Módulo Resiliente (M_R) de la subrasante aplicado sobre: i) material de suelo natural y ii) material de suelo natural con adición de cemento Portland.

Tabla 36. Módulo resiliente de la subrasante del PI2

MÓDULO RESILIENTE DE LA SUBRASANTE		
M_R (psi) = 2555 x CBR^{0.64}		
	SUELO NATURAL	SUELO ESTABILIZADO
CBR _{subrasante}	1.30	13.75
MÓDULO RESILIENTE (M_R)	3,022.14	13,674.29

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 37 presenta las variables consideradas en el diseño de la estructura del pavimento aplicado sobre una subrasante de material de suelo natural.

Tabla 37. Variables de diseño de la estructura del pavimento sin adición de cemento Portland del PI2

DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DE UN PAVIMENTO - MÉTODO AASHTO 93		
REQUISITOS DE DISEÑO DEL PAVIMENTO SIN ADICIÓN DE AGENTE ESTABILIZANTE		
Variables:	PERIODO DE DISEÑO	10 años
	NÚMERO DE EJES EQUIVALENTES (W18)	296,735.30
	MÓDULO RESILIENTE (M_R)	3,022.14 psi
	NIVEL DE CONFIABILIDAD (R)	70 %
	DESVIACIÓN ESTÁNDAR NORMAL (Z_r)	-0.524
	DESVIACIÓN ESTÁNDAR COMBINADA (S_o)	0.45
	ÍNDICE DE SERVICIABILIDAD INICIAL (Pi)	3.80
	ÍNDICE DE SERVICIABILIDAD FINAL (Pt)	2.00
	DIFERENCIA DE SERVICIABILIDAD (Δ PSI)	1.80
Reemplazando:		
	NÚMERO ESTRUCTURAL (SNe)	3.50

Fuente: Elaboración propia

La Figura 10 presenta el resultado del Número Estructural (SNe) aplicado sobre subrasante de material de suelo natural.

Ecuación AASHTO 93

Tipo de Pavimento
 Pavimento flexible Pavimento rígido

Confiabilidad (R) y Desviación estándar (So)
 70 % $Z_r = -0.524$ So 0.45

Serviciabilidad inicial y final
 PSI inicial 3.8 PSI final 2

Módulo resiliente de la subrasante
 Mr 3022.14 psi

Información adicional para pavimentos rígidos

Módulo de elasticidad del concreto - E_c (psi) Coeficiente de transmisión de carga - (J)
 Módulo de rotura del concreto - S_c (psi) Coeficiente de drenaje - (Cd)

Tipo de Análisis
 Calcular SN **W18 = 296735.30**
 Calcular W18

Número Estructural
SN = 3.50

Calcular Salir

Figura 10: Número estructural (SNe) de la subrasante de material de suelo natural del PI2

Fuente: Ecuación de diseño AASHTO (1993)

La Tabla 38 presenta las variables consideradas en el diseño de la estructura del pavimento aplicado sobre subrasante de material de suelo natural con adición de cemento Portland.

Tabla 38. Variables de diseño de la estructura del pavimento con adición de cemento Portland del PI2

REQUISITOS DE DISEÑO DEL PAVIMENTO CON ADICIÓN DE AGENTE ESTABILIZANTE		
VARIABLES:	PERIODO DE DISEÑO	10 años
	NÚMERO DE EJES EQUIVALENTES (W18)	296,735.30
	MÓDULO RESILIENTE (M_R)	13,674.29 psi
	NIVEL DE CONFIABILIDAD (R)	70 %
	DESVIACIÓN ESTÁNDAR NORMAL (Z_r)	-0.524
	DESVIACIÓN ESTÁNDAR COMBINADA (S_o)	0.45
	ÍNDICE DE SERVICIABILIDAD INICIAL (P_i)	3.80
	ÍNDICE DE SERVICIABILIDAD FINAL (P_t)	2.00
	DIFERENCIA DE SERVICIABILIDAD (ΔPSI)	1.80
Reemplazando:		
	NÚMERO ESTRUCTURAL (SNm)	1.97

Fuente: Elaboración propia

La Figura 11 presenta el resultado del Número Estructural (SNm) aplicado sobre subrasante de material de suelo natural con adición de cemento Portland.

Figura 11: Número estructural (SNm) de la subrasante de material de suelo estabilizado del PI2

Fuente: Ecuación de diseño AASHTO (1993)

La Tabla 39 presenta el resultado del espesor de reemplazo del material de subrasante.

Tabla 39. Espesor de reemplazo del material de subrasante del PI2

ESPESOR DE REEMPLAZO DEL MATERIAL DE SUBRASANTE	
$E = (S_{ne} - SN_m) / (a_i \times m_i)$	
Donde:	$S_{ne} = 3.5$
	$SN_m = 1.97$
	$a_i = 0.076$
	$m_i = 1.000$
Reemplazando:	
	E (pulg) = 20.13157895
	E (cm) = 51.13421053
	E (cm) = 55.00

Fuente: Elaboración propia

Proyecto de Investigación PI6

La Tabla 40 presenta el resultado de demanda volumétrica de tráfico vial registrado.

Tabla 40. Demanda volumétrica de tráfico vial del PI6

DEMANDA VOLUMÉTRICA DE TRÁFICO VIAL		
TIPO DE VEHÍCULO	SÍMBOLO	IMDCORREGIDO
AUTOMÓVIL	1	3 veh/día
CAMIONETA	2	6 veh/día
MINIBUS	3	4 veh/día
CAMIÓN DE DOS EJES	C2	11 veh/día
CAMIÓN DE TRES EJES	C3	9 veh/día
TRACTOCAMIÓN DE DOS EJES	T2S1	6 veh/día
TOTAL ÍNDICE MEDIO DIARIO ANUAL (IMDA)		39 veh/día

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 41 presenta el resultado de Ejes Equivalentes por cada tipo de vehículo pesado.

Tabla 41. Ejes Equivalentes por cada tipo de vehículo pesado del PI6

EJES EQUIVALENTES POR CADA TIPO DE VEHÍCULO PESADO						
$EE_{\text{día-carril}} = IMD_{pi} \times F_d \times F_c \times F_{vp} \times F_p$						
TIPO DE VEHÍCULO	IMD	Fd	Fc	Fvp	Fp	EE _{día-carril}
AUTOMÓVIL	3	0.50	1.00	0.0001	1.00	0.000
CAMIONETA	6	0.50	1.00	1.1500	1.00	3.450
MINIBUS	4	0.50	1.00	1.8500	1.00	3.700
CAMIÓN DE DOS EJES	11	0.50	1.00	4.5037	1.00	24.770
CAMIÓN DE TRES EJES	9	0.50	1.00	3.2846	1.00	14.781
TRACTOCAMIÓN DE DOS EJES	6	0.50	1.00	7.7419	1.00	23.226
TOTAL EE_{día-carril} =						69.927

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 42 presenta el resultado del Factor de Crecimiento Acumulado (Fca).

Tabla 42. Factor de crecimiento acumulado del PI6

FACTOR DE CRECIMIENTO ACUMULADO (Fca)	
$\text{Factor Fca} = ((1+r)^n - 1)/r$	
Donde:	Tasa anual de crecimiento (r) = 2.6 % Periodo de diseño (n) = 10 años
Reemplazando:	
Factor Fca = 11.23	

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 43 presenta el resultado del Número de Repeticiones de Ejes Equivalentes.

Tabla 43. Número de repeticiones de ejes equivalentes (Nrep de EE 8.2 tn) del PI6

NÚMERO DE REPETICIONES DE EJES EQUIVALENTES (Nrep de EE 8.2 tn)				
Nrep de EE 8.2 tn = Σ (EE_{día-carril} x Fca x 365)				
TIPO DE VEHÍCULO	EE_{día-carril}	Fca	Año (días)	Nrep de EE
AUTOMÓVIL	0.000	11.23	365	0.61
CAMIONETA	3.450	11.23	365	14,140.27
MINIBUS	3.700	11.23	365	15,164.93
CAMIÓN DE DOS EJES	24.770	11.23	365	101,523.43
CAMIÓN DE TRES EJES	14.781	11.23	365	60,580.24
TRACTOCAMIÓN DE DOS EJES	23.226	11.23	365	95,194.03
TOTAL Nrep de EE 8.2 tn =				286,603.52

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 44 presenta el resultado del Módulo Resiliente (M_R) de la subrasante aplicado sobre: i) material de suelo natural y ii) material de suelo natural con adición de cemento Portland.

Tabla 44. Módulo resiliente de la subrasante del PI6

MÓDULO RESILIENTE DE LA SUBRASANTE		
M_R (psi) = 2555 x CBR^{0.64}		
	SUELO NATURAL	SUELO ESTABILIZADO
CBR _{subrasante}	2.13	29.07
MÓDULO RESILIENTE (M_R)	4,145.28	22,079.83

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 45 presenta las variables consideradas en el diseño de la estructura del pavimento aplicado sobre una subrasante de material de suelo natural.

Tabla 45. Variables de diseño de la estructura del pavimento sin adición de cemento Portland del PI6

DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DE UN PAVIMENTO - MÉTODO AASHTO 93		
REQUISITOS DE DISEÑO DEL PAVIMENTO SIN ADICIÓN DE AGENTE ESTABILIZANTE		
VARIABLES:	PERIODO DE DISEÑO	10 años
	NÚMERO DE EJES EQUIVALENTES (W18)	286,603.52
	MÓDULO RESILIENTE (M _R)	4,145.28 psi
	NIVEL DE CONFIABILIDAD (R)	70 %
	DESVIACIÓN ESTÁNDAR NORMAL (Z _r)	-0.524
	DESVIACIÓN ESTÁNDAR COMBINADA (S _o)	0.45
	ÍNDICE DE SERVICIABILIDAD INICIAL (P _i)	3.80
	ÍNDICE DE SERVICIABILIDAD FINAL (P _t)	2.00
	DIFERENCIA DE SERVICIABILIDAD (ΔPSI)	1.80
Reemplazando:		
	NÚMERO ESTRUCTURAL (S_{Ne})	3.10

Fuente: Elaboración propia

La Figura 12 presenta el resultado del Número Estructural (S_{Ne}) aplicado sobre subrasante de material de suelo natural.

Figura 12: Número estructural (S_{Ne}) de la subrasante de material de suelo natural del PI6

Fuente: Ecuación de diseño AASHTO 93

La Tabla 46 presenta las variables consideradas en el diseño de la estructura del pavimento aplicado sobre subrasante de material de suelo natural con adición de cemento Portland.

Tabla 46. Variables de diseño de la estructura del pavimento con adición de cemento Portland del PI6

REQUISITOS DE DISEÑO DEL PAVIMENTO CON ADICIÓN DE AGENTE ESTABILIZANTE		
Variables:	PERIODO DE DISEÑO	10 años
	NÚMERO DE EJES EQUIVALENTES (W18)	286,603.52
	MÓDULO RESILIENTE (M _R)	22,079.83 psi
	NIVEL DE CONFIABILIDAD (R)	70 %
	DESVIACIÓN ESTÁNDAR NORMAL (Z _r)	-0.524
	DESVIACIÓN ESTÁNDAR COMBINADA (S _o)	0.45
	ÍNDICE DE SERVICIABILIDAD INICIAL (P _i)	3.80
	ÍNDICE DE SERVICIABILIDAD FINAL (P _t)	2.00
	DIFERENCIA DE SERVICIABILIDAD (ΔPSI)	1.80
Reemplazando:		
	NÚMERO ESTRUCTURAL (SN_m)	1.62

Fuente: Elaboración propia

La Figura 13 presenta el resultado del Número Estructural (SN_m) aplicado sobre subrasante de material de suelo natural con adición de cemento Portland.

Figura 13: Número estructural (SN_m) de la subrasante de material de suelo estabilizado del PI6

Fuente: Ecuación de diseño AASHTO (1993)

La Tabla 47 presenta el resultado del espesor de reemplazo del material de subrasante.

Tabla 47. Espesor de reemplazo del material de subrasante del PI6

ESPESOR DE REEMPLAZO DEL MATERIAL DE SUBRASANTE	
$E = (S_{ne} - S_{Nm}) / (a_i \times m_i)$	
Donde:	$S_{Ne} = 3.1$
	$S_{Nm} = 1.62$
	$a_i = 0.094$
	$m_i = 1.000$
Reemplazando:	
	E (pulg) = 15.74468085
	E (cm) = 39.99148936
	E (cm) = 40.00

Fuente: Elaboración propia

Proyecto de Investigación PI7

La Tabla 48 presenta el resultado de demanda volumétrica de tráfico vial registrado.

Tabla 48. Demanda volumétrica de tráfico vial del PI7

DEMANDA VOLUMÉTRICA DE TRÁFICO VIAL		
TIPO DE VEHÍCULO	SÍMBOLO	IMD_{CORREGIDO}
AUTOMÓVIL	1	27 veh/día
CAMIONETA	2	19 veh/día
MINIBUS	3	13 veh/día
BUS MEDIANO	B2	9 veh/día
BUS GRANDE	B3-1	7 veh/día
CAMIÓN DE DOS EJES	C2	3 veh/día
CAMIÓN DE TRES EJES	C3	3 veh/día
TRACTOCAMIÓN DE DOS EJES	T2S1	2 veh/día
TOTAL ÍNDICE MEDIO DIARIO ANUAL (IMDA)		83 veh/día

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 49 presenta el resultado de Ejes Equivalentes por cada tipo de vehículo pesado.

Tabla 49. Ejes Equivalentes por cada tipo de vehículo pesado del PI7

EJES EQUIVALENTES POR CADA TIPO DE VEHÍCULO PESADO						
$EE_{\text{día-carril}} = \text{IMD}_{\text{pi}} \times F_d \times F_c \times F_{\text{vpi}} \times F_{\text{pi}}$						
TIPO DE VEHÍCULO	IMD	F_d	F_c	F_{vpi}	F_{pi}	EE_{día-carril}
AUTOMÓVIL	27	0.50	1.00	0.0001	1.00	0.001
CAMIONETA	19	0.50	1.00	1.1500	1.00	10.925
MINIBUS	13	0.50	1.00	1.8500	1.00	12.025
BUS MEDIANO	9	0.50	1.00	4.5037	1.00	20.266
BUS GRANDE	7	0.50	1.00	2.6313	1.00	9.210
CAMIÓN DE DOS EJES	3	0.50	1.00	4.5037	1.00	6.755
CAMIÓN DE TRES EJES	3	0.50	1.00	3.2846	1.00	4.927
TRACTOCAMIÓN DE DOS EJES	2	0.50	1.00	7.7419	1.00	7.742
TOTAL EE_{día-carril} =						71.852

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 50 presenta el resultado del Factor de Crecimiento Acumulado (Fca)

Tabla 50. Factor de crecimiento acumulado del PI7

FACTOR DE CRECIMIENTO ACUMULADO (Fca)	
Factor Fca = $((1+r)^n - 1) / r$	
Donde:	Tasa anual de crecimiento (r) = 2.7 % Periodo de diseño (n) = 10 años
Reemplazando:	Factor Fca = 11.32

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 51 presenta el resultado del Número de Repeticiones de Ejes Equivalentes.

Tabla 51. Número de repeticiones de ejes equivalentes (Nrep de EE 8.2 tn) del PI7

NÚMERO DE REPETICIONES DE EJES EQUIVALENTES (Nrep de EE 8.2 tn)				
$N_{\text{rep de EE 8.2 tn}} = \sum (EE_{\text{día-carril}} \times F_{\text{ca}} \times 365)$				
TIPO DE VEHÍCULO	EE_{día-carril}	F_{ca}	Año (días)	Nrep de EE
AUTOMÓVIL	0.001	11.32	365	5.58
CAMIONETA	10.925	11.32	365	45,128.54
MINIBUS	12.025	11.32	365	49,672.38
BUS MEDIANO	20.266	11.32	365	83,715.79
BUS GRANDE	9.210	11.32	365	38,042.59
CAMIÓN DE DOS EJES	6.755	11.32	365	27,905.26
CAMIÓN DE TRES EJES	4.927	11.32	365	20,351.71
TRACTOCAMIÓN DE DOS EJES	7.742	11.32	365	31,980.09
TOTAL Nrep de EE 8.2 tn =				296,801.94

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 52 presenta el resultado del Módulo Resiliente (M_R) de la subrasante aplicado sobre: i) material de suelo natural y ii) material de suelo natural con adición de cemento Portland.

Tabla 52. Módulo resiliente de la subrasante del PI7

MÓDULO RESILIENTE DE LA SUBRASANTE		
M_R (psi) = 2555 x CBR^{0.64}		
	SUELO NATURAL	SUELO ESTABILIZADO
CBR _{subrasante}	4.90	20.70
MÓDULO RESILIENTE (M_R)	7,065.07	17,766.91

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 53 presenta las variables consideradas en el diseño de la estructura del pavimento aplicado sobre una subrasante de material de suelo natural.

Tabla 53. Variables de diseño de la estructura del pavimento sin adición de cemento Portland del PI7

DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DE UN PAVIMENTO - MÉTODO AASHTO 93		
REQUISITOS DE DISEÑO DEL PAVIMENTO SIN ADICIÓN DE AGENTE ESTABILIZANTE		
Variables:	PERIODO DE DISEÑO	10 años
	NÚMERO DE EJES EQUIVALENTES (W18)	296,801.94
	MÓDULO RESILIENTE (M_R)	7,065.07 psi
	NIVEL DE CONFIABILIDAD (R)	70 %
	DESVIACIÓN ESTÁNDAR NORMAL (Z_r)	-0.524
	DESVIACIÓN ESTÁNDAR COMBINADA (S_o)	0.45
	ÍNDICE DE SERVICIABILIDAD INICIAL (Pi)	3.80
	ÍNDICE DE SERVICIABILIDAD FINAL (Pt)	2.00
	DIFERENCIA DE SERVICIABILIDAD (Δ PSI)	1.80
Reemplazando:		
	NÚMERO ESTRUCTURAL (SNe)	2.55

Fuente: Elaboración propia

La Figura 14 presenta el resultado del Número Estructural (SNe) aplicado sobre subrasante de material de suelo natural.

Figura 14: Número estructural (SNe) de la subrasante de material de suelo natural del PI7

Fuente: Ecuación de diseño AASHTO (1993)

La Tabla 54 presenta las variables consideradas en el diseño de la estructura del pavimento aplicado sobre subrasante de material de suelo natural con adición de cemento Portland.

Tabla 54. Variables de diseño de la estructura del pavimento con adición de cemento Portland del PI7

REQUISITOS DE DISEÑO DEL PAVIMENTO CON ADICIÓN DE AGENTE ESTABILIZANTE		
VARIABLES:	PERIODO DE DISEÑO	10 años
	NÚMERO DE EJES EQUIVALENTES (W18)	296,801.94
	MÓDULO RESILIENTE (M _R)	17,766.91 psi
	NIVEL DE CONFIABILIDAD (R)	70 %
	DESVIACIÓN ESTÁNDAR NORMAL (Z _r)	-0.524
	DESVIACIÓN ESTÁNDAR COMBINADA (S _o)	0.45
	ÍNDICE DE SERVICIABILIDAD INICIAL (P _i)	3.80
	ÍNDICE DE SERVICIABILIDAD FINAL (P _t)	2.00
	DIFERENCIA DE SERVICIABILIDAD (ΔPSI)	1.80
Reemplazando:		
	NÚMERO ESTRUCTURAL (SN_m)	1.78

Fuente: Elaboración propia

La Figura 15 presenta el resultado del Número Estructural (SNm) aplicado sobre subrasante de material de suelo natural con adición de cemento Portland.

Figura 15: Número estructural (SNm) de la subrasante de material de suelo estabilizado del PI7

Fuente: Ecuación de diseño AASHTO (1993)

La Tabla 55 presenta el resultado del espesor de reemplazo del material de subrasante.

Tabla 55. Espesor de reemplazo del material de subrasante del PI7

ESPESOR DE REEMPLAZO DEL MATERIAL DE SUBRASANTE	
$E = (S_{ne} - SN_m) / (a_i \times m_i)$	
Donde:	$S_{ne} = 2.55$
	$SN_m = 1.78$
	$a_i = 0.094$
	$m_i = 1.000$
Reemplazando:	
	E (pulg) = 8.191489362
	E (cm) = 20.80638298
	E (cm) = 25.00

Fuente: Elaboración propia

Proyecto de Investigación 8

La Tabla 56 presenta el resultado de demanda volumétrica de tráfico vial registrado.

Tabla 56. Demanda volumétrica de tráfico vial del PI8

DEMANDA VOLUMÉTRICA DE TRÁFICO VIAL		
TIPO DE VEHÍCULO	SÍMBOLO	IMDCORREGIDO
AUTOMÓVIL	1	6 veh/día
CAMIONETA	2	5 veh/día
MINIBUS	3	7 veh/día
BUS MEDIANO	B2	3 veh/día
BUS GRANDE	B3-1	3 veh/día
CAMIÓN DE DOS EJES	C2	3 veh/día
CAMIÓN DE TRES EJES	C3	2 veh/día
TRACTOCAMIÓN DE DOS EJES	T2S1	1 veh/día
TOTAL ÍNDICE MEDIO DIARIO ANUAL (IMDA)		30 veh/día

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 57 presenta el resultado de Ejes Equivalentes por cada tipo de vehículo pesado.

Tabla 57. Ejes Equivalentes por cada tipo de vehículo pesado del PI8

EJES EQUIVALENTES POR CADA TIPO DE VEHÍCULO PESADO						
$EE_{\text{día-carril}} = IMD_{pi} \times F_d \times F_c \times F_{vp} \times F_p$						
TIPO DE VEHÍCULO	IMD	F _d	F _c	F _{vp}	F _p	EE _{día-carril}
AUTOMÓVIL	6	0.50	1.00	0.0001	1.00	0.000
CAMIONETA	5	0.50	1.00	1.1500	1.00	2.875
MINIBUS	7	0.50	1.00	1.8500	1.00	6.475
BUS MEDIANO	3	0.50	1.00	4.5037	1.00	6.755
BUS GRANDE	3	0.50	1.00	2.6313	1.00	3.947
CAMIÓN DE DOS EJES	3	0.50	1.00	4.5037	1.00	6.755
CAMIÓN DE TRES EJES	2	0.50	1.00	3.2846	1.00	3.285
TRACTOCAMIÓN DE DOS EJES	1	0.50	1.00	7.7419	1.00	3.871
TOTAL EE_{día-carril} =						33.964

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 58 presenta el resultado del Factor de Crecimiento Acumulado (Fca).

Tabla 58. Factor de crecimiento acumulado del PI8

FACTOR DE CRECIMIENTO ACUMULADO (Fca)	
Factor Fca = $((1+r)^n - 1)/r$	
Donde:	Tasa anual de crecimiento (r) = 3.9 % Periodo de diseño (n) = 10 años
Reemplazando:	
Factor Fca = 11.96	

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 59 presenta el resultado del Número de Repeticiones de Ejes Equivalentes.

Tabla 59. Número de repeticiones de ejes equivalentes (Nrep de EE 8.2 tn) del PI8

NÚMERO DE REPETICIONES DE EJES EQUIVALENTES (Nrep de EE 8.2 tn)				
Nrep de EE 8.2 tn = $\Sigma (EE_{\text{día-carril}} \times Fca \times 365)$				
TIPO DE VEHÍCULO	EE_{día-carril}	Fca	Año (días)	Nrep de EE
AUTOMÓVIL	0.000	11.96	365	1.31
CAMIONETA	2.875	11.96	365	12,546.45
MINIBUS	6.475	11.96	365	28,256.79
BUS MEDIANO	6.755	11.96	365	29,480.80
BUS GRANDE	3.947	11.96	365	17,224.50
CAMIÓN DE DOS EJES	6.755	11.96	365	29,480.80
CAMIÓN DE TRES EJES	3.285	11.96	365	14,333.85
TRACTOCAMIÓN DE DOS EJES	3.871	11.96	365	16,892.85
TOTAL Nrep de EE 8.2 tn =				148,217.37

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 60 presenta el resultado del Módulo Resiliente (M_R) de la subrasante aplicado sobre: i) material de suelo natural y ii) material de suelo natural con adición de cemento Portland.

Tabla 60. Módulo resiliente de la subrasante del PI8

MÓDULO RESILIENTE DE LA SUBRASANTE		
$M_R (\text{psi}) = 2555 \times CBR^{0.64}$		
	SUELO NATURAL	SUELO ESTABILIZADO
CBR _{subrasante}	4.69	32.13
MÓDULO RESILIENTE (M_R)	6,869.76	23,540.40

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 61 presenta las variables consideradas en el diseño de la estructura del pavimento aplicado sobre una subrasante de material de suelo natural.

Tabla 61. Variables de diseño de la estructura del pavimento sin adición de cemento Portland del PI8

DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DE UN PAVIMENTO - MÉTODO AASHTO 93		
REQUISITOS DE DISEÑO DEL PAVIMENTO SIN ADICIÓN DE AGENTE ESTABILIZANTE		
Variables:	PERIODO DE DISEÑO	10 años
	NÚMERO DE EJES EQUIVALENTES (W18)	148,217.37
	MÓDULO RESILIENTE (M _R)	6,869.76 psi
	NIVEL DE CONFIABILIDAD (R)	65 %
	DESVIACIÓN ESTÁNDAR NORMAL (Z _r)	-0.385
	DESVIACIÓN ESTÁNDAR COMBINADA (S _o)	0.45
	ÍNDICE DE SERVICIABILIDAD INICIAL (P _i)	3.80
	ÍNDICE DE SERVICIABILIDAD FINAL (P _t)	2.00
	DIFERENCIA DE SERVICIABILIDAD (ΔPSI)	1.80
Reemplazando:	NÚMERO ESTRUCTURAL (S_{Ne})	2.30

Fuente: Elaboración propia

La Figura 16 presenta el resultado del Número Estructural (S_{Ne}) aplicado sobre subrasante de material de suelo natural.

The screenshot shows the 'Ecuación AASHTO 93' software interface. It is divided into several sections for input and output:

- Tipo de Pavimento:** Radio buttons for 'Pavimento flexible' (selected) and 'Pavimento rígido'.
- Confiabilidad (R) y Desviación estándar (S_o):** A dropdown menu shows '65 % Z_r=-0.385' and a text box shows 'S_o 0.45'.
- Serviciabilidad inicial y final:** Text boxes for 'PSI inicial 3.8' and 'PSI final 2'.
- Módulo resiliente de la subrasante:** Text box for 'Mr 6869.76 psi'.
- Información adicional para pavimentos rígidos:** Empty text boxes for 'Módulo de elasticidad del concreto - E_c (psi)', 'Módulo de rotura del concreto - S_c (psi)', 'Coeficiente de transmisión de carga - (J)', and 'Coeficiente de drenaje - (C_d)'.
- Tipo de Análisis:** Radio buttons for 'Calcular SN' (selected) and 'Calcular W18'. Below them, 'W18 = 148217.37' is displayed.
- Número Estructural:** A large text box displays 'SN = 2.30'.
- Buttons:** 'Calcular' and 'Salir' buttons are at the bottom.

Figura 16: Número estructural (S_{Ne}) de la subrasante de material de suelo natural del PI7

Fuente: Ecuación de diseño AASHTO (1993)

La Tabla 62 presenta las variables consideradas en el diseño de la estructura del pavimento aplicado sobre subrasante de material de suelo natural con adición de cemento Portland.

Tabla 62. Variables de diseño de la estructura del pavimento con adición de cemento Portland del PI8

REQUISITOS DE DISEÑO DEL PAVIMENTO CON ADICIÓN DE AGENTE ESTABILIZANTE		
Variables:	PERIODO DE DISEÑO	10 años
	NÚMERO DE EJES EQUIVALENTES (W18)	148,217.37
	MÓDULO RESILIENTE (M _R)	23,540.40 psi
	NIVEL DE CONFIABILIDAD (R)	65 %
	DESVIACIÓN ESTÁNDAR NORMAL (Z _r)	-0.385
	DESVIACIÓN ESTÁNDAR COMBINADA (S _o)	0.45
	ÍNDICE DE SERVICIABILIDAD INICIAL (P _i)	3.80
	ÍNDICE DE SERVICIABILIDAD FINAL (P _t)	2.00
	DIFERENCIA DE SERVICIABILIDAD (ΔPSI)	1.80
Reemplazando:		
	NÚMERO ESTRUCTURAL (SN_m)	1.40

Fuente: Elaboración propia

La Figura 17 presenta el resultado del Número Estructural (SN_m) aplicado sobre subrasante de material de suelo natural con adición de cemento Portland.

The screenshot shows the 'Ecuación AASHTO 93' software window. It is divided into several sections for input and output:

- Tipo de Pavimento:** Radio buttons for 'Pavimento flexible' (selected) and 'Pavimento rígido'.
- Confiabilidad (R) y Desviación estándar (So):** A dropdown menu shows '65 % Zr=-0.385' and a text box shows 'So 0.45'.
- Serviciabilidad inicial y final:** Text boxes for 'PSI inicial' (3.8) and 'PSI final' (2).
- Módulo resiliente de la subrasante:** Text box for 'Mr' (23540.40 psi).
- Información adicional para pavimentos rígidos:** Empty text boxes for 'Módulo de elasticidad del concreto - E_c (psi)', 'Módulo de rotura del concreto - S_c (psi)', 'Coeficiente de transmisión de carga - (J)', and 'Coeficiente de drenaje - (Cd)'.
- Tipo de Análisis:** Radio buttons for 'Calcular SN' (selected) and 'Calcular W18'.
- W18 =** Text box showing '148217.37'.
- Número Estructural:** Text box showing 'SN = 1.40'.
- Buttons:** 'Calcular' and 'Salir' buttons at the bottom.

Figura 17: Número estructural (SN_m) de la subrasante de material de suelo estabilizado del PI8

Fuente: Ecuación de diseño AASHTO (1993)

La Tabla 63 presenta el resultado del espesor de reemplazo del material de subrasante.

Tabla 63. Espesor de reemplazo del material de subrasante del PI8

ESPESOR DE REEMPLAZO DEL MATERIAL DE SUBRASANTE	
$E = (S_{ne} - S_{Nm}) / (a_i \times m_i)$	
Donde:	$S_{Ne} = 2.3$
	$S_{Nm} = 1.4$
	$a_i = 0.094$
	$m_i = 1.000$
Reemplazando:	
	E (pulg) = 9.574468085
	E (cm) = 24.31914894
	E (cm) = 25.00

Fuente: Elaboración propia

Proyecto de Investigación PI12

La Tabla 64 presenta el resultado de demanda volumétrica de tráfico vial registrado.

Tabla 64. Demanda volumétrica de tráfico vial del PI12

DEMANDA VOLUMÉTRICA DE TRÁFICO VIAL		
TIPO DE VEHÍCULO	SÍMBOLO	IMD_{CORREGIDO}
AUTOMÓVIL	1	25 veh/día
CAMIONETA	2	7 veh/día
BUS MEDIANO	B2	11 veh/día
BUS GRANDE	B3-1	12 veh/día
CAMIÓN DE DOS EJES	C2	11 veh/día
CAMIÓN DE TRES EJES	C3	9 veh/día
TOTAL ÍNDICE MEDIO DIARIO ANUAL (IMDA)		75 veh/día

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 65 presenta el resultado de Ejes Equivalentes por cada tipo de vehículo pesado.

Tabla 65. Ejes Equivalentes por cada tipo de vehículo pesado del PI12

EJES EQUIVALENTES POR CADA TIPO DE VEHÍCULO PESADO						
$EE_{\text{día-carril}} = \text{IMD}_{\text{pi}} \times F_d \times F_c \times F_{\text{vpi}} \times F_{\text{pi}}$						
TIPO DE VEHÍCULO	IMD	F_d	F_c	F_{vpi}	F_{pi}	EE_{día-carril}
AUTOMÓVIL	25	0.50	1.00	0.0001	1.00	0.001
CAMIONETA	7	0.50	1.00	1.1500	1.00	4.025
BUS MEDIANO	11	0.50	1.00	4.5037	1.00	24.770
BUS GRANDE	12	0.50	1.00	2.6313	1.00	15.788
CAMIÓN DE DOS EJES	11	0.50	1.00	4.5037	1.00	24.770
CAMIÓN DE TRES EJES	9	0.50	1.00	3.2846	1.00	14.781
TOTAL EE_{día-carril} =						84.135

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 66 presenta el resultado del Factor de Crecimiento Acumulado (Fca).

Tabla 66. Factor de crecimiento acumulado del PI12

FACTOR DE CRECIMIENTO ACUMULADO (Fca)	
$\text{Factor Fca} = ((1+r)^n - 1) / r$	
Donde:	Tasa anual de crecimiento (r) = 1.7 % Periodo de diseño (n) = 10 años
Reemplazando:	Factor Fca = 10.80

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 67 presenta el resultado del Número de Repeticiones de Ejes Equivalentes.

Tabla 67. Número de repeticiones de ejes equivalentes (Nrep de EE 8.2 tn) del PI12

NÚMERO DE REPETICIONES DE EJES EQUIVALENTES (Nrep de EE 8.2 tn)				
$\text{Nrep de EE 8.2 tn} = \Sigma (\text{EE}_{\text{día-carril}} \times \text{Fca} \times 365)$				
TIPO DE VEHÍCULO	EE_{día-carril}	Fca	Año (días)	Nrep de EE
AUTOMÓVIL	0.001	10.80	365	4.93
CAMIONETA	4.025	10.80	365	15,867.63
BUS MEDIANO	24.770	10.80	365	97,650.34
BUS GRANDE	15.788	10.80	365	62,240.00
CAMIÓN DE DOS EJES	24.770	10.80	365	97,650.34
CAMIÓN DE TRES EJES	14.781	10.80	365	58,269.12
TOTAL Nrep de EE 8.2 tn =				331,682.36

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 68 presenta el resultado del Módulo Resiliente (M_R) de la subrasante aplicado sobre: i) material de suelo natural y ii) material de suelo natural con adición de cemento Portland.

Tabla 68. Módulo resiliente de la subrasante del PI12

MÓDULO RESILIENTE DE LA SUBRASANTE		
M_R (psi) = 2555 x CBR^{0.64}		
	SUELO NATURAL	SUELO ESTABILIZADO
CBR _{subrasante}	2.05	7.65
MÓDULO RESILIENTE (M_R)	4,044.95	9,395.81

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 69 presenta las variables consideradas en el diseño de la estructura del pavimento aplicado sobre una subrasante de material de suelo natural.

Tabla 69. Variables de diseño de la estructura del pavimento sin adición de cemento Portland del PI12

DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DE UN PAVIMENTO - MÉTODO AASHTO 93		
REQUISITOS DE DISEÑO DEL PAVIMENTO SIN ADICIÓN DE AGENTE ESTABILIZANTE		
Variables:	PERIODO DE DISEÑO	10 años
	NÚMERO DE EJES EQUIVALENTES (W18)	331,682.36
	MÓDULO RESILIENTE (M_R)	4,044.95 psi
	NIVEL DE CONFIABILIDAD (R)	75 %
	DESVIACIÓN ESTÁNDAR NORMAL (Z_r)	-0.674
	DESVIACIÓN ESTÁNDAR COMBINADA (S_o)	0.45
	ÍNDICE DE SERVICIABILIDAD INICIAL (Pi)	3.80
	ÍNDICE DE SERVICIABILIDAD FINAL (Pt)	2.00
	DIFERENCIA DE SERVICIABILIDAD (Δ PSI)	1.80
Reemplazando:		
	NÚMERO ESTRUCTURAL (SNe)	3.28

Fuente: Elaboración propia

La Figura 18 presenta el resultado del Número Estructural (SNe) aplicado sobre subrasante de material de suelo natural.

Ecuación AASHTO 93

Tipo de Pavimento
 Pavimento flexible Pavimento rígido

Confiabilidad (R) y Desviación estándar (So)
 75 % $Z_r = -0.674$ So 0.45

Serviciabilidad inicial y final
 PSI inicial 3.8 PSI final 2

Módulo resiliente de la subrasante
 Mr 4044.95 psi

Información adicional para pavimentos rígidos

Módulo de elasticidad del concreto - E_c (psi) Coeficiente de transmisión de carga - (J)
 Módulo de rotura del concreto - S_c (psi) Coeficiente de drenaje - (Cd)

Tipo de Análisis
 Calcular SN **W18 = 331682.36**
 Calcular W18

Número Estructural
SN = 3.28

Figura 18: Número estructural (SNe) de la subrasante de material de suelo natural del PI12

Fuente: Ecuación de diseño AASHTO (1993)

La Tabla 70 presenta las variables consideradas en el diseño de la estructura del pavimento aplicado sobre subrasante de material de suelo natural con adición de cemento Portland.

Tabla 70. Variables de diseño de la estructura del pavimento con adición de cemento Portland del PI12

REQUISITOS DE DISEÑO DEL PAVIMENTO CON ADICIÓN DE AGENTE ESTABILIZANTE		
VARIABLES:	PERIODO DE DISEÑO	10 años
	NÚMERO DE EJES EQUIVALENTES (W18)	331,682.36
	MÓDULO RESILIENTE (M_R)	9,395.81 psi
	NIVEL DE CONFIABILIDAD (R)	75 %
	DESVIACIÓN ESTÁNDAR NORMAL (Z_r)	-0.674
	DESVIACIÓN ESTÁNDAR COMBINADA (S_o)	0.45
	ÍNDICE DE SERVICIABILIDAD INICIAL (P_i)	3.80
	ÍNDICE DE SERVICIABILIDAD FINAL (P_f)	2.00
	DIFERENCIA DE SERVICIABILIDAD (ΔPSI)	1.80
Reemplazando:	NÚMERO ESTRUCTURAL (SNm)	2.39

Fuente: Elaboración propia

La Figura 19 presenta el resultado del Número Estructural (SNm) aplicado sobre subrasante de material de suelo natural con adición de cemento Portland.

Figura 19: Número estructural (SNm) de la subrasante de material de suelo estabilizado del PI12

Fuente: Ecuación de diseño AASHTO (1993)

La Tabla 71 presenta el resultado del espesor de reemplazo del material de subrasante.

Tabla 71. Espesor de reemplazo del material de subrasante del PI12

ESPESOR DE REEMPLAZO DEL MATERIAL DE SUBRASANTE	
$E = (S_{ne} - SN_m) / (a_i \times m_i)$	
Donde:	$S_{ne} = 3.28$
	$SN_m = 2.39$
	$a_i = 0.061$
	$m_i = 1.000$
Reemplazando:	
	E (pulg) = 14.59016393
	E (cm) = 37.05901639
	E (cm) = 40.00

Fuente: Elaboración propia

Proyecto de Investigación PI14

La Tabla 72 presenta el resultado de demanda volumétrica de tráfico vial registrado.

Tabla 72. Demanda volumétrica de tráfico vial del PI14

DEMANDA VOLUMÉTRICA DE TRÁFICO VIAL		
TIPO DE VEHÍCULO	SÍMBOLO	IMDCORREGIDO
AUTOMÓVIL	1	12 veh/día
CAMIONETA	2	19 veh/día
MINIBUS	3	25 veh/día
BUS MEDIANO	B2	4 veh/día
BUS GRANDE	B3-1	3 veh/día
CAMIÓN DE DOS EJES	C2	7 veh/día
TRACTOCAMIÓN DE DOS EJES	T2S1	3 veh/día
TOTAL ÍNDICE MEDIO DIARIO ANUAL (IMDA)		73 veh/día

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 73 presenta el resultado de Ejes Equivalentes por cada tipo de vehículo pesado.

Tabla 73. Ejes Equivalentes por cada tipo de vehículo pesado del PI14

EJES EQUIVALENTES POR CADA TIPO DE VEHÍCULO PESADO						
$EE_{\text{día-carril}} = IMD_{pi} \times F_d \times F_c \times F_{vpi} \times F_{pi}$						
TIPO DE VEHÍCULO	IMD	Fd	Fc	Fvp	Fp	EE _{día-carril}
AUTOMÓVIL	12	0.50	1.00	0.0001	1.00	0.001
CAMIONETA	19	0.50	1.00	1.1500	1.00	10.925
MINIBUS	25	0.50	1.00	1.8500	1.00	23.125
BUS MEDIANO	4	0.50	1.00	4.5037	1.00	9.007
BUS GRANDE	3	0.50	1.00	2.6313	1.00	3.947
CAMIÓN DE DOS EJES	7	0.50	1.00	4.5037	1.00	15.763
TRACTOCAMIÓN DE DOS EJES	3	0.50	1.00	7.7419	1.00	11.613
TOTAL EE_{día-carril} =						74.381

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 74 presenta el resultado del Factor de Crecimiento Acumulado (Fca).

Tabla 74. Factor de crecimiento acumulado del PI14

FACTOR DE CRECIMIENTO ACUMULADO (Fca)	
Factor Fca = $((1+r)^n - 1)/r$	
Donde:	Tasa anual de crecimiento (r) = 1.7 % Periodo de diseño (n) = 10 años
Reemplazando:	
Factor Fca = 10.80	

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 75 presenta el resultado del Número de Repeticiones de Ejes Equivalentes.

Tabla 75. Número de repeticiones de ejes equivalentes (Nrep de EE 8.2 tn) del PI14

NÚMERO DE REPETICIONES DE EJES EQUIVALENTES (Nrep de EE 8.2 tn)				
Nrep de EE 8.2 tn = $\Sigma (EE_{\text{día-carril}} \times Fca \times 365)$				
TIPO DE VEHÍCULO	EE_{día-carril}	Fca	Año (días)	Nrep de EE
AUTOMÓVIL	0.001	10.80	365	2.37
CAMIONETA	10.925	10.80	365	43,069.27
MINIBUS	23.125	10.80	365	91,164.94
BUS MEDIANO	9.007	10.80	365	35,509.22
BUS GRANDE	3.947	10.80	365	15,560.00
CAMIÓN DE DOS EJES	15.763	10.80	365	62,141.13
TRACTOCAMIÓN DE DOS EJES	11.613	10.80	365	45,781.20
TOTAL Nrep de EE 8.2 tn =				293,228.12

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 76 presenta el resultado del Módulo Resiliente (M_R) de la subrasante aplicado sobre: i) material de suelo natural y ii) material de suelo natural con adición de cemento Portland.

Tabla 76. Módulo resiliente de la subrasante del PI14

MÓDULO RESILIENTE DE LA SUBRASANTE		
$M_R (\text{psi}) = 2555 \times CBR^{0.64}$		
	SUELO NATURAL	SUELO ESTABILIZADO
$CBR_{\text{subrasante}}$	3.00	22.00
MÓDULO RESILIENTE (M_R)	5,161.17	18,473.17

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 77 presenta las variables consideradas en el diseño de la estructura del pavimento aplicado sobre una subrasante de material de suelo natural.

Tabla 77. Variables de diseño de la estructura del pavimento sin adición de cemento Portland del PI14

DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DE UN PAVIMENTO - MÉTODO AASHTO 93		
REQUISITOS DE DISEÑO DEL PAVIMENTO SIN ADICIÓN DE AGENTE ESTABILIZANTE		
Variables:	PERIODO DE DISEÑO	10 años
	NÚMERO DE EJES EQUIVALENTES (W18)	293,228.12
	MÓDULO RESILIENTE (M _R)	5,161.17 psi
	NIVEL DE CONFIABILIDAD (R)	70 %
	DESVIACIÓN ESTÁNDAR NORMAL (Z _r)	-0.524
	DESVIACIÓN ESTÁNDAR COMBINADA (S _o)	0.45
	ÍNDICE DE SERVICIABILIDAD INICIAL (P _i)	3.80
	ÍNDICE DE SERVICIABILIDAD FINAL (P _t)	2.00
	DIFERENCIA DE SERVICIABILIDAD (ΔPSI)	1.80
Reemplazando:		
	NÚMERO ESTRUCTURAL (S_{Ne})	2.86

Fuente: Elaboración propia

La Figura 20 presenta el resultado del Número Estructural (S_{Ne}) aplicado sobre subrasante de material de suelo natural.

The screenshot shows the 'Ecuación AASHTO 93' software window. It is configured for a flexible pavement design. The 'Tipo de Pavimento' section has 'Pavimento flexible' selected. The 'Confiabilidad (R) y Desviación estándar (S_o)' section shows '70 % Z_r=-0.524' and 'S_o = 0.45'. The 'Serviciabilidad inicial y final' section shows 'PSI inicial = 3.8' and 'PSI final = 2'. The 'Módulo resiliente de la subrasante' section shows 'Mr = 5161.17 psi'. The 'Tipo de Análisis' section has 'Calcular SN' selected, with 'W18 = 293228.12' displayed. The 'Número Estructural' section shows the final result 'SN = 2.86'. There are 'Calcular' and 'Salir' buttons at the bottom.

Figura 20: Número estructural (S_{Ne}) de la subrasante de material de suelo natural del PI14

Fuente: Ecuación de diseño AASHTO (1993)

La Tabla 78 presenta las variables consideradas en el diseño de la estructura del pavimento aplicado sobre subrasante de material de suelo natural con adición de cemento Portland.

Tabla 78. Variables de diseño de la estructura del pavimento con adición de cemento Portland del PI14

REQUISITOS DE DISEÑO DEL PAVIMENTO CON ADICIÓN DE AGENTE ESTABILIZANTE		
Variables:	PERIODO DE DISEÑO	10 años
	NÚMERO DE EJES EQUIVALENTES (W18)	293,228.12
	MÓDULO RESILIENTE (M _R)	18,473.17 psi
	NIVEL DE CONFIABILIDAD (R)	70 %
	DESVIACIÓN ESTÁNDAR NORMAL (Z _r)	-0.524
	DESVIACIÓN ESTÁNDAR COMBINADA (S _o)	0.45
	ÍNDICE DE SERVICIABILIDAD INICIAL (P _i)	3.80
	ÍNDICE DE SERVICIABILIDAD FINAL (P _t)	2.00
	DIFERENCIA DE SERVICIABILIDAD (ΔPSI)	1.80
Reemplazando:	NÚMERO ESTRUCTURAL (SN_m)	1.75

Fuente: Elaboración propia

La Figura 21 presenta el resultado del Número Estructural (SN_m) aplicado sobre subrasante de material de suelo natural con adición de cemento Portland.

Figura 21: Número estructural (SN_m) de la subrasante de material de suelo estabilizado del PI14

Fuente: Ecuación de diseño AASHTO (1993)

La Tabla 79 presenta el resultado del espesor de reemplazo del material de subrasante.

Tabla 79. Espesor de reemplazo del material de subrasante del PI14

ESPESOR DE REEMPLAZO DEL MATERIAL DE SUBRASANTE	
$E = (S_{ne} - S_{Nm}) / (a_i \times m_i)$	
Donde:	$S_{Ne} = 2.86$
	$S_{Nm} = 1.75$
	$a_i = 0.094$
	$m_i = 1.000$
Reemplazando:	
	E (pulg) = 11.80851064
	E (cm) = 29.99361702
	E (cm) = 30.00

Fuente: Elaboración propia

A continuación, en la Tabla 80 se presenta el resumen de los espesores de reemplazo del material de subrasante para los 7 Proyectos de Investigación seleccionados, cuyos valores soporte o resistencias del suelo no cumplen con las condiciones mínimas para el diseño de proyectos viales.

Tabla 80. Resumen de los espesores de reemplazo del material de subrasante

VARIABLES	PI1	PI2	PI6	PI7	PI8	PI12	PI14
DEMANDA VOLUMÉTRICA DE TRÁFICO VIAL							
ÍNDICE MEDIO DIARIO ANUAL (IMDA)	57 veh/día	66 veh/día	39 veh/día	83 veh/día	30 veh/día	75 veh/día	73 veh/día
EJES EQUIVALENTES POR CADA TIPO DE VEHÍCULO PESADO							
TOTAL EE _{día-carril}	83.328	80.206	69.927	71.852	33.964	84.135	74.381
FACTOR DE CRECIMIENTO ACUMULADO (Fca)							
FACTOR (Fca)	9.85	10.14	11.23	11.32	11.96	10.80	10.80
NÚMERO DE REPETICIONES DE EJES EQUIVALENTES (Nrep de EE 8.2 tn)							
TOTAL Nrep de EE 8.2 tn	299,671.27	296,735.30	286,603.52	296,801.94	148,217.37	331,682.36	293,228.12
MATERIAL DE SUELO NATURAL							
CBR _{subrasante}	2.60	1.30	2.13	4.90	4.69	2.05	3.00
MÓDULO RESILIENTE (M _R)	4,709.49	3,022.14	4,145.28	7,065.07	6,869.76	4,044.95	5,161.17
NÚMERO ESTRUCTURAL (S _{Ne})	2.97	3.50	3.10	2.55	2.30	3.28	2.86
MATERIAL DE SUELO NATURAL + DOSIFICACIÓN (%) DEL CEMENTO PORTLAND							
CBR _{subrasante}	105.40	13.75	29.07	20.70	32.13	7.65	22.00
MÓDULO RESILIENTE (M _R)	50,351.09	13,674.29	22,079.83	17,766.91	23,540.40	9,395.81	18,473.17
NÚMERO ESTRUCTURAL (S _{Nm})	1.14	1.97	1.62	1.78	1.40	2.39	1.75
ESPESOR DE REEMPLAZO DEL MATERIAL DE SUBRASANTE							
E (cm)	50.00	55.00	40.00	25.00	25.00	40.00	30.00

Fuente: Elaboración propia

5.4 Resultados del espesor de la capa de afirmado

Se procedió a realizar el dimensionamiento de los espesores de la capa de afirmado, aplicando el método NAASRA (National Association of Australian State Road Authorities), el cual relaciona el valor soporte del suelo (CBR) y la carga actuante sobre el afirmado, expresada en Número de Repeticiones de EE.

Los espesores de afirmado fueron dimensionados considerando subrasantes con CBR > 6% hasta un CBR > 30% (material de suelo natural con adición de cemento Portland) y tráfico con Número de Repeticiones de hasta 300,000 EE.

Adicionalmente, se determinaron los espesores de afirmado considerando subrasantes con CBR < 6% (material de suelo natural), únicamente con la finalidad de comparar y analizar resultados. Sin embargo, es necesario precisar que los sectores que presenten subrasantes pobres e inadecuadas, serán materia de estabilización y/o mejoramiento de suelos y, solo entonces, podrá diseñarse el espesor de afirmado.

A continuación, en la Tabla 81 se presenta el resumen de los resultados del Número de Repeticiones de Ejes Equivalentes de los Proyectos de Investigación para identificar aquellos PI cuyo Nrep no supere los 300,000 EE.

Tabla 81. Resumen del número de repeticiones de ejes equivalentes (Nrep de EE)

PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN	IMDA	Nrep de EE 8.2 tn
PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PI1	57 veh/día	299,671.27
PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PI2	66 veh/día	296,735.30
PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PI6	39 veh/día	286,603.52
PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PI7	83 veh/día	296,801.94
PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PI8	30 veh/día	148,217.37
PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PI12	75 veh/día	331,682.36
PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PI14	73 veh/día	293,228.12

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a los resultados anteriormente citados, se seleccionaron 6 Proyectos de Investigación, cuyos valores de Nrep de EE se encuentran dentro de los rangos establecidos.

En ese sentido, se determinó el espesor de la capa de afirmado, calculándose lo siguiente:

Proyecto de Investigación PI1

La Tabla 82 presenta el resultado del espesor de afirmado del PI1.

Tabla 82. Espesor de la capa de afirmado del PI1

ESPESOR DE LA CAPA DE AFIRMADO (mm) - MÉTODO NAASRA			
$e = (219 - 211 \times (\log_{10}CBR) + 58 \times (\log_{10}CBR)^2) \times \log_{10}(N_{rep}/120)$			
SUELO NATURAL		SUELO ESTABILIZADO	
Donde:	CBR _{subrasante} = 2.60	Donde:	CBR _{subrasante} = 105.40
	N _{rep} = 299,671.27		N _{rep} = 299,671.27
Reemplazando:		Reemplazando:	
	e (mm) = 480.50		e (mm) = 100.26
	e (cm) = 48.05		e (cm) = 10.03

Fuente: Elaboración propia

Proyecto de Investigación PI2

La Tabla 83 presenta el resultado del espesor de afirmado del PI2.

Tabla 83. Espesor de la capa de afirmado del PI2

ESPESOR DE LA CAPA DE AFIRMADO (mm) - MÉTODO NAASRA			
$e = (219 - 211 \times (\log_{10}CBR) + 58 \times (\log_{10}CBR)^2) \times \log_{10}(N_{rep}/120)$			
SUELO NATURAL		SUELO ESTABILIZADO	
Donde:	CBR _{subrasante} = 1.30	Donde:	CBR _{subrasante} = 13.75
	N _{rep} = 296,735.30		N _{rep} = 296,735.30
Reemplazando:		Reemplazando:	
	e (mm) = 664.08		e (mm) = 183.13
	e (cm) = 66.41		e (cm) = 18.31

Fuente: Elaboración propia

Proyecto de Investigación PI6

La Tabla 84 presenta el resultado del espesor de afirmado del PI6.

Tabla 84. Espesor de la capa de afirmado del PI6

ESPESOR DE LA CAPA DE AFIRMADO (mm) - MÉTODO NAASRA			
$e = (219 - 211 \times (\log_{10}CBR) + 58 \times (\log_{10}CBR)^2) \times \log_{10}(Nrep/120)$			
SUELO NATURAL		SUELO ESTABILIZADO	
Donde:	CBR _{subrasante} = 2.13	Donde:	CBR _{subrasante} = 29.07
	Nrep = 286,603.52		Nrep = 286,603.52
Reemplazando:		Reemplazando:	
	e (mm) = 526.87		e (mm) = 116.31
	e (cm) = 52.69		e (cm) = 11.63

Fuente: Elaboración propia

Proyecto de Investigación PI7

La Tabla 85 presenta el resultado del espesor de afirmado del PI7.

Tabla 85. Espesor de la capa de afirmado del PI7

ESPESOR DE LA CAPA DE AFIRMADO (mm) - MÉTODO NAASRA			
$e = (219 - 211 \times (\log_{10}CBR) + 58 \times (\log_{10}CBR)^2) \times \log_{10}(Nrep/120)$			
SUELO NATURAL		SUELO ESTABILIZADO	
Donde:	CBR _{subrasante} = 4.90	Donde:	CBR _{subrasante} = 20.70
	Nrep = 296,801.94		Nrep = 296,801.94
Reemplazando:		Reemplazando:	
	e (mm) = 342.72		e (mm) = 141.75
	e (cm) = 34.27		e (cm) = 14.17

Fuente: Elaboración propia

Proyecto de Investigación PI8

La Tabla 86 presenta el resultado del espesor de afirmado del PI8.

Tabla 86. Espesor de la capa de afirmado del PI8

ESPESOR DE LA CAPA DE AFIRMADO (mm) - MÉTODO NAASRA			
$e = (219 - 211 \times (\log_{10}CBR) + 58 \times (\log_{10}CBR)^2) \times \log_{10}(Nrep/120)$			
SUELO NATURAL		SUELO ESTABILIZADO	
Donde:	CBR _{subrasante} = 4.69	Donde:	CBR _{subrasante} = 32.13
	Nrep = 148,217.37		Nrep = 148,217.37
Reemplazando:		Reemplazando:	
	e (mm) = 320.02		e (mm) = 101.24
	e (cm) = 32.00		e (cm) = 10.12

Fuente: Elaboración propia

Proyecto de Investigación PI14

La Tabla 87 presenta el resultado del espesor de afirmado del PI14.

Tabla 87. Espesor de la capa de afirmado del PI14

ESPESOR DE LA CAPA DE AFIRMADO (mm) - MÉTODO NAASRA			
$e = (219 - 211 \times (\log_{10}CBR) + 58 \times (\log_{10}CBR)^2) \times \log_{10}(Nrep/120)$			
SUELO NATURAL		SUELO ESTABILIZADO	
Donde:	CBR _{subrasante} = 3.00	Donde:	CBR _{subrasante} = 22.00
	Nrep = 293,228.12		Nrep = 293,228.12
Reemplazando:		Reemplazando:	
	e (mm) = 445.63		e (mm) = 136.44
	e (cm) = 44.56		e (cm) = 13.64

Fuente: Elaboración propia

A continuación, en la Tabla 88 se presenta el resumen de los espesores de la capa de afirmado para los 6 Proyectos de Investigación seleccionados.

Tabla 88. Resumen de los espesores de la capa de afirmado

VARIABLES	PI1	PI2	PI6	PI7	PI8	PI14
DEMANDA VOLUMÉTRICA DE TRÁFICO VIAL						
ÍNDICE MEDIO DIARIO ANUAL (IMDA)	57 veh/día	66 veh/día	39 veh/día	83 veh/día	30 veh/día	73 veh/día
EJES EQUIVALENTES POR CADA TIPO DE VEHÍCULO PESADO						
TOTAL EE _{día-carril}	83.328	80.206	69.927	71.852	33.964	74.381
FACTOR DE CRECIMIENTO ACUMULADO (Fca)						
FACTOR (Fca)	9.85	10.14	11.23	11.32	11.96	10.80
NÚMERO DE REPETICIONES DE EJES EQUIVALENTES (Nrep de EE 8.2 tn)						
TOTAL Nrep de EE 8.2 tn	299,671.27	296,735.30	286,603.52	296,801.94	148,217.37	293,228.12
ESPESOR DE MATERIAL DE AFIRMADO (MATERIAL DE SUELO NATURAL)						
CBR _{subrasante}	2.60	1.30	2.13	4.90	4.69	3.00
e (mm)	480.50	664.08	526.87	342.72	320.02	445.63
e (cm)	48.05	66.41	52.69	34.27	32.00	44.56
ESPESOR DE MATERIAL DE AFIRMADO (MATERIAL DE SUELO ESTABILIZADO CON CEMENTO PORTLAND)						
CBR _{subrasante}	105.40	13.75	29.07	20.70	32.13	22.00
e (mm)	100.26	183.13	116.31	141.75	101.24	136.44
e (cm)	10.03	18.31	11.63	14.17	10.12	13.64

Fuente: Elaboración propia

5.5 Análisis de las características físico-mecánicas del material de subrasante

Se analizó la información consignada en proyectos precedentes sobre investigaciones del suelo de subrasante que se utilizará en la construcción de pavimentos.

Respecto a los resultados anteriores (Tabla 18), se agrupó la siguiente información (Ver Tabla 89).

Tabla 89. Comparación de las características físico-mecánicas

PI	CLASIFICACIÓN DE SUELOS		ÍNDICE DE PLASTICIDAD	ÍNDICE DE GRUPO	VALOR SOPORTE (CBR) (%)
	AASHTO	SUCS			
PI1	A-7-6	CH	39.20	45	2.60
PI2	A-7-6	OH	44.00	37	1.30
PI3	-	CL	20.54	-	14.02
PI4	A-6	SC	15.92	0	30.80
PI5	A-2-4	SC	7.76	0	22.60
PI6	A-2-4	SP-SC	6.51	19	2.13
PI7	A-4	ML	7.00	3	4.90
PI8	A-7-5	CH	29.56	20	4.69
PI9	A-7-6	OL	21.06	6	24.05
PI10	A-1-a	GC-GM	6.30	0	28.20
PI11	A-1-a	GP-GM	3.60	-	48.30
PI12	-	CH	19.33	-	2.05
PI13	A-2-6	CL	11.51	2	27.00
PI14	A-6	ML	12.00	-	3.00

Fuente: Elaboración propia

Como se hizo notar en la Tabla 88, se consolidó el Índice de Plasticidad (IP), Índice de Grupo (IG), los cuales permitieron estimar el comportamiento de los suelos; y, luego clasificar los suelos. Asimismo, se consolidó el valor CBR, que está referido al 95% de la MDS y a una penetración de carga de 2.54 mm.

Teniendo en cuenta dichas variables, se identificó lo siguiente:

De acuerdo con la Clasificación de los Suelos basada en AASHTO M145 y/o ASTM D 3282, los suelos granulares cuya clasificación de grupo correspondió a los A-1 (A-1-a y A-1-b), A-3 y A-2 (A-2-4 y A-2-5) se consideraron excelentes a buenos; sin embargo, los suelos granulares A-2 (A-2-6 y A-2-7) y los suelos finos A-4, A-5, A-6 y A-7 (A-7-5 y A-7-6) se consideraron regulares a insuficientes.

En ese sentido, se observó que existen 5 materiales de suelo cuya clasificación de grupo correspondió a los A-1-a, A-2-4 y A-2-6, los cuales pueden ser utilizables en la ejecución de caminos trabajando como subrasantes, o podrían ser mejorados y trabajar como capa granular (subbase o base). Asimismo, se observó que existen 7 materiales de suelo cuya clasificación de grupo correspondió a los A-4, A-6, A-7-5 y A-7-6, los cuales exigen ser mejorados con el objetivo de modificar propiedades indeseables de materiales de calidad inferior y sean adecuados para su uso en la construcción.

De acuerdo con el Índice de Plasticidad (IP), los suelos clasificados entre A-1 y A-2 presentaron plasticidad baja ($IP < 7$) y media ($7 < IP \leq 20$) entre 3.60 para GP-GM y 11.51 para CL; por lo que, correspondieron a suelos poco arcillosos y arcillosos. Asimismo, los suelos clasificados entre A-4 y A-7 presentaron plasticidad media ($7 < IP \leq 20$) y alta ($IP > 20$) entre 7.00 para ML y 44.00 para OH; por lo que, correspondieron a suelos arcillosos y muy arcillosos, y su presencia en una estructura de pavimento es riesgosa debido a su gran sensibilidad al agua.

De acuerdo con el Índice de Grupo (IG), los suelos clasificados entre A-1 y A-2 presentaron $IG = 0$ para GC-GM y SC; $IG = 2$ para CL, e $IG = 19$ para SP-SC; por lo que, correspondieron a suelos muy buenos, regulares e inadecuados respectivamente. Asimismo, los suelos clasificados entre A-4 y A-7 presentaron $IG = 0$ para SC; $IG = 3$ para ML, e $IG \geq 20$ para CH y OH; por lo que, correspondieron a suelos muy buenos, regulares e inadecuados respectivamente.

De acuerdo al Valor Soporte (CBR), los suelos clasificados entre A-1 y A-2 presentaron $CBR = 2.13\%$ para SP-SC con categoría de subrasante S_0 : Subrasante inadecuada, y CBR entre 22.60% para SC y 48.30% para GP-GM con categorías de subrasante S_4 : Subrasante muy buena y S_5 : Subrasante excelente. Asimismo, los suelos clasificados entre A-4 y A-7 presentaron CBR entre 1.30% para OH y 4.90% para ML, además se debe destacar que existen suelos CL, OL y SC con CBR de 14.02%, 24.05% y 30.80% respectivamente.

A partir de la clasificación de suelos según el IP, IG y CBR, se concluyó que existen suelos inestables para una subrasante; por lo que, son candidatos a ser tratados con proporciones de cemento Portland.

5.6 Análisis de la dosificación en porcentaje del cemento Portland

El Manual de Carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos, establece que los factores que se considerarán al seleccionar el método más conveniente de estabilización son: tipo de suelo a estabilizar, uso propuesto del suelo estabilizado, experiencia en la estabilización que se aplicará, disponibilidad del aditivo estabilizador y costos.

En el presente estudio, se consideró la Estabilización de suelos con cemento Portland, por la accesibilidad del material, experiencia en el rubro de la construcción, influencia en el mercado peruano, así como el uso propuesto del material estabilizado, ya sea como subrasante o capa granular de superficie de rodadura.

La Portland Cement Association (PCA), indica que la dosificación del cemento depende del tipo de aplicación de pavimento suelo-cemento, ya sea a través de Suelo modificado con cemento (CMS), Subrasante estabilizada con cemento (CSS) o Base tratada con cemento (CTB) (Ver Tabla 90).

Tabla 90. Contenido de cemento por tipo de aplicación

TIPO DE APLICACIÓN	DOSIFICACIÓN (%)
SUELO MODIFICADO CON CEMENTO (CMS)	2% - 4%
SUBRASANTE ESTABILIZADA CON CEMENTO (CSS)	3% - 6%
BASE TRATADA CON CEMENTO (CTB)	3% - 6%
PAVIMENTOS UNICAPA	11% - 20%

Fuente: Portland Cement Association (2020)

En ese sentido, se analizó la información expuesta en la Tabla 19 sobre dosificaciones del cemento Portland adicionadas al material de suelo de subrasante, y se identificó lo siguiente:

En el caso del PI1, el suelo natural de tipo A-7-6 y CH presentó $IP = 39.20$ y $CBR = 2.60\%$, y se le adicionó proporciones de cemento de 10%, 15% y 20%, que según la PCA corresponde a un tipo de aplicación de Pavimentos Unicapa, obteniéndose valores de CBR de 105.40%, 108.00% y 138.70% respectivamente. Lo más resaltante

en este caso fue la propiedad física de la durabilidad del suelo, que es el motivo de estos diseños, soportar las cargas del tráfico.

En el caso del PI2, el suelo natural de tipo A-7-6 y OH presentó $IP = 44.00$ y $CBR = 1.30\%$, y se le adicionó proporciones de cemento de 1%, 3% y 5%. Se observó que al agregar 1% de cemento se redujo el IP a 36.00 y aumentó el CBR a 3.50% (S_1 : Subrasante insuficiente); con 3% de cemento se redujo el IP a 23.00 y aumentó el CBR a 6.63% (S_2 : Subrasante regular), que corresponde a una CSS; y con 5% de cemento se redujo el IP a 15.00 y aumentó el CBR a 13.75% (S_3 : Subrasante buena), que corresponde a una CSS. A partir de los resultados obtenidos, se concluyó que la dosificación requerida fue de 5%; puesto que, no solo elevó la resistencia sino también presentó un suelo de plasticidad media $IP \leq 20$.

En el caso del PI3, el suelo natural de tipo CL presentó $IP = 20.54$ y $CBR = 14.02\%$, y se le adicionó proporciones de cemento de 2%, 6% y 8%. Se observó que al agregar 2% de cemento aumentó el CBR a 16.72% (S_3 : Subrasante buena), que corresponde a un CMS; con 6% de cemento aumentó el CBR a 17.50% (S_3 : Subrasante buena), que corresponde a una CSS; y con 8% de cemento se redujo el IP a 14.63 y aumentó el CBR a 19.63% (S_3 : Subrasante buena).

En el caso del PI4, el suelo natural de tipo A-6 y SC presentó $IP = 15.92$ y $CBR = 30.80\%$, y se le adicionó una proporción de cemento de 3%, que según la PCA corresponde a un CMS, observándose que se redujo el IP a 0 (No Plástico) y aumentó el CBR a 51.00% (S_5 : Subrasante excelente).

En el caso del PI5, el suelo natural de tipo A-2-4 y SC presentó $IP = 7.76$ y $CBR = 22.60\%$, y se le adicionó proporciones de cemento de 4%, 6% y 8%. Se observó que al agregar 4% de cemento aumentó el CBR a 138.00%, y se convierte en una CSS o CTB; con 6% de cemento aumentó el CBR a 148.00%, y se convierte en una CSS o CTB; y con 8% de cemento aumentó el CBR a 258.00%.

En el caso del PI6, el suelo natural de tipo A-2-4 y SP-SC presentó $IP = 6.51$ y $CBR = 2.13\%$, y se le adicionó proporciones de cemento de 2% y 4%, que según la PCA corresponde a un CMS. Se observó que al agregar 2% de cemento aumentó el CBR a 29.07% (S_4 : Subrasante muy buena); y con 4% de cemento aumentó el CBR a 50.37% (S_5 : Subrasante excelente).

En el caso del PI7, el suelo natural de tipo A-4 y ML presentó $IP = 7.00$ y $CBR = 4.90\%$, y se le adicionó una proporción de cemento de 1%, observándose que aumentó el CBR a 20.70% (S₄: Subrasante muy buena).

En el caso del PI8, el suelo natural de tipo A-7-5 y CH presentó $IP = 29.56$ y $CBR = 4.69\%$, y se le adicionó proporciones de cemento de 10%, 12%, 14% y 16%, que según la PCA corresponde a un tipo de aplicación de Pavimentos Unicapa. Se observó que al agregar 10% de cemento se redujo el IP a 10.89 y aumentó el CBR a 21.57% (S₄: Subrasante muy buena); con 12% de cemento se redujo el IP a 9.47 y aumentó el CBR a 32.13% (S₅: Subrasante excelente); con 14% de cemento se redujo el IP a 8.28 y aumentó el CBR a 37.67% (S₅: Subrasante excelente); y con 16% de cemento se redujo el IP a 6.17 y aumentó el CBR a 40.09% (S₅: Subrasante excelente).

En el caso del PI9, el suelo natural de tipo A-7-6 y OL presentó $IP = 21.06$ y $CBR = 24.05\%$, y se le adicionó una proporción de cemento de 10%, observándose que aumentó el CBR a 59.25% (S₅: Subrasante excelente).

En el caso del PI10, el suelo natural de tipo A-1-a y GC-GM presentó $IP = 6.30$ y $CBR = 28.20\%$, y se le adicionó una proporción de cemento de 5%, observándose que aumentó el CBR a 56.40% (S₅: Subrasante excelente).

En el caso del PI11, el suelo natural de tipo A-1-a y GP-GM presentó $IP = 3.60$ y $CBR = 48.30\%$, y se le adicionó una proporción de cemento de 5%, observándose que aumentó el CBR a 126.00%, y se convierte en una CSS o CTB.

En el caso del PI12, el suelo natural de tipo CH presentó $IP = 19.33$ y $CBR = 2.05\%$, y se le adicionó proporciones de cemento de 5% y 10%. Se observó que al agregar 5% de cemento se redujo el IP a 16.97 y aumentó el CBR a 5.37% (S₁: Subrasante insuficiente); y con 10% de cemento se redujo el IP a 14.52 y aumentó el CBR a 7.65% (S₂: Subrasante regular). A partir de los resultados obtenidos, se concluyó que la dosificación requerida fue de 10%; puesto que, no solo redujo la plasticidad sino también presentó un $CBR \geq 6\%$ (valor mínimo requerido).

En el caso del PI13, el suelo natural de tipo A-2-6 y CL presentó $IP = 11.51$ y $CBR = 27.00\%$, y se le adicionó proporciones de cemento de 6% y 7%. Se observó que al agregar 6% de cemento se redujo el IP a 10.95 y aumentó el CBR a 72.00%, que

corresponde a una CSS; y con 7% de cemento se redujo el IP a 9.03 y aumentó el CBR a 98.80%, y se convierte en una CSS o CTB.

En el caso del PI14, el suelo natural de tipo A-6 y ML presentó IP = 12.00 y CBR = 3.00%, y se le adicionó proporciones de cemento de 2%, 4%, 6% y 8%. Se observó que al agregar 2% de cemento se redujo el IP a 4.11 y aumentó el CBR a 22.00% (S₄: Subrasante muy buena), que corresponde a un CMS; con 4% de cemento se redujo el IP a 0.54 y aumentó el CBR a 26.50% (S₄: Subrasante muy buena), que corresponde a un CMS; con 6% de cemento se redujo el IP a 2.86 y aumentó el CBR a 33.50% (S₅: Subrasante excelente), que corresponde a una CSS; y con 8% de cemento se redujo el IP a 3.82 y aumentó el CBR a 39.00% (S₅: Subrasante excelente).

5.7 Análisis del espesor de reemplazo del material de subrasante

El Manual de Carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos, establece que para que se apoye una estructura del pavimento, se requiere que los suelos de subrasante presenten un $CBR \geq 6\%$. Si los suelos no cumplen esta condición por tratarse de suelos de mala calidad, se considerará la estabilización y/o mejoramiento de los suelos, según la naturaleza de los mismos.

Respecto a los resultados anteriores (Tabla 80), se agrupó la siguiente información (Ver Tabla 91).

Tabla 91. Comparación de los espesores de reemplazo del material de subrasante

PI	VALOR SOPORTE (CBR) (%)		MÓDULO RESILIENTE (M _R) (psi)		NÚMERO ESTRUCTURAL (SN)		E (cm)
	NATURAL	ESTABILIZADO	NATURAL	ESTABILIZADO	SNe	SNm	
PI1	2.60	105.40	4,709.49	50,351.09	2.97	1.14	50.00
PI2	1.30	13.75	3,022.14	13,674.29	3.50	1.97	55.00
PI6	2.13	29.07	4,145.28	22,079.83	3.10	1.62	40.00
PI7	4.90	20.70	7,065.07	17,766.91	2.55	1.78	25.00
PI8	4.69	32.13	6,869.76	23,540.40	2.30	1.40	25.00
PI12	2.05	7.65	4,044.95	9,395.81	3.28	2.39	40.00
PI14	3.00	22.00	5,161.17	18,473.17	2.86	1.75	30.00

Fuente: Elaboración propia

Como se hizo notar en la Tabla 90, se consolidó el valor soporte (CBR) y Módulo Resiliente (M_R) de los suelos en su estado natural y estabilizado, además del Número

Estructural (SN). Teniendo en cuenta dichas variables, se procedió al cálculo de los espesores de reemplazo del material de subrasante, y se identificó lo siguiente:

En los casos de subrasantes pobres, con valores soporte CBR < 6%, se observó que las bajas resistencias de los suelos de subrasante repercutieron en la medida de la rigidez con valores bajos, los cuales variaron de 3,022.14 psi como mínimo a 7,065.07 psi como máximo. Los valores de Módulo Resiliente (M_R) calculados, no cumplieron con los requerimientos mínimos establecidos en el Manual de Carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos, el cual muestra un valor M_R mínimo de 8,043.00 psi. Por ello, señala que los sectores que presenten subrasante de mala calidad, serán materia de estabilización o mejoramiento de suelos. Usando la ecuación de diseño AASHTO-93, se obtuvo el Número Estructural existente (SNe) requerido por tipo de tráfico y de subrasante, cuyos valores variaron de 2.30 como mínimo a 3.50 como máximo.

En los casos de subrasantes adecuadas y estables, con muestras de suelo adicionadas con cemento Portland y valores soporte CBR \geq 6%, se observó que las resistencias de los suelos de subrasante variaron de 7.65% como mínimo a 105.40% como máximo, presentando categorías de subrasante S₂: Subrasante regular, S₃: Subrasante buena, S₄: Subrasante muy buena y S₅: Subrasante excelente; las cuales repercutieron en la medida de la rigidez con valores óptimos que cumplen con el rango mínimo establecido, y variaron de 9,395.81 psi como mínimo a 50,351.09 como máximo. Usando la ecuación de diseño AASHTO-93, se obtuvo el Número Estructural mejorado (SN_m) requerido por tipo de tráfico y de subrasante, cuyos valores variaron de 1.14 como mínimo a 2.39 como máximo.

Habiéndose obtenido los números estructurales correspondientes, se obtuvo el espesor de reemplazo de material de subrasante (E), cuyos valores variaron de 25.00 cm como mínimo a 55.00 cm como máximo. Asimismo, se verificó que la relación CBR (%) - E (cm) es inversamente proporcional, pues a menor resistencia del suelo, mayor espesor de reemplazo de subrasante.

5.8 Análisis del espesor de la capa de afirmado

El Manual de Carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos, establece que las carreteras con revestimiento granular en sus capas superiores y superficie de

rodadura corresponden a carreteras de bajo volumen de tránsito y poseen un número de repeticiones de Ejes Equivalentes de hasta 3000,000 EE.

Asimismo, indica la metodología para el diseño de estructuras de pavimentos cuya superficie de rodadura estará compuesta por material de afirmado en su totalidad, destinada a soportar las cargas del tránsito.

Respecto a los resultados anteriores (Tabla 88), se agrupó la siguiente información (Ver Tabla 92).

Tabla 92. Comparación de los espesores de la capa de afirmado

PI	Nrep de EE 8.2 tn	VALOR SOPORTE (CBR) (%)		ESPESOR DE AFIRMADO (mm)	
		NATURAL	ESTABILIZADO	NATURAL	ESTABILIZADO
PI1	299,671.27	2.60	105.40	480.50	100.26
PI2	296,735.30	1.30	13.75	664.08	183.13
PI6	286,603.52	2.13	29.07	526.87	116.31
PI7	296,801.94	4.90	20.70	342.72	141.75
PI8	148,217.37	4.69	32.13	320.02	101.24
PI14	293,228.12	3.00	22.00	445.63	136.44

Fuente: Elaboración propia

Como se hizo notar en la Tabla 92, se consolidó el Nrep de EE y valor soporte de los suelos (CBR) en su estado natural y estabilizado. Teniendo en cuenta ambas variables, se procedió al dimensionamiento de espesores de afirmado, y se identificó lo siguiente:

En los casos de diseño de estructuras de pavimento con muestras de suelo natural, se observó que las resistencias de los suelos de subrasante variaron de 1.30% como mínimo a 4.90% como máximo, presentando categorías de subrasante S_0 : Subrasante inadecuada y S_1 : Subrasante insuficiente; las cuales repercutieron en las secciones de capas de afirmado con valores considerablemente altos, y variaron de 320.02 mm como mínimo a 664.08 mm como máximo. Los valores de espesores de afirmado calculados, superaron los rangos establecidos en el Manual de Carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos, el cual recomienda un espesor de afirmado máximo de 350 mm; puesto que, son vías destinadas a soportar bajo volumen de tránsito.

En los casos de diseño de estructuras de pavimento con muestras de suelo adicionadas con cemento Portland, se observó que las resistencias de los suelos de subrasante variaron de 13.75% como mínimo a 105.40% como máximo, presentando categorías de subrasante S₃: Subrasante buena, S₄: Subrasante muy buena y S₅: Subrasante excelente; las cuales repercutieron en las secciones de capas de afirmado con valores dentro de los rangos establecidos, y variaron de 100.26 mm como mínimo a 183.13 mm como máximo.

Al comparar los resultados obtenidos, se observó la notable diferencia entre ambos diseños de estructuras de pavimento con suelo natural y suelo estabilizado, verificándose que los suelos de subrasante con proporciones de cemento, no solo mejoran las propiedades del suelo, sino también proporcionan beneficios estructurales al pavimento mediante la reducción de espesores de la capa de afirmado y, por consiguiente, minimizan los costos y materiales que se consumirían en la ejecución del proyecto.

5.9 Contrastación de hipótesis

Inicialmente, el presente estudio planteó una hipótesis general y cuatro hipótesis específicas, como respuestas anticipadas sobre los resultados de nuestra investigación.

Concluido el proyecto de investigación, se procedió a realizar la validación de hipótesis, las cuales se muestran a continuación:

5.9.1 Hipótesis específica 1

H11: Identificando las características físico-mecánicas del material de subrasante se evalúa la aplicación del cemento Portland para el mejoramiento de las propiedades de los suelos en carreteras de bajo volumen de tránsito.

H01: Identificando las características físico-mecánicas del material de subrasante no se evalúa la aplicación del cemento Portland para el mejoramiento de las propiedades de los suelos en carreteras de bajo volumen de tránsito.

De acuerdo a lo establecido en el inciso 5.5 del Capítulo V y Tabla 89, se verificó que:

Los suelos cuya clasificación de grupo correspondió a los A-1-a, A-2-4, A-2-6 y A-4 presentaron plasticidad baja y media entre 3.60 para GP-GM y 11.51 para CL; sin embargo, los suelos cuya clasificación de grupo correspondió a los A-6, A-7-5 y A-7-6, presentaron elevados Índices de Plasticidad entre 12.00 para ML y 44.00 para OH; por lo que, correspondieron a suelos arcillosos y muy arcillosos cuya presencia en una estructura de pavimento es peligrosa.

Asimismo, los suelos cuya clasificación de grupo correspondió a los A-1-a, A-2-4, A-2-6 presentaron una resistencia de suelo CBR = 2.13% para SP-SC, siendo una subrasante inadecuada; y CBR entre 22.60% y 48.30% para SC y GP-GM respectivamente, siendo una subrasante muy buena y/o excelente; sin embargo, los suelos clasificados entre A-4 y A-7 presentaron CBR entre 1.30% y 4.90% para OH y ML respectivamente, siendo una subrasante insuficiente e inadecuada. Por el contrario, 3 tipos de suelos (CL, OL y SC) presentaron CBR superiores al 10%, de 14.02%, 24.05% y 30.80% respectivamente, considerándose subrasantes buenas, muy buenas y/o excelentes.

Almeida (2021) estudió las características de la subrasante de una carretera siendo de baja capacidad portante y ensayó estabilizaciones con 2, 6 y 8% de cemento aumentando el CBR para carreteras de bajo volumen.

Gongora (2019) aplicó a suelos de baja calidad la adición de 4% de cemento incrementando la capacidad portante del mismo.

En conclusión, existen materiales de suelo cuyas propiedades de ingeniería requieren ser mejoradas con proporciones de cemento para la reducción del Índice de Plasticidad (IP) y el aumento de la resistencia.

Por lo anteriormente expuesto, se acepta la hipótesis alternativa (H11) y se rechaza la hipótesis nula (H01).

5.9.2 Hipótesis específica 2

H12: Determinando la dosificación en porcentaje del cemento Portland se relaciona el contenido del agente estabilizador en función a la clasificación de los suelos para el mejoramiento de sus propiedades en carreteras de bajo volumen de tránsito.

H02: Determinando la dosificación en porcentaje del cemento Portland no se relaciona el contenido del agente estabilizador en función a la clasificación de los suelos para el mejoramiento de sus propiedades en carreteras de bajo volumen de tránsito.

De acuerdo a lo establecido en el inciso 5.6 del Capítulo V, se verificó que:

Las proporciones de cemento Portland agregadas al suelo natural de subrasante, variaron en rangos de 1% a 20%; sin embargo, la mayoría de suelos fueron adicionadas con dosificaciones entre 3% y 6% para suelos tipo OH, SC y ML. Por otro lado, los suelos tipo CL, SP-SC adicionados con dosificaciones de 2%, alcanzaron capacidades de carga altas de 16.72% y 29.07% respectivamente.

Golfin (2019) adicionó 7% de cemento para elevar el CBR y disminuir la Plasticidad del terreno de subrasante.

Urcia (2017) adicionó 3% para mejorar la capacidad portante del terreno de subrasante de una carretera.

En conclusión, el contenido de aditivo químico agregado al suelo natural, está estrechamente ligado con el tipo de material existente en el pavimento.

Por lo anteriormente expuesto, se acepta la hipótesis alternativa (H12) y se rechaza la hipótesis nula (H02).

5.9.3 Hipótesis específica 3

H13: El espesor de reemplazo del material de subrasante de suelos con CBR < 6% supera los 20 cm en carreteras de bajo volumen de tránsito.

H03: El espesor de reemplazo del material de subrasante de suelos con CBR < 6% no supera los 20 cm en carreteras de bajo volumen de tránsito.

De acuerdo a lo establecido en el inciso 5.7 del Capítulo V y Tabla 91, se verificó que:

El espesor de reemplazo del material de subrasante para suelos naturales con CBR < 6% fue de 25.00 mm para suelos con CBR de 4.69% y 4.90%; 30.00 mm para suelos con CBR de 3.00%; 40.00 mm para suelos con CBR de 2.05%

y 2.13%; 50 mm para suelos con CBR de 2.60% y 55.00 mm para suelos con CBR de 1.30%.

Por lo anteriormente expuesto, se acepta la hipótesis alternativa (H13) y se rechaza la hipótesis nula (H03).

5.9.4 Hipótesis específica 4

H14: El espesor de la capa de afirmado de pavimentos con subrasante de suelo adicionado con cemento Portland es menor al espesor de pavimentos con subrasante de suelo natural en carreteras de bajo volumen de tránsito.

H04: El espesor de la capa de afirmado de pavimentos con subrasante de suelo adicionado con cemento Portland no es menor al espesor de pavimentos con subrasante de suelo natural en carreteras de bajo volumen de tránsito.

De acuerdo a lo establecido en el inciso 5.8 del Capítulo V y Tabla 91, se verificó que:

En el caso del PI1, el espesor de la capa de afirmado con subrasante de suelo natural fue de 480.50 mm para CBR = 2.60%; sin embargo, al adicionar cemento Portland el espesor de afirmado se redujo a 100.26 mm para CBR = 105.40%.

En el caso del PI2, el espesor de la capa de afirmado con subrasante de suelo natural fue de 664.08 mm para CBR = 1.30%; sin embargo, al adicionar cemento Portland el espesor de afirmado se redujo a 183.13 mm para CBR = 13.75%.

En el caso del PI6, el espesor de la capa de afirmado con subrasante de suelo natural fue de 526.87 mm para CBR = 2.13%; sin embargo, al adicionar cemento Portland el espesor de afirmado se redujo a 116.31 mm para CBR = 29.07%.

En el caso del PI7, el espesor de la capa de afirmado con subrasante de suelo natural fue de 342.72 mm para CBR = 4.90%; sin embargo, al adicionar cemento Portland el espesor de afirmado se redujo a 141.75 mm para CBR = 20.70%.

En el caso del PI8, el espesor de la capa de afirmado con subrasante de suelo natural fue de 320.02 mm para CBR = 4.69%; sin embargo, al adicionar cemento Portland el espesor de afirmado se redujo a 101.24 mm para CBR = 32.13%.

En el caso del PI14, el espesor de la capa de afirmado con subrasante de suelo natural fue de 445.63 mm para CBR = 3.00%; sin embargo, al adicionar cemento Portland el espesor de afirmado se redujo a 136.44 mm para CBR = 22.00%.

Por lo anteriormente expuesto, se acepta la hipótesis alternativa (H14) y se rechaza la hipótesis nula (H04).

5.9.5 Hipótesis general

Habiendo sido validadas las hipótesis alternativas (H11, H12, H13 y H14), entonces se valida la hipótesis general: La dosificación en porcentaje del cemento Portland para el mejoramiento de las propiedades de los suelos depende de los tipos de suelos existentes en carreteras de bajo volumen de tránsito.

CONCLUSIONES

1. La dosificación en porcentaje del cemento Portland para el mejoramiento de las propiedades de plasticidad y resistencia se encuentran en los rangos de 2% a 8%.
2. La presencia de materiales de suelo natural con características físico-mecánicas permisibles no representa riesgo en la estructura del pavimento de una carretera; sin embargo, los suelos cuya condición sea inadecuada, por alta plasticidad y baja capacidad de soporte, causarán inestabilidad durante la actividad de construcción. En tanto, sus propiedades de ingeniería requieren ser mejoradas con dosificaciones adecuadas de cemento para reducir eficazmente el IP y aportar una mejora en la resistencia a las cargas de trabajo.
3. La dosificación en porcentaje del cemento Portland depende de varios factores, que incluyen: conocimiento del tipo de suelo; propiedades de ingeniería del material natural; y uso del cemento para el tratamiento del suelo, ya sea a través de Suelo modificado con cemento (CMS), Subrasante estabilizada con cemento (CSS) o Base tratada con cemento (CTB). Sin embargo, podemos indicar que el promedio general se encuentra entre 3 y 6 % de adición de cemento.
4. El espesor de reemplazo del material de subrasante depende de su resistencia o valor soporte (CBR), significa que cuanto menor sea la capacidad de carga del suelo natural existente en la estructura del pavimento, por tratarse de suelos inestables o blandos, mayor será la remoción de acuerdo al espesor de reemplazo. Aplicando suelos estabilizados con cemento, se evita el reemplazo de los mismos.
5. El espesor de la capa de afirmado de pavimentos con subrasante de suelo adicionado con cemento Portland se reduce en comparación con el espesor de afirmado aplicado sobre subrasante de suelo natural, en un 50% aproximadamente.

RECOMENDACIONES

1. Continuar investigando la estabilización con cemento, particularmente desde el punto de vista económico, a fin de ver la rentabilidad.
2. Continuar investigando en forma experimental en tramos de prueba, en convenio con las empresas productoras de cemento.
3. Se deben realizar ensayos de laboratorio por tipo de suelo a estabilizar, a fin de determinar el perfil y varias propiedades del material, incluido el contenido de humedad, las características de plasticidad y la capacidad de carga; puesto que, cada muestra de suelo posee una condición física, química y mecánica específica.
4. Es importante caracterizar correctamente el suelo para determinar el contenido de cemento apropiado que se debe agregar.
5. Considerar la estabilización de suelos con cemento Portland, como una alternativa de solución que ayude a extender la vida útil del pavimento, proporcionando un suelo estable y duradero y, por consiguiente, minimizando los costos y materiales que se consumirían para rehabilitar o reconstruir el pavimento.
6. Sugerir a futuras investigaciones, continuar el estudio de suelos tratados con cemento Portland, aplicado desde la técnica de Pavimentos Unicapa que considera proporciones considerablemente altas de aditivo químico.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alata, J., & Vasquez, R. (2019). *Estudio exploratorio de estabilización con cemento portland de subrasante de suelo areno-arcilloso en carretera no pavimentada "El Paujil"*, Loreto. Iquitos, 2019. Loreto: Recuperado de: <http://repositorio.ucp.edu.pe/handle/UCP/803>.
- Aliaga, F., & Soriano, C. (2019). *Análisis comparativo de estabilización con cemento portland y emulsión asfáltica en bases granulares*. Lima: Recuperado de: <http://repositorio.urp.edu.pe/handle/URP/2673>.
- Almeida , V., & Hidalgo, D. (2016). *Análisis comparativo de los procesos de estabilización de suelo con enzimas orgánicas y suelo-cemento, aplicado a suelos arcillosos de sub-rasante*. Ambato: Recuperado de: <https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/24610>.
- Almeida, M. (2021). *Diseño del suelo-cemento y su aplicación como material de sitio para la construcción del camino vecinal del Reinto Zapán*. Guayaquil: Recuperado de: <http://repositorio.ulvr.edu.ec/handle/44000/4277>.
- American Concrete Institute. (2009). *Report on Soil Cement*. United States.
- Analistas Económicos de Andalucía. (2001). Las infraestructuras de transporte del eje mediterráneo andaluz: efectos socioeconómicos. En *El Transporte: importancia económica y social*. Andalucía.
- Atienza, M., Diaz, J., Fernández, J. A., Garrido, L., Jofré, C., Kraemer, C., & Vera, M. (2008). *Manual de Estabilización de Suelos con Cemento o Cal*. Madrid: Vaquero Servicios de Publicaciones, 15-16.
- Bandara, W. W., Mampearachchi, W. K., & Sampath, K. S. (February de 2017). *Cement stabilized soil as a road base material for use in Sri Lankan roads*. Journal of the Institution of Engineers. Sri Lanka: Recuperado de: http://iesl.nsf.ac.lk/bitstream/handle/1/1988/Engineer_50_1_21.pdf?sequence=2&isAllowed=y.
- Barrera, J., Picaron, C., & Rojas, H. I. (2007). *Análisis comparativo de la estabilización de una base granular*. Bogotá.
- Braja, D. (2011). *Fundamentos de ingeniería de cimentaciones*. España.

- Castillo, P. (2018). *Influencia de la aplicación de aditivos químicos en la estabilización de suelos cohesivos para uso como subrasante mejorada de pavimentos entre los sectores Calamarca - Huaso, La Libertad, 2018 (Tesis de licenciatura)*. La Libertad: Repositorio de la Universidad Privada del Norte. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/11537/13798>.
- Castro, A., & Navarro, J. (2019). *Análisis de mejora de suelos arcillosos de alta plasticidad a nivel de subrasante mediante adición de cemento Portland para disminuir el cambio volumétrico*. Lima: Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas. Lima. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/10757/626119>.
- Cedeño, D. (2013). *Investigación de la estabilización desuelos con enzima aplicado a la sub-rasante de la Avenida Quitumbe - Ñan, Catón Quito*. Quito.
- Crespo, C. (2004). *Mecánica de suelos y cimentaciones*. México.
- Cuzo, S. (2019). *Mejoramiento de la subrasante incorporando el estabilizador cemento Portland Tipo I, en la Asociación los Rosales II, distrito de Carabayllo, 2019*. Cusco: Recuperado de:.
- De la Cruz, L., & Salcedo, K. (2016). *Estabilización de suelos cohesivos por medio de aditivos (Eco Road 2000) para pavimentación en Palian - Huancayo - Junín*. Huancayo.
- El Peruano. (27 de marzo de 2014). NORMAS LEGALES. *El Peruano*, pág. 2.
- Elizondo, F., & Sibaja, D. (2008). *Guía para la estabilización y mejoramiento de rutas no pavimentadas*. Costa Rica: Recuperado de: <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/handle/50625112500/1468>.
- García, L., & Romero, A. (2019). *Verificación de resistencia entre la estabilización de suelo-cemento y la estabilización con suelo-cemento y fibra de fique (Bachelor's thesis, Universidad de Ibagué)*. Ibagué: Recuperado de: <https://hdl.handle.net/20.500.12313/1812>.
- García, J. R. (2019). *Estudio de la técnica de suelo-cemento para la estabilización de vías terciarias en Colombia que posean un alto contenido de caolín*. Bogotá: Repositorio Institucional Universidad Católica de Colombia. Recuperado de: <https://hdl.handle.net/10983/23731>.

- Gavilanes, E. (2015). *Estabilización y mejoramiento de sub-rasante mediante cal y cemento para una obra vial en el sector de Santos Pamba Barrio Colinas del Sur (Bachelor's thesis, Quito/UIDE/2015)*. Ecuador: Recuperado de: <https://repositorio.uide.edu.ec/handle/37000/2191>.
- Golfín, K. A. (2019). *Mejoramiento del desempeño en la estabilización de suelos de subrasantes con cemento hidráulico en vías no pavimentadas*. Cartago: Repositorio Institucional del Tecnológico de Costa Rica. Recuperado de: <https://hdl.handle.net/2238/10990>.
- Gongora, C. K. (2019). *Influencia de la cal y el cemento Portland tipo I en la subrasante de la trocha del distrito de Chillia, provincia de Patas - 2019 (Tesis de licenciatura)*. Lima: Repositorio de la Universidad Privada del Norte. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/11537/21168>.
- González, L. I., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2002). *Ingeniería geológica*. Madrid: Pearson Educación.
- Gross, J., & Adaska, W. (2020). Guide to Cement-Stabilized Subgrade Soils. *Portland Cement Association*, 59.
- Guevara, J., & Salazar, L. (2021). *Comparación técnica y económica de base granular estabilizada con cemento Portland tipo I y emulsión asfáltica para el camino de bajo volumen de tránsito de la ruta LI-113, distrito de Charat, Usquil, Huaranchal, Otuzco, La Libertad*. La Libertad: Recuperado de: <https://hdl.handle.net/20.500.12759/7742>.
- Gutiérrez, C. A. (2010). *Estabilización química de carreteras no pavimentadas en el Perú y ventajas comparativas del cloruro de magnesio (bischofita) frente al cloruro de calcio*. Lima.
- Hicks, R. G. (2002). *Alaska Soil Stabilization Design Guide*. Oregon: Recuperado de: https://dot.alaska.gov/stwddes/research/assets/pdf/fhwa_ak_rd_01_06b.pdf.
- Hoppe, E. J., & Nair, H. (2017). *Cement stabilization of unpaved roads*. Virginia: Virginia Transportation Research Council.
- Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones. (2016). *Componentes y Propiedades del Cemento*. España.

- Kestler, M. A. (2009). *Stabilization selection guide for aggregate-and native-surfaced low-volume roads*. US: US Department of Agriculture, Forest Service, National Technology & Development Program.
- Menendez, J. R. (2012). *Ingeniería de pavimentos*. Lima: ICG.
- Minguela, J. D., & Rodríguez, A. S. (2008). *La adecuada elección del conglomerante en la estabilización de suelos*. Valladolid: In VIII Congreso Nacional de Firmes: Valladolid del 21 al 23 de octubre de 2008 (pp. 161-170).
- Ministerio de Economía y Finanzas. (2015). *Pautas metodológicas para el desarrollo de alternativas de pavimentos en la formulación y evaluación social de proyectos de inversión pública de carreteras*. Lima: Ministerio de Economía y Finanzas.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2008). *MANUAL DE DISEÑO DE CARRETERAS NO PAVIMENTADAS DE BAJO VOLUMEN DE TRÁNSITO*. Lima: Ministerio de Transportes y Comunicaciones.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2008). *MANUAL PARA EL DISEÑO DE CARRETERAS PAVIMENTADAS DE BAJO VOLUMEN DE TRÁNSITO*. Lima: Ministerio de Transportes y Comunicaciones.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2014). Manual de Carreteras. En *Sección: Suelos y Pavimentos*. Recuperado de: https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/documentos/manuales/MANUALES%20DE%20CARRETERAS%202019/MC-05-14%20Seccion%20Suelos%20y%20Pavimentos_Manual_de_Carreteras_OK.pdf
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2018). *Glosario de términos*. Lima: Recuperado de: http://transparencia.mtc.gob.pe/idm_docs/normas_legales/1_0_4032.pdf.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2018). *MANUAL DE CARRETERAS: DISEÑO GEOMÉTRICO DG - 2018*. Lima: Ministerio de Transportes y Comunicaciones.

- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2020). *Informe Multianual de Inversiones en Asociaciones Público Privadas*. Perú: https://www.mef.gob.pe/contenidos/inv_privada/app/IMIAPP_MTC_2020.pdf.
- Montejo, A. (2002). *Ingeniería de pavimentos para carreteras* (2da ed.). Bogotá, Colombia: Ágora.
- Pezo, F. G. (2018). *Mejoramiento y rehabilitación de la carretera vecinal Juan Guerra-Bello Horizonte con estabilización de suelo cemento del terreno de fundación y capa de afirmado, distrito de Juan Guerra, provincia de San Martín, Región San Martín (Tesis de licenciatura)*. Tarapoto: Repositorio de la Universidad Nacional de San Martín-Tarapoto. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/11458/2910>.
- Portland Cement Association. (2020). *Cement-Stabilized Subgrade Soils*. United States.
- Rico, & Del Castillo. (2005). *La Ingeniería de Suelos en las Vías Terrestres: Carreteras, Ferrocarriles y Aeropistas*. México: Recuperado de: <https://books.google.com.pe/books?id=d042vJAKVK8C&pg=PA493&dq=ESTABILIZACION#v=onepage&q=ESTABILIZACION&f=false>.
- Roziawati , R., & Mohamad, S. (Abril de 2019). The usage of cement for soil stabilisation in construction of low volume roads in Malaysia. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 512(1), 12.
- Sánchez, M. (2014). *Estabilización de suelos expansivos con cal y cemento en el sector*. Ecuador.
- Terzagui, K., & Peck, R. (1973). *Mecánica de suelos en la ingeniería práctica*. España.
- TM, A. (1994). *SOIL STABILIZATION FOR PAVEMENTS*. DEPARTMENT OF THE ARMY, THE NAVY, AND THE AIR FORCE.
- Transportation Officials. (1993). *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures 1993 (Vol. 1)*.
- Urcia, F. R. (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*. Lima: Repositorio de la Universidad César Vallejo. Recuperado de: <https://hdl.handle.net/20.500.12692/23128>.

Valencia , S. (2020). *Estabilización de suelo con cemento en la ruta LI-877 Comunidad Campesina La Victoria-Distrito de Tayabamba-Provincia De Pataz-Región La Libertad*, 2020. La Libertad.

Velásquez, C. (2018). *Influencia del cemento portland tipo I en la estabilización del suelo arcilloso de la subrasante de la avenida Dinamarca, sector La Molina*. Cajamarca: Recuperado de: <http://hdl.handle.net/11537/13798>.

ANEXOS

Anexo 1: Matriz de Consistencia

PROBLEMAS	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	DIMENSIONES	INDICADORES	METODOLOGÍA
PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPÓTESIS GENERAL	VARIABLE INDEPENDIENTE X1: Propiedades de los suelos	Propiedades físicas de los suelos	Humedad Natural	MÉTODO DE INVESTIGACIÓN Método: Deductivo Orientación: Aplicada Enfoque: Cualitativo Fuente de Recolección de Datos: Retrolectiva TIPO DE INVESTIGACIÓN Descriptiva Explicativa NIVEL DE INVESTIGACIÓN Descriptiva DISEÑO DE INVESTIGACIÓN Observacional Longitudinal Retrospectiva POBLACIÓN Carreteras de bajo volumen de tránsito MUESTRA Suelo existente en las carreteras de bajo volumen de tránsito TÉCNICA Recopilación de Información Bibliográfica INSTRUMENTOS Registro de resultados de Ensayos de Laboratorio Cuadros de Registro de Información
¿Cómo es la dosificación en porcentaje del cemento Portland para el mejoramiento de las propiedades de los suelos en carreteras de bajo volumen de tránsito?	Evaluar la dosificación en porcentaje del cemento Portland para el mejoramiento de las propiedades de los suelos en carreteras de bajo volumen de tránsito, año 2021.	La dosificación en porcentaje del cemento Portland para el mejoramiento de las propiedades de los suelos depende de los tipos de suelos existentes en carreteras de bajo volumen de tránsito.			Granulometría	
PROBLEMAS ESPECÍFICOS	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	HIPÓTESIS ESPECÍFICAS			Límite Líquido	
a) ¿Cuáles son las características físico-mecánicas del material de subrasante en carreteras de bajo volumen de tránsito?	a) Identificar las características físico-mecánicas del material de subrasante en carreteras de bajo volumen de tránsito.	a) Identificando las características físico-mecánicas del material de subrasante se evalúa la aplicación del cemento Portland para el mejoramiento de las propiedades de los suelos en carreteras de bajo volumen de tránsito.			Límite Plástico	
b) ¿Cuál es la dosificación en porcentaje del cemento Portland para el mejoramiento de las propiedades de los suelos en carreteras de bajo volumen de tránsito?	b) Determinar la dosificación en porcentaje del cemento Portland para el mejoramiento de las propiedades de los suelos en carreteras de bajo volumen de tránsito.	b) Determinando la dosificación en porcentaje del cemento Portland se relaciona el contenido del agente estabilizador en función a la clasificación del suelo para el mejoramiento de sus propiedades en carreteras de bajo volumen de tránsito.			Índice de Plasticidad	
c) ¿Cuál es el espesor de reemplazo del material de subrasante en carreteras de bajo volumen de tránsito?	c) Calcular el espesor de reemplazo del material de subrasante, aplicando la normativa vigente del MTC, en carreteras de bajo volumen de tránsito.	c) El espesor de reemplazo del material de subrasante en suelos con CBR < 6% supera los 20 cm en carreteras de bajo volumen de tránsito.			Clasificación de los suelos	
d) ¿Cuál es el espesor de la capa de afirmado de pavimentos con subrasante de suelo adicionado con cemento Portland en carreteras de bajo volumen de tránsito?	d) Calcular el espesor de la capa de afirmado de pavimentos con subrasante de suelo adicionado con cemento Portland, aplicando el método NASSRA, en carreteras de bajo volumen de tránsito.	d) El espesor de la capa de afirmado de pavimentos con subrasante de suelo adicionado con cemento Portland es menor al espesor de afirmado de pavimentos con subrasante de suelo natural en carreteras de bajo volumen de tránsito.			Máxima Densidad Seca	
					Humedad Óptima	
					Resistencia	
					VARIABLE DEPENDIENTE Y1: Dosificación en porcentaje del cemento Portland	

Fuente: Elaboración propia

Anexo 2: Operacionalización de variables

VARIABLE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	UNIDAD DE MEDIDA	ESCALA	INSTRUMENTO	HERRAMIENTA
VARIABLE INDEPENDIENTE X1: Propiedades de los suelos	Características físicas y mecánicas del suelo, las cuales dependen de un gran número de factores, entre éstos se incluyen la situación geográfica y las condiciones climáticas, tales como la temperatura y humedad. Además, dependen de otros factores externos como los producidos por el tránsito de vehículos (velocidad, configuración de ejes, neumáticos, y otros).	Se recopiló información sobre las propiedades de los suelos (humedad natural, granulometría, límites de consistencia, clasificación de los suelos, máxima densidad seca, humedad óptima y resistencia) obtenidas mediante ensayos de laboratorio en investigaciones precedentes.	Propiedades físicas de los suelos	Humedad Natural	Porcentual (%)	Cuantitativa continua	Registro de resultados de Ensayos de Laboratorio	MTC E 108, ASTM D 2216
				Granulometría	Adimensional	Cuantitativa continua		MTC E 107, ASTM D 422
				Límite Líquido	Adimensional	Cuantitativa continua		MTC E 110, NTP 339.129
				Límite Plástico	Adimensional	Cuantitativa continua		MTC E 111, NTP 339.129
				Índice de Plasticidad	Adimensional	Cuantitativa continua		MTC E 111, NTP 339.129
				Clasificación de los suelos	Adimensional	Cualitativa ordinal		ASTM D 2487, AASHTO M 145
			Propiedades mecánicas de los suelos	Máxima Densidad Seca	gr/cm ³	Cuantitativa continua		MTC E 115, NTP 339.141, ASTM D 1557
				Humedad Óptima	Porcentual (%)	Cuantitativa continua		MTC E 115, NTP 339.141, ASTM D 1557
				Resistencia	Porcentual (%)	Cuantitativa continua		MTC E 132, ASTM D 1883
VARIABLE DEPENDIENTE Y1: Dosificación en porcentaje del cemento Portland	Agente estabilizador cuya adición al material de suelo logra transformarlo en una masa cementada con incremento en resistencia y durabilidad.	A la muestra de suelo natural extraída del tramo de estudio, se adicionará contenidos iniciales (estimados) de cemento en función del tipo de suelo.	Aditivo estabilizador	Dosificación del cemento Portland	Porcentual (%)	Cuantitativa continua		NTP 334.009, ASTM C 150

Fuente: Elaboración propia

Anexo 3: Resumen del Proyecto de Investigación PII

PROYECTO	ANÁLISIS DE MEJORA DE SUELOS ARCILLOSOS DE ALTA PLASTICIDAD A NIVEL DE SUBRASANTE MEDIANTE ADICIÓN DE CEMENTO PORTLAND PARA DISMINUIR EL CAMBIO VOLUMÉTRICO			
TESISTA(S)	BACH. CASTRO GONZALES, MILAGROS ALESSANDRA BACH. NAVARRO PEREYRA, JESUS DAVID			
UBICACIÓN	PASCO			
AÑO	2019			
DATOS DE LA MUESTRA				
OBSERVACIONES:	IMDA	57 veh/día		
	FECHA DE MUESTREO	19/07/2019		
ENSAYOS DE LABORATORIO DE SUELOS				
MUESTRA DE SUELO ELEGIDA (MÁS DESFAVORABLE)				
HUMEDAD NATURAL	29.37%			
LÍMITE LÍQUIDO	66.10			
LÍMITE PLÁSTICO	26.90			
ÍNDICE DE PLASTICIDAD	39.20			
CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS:				
CLASIFICACIÓN SUCS	CH			
CLASIFICACIÓN AASHTO	A-7-6 (45)			
ADITIVO ESTABILIZADOR	0%	10%	15%	20%
ENSAYOS PARA COMPROBAR LA ESTABILIZACIÓN:				
PROCTOR MODIFICADO:				
MÁXIMA DENSIDAD SECA	1.827 gr/cm ³	1.831 gr/cm ³	1.832 gr/cm ³	1.833 gr/cm ³
HUMEDAD ÓPTIMA	14.30%	14.60%	15.00%	15.20%
CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR):				
CBR (100% MDS Y 0.1" DE PENETRACIÓN)	3.30%	130.80%	116.70%	153.60%
CBR (95% MDS Y 0.1" DE PENETRACIÓN)	2.60%	105.40%	108.00%	138.70%
CBR (100% MDS Y 0.2" DE PENETRACIÓN)	3.00%	105.80%	111.80%	146.30%
CBR (95% MDS Y 0.2" DE PENETRACIÓN)	2.30%	91.90%	104.70%	129.30%
EXPANSIÓN DEL SUELO	8.12%	2.98%	4.24%	3.54%

Fuente: Castro y Navarro (2019)

PROYECTO	INFLUENCIA DEL CEMENTO PORTLAND TIPO I EN LA ESTABILIZACIÓN DEL SUELO ARCILLOSO DE LA SUBRASANTE DE LA AVENIDA DINAMARCA, SECTOR LA MOLINA			
TESISTA(S)	BACH. VELÁSQUEZ PEREYRA, CÉSAR			
UBICACIÓN	CAJAMARCA			
AÑO	2018			
DATOS DE LA MUESTRA				
OBSERVACIONES:	LONGITUD	1,070.00 m		
	ANCHO	8.00 m		
	ÁREA	8,560.00 m ²		
	IMDA	66 veh/día		
	FECHA DE MUESTREO	01/06/2017		
	NÚMERO DE CALICATAS	4 calicata(s)		
	PROFUNDIDAD	1.50 m		
ENSAYOS DE LABORATORIO DE SUELOS				
CLASIFICACIÓN E IDENTIFICACIÓN DEL SUELO				
CALICATA	C1	C2	C3	C4
MUESTRA	M1	M2	M3	M4
ESTRATO	E2	E2	E2	E2
PROFUNDIDAD DE ESTRATO	0.25 a 1.50 m	0.35 a 1.50 m	0.30 a 1.50 m	0.35 a 1.50 m
ENSAYOS PARA DETERMINAR EL SUELO MÁS DESFAVORABLE:				
HUMEDAD NATURAL	33.55%	32.78%	32.80%	28.73%
% QUE PASA POR EL TAMIZ DE:				
2 mm (N°10)	94.44	98.00	99.22	98.54
0.425 mm (N° 40)	89.36	93.50	95.74	88.24
F: 0.075 mm (N° 200)	73.18	78.38	78.22	65.02
LÍMITE LÍQUIDO	58.00	73.00	54.00	45.00
LÍMITE PLÁSTICO	23.00	29.00	24.00	21.00
ÍNDICE DE PLASTICIDAD	35.00	44.00	30.00	24.00
ÍNDICE DE GRUPO	26	37	24	14
ÍNDICE DE LIQUIDEZ	0.30	0.09	0.29	0.32
CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS:				
CLASIFICACIÓN SUCS	CH	OH	OH	CL
CLASIFICACIÓN AASHTO	A-7-6 (26)	A-7-6 (37)	A-7-6 (24)	A-7-6 (14)
SUELO MÁS DESFAVORABLE	C2-M2			

Fuente: Velásquez (2018)

MUESTRA DE SUELO ELEGIDA (MÁS DESFAVORABLE)				
CALICATA				C2
MUESTRA				M2
ESTRATO				E2
PROFUNDIDAD DE ESTRATO				0.35 a 1.50 m
HUMEDAD NATURAL				32.78%
CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS:				
CLASIFICACIÓN SUCS				OH
CLASIFICACIÓN AASHTO				A-7-6 (37)
ADITIVO ESTABILIZADOR	0%	1%	3%	5%
ENSAYOS PARA COMPROBAR LA ESTABILIZACIÓN:				
LÍMITE LÍQUIDO	73.00	71.00	66.00	63.00
LÍMITE PLÁSTICO	29.00	35.00	43.00	48.00
LÍMITE DE CONTRACCIÓN	2.00	9.00	21.00	29.00
ÍNDICE DE PLASTICIDAD	44.00	36.00	23.00	15.00
ÍNDICE DE CONTRACCIÓN	27.00	26.00	22.00	19.00
RELACIÓN DE CONTRACCIÓN	2.34	1.93	1.53	1.42
GRADO DE CONTRACCIÓN	51.42	42.51	30.77	21.86
PROCTOR MODIFICADO:				
MÁXIMA DENSIDAD SECA	1.615 gr/cm ³	1.680 gr/cm ³	1.708 gr/cm ³	1.735 gr/cm ³
HUMEDAD ÓPTIMA	18.90%	17.90%	17.04%	16.40%
CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR):				
CBR (100% MDS Y 0.1" DE PENETRACIÓN)	1.44%	4.45%	7.70%	15.70%
CBR (95% MDS Y 0.1" DE PENETRACIÓN)	1.30%	3.50%	6.63%	13.75%
HINCHAMIENTO PROMEDIO	6.61%	6.52%	4.70%	3.23%

Fuente: Velásquez (2018)

Anexo 5: Resumen del Proyecto de Investigación PI3

PROYECTO	DISEÑO DEL SUELO-CEMENTO Y SU APLICACIÓN COMO MATERIAL DE SITIO PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL CAMINO VECINAL DEL RECINTO ZAPÁN			
TESISTA(S)	BACH. CEVALLOS CHAVEZ, CLAUDIO ATKINSON BACH. DE LA CRUZ ERIQUE, JOSE ENRIQUE			
UBICACIÓN	GUAYAQUIL			
AÑO	2021			
DATOS DE LA MUESTRA				
OBSERVACIONES:	LONGITUD	1,180.00 m		
	ANCHO	5.00 m		
	ÁREA	5,900.00 m ²		
	IMDA	190 veh/día		
	FECHA DE MUESTREO	01/01/2021		
	NÚMERO DE CALICATAS	1 calicata(s)		
	PROFUNDIDAD	1.50 m		
ENSAYOS DE LABORATORIO DE SUELOS				
CLASIFICACIÓN E IDENTIFICACIÓN DEL SUELO				
CALICATA	C1			
MUESTRA	M1	M2	M3	
ESTRATO	E1	E2	E3	
PROFUNDIDAD DE ESTRATO	0.00 a 0.50 m	0.50 a 1.00 m	1.00 a 1.50 m	
ENSAYOS PARA DETERMINAR EL SUELO MÁS DESFAVORABLE:				
HUMEDAD NATURAL	14.71%	15.90%	22.46%	
% QUE PASA POR EL TAMIZ DE:				
2 mm (N°10)	86.69	100.00	98.38	
0.425 mm (N° 40)	77.63	92.10	95.26	
F: 0.075 mm (N° 200)	46.82	54.79	13.43	
LÍMITE LÍQUIDO	29.30	32.30	28.00	
LÍMITE PLÁSTICO	11.79	11.76	9.19	
ÍNDICE DE PLASTICIDAD	17.51	20.54	18.81	
CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS:				
CLASIFICACIÓN SUCS	GW	CL	CL	
SUELO MÁS DESFAVORABLE	M2			
MUESTRA DE SUELO ELEGIDA (MÁS DESFAVORABLE)				
MUESTRA	M2			
ESTRATO	E2			
PROFUNDIDAD DE ESTRATO	0.50 a 1.00 m			
CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS:				
CLASIFICACIÓN SUCS	CL			
ADITIVO ESTABILIZADOR	0%	2%	6%	8%
ENSAYOS PARA COMPROBAR LA ESTABILIZACIÓN:				
HUMEDAD NATURAL	15.90%	-	-	11.99%
LÍMITE LÍQUIDO	32.30	-	-	24.79
LÍMITE PLÁSTICO	11.76	-	-	10.16
ÍNDICE DE PLASTICIDAD	20.54	-	-	14.63
PROCTOR MODIFICADO:				
MÁXIMA DENSIDAD SECA	1.852 gr/cm ³	1.900 gr/cm ³	1.970 gr/cm ³	2.030 gr/cm ³
HUMEDAD ÓPTIMA	11.29%	10.00%	-	-
CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR):				
CBR (95% MDS Y 0.1" DE PENETRACIÓN)	14.02%	16.72%	17.50%	19.63%

Fuente: Cevallos y De la Cruz (2021)

Anexo 6: Resumen del Proyecto de Investigación PI4

PROYECTO	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 HUANCVELICA, 2017					
TESISTA(S)	BACH. URCIA GARCÍA, FRANCISCO RICARDO					
UBICACIÓN	HUANCVELICA					
AÑO	2017					
DATOS DE LA MUESTRA						
OBSERVACIONES:	LONGITUD	36,500.00 m				
	IMDA	55 veh/día				
	FECHA DE MUESTREO	01/01/2017				
	NÚMERO DE CALICATAS	6 calicata(s)				
	PROFUNDIDAD	1.50 m				
ENSAYOS DE LABORATORIO DE SUELOS						
CLASIFICACIÓN E IDENTIFICACIÓN DEL SUELO						
CALICATA	C1	C2	C3	C4	C5	C6
MUESTRA	M1	M2	M3	M4	M5	M6
ESTRATO	E2	E2	E2	E2	E2	E2
PROFUNDIDAD DE ESTRATO	1.20 a 1.50 m	0.50 a 1.50 m	0.20 a 1.50 m	0.40 a 1.50 m	0.35 a 1.50 m	0.10 a 1.50 m
ENSAYOS PARA DETERMINAR EL SUELO MÁS DESFAVORABLE:						
HUMEDAD NATURAL	10.93%	7.76%	8.83%	14.31%	10.17%	10.78%
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO						
% QUE PASA POR EL TAMIZ DE:						
2 mm (N°10)	64.75	48.36	66.59	68.53	82.41	82.39
0.425 mm (N° 40)	51.49	32.66	51.82	59.87	62.76	62.27
F: 0.075 mm (N° 200)	37.65	21.68	36.69	48.55	41.37	35.49
LÍMITE LÍQUIDO	30.52	28.07	27.43	33.6	24.82	24.79
LÍMITE PLÁSTICO	14.61	18.88	15.9	21.83	14.29	16.86
ÍNDICE DE PLASTICIDAD	15.92	9.19	11.52	11.78	10.52	7.92
CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS:						
CLASIFICACIÓN SUCS	SC	SC	SC	GC	SC	SC
CLASIFICACIÓN AASHTO	A-6 (0)	A-2-4 (0)	A-6 (0)	A-6 (0)	A-6 (0)	A-2-4 (0)
SUELO MÁS DESFAVORABLE	C1-M1					
MUESTRA DE SUELO ELEGIDA (MÁS DESFAVORABLE)						
CALICATA	C1					
MUESTRA	M1					
ESTRATO	E2					
PROFUNDIDAD DE ESTRATO	1.20 a 1.50 m					
ADITIVO ESTABILIZADOR	0%		3%			
ENSAYOS PARA COMPROBAR LA ESTABILIZACIÓN:						
HUMEDAD NATURAL	10.93%		5.28%			
CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS:						
CLASIFICACIÓN SUCS	SC		SC			
CLASIFICACIÓN AASHTO	A-6 (0)		A-2-6 (0)			
LÍMITE LÍQUIDO	30.52		31.88			
LÍMITE PLÁSTICO	14.61		N.P.			
ÍNDICE DE PLASTICIDAD	15.92		N.P.			
PROCTOR MODIFICADO:						
MÁXIMA DENSIDAD SECA	2.123 gr/cm ³		2.240 gr/cm ³			
HUMEDAD ÓPTIMA	8.40%		5.40%			
CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR):						
CBR (100% MDS Y 0.1" DE PENETRACIÓN)	70.70%		80.00%			
CBR (95% MDS Y 0.1" DE PENETRACIÓN)	30.80%		51.00%			

Fuente: Urcia (2017)

Anexo 7: Resumen del Proyecto de Investigación PI5

PROYECTO	ESTUDIO EXPLORATORIO DE ESTABILIZACIÓN CON CEMENTO PORTLAND DE SUBRASANTE DE SUELO ARENO-ARCILLOSO EN CARRETERA NO PAVIMENTADA "EL PAUJIL" - LORETO - IQUITOS, 2019			
TESISTA(S)	BACH. ALATA MESTANZA, JHANK PIER BACH. VÁSQUEZ JO, ROQUE CÉSAR			
UBICACIÓN	LORETO			
AÑO	2019			
DATOS DE LA MUESTRA				
OBSERVACIONES:	LONGITUD	10,000.00 m		
	IMDA	52 veh/día		
	FECHA DE MUESTREO	01/01/2019		
	NÚMERO DE CALICATAS	1 calicata(s)		
	PROFUNDIDAD	1.50 m		
ENSAYOS DE LABORATORIO DE SUELOS				
MUESTRA DE SUELO ELEGIDA (MÁS DESFAVORABLE)				
HUMEDAD NATURAL	32.78%			
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO				
% QUE PASA POR EL TAMIZ DE:				
2 mm (N°10)	99.54			
0.425 mm (N° 40)	98.52			
F: 0.075 mm (N° 200)	28.65			
LÍMITE LÍQUIDO	29.61			
LÍMITE PLÁSTICO	21.85			
ÍNDICE DE PLASTICIDAD	7.76			
CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS:				
CLASIFICACIÓN SUCS	SC			
CLASIFICACIÓN AASHTO	A-2-4 (0)			
ADITIVO ESTABILIZADOR	0%	4%	6%	8%
ENSAYOS PARA COMPROBAR LA ESTABILIZACIÓN:				
PROCTOR MODIFICADO:				
MÁXIMA DENSIDAD SECA	1.878 gr/cm ³	1.893 gr/cm ³	1.890 gr/cm ³	1.880 gr/cm ³
HUMEDAD ÓPTIMA	12.44%	11.97%	12.86%	12.59%
CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR):				
CBR (100% MDS Y 0.1" DE PENETRACIÓN)	44.44%	213.51%	224.29%	276.24%
CBR (95% MDS Y 0.1" DE PENETRACIÓN)	22.60%	138.00%	148.00%	258.00%
EXPANSIÓN DEL SUELO:				
12 GOLPES	0.96%	0.00%	0.00%	0.00%
25 GOLPES	0.72%	0.00%	0.00%	0.00%
56 GOLPES	0.42%	0.00%	0.00%	0.00%

Fuente: Alata y Vásquez (2019)

Anexo 8: Resumen del Proyecto de Investigación PI6

PROYECTO	INFLUENCIA DE LA CAL Y EL CEMENTO PORTLAND TIPO I EN LA SUBRASANTE DE LA TROCHA DEL DISTRITO DE CHILLIA, PROVINCIA DE PATAZ - 2019					
TESISTA(S)	BACH. GONGORA VELASQUEZ, CINTHIA KAREL					
UBICACIÓN	TRUJILLO					
AÑO	2019					
DATOS DE LA MUESTRA						
OBSERVACIONES:	LONGITUD	4,000.00 m				
	IMDA	39 veh/día				
	FECHA DE MUESTREO	01/01/2019				
	NÚMERO DE CALICATAS	4 calicata(s)				
	PROFUNDIDAD	1.50 m				
ENSAYOS DE LABORATORIO DE SUELOS						
CLASIFICACIÓN E IDENTIFICACIÓN DEL SUELO						
CALICATA	C1			C2		
ESTRATO	E1	E2	E1	E2		
PROFUNDIDAD DE ESTRATO	1.50 m	0.95 m	1.50 m	1.00 m		
ENSAYOS PARA DETERMINAR EL SUELO MÁS DESFAVORABLE:						
HUMEDAD NATURAL	12.34%	9.46%	7.13%	6.90%		
GRAVEDAD ESPECÍFICA	2.65	2.66	2.67	2.66		
% QUE PASA POR EL TAMIZ DE:						
4.760 mm (N° 4)	77.04	73.04	82.22	74.61		
F: 0.075 mm (N° 200)	5.99	5.21	6.03	5.63		
LÍMITE LÍQUIDO	38.36	30.24	37.03	30.92		
LÍMITE PLÁSTICO	26.17	27.35	22.58	28.01		
ÍNDICE DE PLASTICIDAD	12.19	2.89	14.45	2.91		
CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS:						
CLASIFICACIÓN SUCS	SP-SM	SP-SC	SP-SM	SP-SC		
CLASIFICACIÓN AASHTO	A-2-6 (28)	A-2-4 (17)	A-2-6 (25)	A-2-4 (15)		
CLASIFICACIÓN E IDENTIFICACIÓN DEL SUELO						
CALICATA	C2		C3		C4	
ESTRATO	E3	E1	E2	E1	E2	
PROFUNDIDAD DE ESTRATO	0.45 m	1.50 m	0.80 m	1.50 m	0.85 m	
ENSAYOS PARA DETERMINAR EL SUELO MÁS DESFAVORABLE:						
HUMEDAD NATURAL	4.91%	6.60%	5.77%	8.28%	6.69%	
GRAVEDAD ESPECÍFICA	2.64	2.65	2.65	2.66	2.67	
% QUE PASA POR EL TAMIZ DE:						
4.760 mm (N° 4)	75.44	73.66	75.08	73.84	72.32	
F: 0.075 mm (N° 200)	5.82	5.02	5.14	5.38	5.20	
LÍMITE LÍQUIDO	34.67	39.18	30.35	26.76	22.83	
LÍMITE PLÁSTICO	31.92	27.82	23.83	14.67	17.07	
ÍNDICE DE PLASTICIDAD	2.75	11.36	6.51	12.09	5.76	
CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS:						
CLASIFICACIÓN SUCS	SP-SM	SP-SM	SP-SC	SP-SM	SP-SC	
CLASIFICACIÓN AASHTO	A-2-6 (14)	A-2-6 (26)	A-2-4 (19)	A-2-6 (29)	A-2-4 (18)	
SUELO MÁS DESFAVORABLE						
C3						
MUESTRA DE SUELO ELEGIDA (MÁS DESFAVORABLE)						
CALICATA	C3					
ESTRATO	E2			E1		
PROFUNDIDAD DE ESTRATO	0.80 m			1.50 m		
PROCTOR MODIFICADO:						
MÁXIMA DENSIDAD SECA	1.600 gr/cm ³			1.750 gr/cm ³		
HUMEDAD ÓPTIMA	6.66%			6.40%		
ADITIVO ESTABILIZADOR	0%	2%	4%	0%	2%	4%
ENSAYOS PARA COMPROBAR LA ESTABILIZACIÓN:						
CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR):						
CBR (95% MDS Y 0.1" DE PENETRACIÓN)	2.13%	29.07%	50.37%	2.77%	32.00%	57.33%
CBR (95% MDS Y 0.2" DE PENETRACIÓN)	1.93%	26.87%	45.83%	2.77%	29.67%	50.00%

Fuente: Góngora (2019)

Anexo 9: Resumen del Proyecto de Investigación PI7

PROYECTO MEJORAMIENTO DE LA SUBRASANTE INCORPORANDO EL ESTABILIZADOR CEMENTO PORTLAND TIPO I, EN LA ASOCIACIÓN LOS ROSALES II, DISTRITO DE CARABAYLLO, 2019

TESISTA(S) BACH. CUZCO ZAVALA, SANDY MARLEN

UBICACIÓN LIMA

AÑO 2019

DATOS DE LA MUESTRA

OBSERVACIONES:	LONGITUD	160.00 m
	IMDA	83 veh/día
	FECHA DE MUESTREO	01/10/2019
	NÚMERO DE CALICATAS	3 calicata(s)
	PROFUNDIDAD	2.50 m

ENSAYOS DE LABORATORIO DE SUELOS

CLASIFICACIÓN E IDENTIFICACIÓN DEL SUELO

CALICATA	C1	C2	C3
MUESTRA	M1	M2	M3

ENSAYOS PARA DETERMINAR EL SUELO MÁS DESFAVORABLE:

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

% QUE PASA POR EL TAMIZ DE:

2 mm (N°10)	99.60	98.70	99.50
0.425 mm (N° 40)	97.20	92.50	95.70
F: 0.075 mm (N° 200)	69.50	61.50	69.10
LÍMITE LÍQUIDO	27.00	27.00	30.00
LÍMITE PLÁSTICO	20.00	20.00	23.00
ÍNDICE DE PLASTICIDAD	7.00	7.00	7.00

CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS:

CLASIFICACIÓN SUCS	CL-ML	ML	ML
CLASIFICACIÓN AASHTO	A-4 (3)	A-4 (1)	A-4 (3)

SUELO MÁS DESFAVORABLE C1+C2+C3

MUESTRA DE SUELO ELEGIDA (MÁS DESFAVORABLE)

CALICATA	C1+C2+C3
MUESTRA	M1+M2+M3

HUMEDAD NATURAL 12.51%

CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS:

CLASIFICACIÓN SUCS	ML
CLASIFICACIÓN AASHTO	A-4 (3)

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN NO CONFINADA:

SUELO NATURAL	2.45 kg/cm ²		
DOSIFICACIÓN	1%	1.5%	2%
COHESIÓN (PROBETA 1)	3.5 kg/cm ²	1.9 kg/cm ²	1.7 kg/cm ²
COHESIÓN (PROBETA 2)	4.7 kg/cm ²	2.0 kg/cm ²	2.1 kg/cm ²
CARGA (PROBETA 1)	135 kg	73 kg	65 kg
CARGA (PROBETA 2)	182 kg	77 kg	82 kg
MAYOR RESISTENCIA	PROBETAS DE DOSIFICACIÓN DE 1%		

ADITIVO ESTABILIZADOR 0% 1%

ENSAYOS PARA COMPROBAR LA ESTABILIZACIÓN:

PROCTOR MODIFICADO:

MÁXIMA DENSIDAD SECA	1.804 gr/cm ³	1.865 gr/cm ³
HUMEDAD ÓPTIMA	16.50%	15.60%

CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR):

CBR (100% MDS Y 0.1" DE PENETRACIÓN)	7.20%	71.80%
CBR (95% MDS Y 0.1" DE PENETRACIÓN)	4.90%	20.70%

Fuente: Cuzco (2019)

PROYECTO	MEJORAMIENTO Y REHABILITACIÓN DE LA CARRETERA VECINAL JUAN GUERRA - BELLO HORIZONTE CON ESTABILIZACIÓN DE SUELO CEMENTO DEL TERRENO DE FUNDACIÓN Y CAPA DE AFIRMADO, DISTRITO DE JUAN GUERRA, PROVINCIA DE SAN MARTÍN, REGIÓN SAN MARTÍN							
TESISTA(S)	BACH. PEZO LÓPEZ, FLAVIO GEAN PIERRE							
UBICACIÓN	TARAPOTO							
AÑO	2018							
DATOS DE LA MUESTRA								
OBSERVACIONES:	LONGITUD	8,520.00 m						
	ANCHO	4.60 m						
	ÁREA	39,192.00 m ²						
	IMDA	30 veh/día						
	FECHA DE MUESTREO	01/01/2018						
	NÚMERO DE CALICATAS	18 calicata(s)						
	PROFUNDIDAD	1.50 m						
ENSAYOS DE LABORATORIO DE SUELOS								
CLASIFICACIÓN E IDENTIFICACIÓN DEL SUELO								
CALICATA	C1		C2		C3		C4	
ESTRATO	E2	E3	E2	E3	E2	E3	E4	
PROFUNDIDAD DE ESTRATO	0.50 a 1.00 m	1.00 a 1.50 m	0.20 a 1.50 m	0.20 a 1.50 m	0.10 a 0.60 m	0.60 a 1.10 m	1.10 a 1.50 m	
ENSAYOS PARA DETERMINAR EL SUELO MÁS DESFAVORABLE:								
HUMEDAD NATURAL	8.45%	18.39%	12.53%	6.31%	8.49%	11.29%	12.49%	
% QUE PASA POR EL TAMIZ DE:								
2 mm (N°10)	66.74	99.28	99.60	98.52	92.67	71.83	98.72	
0.425 mm (N° 40)	55.45	95.34	98.87	97.65	79.51	68.15	98.06	
F: 0.075 mm (N° 200)	30.09	75.43	85.60	76.66	28.66	32.16	97.12	
LÍMITE LÍQUIDO	22.16	33.47	35.19	26.31	22.08	24.99	43.43	
LÍMITE PLÁSTICO	16.32	19.48	19.43	21.17	17.50	17.64	24.57	
ÍNDICE DE PLASTICIDAD	5.84	13.99	15.76	5.14	4.58	7.36	18.87	
CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS:								
CLASIFICACIÓN SUCS	SM-SC	CL	CL	CL-ML	SM-SC	SC	CL	
CLASIFICACIÓN AASHTO	A-2-4 (0)	A-6 (9)	A-6 (13)	A-4 (2)	A-2-4 (0)	A-2-4 (0)	A-7-6 (20)	
PROCTOR MODIFICADO:								
MÁXIMA DENSIDAD SECA	-	1.880 gr/cm ³	1.873 gr/cm ³	1.950 gr/cm ³	1.960 gr/cm ³	-	-	
HUMEDAD ÓPTIMA	-	14.25%	15.15%	11.60%	11.00%	-	-	
CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR):								
CBR (100% MDS Y 0.1" DE PENETRACIÓN)	-	13.20%	13.24%	19.15%	34.46%	-	-	
CBR (95% MDS Y 0.1" DE PENETRACIÓN)	-	8.83%	9.36%	13.20%	25.39%	-	-	

Fuente: Pezo (2018)

CALICATA	C5		C6		C7		C8		C9	
ESTRATO	E2	E2	E3	E3	E3	E2	E3	E3	E4	
PROFUNDIDAD DE ESTRATO	0.25 a 1.50 m	0.20 a 1.00 m	1.00 a 1.50 m	0.50 a 1.50 m	0.50 a 1.50 m	0.15 a 0.70 m	0.70 a 1.10 m	1.10 a 1.50 m		
ENSAYOS PARA DETERMINAR EL SUELO MÁS DESFAVORABLE:										
HUMEDAD NATURAL	7.37%	12.72%	17.46%	3.62%	9.60%	16.33%	13.31%	11.31%		
% QUE PASA POR EL TAMIZ DE:										
2 mm (N°10)	98.34	90.14	99.89	99.96	99.87	99.33	82.99	41.10		
0.425 mm (N° 40)	91.41	86.72	99.44	99.09	98.81	95.86	75.46	37.61		
F: 0.075 mm (N° 200)	55.41	83.55	97.38	25.97	95.73	87.47	48.07	27.91		
LÍMITE LÍQUIDO	25.83	38.28	58.54	17.04	36.30	37.60	26.13	24.15		
LÍMITE PLÁSTICO	19.93	20.89	30.10	12.50	19.35	20.02	17.45	17.47		
ÍNDICE DE PLASTICIDAD	5.90	17.39	28.44	4.54	16.95	17.58	8.68	6.68		
CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS:										
CLASIFICACIÓN SUCS	CL-ML	CL	CH	SM-SC	CL	CL	SC	GM-GC		
CLASIFICACIÓN AASHTO	A-4 (1)	A-6 (14)	A-7-5 (20)	A-2-4 (0)	A-6 (17)	A-6 (15)	A-4 (1)	A-2-4 (0)		
PROCTOR MODIFICADO:										
MÁXIMA DENSIDAD SECA	1.880 gr/cm ³	1.900 gr/cm ³	-	2.000 gr/cm ³	1.904 gr/cm ³	1.890 gr/cm ³	-	-		
HUMEDAD ÓPTIMA	11.30%	14.35%	-	9.50%	13.50%	14.00%	-	-		
CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR):										
CBR (100% MDS Y 0.1" DE PENETRACIÓN)	31.37%	9.18%	-	36.18%	12.16%	9.71%	-	-		
CBR (95% MDS Y 0.1" DE PENETRACIÓN)	20.24%	6.12%	-	26.13%	8.57%	6.38%	-	-		

CALICATA	C10		C11		C12		C13		C14		C15	
ESTRATO	E4	E2	E3	E2	E2	E2	E2	E2	E2	E3		
PROFUNDIDAD DE ESTRATO	0.60 a 1.50 m	0.20 a 1.10 m	1.10 a 1.50 m	0.20 a 1.50 m	1.70 a 2.10 m	0.50 a 1.50 m	0.10 a 0.90 m	0.90 a 1.50 m				
ENSAYOS PARA DETERMINAR EL SUELO MÁS DESFAVORABLE:												
HUMEDAD NATURAL	14.78%	23.32%	11.33%	22.82%	18.42%	18.81%	23.44%	16.31%				
% QUE PASA POR EL TAMIZ DE:												
2 mm (N°10)	99.98	99.94	99.87	99.58	98.32	99.67	99.98	0.00				
0.425 mm (N° 40)	99.60	99.64	99.38	98.47	95.47	98.42	99.92	99.98				
F: 0.075 mm (N° 200)	94.82	99.01	98.43	92.16	91.21	89.61	99.59	99.74				
LÍMITE LÍQUIDO	42.41	59.60	59.38	45.63	45.41	43.66	59.79	59.87				
LÍMITE PLÁSTICO	23.35	30.38	30.56	25.60	25.46	24.72	30.23	30.20				
ÍNDICE DE PLASTICIDAD	19.06	29.22	28.82	20.03	19.95	18.94	29.56	29.67				
CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS:												
CLASIFICACIÓN SUCS	CL	CH	CH	CL-ML	CL	CL	CH	CH				
CLASIFICACIÓN AASHTO	A-7-6 (20)	A-7-5 (20)	A-7-5 (20)	A-7-6 (20)	A-7-6 (20)	A-7-6 (19)	A-7-5 (20)	A-7-5 (20)				
PROCTOR MODIFICADO:												
MÁXIMA DENSIDAD SECA	1.830 gr/cm ³	1.770 gr/cm ³	-	1.810 gr/cm ³	1.850 gr/cm ³	1.790 gr/cm ³	1.764 gr/cm ³	-				
HUMEDAD ÓPTIMA	16.00%	17.40%	-	17.00%	15.40%	16.00%	15.60%	-				
CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR):												
CBR (100% MDS Y 0.1" DE PENETRACIÓN)	9.36%	6.82%	-	9.88%	10.76%	10.23%	6.96%	-				
CBR (95% MDS Y 0.1" DE PENETRACIÓN)	6.21%	4.84%	-	6.56%	6.38%	6.56%	4.69%	-				

Fuente: Pezo (2018)

CALICATA	C16		C17	C18	
ESTRATO	E2	E3	E3	E2	E3
PROFUNDIDAD DE ESTRATO	0.10 a 0.90 m	0.90 a 1.50 m	0.40 a 1.50 m	0.20 a 0.80 m	0.80 a 1.50 m
ENSAYOS PARA DETERMINAR EL SUELO MÁS DESFAVORABLE:					
HUMEDAD NATURAL	14.72%	13.64%	17.16%	9.29%	17.37%
% QUE PASA POR EL TAMIZ DE:					
2 mm (N°10)	99.76	99.61	99.90	99.42	99.54
0.425 mm (N° 40)	96.14	95.27	97.16	89.08	92.79
F: 0.075 mm (N° 200)	70.33	68.67	78.03	46.93	60.45
LÍMITE LÍQUIDO	31.45	31.30	35.42	14.02	28.40
LÍMITE PLÁSTICO	20.87	20.99	20.74	10.06	19.06
ÍNDICE DE PLASTICIDAD	10.58	10.31	14.68	3.96	9.34
CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS:					
CLASIFICACIÓN SUCS	CL	CL	CL	SM-SC	CL
CLASIFICACIÓN AASHTO	A-6 (6)	A-4 (5)	A-6 (11)	A-4 (0)	A-4 (3)
PROCTOR MODIFICADO:					
MÁXIMA DENSIDAD SECA	1.910 gr/cm ³	-	1.880 gr/cm ³	1.980 gr/cm ³	-
HUMEDAD ÓPTIMA	13.50%	-	14.90%	10.50%	-
CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR):					
CBR (100% MDS Y 0.1" DE PENETRACIÓN)	16.97%	-	15.48%	51.62%	-
CBR (95% MDS Y 0.1" DE PENETRACIÓN)	11.11%	-	9.53%	41.08%	-
SUELO MÁS DESFAVORABLE		C2-E2, C6-E2, C9-E2, C11-E2, C15-E2			
MUESTRAS DE SUELOS ELEGIDAS (MÁS DESFAVORABLES)					
CALICATA	C2				
ESTRATO	E2				
PROFUNDIDAD DE ESTRATO	0.20 a 1.50 m				
ADITIVO ESTABILIZADOR	0%	9%	11%	13%	15%
ENSAYOS PARA COMPROBAR LA ESTABILIZACIÓN:					
% QUE PASA POR EL TAMIZ DE:					
2 mm (N°10)	99.60	99.89	99.91	99.90	99.88
0.425 mm (N° 40)	98.87	99.20	99.25	99.20	99.19
F: 0.075 mm (N° 200)	85.60	86.76	87.50	87.50	87.83
LÍMITE LÍQUIDO	35.19	34.36	33.33	32.31	31.39
LÍMITE PLÁSTICO	19.43	26.08	26.06	25.81	26.05
ÍNDICE DE PLASTICIDAD	15.76	8.28	7.27	6.50	5.34
CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS:					
CLASIFICACIÓN SUCS	CL	ML	ML	ML	ML
CLASIFICACIÓN AASHTO	A-6 (13)	A-4 (8)	A-4 (7)	A-4 (6)	A-4 (5)
PROCTOR MODIFICADO:					
MÁXIMA DENSIDAD SECA	1.873 gr/cm ³	1.880 gr/cm ³	1.873 gr/cm ³	1.869 gr/cm ³	1.881 gr/cm ³
HUMEDAD ÓPTIMA	15.15%	13.80%	14.60%	14.45%	12.80%
CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR):					
CBR (100% MDS Y 0.1" DE PENETRACIÓN)	13.24%	40.66%	44.03%	50.02%	52.27%
CBR (95% MDS Y 0.1" DE PENETRACIÓN)	9.36%	32.13%	36.55%	39.17%	43.29%

Fuente: Pezo (2018)

CALICATA				C6		
ESTRATO				E2		
PROFUNDIDAD DE ESTRATO				0.20 a 1.00 m		
ADITIVO ESTABILIZADOR	0%	9%		11%	13%	15%
ENSAYOS PARA COMPROBAR LA ESTABILIZACIÓN:						
% QUE PASA POR EL TAMIZ DE:						
2 mm (N°10)	90.14	96.12		96.46	96.74	95.50
0.425 mm (N° 40)	86.72	91.85		92.31	92.33	91.43
F: 0.075 mm (N° 200)	83.55	83.02		83.48	84.32	83.56
LÍMITE LÍQUIDO	38.28	32.30		32.22	31.88	34.30
LÍMITE PLÁSTICO	20.89	26.45		25.54	26.30	28.67
ÍNDICE DE PLASTICIDAD	17.39	5.85		6.68	5.58	5.63
CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS:						
CLASIFICACIÓN SUCS	CL	ML		ML	ML	ML
CLASIFICACIÓN AASHTO	A-6 (14)	A-4 (5)		A-4 (6)	A-4 (5)	A-4 (5)
PROCTOR MODIFICADO:						
MÁXIMA DENSIDAD SECA	1.900 gr/cm ³	1.905 gr/cm ³		1.902 gr/cm ³	1.904 gr/cm ³	1.901 gr/cm ³
HUMEDAD ÓPTIMA	14.35%	11.75%		11.35%	10.35%	11.45%
CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR):						
CBR (100% MDS Y 0.1" DE PENETRACIÓN)	9.18%	44.03%		45.16%	53.39%	56.76%
CBR (95% MDS Y 0.1" DE PENETRACIÓN)	6.12%	33.40%		35.05%	40.66%	45.68%
CALICATA				C9		
ESTRATO				E2		
PROFUNDIDAD DE ESTRATO				0.15 a 0.70 m		
ADITIVO ESTABILIZADOR	0%	9%		11%	13%	15%
ENSAYOS PARA COMPROBAR LA ESTABILIZACIÓN:						
% QUE PASA POR EL TAMIZ DE:						
2 mm (N°10)	99.33	98.79		98.62	98.26	98.81
0.425 mm (N° 40)	95.86	95.49		95.18	95.11	95.69
F: 0.075 mm (N° 200)	87.47	85.87		85.57	84.84	85.53
LÍMITE LÍQUIDO	37.60	35.64		33.55	34.76	33.34
LÍMITE PLÁSTICO	20.02	26.65		25.66	27.66	25.82
ÍNDICE DE PLASTICIDAD	17.58	8.99		7.99	7.10	7.52
CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS:						
CLASIFICACIÓN SUCS	CL	ML		ML	ML	ML
CLASIFICACIÓN AASHTO	A-6 (15)	A-4 (8)		A-4 (7)	A-4 (7)	A-4 (7)
PROCTOR MODIFICADO:						
MÁXIMA DENSIDAD SECA	1.890 gr/cm ³	1.902 gr/cm ³		1.910 gr/cm ³	1.913 gr/cm ³	1.897 gr/cm ³
HUMEDAD ÓPTIMA	14.00%	12.20%		11.30%	12.80%	12.55%
CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR):						
CBR (100% MDS Y 0.1" DE PENETRACIÓN)	9.71%	46.28%		45.16%	51.15%	52.27%
CBR (95% MDS Y 0.1" DE PENETRACIÓN)	6.38%	33.93%		36.55%	38.79%	42.54%

Fuente: Pezo (2018)

Anexo 10: Resumen del Proyecto de Investigación PI8

CALICATA						C11
ESTRATO						E2
PROFUNDIDAD DE ESTRATO						0.20 a 1.10 m
ADITIVO ESTABILIZADOR	0%	10%	12%	14%	16%	
ENSAYOS PARA COMPROBAR LA ESTABILIZACIÓN:						
% QUE PASA POR EL TAMIZ DE:						
2 mm (N°10)	99.94	99.72	99.76	99.81	99.81	
0.425 mm (N° 40)	99.64	99.08	99.20	99.17	99.19	
F: 0.075 mm (N° 200)	99.01	97.79	98.28	97.97	98.21	
LÍMITE LÍQUIDO	59.60	56.08	54.34	50.50	49.97	
LÍMITE PLÁSTICO	30.38	43.82	42.23	38.56	38.51	
ÍNDICE DE PLASTICIDAD	29.22	12.26	12.11	11.94	11.46	
CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS:						
CLASIFICACIÓN SUCS	CH	MH	MH	MH	ML	
CLASIFICACIÓN AASHTO	A-7-5 (20)	A-7-5 (19)	A-7-5 (19)	A-7-5 (18)	A-7-5 (17)	
PROCTOR MODIFICADO:						
MÁXIMA DENSIDAD SECA	1.770 gr/cm ³	1.805 gr/cm ³	1.810 gr/cm ³	1.807 gr/cm ³	1.800 gr/cm ³	
HUMEDAD ÓPTIMA	17.40%	13.40%	12.25%	12.35%	12.20%	
CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR):						
CBR (100% MDS Y 0.1" DE PENETRACIÓN)	6.82%	40.29%	41.41%	45.91%	51.15%	
CBR (95% MDS Y 0.1" DE PENETRACIÓN)	4.84%	31.01%	32.05%	35.42%	39.09%	
CALICATA						C15
ESTRATO						E2
PROFUNDIDAD DE ESTRATO						0.90 a 1.50 m
ADITIVO ESTABILIZADOR	0%	10%	12%	14%	16%	
ENSAYOS PARA COMPROBAR LA ESTABILIZACIÓN:						
% QUE PASA POR EL TAMIZ DE:						
2 mm (N°10)	99.98	99.97	99.94	99.95	99.94	
0.425 mm (N° 40)	99.92	99.74	99.70	99.74	99.69	
F: 0.075 mm (N° 200)	99.59	97.60	97.78	97.91	97.46	
LÍMITE LÍQUIDO	59.79	50.32	49.74	47.70	44.57	
LÍMITE PLÁSTICO	30.23	39.43	40.28	39.42	38.40	
ÍNDICE DE PLASTICIDAD	29.56	10.89	9.47	8.28	6.17	
CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS:						
CLASIFICACIÓN SUCS	CH	MH	ML	ML	ML	
CLASIFICACIÓN AASHTO	A-7-5 (20)	A-7-5 (16)	A-5 (15)	A-5 (14)	A-5 (11)	
PROCTOR MODIFICADO:						
MÁXIMA DENSIDAD SECA	1.764 gr/cm ³	1.730 gr/cm ³	1.724 gr/cm ³	1.737 gr/cm ³	1.720 gr/cm ³	
HUMEDAD ÓPTIMA	15.60%	15.20%	15.00%	15.10%	15.30%	
CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR):						
CBR (100% MDS Y 0.1" DE PENETRACIÓN)	6.96%	27.56%	40.29%	47.03%	50.32%	
CBR (95% MDS Y 0.1" DE PENETRACIÓN)	4.69%	21.57%	32.13%	37.67%	40.09%	

Fuente: Pezo (2018)

Anexo 11: Resumen del Proyecto de Investigación PI9

PROYECTO	ESTABILIZACIÓN DE SUELO CON CEMENTO EN LA RUTA LI-877 COMUNIDAD CAMPESINA LA VICTORIA - DISTRITO DE TAYABAMBA - PROVINCIA DE PATAZ - REGIÓN LA LIBERTAD, 2020.					
TESISTA(S)	BACH. VALENCIA OTINIANO, SHIRLAY LARIZZA					
UBICACIÓN	TRUJILLO					
AÑO	2020					
DATOS DE LA MUESTRA						
OBSERVACIONES:	LONGITUD	11,000.00 m				
	IMDA	56 veh/día				
	FECHA DE MUESTREO	01/10/2020				
	NÚMERO DE CALICATAS	3 calicata(s)				
	PROFUNDIDAD	1.50 m				
ENSAYOS DE LABORATORIO DE SUELOS						
CLASIFICACIÓN E IDENTIFICACIÓN DEL SUELO						
CALICATA	C1	C2	C3			
MUESTRA	M1	M2	M3			
ESTRATO	E1	E1	E1			
PROFUNDIDAD DE ESTRATO	1.50 m	1.50 m	1.50 m			
ENSAYOS PARA DETERMINAR EL SUELO MÁS DESFAVORABLE:						
HUMEDAD NATURAL	10.92%	6.24%	8.59%			
% QUE PASA POR EL TAMIZ DE:						
4.760 mm (N°4)	95.74	98.77	99.41			
2 mm (N°10)	93.37	97.29	98.13			
F: 0.075 mm (N° 200)	61.00	83.81	86.31			
LÍMITE LÍQUIDO	40.00	46.00	41.00			
LÍMITE PLÁSTICO	14.40	24.94	17.26			
ÍNDICE DE PLASTICIDAD	25.60	21.06	23.74			
CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS:						
CLASIFICACIÓN SUCS	OL	OL	CL			
CLASIFICACIÓN AASHTO	A-6	A-7-6	A-7			
MUESTRA DE SUELO ELEGIDA (MÁS DESFAVORABLE)						
CALICATA	C1	C2	C3			
MUESTRA	M1	M2	M3			
ESTRATO	E1	E1	E1			
PROFUNDIDAD DE ESTRATO	1.50 m	1.50 m	1.50 m			
ADITIVO ESTABILIZADOR	0%	8%	0%	10%	0%	12%
ENSAYOS PARA COMPROBAR LA ESTABILIZACIÓN:						
PROCTOR MODIFICADO:						
MÁXIMA DENSIDAD SECA	1.280 gr/cm ³	1.380 gr/cm ³	1.300 gr/cm ³	1.400 gr/cm ³	1.300 gr/cm ³	1.690 gr/cm ³
HUMEDAD ÓPTIMA	8.00%	7.20%	8.20%	7.40%	8.20%	7.57%
CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR):						
CBR (100% MDS Y 0.1" DE PENETRACIÓN)	27.41%	50.27%	27.55%	63.10%	27.60%	79.25%
CBR (95% MDS Y 0.1" DE PENETRACIÓN)	24.30%	46.64%	24.05%	59.25%	24.23%	69.29%

Fuente: Valencia (2020)

PROYECTO	COMPARACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA DE BASE GRANULAR ESTABILIZADA CON CEMENTO PORTLAND TIPO I Y EMULSIÓN ASFÁLTICA PARA EL CAMINO DE BAJO VOLUMEN DE TRÁNSITO DE LA RUTA LI-113, DISTRITO DE CHARAT, USQUIL, HUARANCHAL, OTUZCO, LA LIBERTAD	
TESISTA(S)	BACH. GUEVARA CASTILLO, JUAN CARLOS BACH. SALAZAR PAREDES, LUIS MIGUEL	
UBICACIÓN	TRUJILLO	
AÑO	2021	
DATOS DE LA MUESTRA		
OBSERVACIONES:	IMDA	56 veh/día
	FECHA DE MUESTREO	14/10/2020
	NÚMERO DE CANTERAS	2 cantera(s)
ENSAYOS DE LABORATORIO DE SUELOS		
CLASIFICACIÓN E IDENTIFICACIÓN DEL SUELO		
CANTERA	C1	C2
MUESTRA	M1	M2
PROGRESIVA	30+850	-
HUMEDAD NATURAL	2.80%	3.10%
% QUE PASA POR EL TAMIZ DE:		
2 mm (N°10)	25.60	-
0.425 mm (N° 40)	18.20	-
F: 0.075 mm (N° 200)	12.90	4.40
LÍMITE LÍQUIDO	24.70	N.P.
LÍMITE PLÁSTICO	18.40	N.P.
ÍNDICE DE PLASTICIDAD	6.30	N.P.
CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS:		
CLASIFICACIÓN SUCS	GC-GM	-
CLASIFICACIÓN AASHTO	A-1-a (0)	-
PROCTOR MODIFICADO:		
MÁXIMA DENSIDAD SECA	2.170 gr/cm ³	-
HUMEDAD ÓPTIMA	6.98%	-
CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR):		
CBR (100% MDS Y 0.1" DE PENETRACIÓN)	36.50%	-
CBR (95% MDS Y 0.1" DE PENETRACIÓN)	28.20%	-
CBR (100% MDS Y 0.2" DE PENETRACIÓN)	52.30%	-
CBR (95% MDS Y 0.2" DE PENETRACIÓN)	40.40%	-
SUELO MÁS DESFAVORABLE	C1-M1	

Fuente: Guevara y Salazar (2021)

MUESTRA DE SUELO ELEGIDA (MÁS DESFAVORABLE)				
CANTERA				C1
MUESTRA				M1
PROGRESIVA				30+850
HUMEDAD NATURAL				32.78%
CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS:				
CLASIFICACIÓN SUCS				GC-GM
CLASIFICACIÓN AASHTO				A-1-a (0)
ADITIVO ESTABILIZADOR	2.8%			5%
ENSAYOS PARA COMPROBAR LA ESTABILIZACIÓN:				
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN NO CONFINADA				
TIPO DE MUESTRA	NO SATURADA	SATURADA	NO SATURADA	SATURADA
DENSIDAD SECA	2.158 gr/cm ³	2.151 gr/cm ³	2.169 gr/cm ³	2.180 gr/cm ³
CONTENIDO DE HUMEDAD	6.30%	6.33%	6.40%	6.40%
CARGA	1680 kg	1649 kg	3070 kg	2850 kg
RESISTENCIA CALCULADA	19.20 kg/cm ²	19.31 kg/cm ²	34.49 kg/cm ²	33.49 kg/cm ²
RESISTENCIA MÍNIMA (NORMA)			3.5 Mpa	
CUMPLE/NO CUMPLE	NO CUMPLE		CUMPLE	
DOSIFICACIÓN DE ADITIVO ESTABILIZADOR SELECCIONADA				5%
PROCTOR MODIFICADO:				
MÁXIMA DENSIDAD SECA	-			2.180 gr/cm ³
HUMEDAD ÓPTIMA	-			5.98%
CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR):				
CBR (100% MDS Y 0.1" DE PENETRACIÓN)	-			73.00%
CBR (95% MDS Y 0.1" DE PENETRACIÓN)	-			56.40%
CBR (100% MDS Y 0.2" DE PENETRACIÓN)	-			104.60%
CBR (95% MDS Y 0.2" DE PENETRACIÓN)	-			80.80%

Fuente: Guevara y Salazar (2021)

Anexo 13: Resumen del Proyecto de Investigación PII 1

PROYECTO	ANÁLISIS COMPARATIVO DE ESTABILIZACIÓN CON CEMENTO PORTLAND Y EMULSIÓN ASFÁLTICA EN BASES GRANULARES	
TESISTA(S)	BACH. ALIAGA REZZA, FREDY RICHARD BACH. SORIANO OCHOA, CARLOS ENRIQUE	
UBICACIÓN	LIMA	
AÑO	2019	
DATOS DE LA MUESTRA		
OBSERVACIONES:	IMDA	84 veh/día
	FECHA DE MUESTREO	01/08/2019
	NÚMERO DE CANTERAS	1 cantera(s)
ENSAYOS DE LABORATORIO DE SUELOS		
CLASIFICACIÓN E IDENTIFICACIÓN DEL SUELO		
CANTERA	C1	
ADITIVO ESTABILIZADOR	0%	5%
ENSAYOS PARA COMPROBAR LA ESTABILIZACIÓN:		
HUMEDAD NATURAL	6.10%	-
% QUE PASA POR EL TAMIZ DE:		
2 mm (N°10)	23.30	-
0.425 mm (N° 40)	16.30	-
F: 0.075 mm (N° 200)	13.80	-
LÍMITE LÍQUIDO	22.00	-
LÍMITE PLÁSTICO	18.40	-
ÍNDICE DE PLASTICIDAD	3.60	-
CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS:		
CLASIFICACIÓN SUCS	GP-GM	-
CLASIFICACIÓN AASHTO	A-1-a	-
PROCTOR MODIFICADO:		
MÁXIMA DENSIDAD SECA	2.292 gr/cm ³	2.303 gr/cm ³
HUMEDAD ÓPTIMA	6.30%	7.10%
CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR):		
CBR (100% MDS Y 0.1" DE PENETRACIÓN)	65.10%	153.50%
CBR (95% MDS Y 0.1" DE PENETRACIÓN)	48.30%	126.00%

Fuente: Aliaga y Soriano (2019)

Anexo 14: Resumen del Proyecto de Investigación PI12

PROYECTO	ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS PROCESOS DE ESTABILIZACIÓN DE SUELO CON ENZIMAS ORGÁNICAS Y SUELO-CEMENTO, APLICADO A SUELOS ARCILLOSOS DE SUB-RASANTE					
TESISTA(S)	BACH. HIDALGO BENAVIDES, DEIVYS ISMAEL					
UBICACIÓN	ECUADOR					
AÑO	2016					
DATOS DE LA MUESTRA						
OBSERVACIONES:	IMDA	75 veh/día				
	FECHA DE MUESTREO	01/01/2016				
	NÚMERO DE CALICATAS	2 calicata(s)				
	PROFUNDIDAD	1.50 m				
ENSAYOS DE LABORATORIO DE SUELOS						
CLASIFICACIÓN E IDENTIFICACIÓN DEL SUELO						
CALICATA	C1					C2
MUESTRA	M1					M2
ENSAYOS PARA DETERMINAR EL SUELO MÁS DESFAVORABLE:						
HUMEDAD NATURAL	59.70%					79.48%
% QUE PASA POR EL TAMIZ DE:						
2 mm (N°10)	99.42					99.04
0.425 mm (N° 40)	97.92					96.98
F: 0.075 mm (N° 200)	56.46					51.54
LÍMITE LÍQUIDO	60.50					86.00
LÍMITE PLÁSTICO	54.17					66.67
ÍNDICE DE PLASTICIDAD	6.33					19.33
CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS:						
CLASIFICACIÓN SUCS	CH					CH
ADITIVO ESTABILIZADOR	0%	5%	10%	0%	5%	10%
ENSAYOS PARA COMPROBAR LA ESTABILIZACIÓN:						
LÍMITE LÍQUIDO	60.50	61.20	58.60	86.00	88.60	85.00
LÍMITE PLÁSTICO	54.17	55.71	54.17	66.67	71.63	70.48
ÍNDICE DE PLASTICIDAD	6.33	5.49	4.43	19.33	16.97	14.52
PROCTOR MODIFICADO:						
MÁXIMA DENSIDAD SECA	1.1452 gr/cm ³	1.1453 gr/cm ³	1.143 gr/cm ³	1.483 gr/cm ³	1.1976 gr/cm ³	1.180 gr/cm ³
HUMEDAD ÓPTIMA	30.80%	32.00%	33.80%	35.40%	36.80%	38.00%
CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR):						
CBR (95% MDS Y 0.1" DE PENETRACIÓN)	3.81%	6.86%	6.94%	2.05%	5.37%	7.65%

Fuente: Hidalgo (2016)

Anexo 15: Resumen del Proyecto de Investigación PI13

PROYECTO	VERIFICACIÓN DE RESISTENCIA ENTRE LA ESTABILIZACIÓN DE SUELO - CEMENTO Y LA ESTABILIZACIÓN CON SUELO - CEMENTO Y FIBRA DE FIQUE		
TESISTA(S)	BACH. GARCIA LIBERATO, DIEGO ANDRES BACH. ROMERO NARANJO, ALDAYR		
UBICACIÓN	COLOMBIA		
AÑO	2019		
DATOS DE LA MUESTRA			
OBSERVACIONES:	IMDA	126 veh/día	
	NÚMERO DE CALICATAS	1 calicata(s)	
	PROFUNDIDAD	1.50 m	
ENSAYOS DE LABORATORIO DE SUELOS			
CLASIFICACIÓN E IDENTIFICACIÓN DEL SUELO			
CALICATA	C1		
MUESTRA	M1		
ESTRATO	E2		
PROFUNDIDAD DE ESTRATO	0.00 a 1.50 m		
ENSAYOS PARA DETERMINAR EL SUELO MÁS DESFAVORABLE:			
HUMEDAD NATURAL	10.47		
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO			
% QUE PASA POR EL TAMIZ DE:			
4.75 mm (N°4)	72.29		
F: 0.075 mm (N° 200)	31.53		
LÍMITE LÍQUIDO	31.60		
LÍMITE PLÁSTICO	20.09		
ÍNDICE DE PLASTICIDAD	11.51		
ÍNDICE DE GRUPO	2		
CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS:			
CLASIFICACIÓN SUCS	CL		
CLASIFICACIÓN AASHTO	A-2-6 (2)		
ADITIVO ESTABILIZADOR	0%	6%	7%
ENSAYOS PARA COMPROBAR LA ESTABILIZACIÓN:			
LÍMITE LÍQUIDO	31.60	31.15	32.40
LÍMITE PLÁSTICO	20.09	20.22	23.37
ÍNDICE DE PLASTICIDAD	11.51	10.95	9.03
PROCTOR MODIFICADO:			
MÁXIMA DENSIDAD SECA	1.900 gr/cm ³	1.830 gr/cm ³	1.840 gr/cm ³
HUMEDAD ÓPTIMA	13.32%	13.40%	13.48%
CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR):			
CBR (100% MDS Y 0.1" DE PENETRACIÓN)	-	-	-
CBR (95% MDS Y 0.1" DE PENETRACIÓN)	27.00%	72.00%	98.80%

Fuente: Garcia y Romero (2019)

Anexo 16: Resumen del Proyecto de Investigación PI14

PROYECTO	ESTABILIZACIÓN Y MEJORAMIENTO DE SUB-RASANTE MEDIANTE CAL Y CEMENTO PARA UNA OBRA VIAL EN EL SECTOR DE SANTOS PAMBA BARRIO COLINAS DEL SUR				
TESISTA(S)	BACH. BENAVIDES SEMPÉRTEGUI, FREDY IVÁN				
UBICACIÓN	ECUADOR				
AÑO	2015				
DATOS DE LA MUESTRA					
OBSERVACIONES:	IMDA	73 veh/día			
	NÚMERO DE CALICATAS	2 calicata(s)			
	PROFUNDIDAD	1.50 m			
ENSAYOS DE LABORATORIO DE SUELOS					
CLASIFICACIÓN E IDENTIFICACIÓN DEL SUELO					
CALICATA	C1	C2			
ESTRATO	E2	E2			
PROFUNDIDAD DE ESTRATO	0.00 a 1.50 m				
ENSAYOS PARA DETERMINAR EL SUELO MÁS DESFAVORABLE:					
HUMEDAD NATURAL	33.46	28.53			
% QUE PASA POR EL TAMIZ DE:					
4.75 mm (N°4)	99.00	99.00			
F: 0.075 mm (N° 200)	62.00	60.00			
LÍMITE LÍQUIDO	38.00	37.00			
LÍMITE PLÁSTICO	26.00	26.00			
ÍNDICE DE PLASTICIDAD	12.00	11.00			
CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS:					
CLASIFICACIÓN SUCS	ML				
CLASIFICACIÓN AASHTO	A-6				
SUELO MÁS DESFAVORABLE	C1-M1				
MUESTRA DE SUELO ELEGIDA (MÁS DESFAVORABLE)					
CALICATA	C1				
MUESTRA	M1	M2	M3	M4	M5
PROFUNDIDAD	1.00 m	1.00 m	1.00 m	1.00 m	1.00 m
CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS					
CLASIFICACIÓN SUCS	ML				
CLASIFICACIÓN AASHTO	A-6				
ADITIVO ESTABILIZADOR	0%	2%	4%	6%	8%
ENSAYOS PARA COMPROBAR LA ESTABILIZACIÓN:					
LÍMITE LÍQUIDO	38.00	31.08	31.39	30.40	32.34
LÍMITE PLÁSTICO	26.00	26.97	30.85	27.54	28.52
ÍNDICE DE PLASTICIDAD	12.00	4.11	0.54	2.86	3.82
PROCTOR MODIFICADO:					
MÁXIMA DENSIDAD SECA	1.705 gr/cm ³	1.471 gr/cm ³	1.374 gr/cm ³	1.409 gr/cm ³	1.439 gr/cm ³
HUMEDAD ÓPTIMA	16.73%	18.60%	18.20%	18.60%	19.00%
CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR):					
CBR (100% MDS Y 0.1" DE PENETRACIÓN)	-	-	-	-	-
CBR (95% MDS Y 0.1" DE PENETRACIÓN)	3.00%	22.00%	26.50%	33.50%	39.00%

Fuente: Benavides (2015)