UNIVERSIDAD PERUANA DE CIENCIAS APLICADAS

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA CIVIL

Estabilización química de suelos arcillosos con cal para su uso como
subrasante en vías terrestres de la localidad de Villa Rica

TESIS

Para optar el título profesional de Ingeniero Civil

AUTORES

Moale Quispe, Alexandra Brigitte ([0000-0003-1379-8050](#))

Rivera Justo, Ebdy Josias ([0000-0002-8865-9779](#))

ASESOR

Aybar Arriola, Gustavo Adolfo ([0000-0001-8625-3989](#))

Lima, 05 de diciembre de 2019

DEDICATORIA

Dedico principalmente a mis queridos padres y hermanas, por su apoyo y porque me incentivan y alientan a seguir avanzando en mi carrera profesional y porque mi familia es lo más importante en mi vida.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por habernos permitido llegar hasta esta etapa muy importante de nuestras vidas.
A nuestro profesor Ing. Gustavo Aybar Arriola, quien más que nuestro asesor fue nuestro amigo y guía, muchas gracias por su asesoramiento, por el conocimiento transmitido, su comprensión y apoyo para culminar la presente tesis.

A nuestros profesores del curso proyecto de tesis Ing. Gary Duran Ramírez y el Ing. Cesar Anza Moreau por sus enseñanzas y consejos brindados para poder culminar satisfactoriamente el curso.

A nuestro amigo Guillermo Cansinos Vega por sus servicios brindados en el Laboratorio de Mecánica de Suelos de la UPC para el desarrollo de los ensayos de la presente tesis.

RESUMEN

El presente trabajo de investigación está enfocado en estudiar el procedimiento de estabilización de suelos arcillosos con cal y determinar el óptimo contenido del estabilizante que asegure un aumento significativo en la capacidad de soporte de la subrasante para pavimentos flexibles. La zona de estudio y de donde se extrajeron las muestras es la localidad de Villa Rica, progresiva 3+000 km de la carretera Oconal-Cedropampa.

La cal como agente estabilizante tiene propiedades de absorción de agua y mejora la resistencia de suelos arcillosos mediante el encapsulamiento de partículas de arcilla. Es decir, al interactuar cal con partículas de arcilla se produce un efecto de floculación, creando una doble capa difusa que reduce el potencial de hinchamiento y expansión de los suelos finos y aumentando la resistencia a la penetración. Se realizaron ensayos de granulometría, límites de consistencia, gravedad específica, proctor modificado y el ensayo de CBR para muestras del suelo en estado natural y con porcentajes de 9 %, 15% y 21% de cal. También, se realizó la clasificación de suelos mediante el método AASHTO Y SUCS para complementar los cálculos necesarios.

El porcentaje óptimo de cal hallado fue 15%, con lo que se logra incrementar el valor del CBR del suelo de 3.3% a 5.9%. Además, se realiza un análisis comparativo de costos del diseño de la estructura de pavimento. En donde, se modela el pavimento sobre una subrasante en estado natural y otra en estado mejorado con el óptimo porcentaje de cal hallado.

Palabras clave: estabilización; cal; arcilla; subrasante; floculación

Chemical stabilization of clay soils with lime for use as a subgrade in land roads in the town of Villa Rica

ABSTRACT

The present research work is focused on study the stabilization procedure of clay soils with lime and determine the optimum content of the stabilizer that ensures a significant increase in the support capacity of the subgrade for flexible pavements. The study zone and where the samples were extracted is the town of Villa Rica, progressive 3 + 000 km from the Oconal-Cedropampa highway.

Lime as a stabilizing agent has water absorption properties and improves the resistance of clay soils by encapsulating clay particles. That is, when lime interacts with clay particles, a flocculation effect is produced, creating a diffuse double layer that reduces the potential for swelling and expansion of fine soils and increasing the penetration resistance. It has been made granulometry test, sedimentation, consistency limits, specific gravity, modified proctor and the CBR test for soil samples in the natural state and with percentages of 9%, 15% and 21% lime. In addition, has been made soil classification by the method of the AASHTO and SUCS method to complement the necessary calculations.

The optimal percentage of lime found was 15%, which increases the CBR value of the soil from 3.3% to 5.9%. In addition, has been made a comparative cost analysis of the pavement structure design was performed, where a design was modeled on a subgrade in the natural state and another in an improved state with the optimum percentage of lime found.

Keywords: stabilization; lime; clay; sub-grade; flocculation

TABLA DE CONTENIDOS

1	INTRODUCCIÓN	15
2	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	16
2.1	REALIDAD PROBLEMÁTICA.....	16
2.2	IMPORTANCIA DEL PROBLEMA	18
2.3	FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	18
2.3.1	Problema general.....	18
2.3.2	Problemas específicos	18
2.4	OBJETIVOS	19
2.4.1	Objetivo general.....	19
2.4.2	Objetivos específicos.....	19
2.5	HIPÓTESIS	19
2.6	JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....	19
2.7	DELIMITACIÓN	20
2.8	VIABILIDAD	20
3	MARCO TEÓRICO	21
3.1	ANTECEDENTES.....	21
3.2	BASES TEÓRICAS	27
3.2.1	Reacción química de arcilla-agua	27
3.2.2	Reacción química entre suelo y la cal	27
3.2.3	Ensayos de laboratorio	29
3.2.3.1	Ensayo de Granulometría por tamizado	29
3.2.3.2	Análisis Granulométrico por medio del Hidrómetro	29
3.2.3.3	Determinación del límite líquido del suelo	29
3.2.3.4	Determinación del límite plástico del suelo	30
3.2.3.5	Proctor Modificado.....	31
3.2.3.6	Ensayo de California Bearing Ratio (CBR)	32
3.2.3.7	Ensayo Equivalente de Arena.....	33
3.2.3.8	Ensayo gravedad específica	34
3.2.4	Clasificación de suelos según AASHTO	35
3.2.5	Clasificación de suelos según SUCS	36
3.2.6	Categorías de subrasante según su valor CBR.	37

3.2.7	Arcillas expansivas	37
3.2.7.1	Actividad de las arcillas	38
3.2.7.2	Potencial de expansión de las arcillas	39
3.2.8	Importancia del curado en muestras de laboratorio	39
3.3	DEFINICIÓN DE TÉRMINOS	40
3.3.1	Suelos arcillosos	40
3.3.2	La cal.....	40
3.3.3	Subrasante en vías terrestres.....	41
3.3.4	Pavimentos	42
3.3.4.1	El pavimento flexible	43
3.3.4.2	El pavimento semirrígido.....	44
3.3.4.3	El pavimento rígido	44
3.3.5	Estabilización de suelos	45
3.3.5.1	Estabilización por combinación de suelos	47
3.3.5.2	Estabilización por sustitución de suelos.....	47
3.3.5.3	Estabilización de suelos con Cal	48
3.3.5.4	Estabilización de suelos con Cemento.....	48
3.3.5.5	Estabilización con Escoria	49
3.3.5.6	Estabilización con Cloruro de Sodio	49
3.3.5.7	Estabilización con Cloruro de Calcio.....	50
3.3.5.8	Estabilización con Cloruro de Magnesio	50
3.3.5.9	Estabilización por compactación.....	51
3.3.5.10	Estabilización geo sintéticos.....	52
4	METODOLOGÍA Y RECOLECCIÓN DE DATOS	53
4.1	DISEÑO METODOLÓGICO	53
4.1.1	De acuerdo al fin que persigue	53
4.1.2	De acuerdo a los tipos de datos analizados.....	53
4.1.3	De acuerdo a la metodología para demostrar la hipótesis	53
4.2	POBLACIÓN Y MUESTRA.....	54
4.3	LOCALIZACIÓN Y UBICACIÓN DE LA ZONA DE EXTRACCIÓN	54
4.4	TRABAJOS DE CAMPO.....	55
4.5	CARACTERÍSTICAS DEL ESTABILIZANTE	57
4.6	CARACTERÍSTICAS DEL SUELO	58

4.7	ENSAYOS DE LABORATORIO.....	58
4.7.1	Gravedad específica.....	59
4.7.2	Análisis granulométrico por tamizado	59
4.7.3	Análisis granulométrico por sedimentación.....	60
4.7.4	Ensayos de consistencia: Límites de Atterberg.....	61
4.7.4.1	Límite Líquido	61
4.7.4.2	Límite Plástico e índice de plasticidad	61
4.7.5	Ensayo Proctor Modificado del suelo natural.....	62
4.7.6	Ensayo de CBR del suelo natural.....	63
4.8	CLASIFICACIÓN SUCS	66
4.9	CLASIFICACIÓN AASHTO	67
4.10	ENSAYOS DEL SUELO ARCILLOSO CON ADICIÓN DE 9%,15% Y 21% DE CAL	
	67	
5	RESULTADOS E INTERPRETACIÓN.....	68
5.1	GRAVEDAD ESPECÍFICA DEL SUELO NATURAL Y LA CAL	68
5.2	ENSAYOS DE GRANULOMETRÍA Y CONSISTENCIA DEL SUELO NATURAL	69
5.2.1	Análisis Granulométrico	69
5.2.2	Ensayo de sedimentación	70
5.2.3	Límite Líquido	71
5.2.4	Límite Plástico.....	72
5.2.5	Índice de plasticidad	72
5.3	CLASIFICACIÓN SUCS DEL SUELO NATURAL.....	72
5.4	CLASIFICACIÓN AASHTO DEL SUELO NATURAL	73
5.5	RESULTADOS DEL ENSAYO PROCTOR MODIFICADO Y CBR DEL SUELO	
	NATURAL.....	74
5.6	RESUMEN DE LOS RESULTADOS DE ENSAYOS DEL SUELO NATURAL	76
5.7	RESUMEN DE LOS RESULTADOS DE ENSAYOS CON 9% DE CAL	76
5.8	RESUMEN DE LOS RESULTADOS DE ENSAYOS CON 15% DE CAL	77
5.9	RESUMEN DE LOS RESULTADOS DE ENSAYOS CON 21% DE CAL	77
5.10	ANÁLISIS DE RESULTADOS	78
5.10.1	Límite Líquido, Límite Plástico e Índice de Plasticidad	78
5.10.2	Compactación Proctor y CBR.....	80
6	ANÁLISIS COMPARATIVO DE COSTOS	82

6.1	DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DE PAVIMENTO.....	82
6.1.1	Diseño sobre la subrasante natural con un CBR 3.3 %	85
6.1.2	Diseño sobre una subrasante mejorada con un CBR 5.9 %	87
6.2	ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS DE LA ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO	89
6.2.1	Análisis de precios unitarios	89
6.2.2	Presupuesto	92
7	CONCLUSIONES	93
8	RECOMENDACIONES:	95
9	REFERENCIAS.....	96
10	ANEXOS.....	99

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Resultados de análisis.....	23
Tabla 2 <i>Resumen de resultados de ensayos</i>	25
Tabla 3 Resumen de las propiedades de las muestras ensayadas	26
Tabla 4 Características internas de las partículas de muestras con y sin cal.	26
Tabla 5 <i>Definición de símbolos de la clasificación SUCS</i>	35
Tabla 6 <i>Clasificación de subrasante según su valor CBR</i>	37
Tabla 7 Clasificación de suelos expansivos	39
Tabla 8 <i>Ventajas y desventajas de los diferentes tipos de Cal.</i>	41
Tabla 9 <i>Resultado del ensayo de gravedad específica del suelo natural y cal</i>	68
Tabla 10 <i>Análisis mecánico por tamizado</i>	69
Tabla 11 Resultado del ensayo de sedimentación	70
Tabla 12 <i>Resultados del ensayo de Limite Líquido</i>	71
Tabla 13 <i>Resultados del ensayo de Limite Plástico</i>	72
Tabla 14 <i>Índice de plasticidad</i>	72
Tabla 15 <i>CBR luego de la saturación</i>	74
Tabla 16 <i>Resultados del CBR al 95% y 100% de la MDS</i>	75
Tabla 17 <i>Resultados de ensayos del suelo natural</i>	76
Tabla 18 <i>Resultados de ensayos del suelo con cal al 9%</i>	76
Tabla 19 <i>Resultados de ensayos del suelo con cal al 15%</i>	77
Tabla 20 <i>Resultados de ensayos del suelo con cal al 21%</i>	77
Tabla 21 <i>Resumen Límite Líquido, Limite Plástico e Índice de Plasticidad</i>	78
Tabla 22 <i>Compactación Proctor y CBR</i>	80
Tabla 23 <i>Coeficiente estructural para el diseño del pavimento flexible</i>	85
Tabla 24 <i>Diseño de la estructura de pavimento</i>	86
Tabla 25 <i>Diseño con un CBR 5.90</i>	87
Tabla 26 <i>Diseño de la estructura de pavimento</i>	88
Tabla 27 Precios Unitarios para la construcción de base de una estructura de pavimento	89
Tabla 28 Precios Unitarios para la construcción de Sub-base de una estructura de pavimento	90
Tabla 29 <i>Precios unitarios para la construcción de la carpeta asfáltica</i>	91

Tabla 30 <i>Presupuesto para la construcción de pavimento flexible sobre una subrasante de CBR igual a 5.9 %</i>	92
Tabla 31 <i>Presupuesto para la construcción de pavimento flexible sobre una subrasante de CBR igual a 3.3 %</i>	92
Tabla 32 Variación de la Máxima Densidad Seca y CBR para diferentes porcentajes de cal.....	93
Tabla 33 Cuadro comparativo de diseño de la estructura de pavimento flexible	94
Tabla 34 Comparativo de costos de construcción de 1 km de carretera.....	94

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Carretera Villa Rica-Puerto Bermúdez. Adaptado del “Diario El Siglo” (2018)	16
Figura 2. Vías terrestres en el Perú. Adaptado del MTC (2017)	17
Figura 3. Resultados del ensayo de compactación. Adaptado de “Lime stabilization of expansive soil from Sergipe - Brazil”, por Leite, R. et al (2016).	21
Figura 4. Presión de hinchazón para diferentes contenidos de cal. Adaptado de “Lime stabilization of expansive soil from Sergipe - Brazil”, por Leite, R. et al (2016).	22
Figura 5. Curva de los resultados del ensayo de Proctor Modificado. Adaptado de “In situ determination of the California bearing ratio of pavement subgrade”, por Decky, M. et al (2016).	22
Figura 6. Resultados del ensayo de CBR in situ del suelo de la localidad de Zilina. Adaptado de “In-situ determination of the California bearing ratio of pavement subgrade”, por Decky, M. et al (2016).	23
Figura 7. Distribución del tamaño de partículas de las muestras seleccionadas. Adaptado de “Predicción de las características de compactación de los suelos de grano fino usando límites de consistencia”, Farooq K. et al. (2015).	24
Figura 8. Formación de doble capa difusa en la superficie de las partículas de la arcilla. Adaptado de “Respuesta de geófonos a campos electromagnéticos”, por Patricia, M. et al (2010).	27
Figura 9. Reacción puzolánica entre la cal y un suelo. Adaptado de “Materiales para base y subbase”, por Sánchez, F. (2016)	28
Figura 10. Aparato Casa Grande para ensayo de LL. Manual de Ensayo de Materiales (EM2000).	30
Figura 11. Ensayo de Límite Plástico. Fuente propia (2018).	31
Figura 12. Compactación del espécimen para el ensayo Proctor Modificado. Fuente propia (2018).	31
Figura 13: Ensayo CBR. Adaptada del Manual de Ensayos de Materiales, por el Ministerio de Transporte y Comunicaciones (2000).	32
Figura 14. Ensayo Equivalente de arena. Adaptado de YouTube, por Cristian Medina, 2018.	34
Figura 15. Ensayo de gravedad específica; Adaptado de Reyes y Asociados, 2009.	34

Figura 16 : Clasificación de suelos según la Norma AASHTO. Adaptado de “clasificación AASHTO”, por Wikivia (2011).	35
Figura 17. Criterios para la clasificación de suelos mediante el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos SUCS, Adaptado de Lixivia, por Wikivia, 2009.....	36
Figura 18. Clasificación de las arcillas según su mineralogía. Adaptado de Norma E.050, 2006	38
Figura 19. Clasificación de cambio de potencial de volumen para suelos arcillosos. Adaptado de la «Norma E.050», por El Peruano, 2006.	38
Figura 20. Sección transversal de una carretera, Olivo, K. (2014).	42
Figura 21. Pavimento flexible. Adaptado de "Pavimentos en carreteras», 2019.	43
Figura 22. Pavimento semirrígido. Adaptado de «Diseño de pavimentos, por Universidad Libre Pereira- Colombia, 2017.	44
Figura 23. Pavimento rígido. Adaptado de "Pavimentos en carreteras », 2019.	44
Figura 24. Guía Complementaria Referencial para la Selección del Tipo de Estabilizador. Adaptado del Manual de carreteras, sección suelos y pavimentos, MTC	46
Figura 25. Estabilización de suelos por combinación de material, Brackel constructions products, 2015.	47
Figura 26. Estabilización por sustitución de suelos, Construir Nicaragua, 2016.	47
Figura 27. Estabilización de suelos con Cal, National Lime Association, 2006.	48
Figura 28. Estabilización de suelos con cemento, Asociación Colombiana de Productores de Concreto, 2017.....	49
Figura 29. Estabilización de suelos con escoria, Sebre, 2017.	49
Figura 30. Estabilización de suelo con cloruro de sodio, Alcaraz T.M, 2016.	50
Figura 31. Estabilización de suelos con cloruro de calcio, Cuchillo O, 2016.	50
Figura 32. Estabilización del suelo con el uso de cloruro de magnesio, Miranda C, 2013.	51
Figura 33. Compactación de suelos, Yepes V, 2014.	51
Figura 34. Estabilización de suelos con cloruro de calcio, Cuchillo O, 2016.	52
Figura 35. Localización de la zona de extracción de muestras. Adaptado de Google Earth, 2017	54
Figura 36. Carretera Villa Rica-Oconal-Alto Cedropampa. Fuente propia	55
Figura 37. Excavación con la máquina excavadora.Fuente propia.....	55
Figura 38. Calicata de 1.50 m de profundidad para extracción de suelo arcilloso. Fuente propia	56

<i>Figura 39.</i> Recolección de muestras alteradas del suelo arcilloso. Fuente propia.....	56
<i>Figura 40.</i> Cal de obra. Adaptado de Sodimac.com.pe, 2018	57
<i>Figura 41.</i> Secado de la muestra en cocina eléctrica. Fuente propia	59
<i>Figura 42.</i> Lavado de la muestra por la malla N° 200. Fuente propia.	59
<i>Figura 43.</i> Tamizado del suelo retenido en la malla N° 200 entre las mallas N°10, N°20, N°40, 60, N°140 y N° 200.....	60
<i>Figura 44.</i> Reducción del tamaño de las partículas del suelo, para realizar el ensayo de consistencia. Fuente propia.....	61
<i>Figura 45.</i> Ensayo de límite plástico. Adaptado de Mecánica de Suelos UPC, 2017.....	61
<i>Figura 46.</i> Ensayo de CBR.....	65
<i>Figura 47.</i> Tabla para la clasificación SUCS. Adaptado de wikivia, 2017.....	66
<i>Figura 48.</i> Grafico de fluidez. Fuente propia, 2018	71
<i>Figura 49.</i> Clasificación de suelos según la Norma AASHTO. Adaptado de “clasificación AASHTO”, por Wikivia (2011).	73
<i>Figura 50.</i> Curva de compactación de Proctor Modificado. Adaptado de MR & Asociados S.A.C	74
<i>Figura 51.</i> Índice CBR vs Densidad Seca (g/cm ³)	75
<i>Figura 52.</i> Comportamiento del Límite Líquido frente a diferentes porcentajes de cal. ..	78
<i>Figura 53.</i> Comportamiento del Límite Plástico frente a diferentes porcentajes de cal. .	78
<i>Figura 54.</i> Comportamiento del Índice de Plasticidad frente a diferentes porcentajes de cal.....	79
<i>Figura 55.</i> Comportamiento de los límites de consistencia al variar la dosis de cal.....	79
<i>Figura 56.</i> Comportamiento de la D _{smax} sobre los porcentajes de cal.	80
<i>Figura 57.</i> Contenido de humedad (W%) vs porcentajes de cal.	80
<i>Figura 58.</i> Comportamiento del CBR al 100% de la MDS vs porcentajes de cal.	81
<i>Figura 59.</i> Comportamiento del CBR al 95% de la MDS vs porcentajes de cal.	81
<i>Figura 60.</i> Coeficientes estructurales AASHTO para el diseño de pavimentos flexibles. Adaptado de Wordpress, por Navarro (2008)	83
<i>Figura 61.</i> Curva de coeficiente estructural a1. Adaptado de AASHTO Guide for designing of pavement Structures 1993.....	83
<i>Figura 62.</i> Curva de coeficiente estructural a2. Adaptado de AASHTO Guide for designing of pavement Structures 1993.....	84
<i>Figura 63.</i> Curva de coeficiente estructural a3. Adaptado de AASHTO Guide for designing of pavement Structures 1993.....	84

1 INTRODUCCIÓN

El Perú tiene por característica geológica diversa variedad de suelos, topografía agreste y variedad de climas, que se han generado por la actividad de la cordillera de los Andes. Los suelos sedimentarios predominantes en esta área son de tipo arcilloso y al saturarse presentan cambios volumétricos que generan inestabilidad, también presentan baja capacidad de soporte y no pueden ser usados como capa sub rasante en pavimentos. Actualmente el país cuenta con 78 000 km de carretera entre longitudinales, de penetración y de enlace según la categorización del Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Per. Partiendo de este dato se conoce que en el año 2016 sólo en la Región de Pasco se contaba con 313.9 km de carretera pavimentada y 2981.6 km de carretera sin pavimentar. Por ello, es prioridad la construcción de vías en buen estado que facilite el transporte en la región y para lograrlo se debe asegurar la estabilidad y resistencia de la sub-rasante.

En la localidad de Villa Rica, provincia de Oxapampa y departamento de Pasco, ubicación de esta investigación, el suelo en su mayoría está compuesto por arcillas y limos. Las principales vías de la localidad se encuentran dañadas por falta de una estabilización adecuada de suelos. Basada en estas premisas planteamos como tema de investigación la tesis titulada “Estabilización química de suelos arcillosos con cal para su uso como subrasante en vías terrestres de la localidad de Villa Rica”. Pretendemos como objetivo principal de esta tesis obtener un porcentaje óptimo de cal que asegure un incremento significativo del valor de soporte del suelo

2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1 Realidad problemática

En el Perú, los suelos tropicales en gran porcentaje son de tipo saprolíticos, este es el caso de la zona en estudio de Oxapampa, suelos arcillosos intercalados con limo y arena principalmente. Cabe mencionar que las preocupaciones de los ingenieros geotécnicos de carreteras y pistas de aeropuertos apoyadas sobre suelos tropicales, es el diseño adecuado de pavimentos. Los problemas que generan los suelos arcillosos en las vías terrestres de la zona de estudio son debido a sus características como la baja capacidad de soporte y alta capacidad de deformación ante cargas.

La realidad problemática de la zona en estudio se evidencia en el artículo del diario “El Siglo”, en dónde menciona el mal estado de las carreteras de Villa Rica.

Diario El Siglo (2018) menciona: “Cientos de transportistas muy incómodos dieron a conocer que en la provincia de Oxapampa las carreteras que unen los distritos de dicha provincia se encuentran en pésimo estado, intransitables, dijeron que estas vías están totalmente abandonadas, principalmente en el tramo del kilómetro 17 que une los distritos de Villa Rica con Puerto Bermúdez, considerada como una de las importantes vías de comunicación”. (p.1). Además, cabe resaltar que el mejoramiento y mantenimiento de estas vías deben ser gestionadas en coordinación con el Instituto Vial Provincial, ya que esta es la encargada de mantener las vías en buen estado según el DS N° 088-2003-PCM.

Figura 1. Carretera Villa Rica-Puerto Bermúdez. Adaptado del “Diario El Siglo” (2018)

También, existen muchos casos en los que se han aplicado condiciones de diseño inadecuadas o tomadas de especificaciones foráneas exigidas para casos donde el soporte del suelo de subrasante es débil, sin embargo, estas especificaciones son aplicables a otras regiones del mundo donde los suelos no son del tipo encontrado en la selva peruana. Es conveniente tomar en cuenta que cuando un suelo es deformable, siempre será más conveniente colocar bases y productos también flexibles de manera de lograr un comportamiento eficiente. Por el contrario, si la estructura del pavimento es rígida o semirrígida, apoyada sobre un suelo flexible, pueden esperarse deformaciones que más tarde redundarán en agrietamientos y fracturamientos no sólo de la estructura inferior sino también de la capa de rodadura correspondiente (Carrillo, A. 1997).

En el Perú cada año se incrementan las vías terrestres (figura 2), por ende, es muy importante la correcta realización de los proyectos viales. Para ello, es necesario el correcto estudio y estabilización de suelos, principalmente en las zonas tropicales.

Figura 2. Vías terrestres en el Perú. Adaptado del MTC (2017)

2.2 Importancia del problema

La estabilización de suelos cohesivos es importante en la construcción de las vías terrestres para garantizar la resistencia del suelo y evitar las deformaciones inadmisibles en el terreno, ya que los suelos arcillosos, materia futura de esta investigación, se caracterizan por los cambios volumétricos que son causados por variaciones de humedad. Estos suelos pueden causar varios daños a las edificaciones, obras hidráulicas y especialmente en vías terrestres incluyendo grietas y fisuras.

2.3 Formulación del problema

El suelo del sector en estudio no es apto para usarse como capa subrasante en la construcción de vías terrestres, debido a la baja capacidad de soporte. Por ende, el suelo deberá ser estabilizado con el uso de cal para mejorar su capacidad de soporte y cumplir con las especificaciones de los proyectos viales.

2.3.1 Problema general

Baja capacidad de soporte de los suelos de la localidad de Villa Rica para ser usados como capa subrasante en vías terrestres.

2.3.2 Problemas específicos

- Existencia de suelos finos, limos y arcillas
- Falta de drenaje pluvial en vías afirmadas
- Inadecuada estabilización de suelos
- Escasa fricción entre partículas de suelos finos.

Según lo mencionado, se plantea la siguiente pregunta de investigación:

¿Cómo podríamos lograr la estabilización de los suelos arcillosos con cal para su uso de subrasante de vías terrestres en Vila Rica, Pasco?

2.4 Objetivos

2.4.1 Objetivo general

- Mejorar la capacidad de soporte de la subrasante, mediante la estabilización química del suelo en estudio, con el óptimo porcentaje de cal.

2.4.2 Objetivos específicos

- Obtener muestras de suelo cohesivos de la localidad de Villa Rica, Oxapampa, Pasco para estudiar sus propiedades físicas y mecánicas.
- Clasificar las muestras de suelos por el método AASHTO y SUCS mediante los ensayos de Granulometría y Límites de Atterberg y justificar el método de estabilización elegido.
- Determinar la máxima densidad seca y el óptimo contenido de humedad de los suelos muestreados mediante el ensayo de Proctor Modificado.
- Realizar ensayos de CBR de muestras del suelo en estudio en estado natural y con diferentes porcentajes de cal.

2.5 Hipótesis

Dosificaciones adecuadas de cal en muestras de suelos arcillosos mejoran su capacidad de soporte, mediante el proceso de floculación, para su uso en subrasantes.

2.6 Justificación de la investigación

El mejoramiento de suelos mediante la estabilización química con cal es una de las técnicas más usadas en los proyectos viales, debido a que presenta bajo costo de ejecución respecto a otros métodos de mejora como la sustitución del material, compactación y mezcla con cemento o ceniza volante. El aporte de esta investigación es cuantificar el porcentaje óptimo de cal para estabilizar los suelos arcillosos presentes en la vía terrestre Villa Rica- Oconal-Alto Cedropampa. Actualmente existen investigaciones sobre la estabilización química con cenizas volantes de los suelos de la carretera mencionada, mas no existen investigaciones sobre estabilización con cal. Por tal motivo, la presente tesis es un gran aporte para ser usado en futuras investigaciones de comparación de costo y viabilidad entre las dos técnicas de estabilización en la zona estudiada.

2.7 Delimitación

Se realizará la estabilización química con cal de suelos arcillosos obtenidos de muestras extraídas de la vía terrestre Villa Rica- Oconal-Alto Cedropampa en la progresiva Km 3+000, que se encuentra en la localidad de Villa Rica, Provincia de Oxapampa, departamento de Pasco.

2.8 Viabilidad

Se obtuvo la autorización del propietario del terreno ubicado en la progresiva 3+000 km de la vía terrestre en estudio para la extracción de las muestras alteradas e inalteradas. La extracción y el traslado de las muestras fueron realizados por los tesisistas. Los ensayos de laboratorio fueron realizados a través de la empresa consultora MR & Asociados S.A.C.

3 MARCO TEÓRICO

3.1 Antecedentes

Las siguientes investigaciones son artículos científicos, indexados y con alto factor de impacto, que muestran estudios sobre estabilización de suelos arcillosos con el fin de mejorar la capacidad de soporte de la misma. A continuación, se muestra la metodología y los resultados que se obtuvieron al realizar las investigaciones.

Leite, R., Cardoso, R., Cardoso, C., Cavalcante, E., & de Freitas, O. (2016). Realizaron un análisis de estabilización de suelos arcillosos con el objetivo de reducir su potencial de hinchamientos. Para esta finalidad se utilizó cal como estabilizante en cantidades de 3%, 6% y 9%. Para el análisis se realizaron ensayos de laboratorio como el CBR y Proctor modificado con el suelo natural y luego de la adición del estabilizante químico. Los resultados confirmaron la eficacia de la estabilización de la cal. Se observó que, a medida que aumentaba el contenido de cal, había una reducción de la fracción de arcilla y un incremento de la fracción de material granular, aumentando así la resistencia al corte del suelo. La curva de compactación fue desplazada y la presión de hinchamiento libre se redujo significativamente.

Figura 3. Resultados del ensayo de compactación. Adaptado de “Lime stabilization of expansive soil from Sergipe - Brazil”, por Leite, R. et al (2016).

Figura 4. Presión de hinchazón para diferentes contenidos de cal. Adaptado de “Lime stabilization of expansive soil from Sergipe - Brazil”, por Leite, R. et al (2016).

Decky, M., Remišová, E., Hájek, M., & Pitoňák, M. (2016). Presentan el proceso de evaluación de suelos arcillosos mediante el ensayo de California Bearing Ratio (CBR) en laboratorio y en campo. Mediante el CBR realizó la evaluación de la capacidad de soporte de las estructuras de tierra, ya que la prueba California Bearing Ratio es una de las pruebas de laboratorio más utilizadas en la calidad de las estructuras terrestres. Para realizar los ensayos de CBR se preparó el suelo usando Proctor Modificado (figura4). Los resultados obtenidos del ensayo Proctor permite correlacionar el nivel de humedad para cumplir con los requisitos recomendados para una subrasante de vías terrestres. El resultado de mediciones de campo del CBR sirve para garantizar condiciones objetivas de las estructuras de tierra.

Figura 5. Curva de los resultados del ensayo de Proctor Modificado. Adaptado de “In situ determination of the California bearing ratio of pavement subgrade”, por Decky, M. et al (2016).

Figura 6. Resultados del ensayo de CBR in situ del suelo de la localidad de Zilina. Adaptado de “In-situ determination of the California bearing ratio of pavement subgrade”, por Decky, M. et al (2016).

Ekeocha, N. E., & Egesi, N. (2014). Realizaron la evaluación de suelos arcillosos mediante el ensayo del California Bearing Ratio (CBR). Las muestras de suelo recogidas fueron llevadas al laboratorio para la prueba de (CBR) sumergida por 24 horas, compactación Proctor estándar al 100% de MDS, contenido de humedad próximo al OCH, debidamente clasificado según AASHTO 1993. Los resultados del estudio han establecido que las muestras son de mala calidad y, como tal, es necesaria la estabilización de suelos que se considera para su uso como subrasante mejorada. En vista de ello los autores, recomendaron opciones de mejora como la son sobre-excavación y estabilización. Se podría excavar hasta 0.7m y hacer la sustitución con material de mejor calidad, podría ser adición química, mezcla suelo cal o suelo con asfalto.

Tabla 1
Resultados de análisis

Sample identity	1	2	3	4	5	6	7	8	FGN 1997
Liquid limit (%)	36	35.4	35.4	36	41	38	37	44	30
Plastic limit (%)	23	23.6	21.3	24	25	24	24	30	-
Plasticity index (%)	13	12	14	14	16	14	13	14	13
Mdd (kg/dm3)	1.86	1.88	1.97	1.94	1.71	1.82	1.83	1.87	-
Omc (%)	13.5	13.4	14.3	11.5	19.2	13.9	12.4	10.4	-
Clor (%)	27	25	26	34	13	12	22	17	5-11
Soaked (24 hours)									

Nota: Resultado de los ensayos de laboratorio para cada muestra. Adaptado de “Evaluation of Subgrade Soils using California Bearing Ratio (CBR) in Parts of Rivers State”, por Ekeocha, N. E., & Egesi, N. (2014).

Farooq K. et al. (2015). Tienen como principal motivación a investigaciones anteriores en las que se predijeron las características de compactación de suelos de grano grueso y grano fino usando parámetros y propiedades de índice de suelos sin realizar ensayos de compactación en laboratorio, por lo que es necesario elaborar un modelo para el caso de suelos de grano fino a fin de predecir las características de compactación mediante el uso de límites de consistencia. Sin embargo, los autores afirman que es necesario realizar ensayos de laboratorio ya que la compactación de suelos es un procedimiento importante el que permite que las partículas de suelo se acoplen entre sí transmitiendo esfuerzo de compactación, dando como resultado el aumento significativo a la resistencia al corte, disminución de la compresibilidad y permeabilidad de la masa del suelo.

Uno de los ensayos principales es el de Proctor Estándar y Modificado, normados por el ASTM D-698 y ASTM D-1557 respectivamente, que se realiza con la finalidad de obtener la máxima densidad seca (γ_{dmax}) y el contenido óptimo de humedad (OCH).

Para la investigación se recolectaron 105 muestras de los grupos CH, CL-ML, ML con fracción de grava de 0-12%, fracción de arena de 2-48% y fracción de arcilla de 50-95%. Las muestras fueron sometidas a los ensayos de: Prueba límite de Atterberg (ASTM D-4318), Prueba de gravedad específica (ASTM D-854), Ensayo Proctor estándar ASTM D-698 y el Ensayo de compactación modificado (ASTM D-1557). Los resultados de los ensayos de compactación mostraron que la máxima densidad seca y el contenido óptimo de humedad se encontró en el intervalo de 17.8-19.7 KN/m³ y 9-15% respectivamente, con ello se comprueba que para las muestras ML está en un valor más alto seguido de CL-ML, CL y CH ordenadas de forma decreciente.

Figura 7. Distribución del tamaño de partículas de las muestras seleccionadas. Adaptado de “Predicción de las características de compactación de los suelos de grano fino usando límites de consistencia”, Farooq K. et al. (2015).

Tabla 2
Resumen de resultados de ensayos

N° de muestras	Clasificación SUCS	Distribución (%) del tamaño de partícula				LL (%)	IP	Gs	Proctor Estándar (ASTM D-698)		Proctor Modificado (ASTM D-1557)	
		Grava	Arena	Limo	Arcilla				Humedad óptima (%)	Densidad máxima seca: γ_{dmax} (KN/m ³)	Humedad óptima (%)	Densidad máxima seca: γ_{dmax} (KN/m ³)
22	ML	4-5	4-45	44-95	0-30	20-25	0-3	2.65-2.75	11.5-15.5	16.7-18.4	9.0-11.5	18.7-19.7
15	CL-ML	5-8	5-7	60-74	10-20	19-27	4-7	2.66-2.77	13.5-16.5	17.3-18.0	10.0-12.0	18.7-19.3
58	CL	0-12	1-39	51-80	15-42	23-48	8-26	2.65-2.78	11-18.5	16.3-18.2	10.0-14.0	17.8-19.6
10	CH	0	2-4	49-54	43-48	52-70	27-46	2.67-2.73	15.5-19.5	15.8-17.0	13.5-15.0	17.9-18.3

Nota: La tabla muestra la composición de las muestras según la característica de sus partículas, el Límite Líquido (LL), Índice de Plasticidad (IP), Gravedad específica de sólidos (Gs) y los resultados de los ensayos de Proctor. Adaptado de “Predicción de las características de compactación de los suelos de grano fino usando límites de consistencia”, Farooq K. et al., 2015.

Investigación 5: Stoltz Guillaume et al. (2012) presenta como problema principal los cambios de volúmenes que experimentan las arcillas expansivas en los suelos según las variaciones en el contenido de humedad, por ello para evitar que los suelos arcillosos expansivos se hinchen o contraigan se presenta como solución un método de estabilización con cal. A nivel macro escala STOLTZ plantea determinar las curvas de retención de agua del suelo tratado con diferentes porcentajes de cal y en diferentes periodos de curado (0, 28 y 180 días); en el nivel de microescala se estudiaron las funciones de densidad al tamaño de poro a través de pruebas de poro simetría de intrusión de mercurio (MIP) para muestras de suelos tratadas y no tratadas con cal sometidas a diferentes niveles de succión. Los resultados de las pruebas realizadas fueron que la adición de cal al suelo arcilloso expansivo aumentó la cantidad de microporos, debido alto contenido de cal; mientras que la cantidad de macroporos no tuvo variaciones significativas. También, en el caso de las muestras tratadas con cal no se observó hinchamiento volumétrico durante la saturación de la arcilla, con lo que se comprobó que el uso de la cal inhibía el hinchamiento o expansión de las partículas.

Tabla 3
Resumen de las propiedades de las muestras ensayadas

Propiedades	Suelo natural	Contenido de cal		
		0%	2%	5%
Pasante de la malla 80 μ m (%)	90			
Contenido de arcilla (2 μ m)	70			
Gravedad específica (Gs)	2.675			
Límite líquido (LL)	71			
Límite plástico (LP)	29			
Índice de plasticidad (IP)	42			
Densidad máxima seca (Y _{dmax})		1.5	1.3	1.2
Óptimo contenido de humedad (w%)		26.5	32.0	37.0
Relación de vacíos inicial(e)		0.8	1.0	1.2

Nota: Adaptado de “Análisis a gran escala de la hinchazón y la contracción de un suelo arcilloso expansivo tratado con cal”, por Stoltz G. et al., 2012.

Tabla 4
Características internas de las partículas de muestras con y sin cal.

% de Cal	Periodo de curado	Radio medio de macro-poros (μ m)	Radio medio de micro-poros (μ m)
0	0	9	0.011
2	28	14	0.019
5	28	42	0.027

Nota: Adaptado de “Análisis a gran escala de la hinchazón y la contracción de un suelo arcilloso expansivo tratado con cal”, por Stoltz G. et al., 2012.

3.2 Bases teóricas

3.2.1 Reacción química de arcilla-agua

Las arcillas sufren cambios volumétricos al variar su contenido de humedad, estos cambios son debido a la formación de la doble capa difusa en la superficie de las partículas de arcilla haciendo que se expandan (figura 8). Según Leite, R. et al (2011), esto sucede porque “Las partículas de arcilla se caracterizan por presentar cargas negativas en sus placas, causadas por sustituciones isomorfas. Con el fin de equilibrar estas cargas, los cationes son atraídos a su superficie y están rodeados de moléculas polares de agua, que forman una doble capa difusa, que conduce a la expansión” (p. 2).

Figura 8. Formación de doble capa difusa en la superficie de las partículas de la arcilla. Adaptado de “Respuesta de geófonos a campos electromagnéticos”, por Patricia, M. et al (2010).

3.2.2 Reacción química entre suelo y la cal

La acción de la cal en el suelo a corto plazo se caracteriza por los intercambios catiónicos. Tal como explica Leite, R. et al (2011) que “la adición de cal a los suelos arcillosos proporciona una abundancia de iones de calcio y magnesio, que tienden a desplazar otros cationes monovalentes comunes, como sodio y potasio presentes en las placas minerales de arcilla” (p. 3). Esto conduce a una reducción del espesor de la doble capa difusa de agua que rodea partículas de suelo.

Después de intercambios catiónicos, “Se produce un cambio aparente de la textura del suelo, por cuanto a las partículas de arcilla se aglomeran formando otras de mayor tamaño. Como resultado de ello se produce mejoras de plasticidad, debido a la capa de agua absorbida” (Sánchez, F. 2016, p.74). Esto es, debido a que la cal tiene la capacidad mejorar las propiedades físicas y químicas de las arcillas, acercándolas a propiedades similares de suelos granulares. Esto se da mediante el encapsulamiento de partículas de arcilla, de esta manera, también se evita la expansión del material, a este proceso se le llama floculación¹.

Según Sánchez, F. (2016) “Si el suelo se compacta, también se produce una reacción a largo plazo entre la cal y los minerales sílico aluminosos del suelo fino, formándose complejos compuestos de silicatos aluminatos de calcio hidratados que son agentes cementantes que incrementan la resistencia de la mezcla y su durabilidad”. En la figura 11 esta reacción a largo plazo descrita anteriormente llamada también reacción puzolánica (p. 84).

Figura 9. Reacción puzolánica entre la cal y un suelo. Adaptado de “Materiales para base y subbase”, por Sánchez, F. (2016)

¹ **Floculación** : Es la aglomeración de partículas desestabilizadas en microflóculos y después en los flóculos más grandes que tienden a depositarse en el fondo de los recipientes contruidos para este fin, denominados sedimentadores.

3.2.3 Ensayos de laboratorio

3.2.3.1 Ensayo de Granulometría por tamizado

Es una clasificación granulométrica, el cual realiza la medición y gradación que se lleva a cabo de los granos de los suelos. El objetivo de este análisis es la determinación cuantitativa de la distribución de tamaños de partículas de suelo. Entre las normas existentes para la correcta ejecución del ensayo se encuentran la Norma ASTM D-422 y la Norma Técnica Peruana NTP 339. 128. Estas, describen el método para determinar los porcentajes de suelos que pasan por los distintos tamices de la serie empleada en el ensayo, hasta el de 75 μ m (N° 200).

Si el material contiene gran porcentaje de arcillas y limos es recomendable realizar el lavado con el uso de la malla N° 200, posteriormente secar al horno y clasificar el material retenido.

El análisis por tamizado o granulometría es recomendable para suelos granulares, en el caso de suelos con alto contenido de finos se recomienda realizar en ensayo del hidrómetro.

3.2.3.2 Análisis Granulométrico por medio del Hidrómetro

Este ensayo se basa en el principio de la Ley de Stokes, que hace referencia a la fuerza de fricción que experimentan los objetos esféricos (partículas de suelo dispersados de distintas formas y tamaños) que se mueven dentro de un fluido viscoso de régimen laminar; se usará como instrumento de medición un Hidrómetro para determinar la cantidad de partículas dispersadas (pasantes del tamiz N° 200) que permanecerán en suspensión durante un tiempo determinado. (RD N°18_2014_MTC, Manual de Ensayo de Materiales).

Entre las normas existentes para la realización de los procedimientos de este ensayo se encuentra la Norma ASTM D422-63 y la Norma Técnica Peruana NTP 339.128.

3.2.3.3 Determinación del límite líquido del suelo

El límite líquido de un suelo es el porcentaje de humedad que sucede cuando éste pasa de un estado plástico a un estado líquido, estos parámetros son usados en varios sistemas de clasificación de suelos y para establecer correlaciones con las propiedades del suelo.

Como instrumento de medición se usa la Copa de Casagrande (Figura 10), en el que se mide el contenido de humedad de un surco separador de 13mm al dejar caer la copa 25

veces desde una altura de caída de 1cm, con una velocidad de 2 caídas por segundo. (RD N°18_2014_MTC, Manual de Ensayo de Materiales).

Entre las normas existentes que regulan este ensayo se encuentran la Norma ASTM D-4318 y la Norma Técnica Peruana 339.129.

Figura 10. Aparato Casa Grande para ensayo de LL. Manual de Ensayo de Materiales (EM2000).

3.2.3.4 Determinación del límite plástico del suelo

El límite plástico se determina cuando un suelo pasa de un estado semisólido a un estado plástico, este se determina con un porcentaje de humedad que corresponde al obtenido cuando unas barras de suelo al ser amasadas con la mano sin fisurarse alcanzan un diámetro de 3.2 mm. (RD N°18_2014_MTC, Manual de Ensayo de Materiales). Ver figura 11.

Entre las normas existentes para la realización de los procedimientos de este ensayo se encuentra la Norma ASTM D-4318 y la Norma Técnica Peruana NTP 339.129.

Figura 11. Ensayo de Límite Plástico. Fuente propia (2018).

3.2.3.5 Proctor Modificado

Este es un ensayo de compactación de suelos que se utiliza en suelos con un 30% o menos en peso de partículas retenidas en el tamiz $\frac{3}{4}$ “. La finalidad del ensayo es determinar el contenido óptimo de humedad y la máxima densidad seca del suelo que será sometido a una energía de compactación de 2 700 kN-m/m³ (56 000 pie-lbf/pie³), en un molde de 4” o 6” con un pistón de 10lbf, con una altura de caída de 18 pulg. (RD N°18_2014_MTC, Manual de Ensayo de Materiales).

Entre las normas existentes para la realización de los procedimientos de este ensayo se encuentra la Norma ASTM D-1557 y la Norma Técnica Peruana NTP 339.141.

Figura 12. Compactación del espécimen para el ensayo Proctor Modificado. Fuente propia (2018).

3.2.3.6 Ensayo de California Bearing Ratio (CBR)

Este ensayo se usa para determinar la capacidad de soporte de bases, subbases y subrasantes de suelos mediante un índice de resistencia denominado valor de la relación de soporte, previamente a la realización del ensayo se debe de conocer la humedad óptima y la máxima densidad seca del suelo. En términos generales, la condición de humedad más desfavorable se presenta cuando el suelo está saturado; por ello se debe sumergir las muestras en agua durante 4 días, confinados en un molde con una sobrecarga que simula el peso del pavimento.

Por lo tanto, el valor CBR se obtiene del esfuerzo de penetración de un pistón de 44.5 KN para penetrar 0.1'' y 0.2'' en la muestra con respecto al esfuerzo que se tiene para penetrar la misma profundidad en una muestra de piedra chancada de california; por especificaciones de la norma peruana este valor debe ser como mínimo de 6% para que se considere un suelo óptimo para uso en proyectos viales. (RD N°18_2014_MTC, Manual de Ensayo de Materiales).

Entre las normas existentes que regulan este ensayo se encuentran la Norma ASTM D-1883 y la Norma Técnica Peruana 339.145.

Figura 13: Ensayo CBR. Adaptada del Manual de Ensayos de Materiales, por el Ministerio de Transporte y Comunicaciones (2000).

3.2.3.7 Ensayo Equivalente de Arena

Este ensayo tiene por objeto determinar la proporción relativa del contenido de polvo fino nocivo, o material arcilloso, en los suelos o agregados finos.

Método: A un volumen determinado de suelo o agregado fino se le adiciona una pequeña cantidad de solución floculante, mezclándolos en un cilindro de plástico graduado y agitándolos para que las partículas de arena pierdan la cobertura arcillosa (Figura 14). La muestra es entonces "irrigada", usando una cantidad adicional de solución floculante, para forzar el material arcilloso a quedar en suspensión encima de la arena. Después de un período de sedimentación, se determinan las alturas de la arcilla floculada y de la arena en el cilindro. El "equivalente de arena" es la relación entre la altura de arena y la altura de arcilla, expresada en porcentaje.

$$\text{Equivalente de Arena (EA)} = \frac{\text{Lectura de arena}}{\text{Lectura de arcilla}} \times 100$$

Interpretación de los resultados del ensayo

- Este ensayo produce como resultado un valor empírico de la cantidad relativa de finos y material arcilloso presente en la muestra de suelo o agregado fino.
- Puede especificarse un valor mínimo del equivalente de arena, para limitar la cantidad permisible de finos arcillosos en un agregado.
- Este método de ensayo permite determinar rápidamente, en el campo, variaciones de calidad de los materiales que se estén produciendo o utilizando.

“Equivalentes de arena inferiores a 20 corresponden a áridos muy contaminados que, en general, no deben utilizarse en capas de firme. Sin embargo, valores del equivalente de arena superiores a 50 reflejan un grado de limpieza suficiente para la mayor parte de las aplicaciones”. Wikivia, 2018.

Entre las normas existentes que regulan este ensayo se encuentran la Norma ASTM D-2419 y la Norma Técnica Peruana 339.146.

Figura 14. Ensayo Equivalente de arena. Adaptado de YouTube, por Cristian Medina, 2018.

3.2.3.8 Ensayo gravedad específica

También llamado ensayo de peso específico de sólidos. Entre las normas existentes que regulan este ensayo se encuentran la Norma ASTM D-854 y la Norma Técnica Peruana 339.131.

Peso específico relativo de las partículas sólidas (G_s): Es la relación entre el peso en aire del volumen de un material, a una temperatura indicada y el peso en aire de idéntico volumen de agua destilada a la misma temperatura. (Norma Técnica Peruana 339.131)

Figura 15. Ensayo de gravedad específica; Adaptado de Reyes y Asociados, 2009.

3.2.4 Clasificación de suelos según AASHTO

Este sistema es el más usado para estudios de carreteras, en donde se clasifica el suelo en 7 grupos (A1, A2, A3, A4, A5, A6, A7) en base al porcentaje que pasa por los tamices N° 200, 40 y 10 y a los límites de Atterberg (líquido y plástico); para ello, los suelos granulares deben tener no más de un 35 % pasante del tamiz N° 200 y los limo-arcillosos más del 35% pasante. La clasificación se realiza según los parámetros de la figura N°16.

Clasificación general	Materiales granulares (35% o menos pasa el tamiz #200)							Materiales limoarcillosos (más de 35% pasa el tamiz #200)			
Clasificación de grupo	A-1		A-3 ^A	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5 A-7-6
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				
Tamizado, % que pasa											
No. 10 (2.00mm)	50 máx.	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
No. 40 (425µm)	30 máx.	50 máx.	51 mín.	...	...	...	...	...	...	...	...
No. 200 (75µm)	15 máx.	25 máx.	10 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. ^B
Tipos de materiales característicos	Cantos, grava y arena		Arena fina	Grava y arena limoarcillosas				Suelos limosos		Suelos arcillosos	
Calificación	Excelente a bueno							Regular a malo			

^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.

Figura 16: Clasificación de suelos según la Norma AASHTO. Adaptado de “clasificación AASHTO”, por Wikivia (2011).

Tabla 5

Definición de símbolos de la clasificación SUCS

Símbolo	Definición	Letra	Definición
G	Grava	P	Pobrementemente graduado (tamaño de partícula uniforme)
S	Arena	W	Bien graduado (tamaños de partículas diversos)
M	Limo	H	Alta plasticidad
C	Arcilla	L	Baja Plasticidad
O	Orgánico		

Nota: Adaptado de “Wikipedia”, por Wikipedia, 2017

3.2.5 Clasificación de suelos según SUCS

El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos - SUCS (Unified Soil Classification Sistema (USCS)) se usa para describir la textura y el tamaño de las partículas de un suelo y se representa mediante un símbolo con dos letras. Cada letra es descrita en la tabla 5. Para clasificar el suelo es necesario realizar previamente una granulometría del suelo mediante tamizado u otros. Se clasifica el suelo siguiendo los criterios de la figura 10.

Entre las normas existentes que regulan este ensayo se encuentran la Norma ASTM D-2487 y la Norma Técnica Peruana 339.134.

DIVISION PRINCIPAL	SÍMBOLO DEL GRUPO	NOMBRES TÍPICOS	CRITERIO DE CLASIFICACION
SUELOS DE GRANOS GRUESOS 50% o más es retenido en el tamiz No. 200	GRAVAS 50% o más de la fracción gruesa es retenido en el tamiz No. 4	GW	Gravas bien gradadas y mezclas de arena y grava con pocos finos o sin finos
		GP	Gravas y mezclas de gravas y arenas mal gradadas con pocos finos o sin finos
		GM	Gravas limosas, mezclas de grava - arena y limo
		GC	Gravas arcillosas, mezclas de grava - arena y arcilla
	ARENAS Más del 50% de la fracción gruesa pasa por el tamiz No. 4	SW	Arenas y arenas gravosas bien gradadas con pocos finos o sin finos
		SP	Arenas y arenas gravosas mal gradadas con pocos finos o sin finos
		SM	Arenas limosas, mezclas de arena limo
		SC	Arenas arcillosas, mezclas de arena y arcilla
		Clasificación basada en el porcentaje de finos Menos del 5% pasa por el tamiz No. 200 GP, SW, SC Más del 12% pasa por el tamiz No. 200 GM, GC, SM, SC (5% a 12% pasa por el tamiz No. 200) Para clasificación de frontera se necesitan símbolos dobles	
		$C_u = D_{60}/D_{10}$ Mayor que 4 $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ Entre 1 y 3 Si los criterios para GW no se cumplen	
		Límites de Atterberg localizados bajo la línea "A" o índice de plasticidad inferior a 4. Si los límites de Atterberg se localizan en el área sombreada se debe clasificar utilizando símbolos dobles	
		Límites de Atterberg sobre la línea "A" e índice de plasticidad superior a 7.	
		$C_u = D_{60}/D_{10}$ Superior a 6 $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ Entre 1 y 3 Si no se cumplen los criterios para SW	
		Límites de Atterberg localizados bajo la línea "A" o índice de plasticidad inferior a 4. Para los límites de Atterberg localizados en el área sombreada se debe clasificar utilizando símbolos dobles.	
SUELOS DE GRANOS FINOS 50% o más pasa por el tamiz No. 200	LIMOS Y ARCILLAS Límite líquido superior a 50% o inferior	ML	Limos inorgánicos, arenas muy finas, polvo de roca, arenas finas limosas o arcillosas
		CL	Arcillas inorgánicas de plasticidad baja a media, arcillas gravosas, arcillas arenosas, arcillas limosas, suelos sin mucha arcilla
		OL	Limos orgánicos y arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad
	LIMOS Y ARCILLAS Límite líquido superior a 50%	MH	Limos inorgánicos, arenas finas o limos micáceos o de diatomeas limos elásticos
		CH	Arcillas inorgánicas de alta plasticidad, arcillas grasas
		OH	Arcillas orgánicas de plasticidad alta o media
	Suelos altamente orgánicos	PT	Turba, estiércol y otros suelos altamente orgánicos

Figura 17. Criterios para la clasificación de suelos mediante el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos SUCS, Adaptado de Lixivia, por Wikivia, 2009.

3.2.6 Categorías de subrasante según su valor CBR.

El suelo destinado como capa subrasante de la estructura de pavimento se clasifica de acuerdo a su capacidad de soporte, las cuales son hallados mediante el ensayo del CBR. Según el manual de carreteras, sección suelos y pavimento, el CBR del suelo donde se construirá el pavimento debe ser mayor o igual a 6% para ser considerado apto como capa subrasante.

Tabla 6
Clasificación de subrasante según su valor CBR

CBR	CATEGOTIA DE SUBRASANTE
CBR <3%	Subrasante Inadecuada
$3\% \leq \text{CBR} < 6\%$	Subrasante Pobre
$6\% \leq \text{CBR} < 10\%$	Subrasante Regular
$10\% \leq \text{CBR} < 20\%$	Subrasante Buena
$20\% \leq \text{CBR} < 30\%$	Subrasante Muy Buena
$30\% \leq \text{CBR}$	Subrasante Extraordinaria

Nota: Adaptado de Manual de carreteras “Suelos, Geología, geotecnia y pavimento” MTC, 2013.

3.2.7 Arcillas expansivas

El factor determinante del comportamiento de una arcilla es la mineralogía de los materiales de la forman. Los principales minerales de una arcilla corresponden a los grupos de la caolinita, haloisita, ilita y montmorillonita. Hasta la fecha se han definido como arcillas de alta actividad las pertenecientes al grupo de la montmorillonita, las cuales presentan fuertes variaciones volumétricas, lo que revela su capacidad para absorber agua, en cambio, las arcillas de mínima variación volumétrica, constituidas por minerales del grupo de la caolinita, no presentan cambios de importancia, lo cual se debe a su ordenamiento atómico, su liga cristalográfica y su carga iónica (la liga más inestable corresponde a los de la montmorillonita).

Figura 18. Clasificación de las arcillas según su mineralogía. Adaptado de Norma E.050, 2006

3.2.7.1 Actividad de las arcillas

Según la Norma E.050, en las zonas que se encuentra suelos cohesivos con bajo grado de saturación y plasticidad alta ($LL > 50$), el profesional responsable deberá realizar un análisis basado en la determinación de la plasticidad del suelo NTP 339.129 (ASTM D4318) y ensayos de granulometría por sedimentación NTP 339.128 (ASTM D 422) con la finalidad de evaluar el potencial de expansión del suelo cohesivo en función del porcentaje de partículas menores a 0.002mm, del índice de plasticidad (IP) y de la actividad (A) de la arcilla. La relación entre la Expansión Potencial (E_p) y los parámetros antes indicados se muestra en la gráfica siguiente:

Figura 19. Clasificación de cambio de potencial de volumen para suelos arcillosos. Adaptado de la «Norma E.050», por El Peruano, 2006.

La figura N°21, refleja a la siguiente expresión

$$Actividad (A) = \frac{IP}{\% 2 m}$$

3.2.7.2 Potencial de expansión de las arcillas

La norma E.050, también indica que si se encuentra evidencias de la existencia de suelos expansivos, es decir alta actividad, se deberá sustentar su evaluación mediante los resultados del ensayo para la determinación del Hinchamiento Unidimensional de suelos cohesivos según NTP 339.170 (ASTM D 4648). Las muestras utilizadas para la evaluación del hinchamiento deberán ser obtenidas de pozos a cielo abierto, en condición inalterada, preferentemente del tipo Mib. Mediante la tabla N°7 se puede clasificar el potencial de expansión de suelos expansivos.

Tabla 7
Clasificación de suelos expansivos

Potencial de expansión	Expansión en consolidómetro, bajo presión vertical de 7 kPa (0,07 kgf/cm ²)	Índice de plasticidad	Porcentaje de partículas menores que dos micras
%	%	%	%
Muy alto	>30	>32	>37
Alto	20-30	23-45	18-37
Medio	10-20	12-34	12-27
Bajo	<10	<20	<17

Nota: El potencial de expansión se evalúa solo si se evidencia alta actividad en las arcillas, tabla tomada de la Norma E.050.

3.2.8 Importancia del curado en muestras de laboratorio

Los suelos en general se encuentran en condiciones más desfavorables cuando están completamente saturados. Por esta razón, se realiza el curado de los especímenes de laboratorio cuando se va realizar ensayos de resistencia del suelo, es decir son sumergidos en agua por un periodo de tiempo establecido según recomiendan las normas NTP o ASTM para cada tipo de ensayo. Por ejemplo, la NTP 339.145, Ensayo del CBR, recomienda 96 horas de curado de los especímenes antes de comenzar el ensayo.

3.3 Definición de términos

3.3.1 Suelos arcillosos

Los suelos arcillosos están conformados principalmente por silicato de aluminio hidratado, sus partículas son de aproximadamente 0.005mm de diámetro y posee una textura plástica. La arcilla se origina por la alteración hidrotermal de rocas ígneas (granito, riolita, diorita y basalto) que bajo condiciones de presión, temperatura y acidez.

La clasificación de las arcillas principalmente se divide en primarias o residuales de origen hipogénico, es decir aquellas que permanecieron en su mismo lugar de formación, y secundarias, las que fueron acarreadas de lugares distintos a los de su formación. De esta clasificación a su vez se desprende las arcillas fluviales, aquellas que fueron depositadas por ríos; lacustres, asentadas en lagos; marinas, arcillas con mayor uniformidad; en delta, arenosas y de composición irregular y glacial, las que fueron formadas debido a la acción de grandes masas de suelo (Liberto de Pablo, 1964)

3.3.2 La cal

La cal es un material conglomerante que proviene de la calcinación de piedras calizas, la cual puede variar desde cales con alto grado de pureza hasta cales hidráulicas con contenidos de menos de 50% de óxido de calcio. En el manual de estabilización de suelos con Cal, se detalla los tipos de cal que se muestran en la tabla 8.

Tabla 8

Ventajas y desventajas de los diferentes tipos de Cal.

MATERIAL	VENTAJAS	DESVENTAJAS
CAL HIDRATADA EN POLVO	Puede ser aplicada más rápidamente que la lechada. La cal hidratada en polvo puede ser utilizada para secar arcillas, pero no es tan eficaz como la cal viva.	Las partículas hidratadas de cal son finas, por lo que el polvo puede ser un problema. Este tipo de uso generalmente es inadecuado en áreas pobladas.
CAL VIVA EN SECO	Económica. Posee entre 20 y 24 % más de óxido de calcio disponible que la cal hidratada. Tamaños de partículas más grandes, es excelente para secar suelos.	Requiere 32% de su peso en agua para convertirse en cal hidratada y puede haber pérdida adicional debido al calor de hidratación. Puede requerir mayor cantidad de mezcla.
LECHADA DE CAL	Aplicación libre de polvo. Es más fácil lograr la distribución. Se aprovecha la aplicación por rociado. Se requiere menos agua adicional para la mezcla final.	Velocidad lenta de aplicación. Costos más altos debido al equipo extra requerido. Puede no ser práctico en suelos muy mojados. No es práctico para secar.

Nota: Se ha realizado el análisis de ventajas y desventajas de los tipos de cal usados en procesos de estabilización de suelos. Adaptado del “Manual de Estabilización de suelos con Cal”, por National Lime Association, 2004.

3.3.3 Subrasante en vías terrestres

La subrasante es la capa superior del terraplén o el fondo de las excavaciones en terreno natural, que soportará la estructura del pavimento, y está conformada por suelos seleccionados de características aceptables y compactados por capas para constituir un cuerpo estable en óptimo estado, de tal manera que no se vea afectada por la carga de diseño que proviene del tránsito. Su capacidad de soporte en condiciones de servicio, junto con el tránsito y las características de los materiales de construcción de la superficie de rodadura, constituyen las variables básicas para el diseño de la estructura del pavimento que se colocará encima. En la etapa constructiva, los últimos 0.30m de suelo debajo del nivel superior de la subrasante, deberán ser compactados al 95% de la máxima densidad seca obtenida del ensayo Proctor modificado (MTC EM 115).

Figura 20. Sección transversal de una carretera, Olivo, K. (2014).

Los suelos por debajo del nivel superior de la subrasante, en una profundidad no menor de 0.60 m, deberán ser suelos adecuados y estables con $\text{CBR} \geq 6\%$. En caso el suelo, debajo del nivel superior de la subrasante, tenga un $\text{CBR} < 6\%$ (subrasante pobre o subrasante inadecuada), corresponde estabilizar los suelos, para lo cual el Ingeniero Responsable analizará según la naturaleza del suelo alternativas de solución, como la estabilización mecánica, el reemplazo del suelo de cimentación, estabilización química de suelos, estabilización con geo sintéticos, elevación de la rasante, cambiar el trazo vial, eligiéndose la más conveniente técnica y económica. En la sección 2.3.5 se describen los diversos tipos de estabilización de suelos.

3.3.4 Pavimentos

El Pavimento es una estructura de varias capas construida sobre la subrasante del camino para resistir y distribuir esfuerzos originados por los vehículos y mejorar las condiciones de seguridad y comodidad para el tránsito. Por lo general está conformada por las siguientes capas: base, subbase y capa de rodadura (Manual de carreteras, suelos, geología, geotecnia y pavimentos, 2013)

Capa de Rodadura: Es la parte superior de un pavimento, que puede ser de tipo bituminoso (flexible) o de concreto de cemento Portland (rígido) o de adoquines, cuya función es sostener directamente el tránsito

Base: Es la capa inferior a la capa de rodadura, que tiene como principal función de sostener, distribuir y transmitir las cargas ocasionadas por el tránsito. Esta capa será de material granular drenante ($\text{CBR} \geq 80\%$) o será tratada con asfalto, cal o cemento

Subbase: Es una capa de material especificado y con un espesor de diseño, el cual soporta a la base y a la carpeta. Además, se utiliza como capa de drenaje y controlador de la capilaridad del agua. Dependiendo del tipo, diseño y dimensionamiento del pavimento, esta capa puede obviarse. Esta capa puede ser de material granular ($\text{CBR} \geq 40\%$) o tratada con asfalto, cal o cemento.

Los tipos de pavimento incluidos en el Manual de carreteras del MTC son los siguientes: Pavimentos Flexibles, Pavimentos Semirrígidos y Pavimentos Rígido

3.3.4.1 El pavimento flexible

Es una estructura compuesta por capas granulares (subbase, base) y como capa de rodadura una carpeta constituida con materiales bituminosos como aglomerantes, agregados y de ser el caso aditivos. Principalmente se considera como capa de rodadura asfáltica sobre capas granulares: mortero asfáltico, tratamiento superficial bicapa, micro pavimentos, macadam asfáltico, mezclas asfálticas en frío y mezclas asfálticas en caliente (Manual de carreteras, suelos, geología, geotecnia y pavimentos, 2013).

Figura 21. Pavimento flexible. Adaptado de "Pavimentos en carreteras», 2019.

3.3.4.2 El pavimento semirrígido

Es una estructura de pavimento compuesta básicamente por capas asfálticas con un espesor total bituminoso (carpeta asfáltica en caliente sobre base tratada con asfalto); también se considera como pavimento semirrígido la estructura compuesta por carpeta asfáltica sobre base tratada con cemento o sobre base tratada con cal. Dentro del tipo de pavimento semirrígido se ha incluido los pavimentos adoquinados (Manual de carreteras, suelos, geología, geotecnia y pavimentos, 2013).

Figura 22. Pavimento semirrígido. Adaptado de «Diseño de pavimentos, por Universidad Libre Pereira- Colombia, 2017.

3.3.4.3 El pavimento rígido

Es una estructura de pavimento compuesta específicamente por una capa de subbase granular, no obstante, esta capa puede ser de base granular, o puede ser estabilizada con cemento, asfalto o cal y una capa de rodadura de losa de concreto de cemento hidráulico como aglomerante, agregados y de ser el caso aditivo. Dentro de los pavimentos rígidos existen tres categorías: Pavimento de concreto simple con juntas, Pavimento de concreto con juntas y refuerzo de acero en forma de fibras o mallas y Pavimento de concreto con refuerzo continuo (Manual de carreteras, suelos, geología, geotecnia y pavimentos, 2013).

Figura 23. Pavimento rígido. Adaptado de "Pavimentos en carreteras », 2019.

3.3.5 Estabilización de suelos

Según el Manual de Carreteras, sección suelos y pavimentos, la estabilización de suelos se define como el mejoramiento de las propiedades físicas y mecánicas de un suelo a través de procedimientos mecánicos e incorporación de productos químicos, naturales o sintéticos. Tales estabilizaciones, por lo general se realizan en los suelos de subrasante inadecuado o pobre, en este caso son conocidas como estabilización suelo cemento, suelo cal, suelo asfalto y otros productos diversos. En cambio, cuando se estabiliza una subbase granular o base granular, para obtener un material de mejor calidad se denomina como subase o base granular tratada (con cemento o con cal o con asfalto, etc.).

La estabilización de suelos consiste en dotar a los mismos, de resistencia mecánica y permanencia de tales propiedades en el tiempo. Las técnicas son variadas y van desde la adición de otro suelo, a la incorporación de uno o más agentes estabilizantes. Cualquiera sea el mecanismo de estabilización, es seguido de un proceso de compactación. El manual ilustra diferentes metodologías de estabilización como: mejoramiento por sustitución de suelos de la subrasante, estabilización mecánica de suelos, mejoramiento por combinación de suelos, suelos estabilizados con cal, cemento, escorias, emulsión asfáltica, estabilización química del suelo, estabilización con geosintéticos (geotextiles, geomallas u otros).

El Manual de Carreteras “Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos”, Sección suelos y pavimentos, capítulo IX, (2013) detalla los tipos de estabilización de suelos según la clasificación e Índice de plasticidad de suelo a nivel de subrasante (figura 20). Para ello, se debe realizar ensayos de granulometría, por tamizado e hidrómetro, y límites de consistencias de la muestra estudiada.

ÁREA	CLASE DE SUELO	TIPO DE ESTABILIZADOR RECOMENDADO		RESTRICCIÓN EN LL Y IP DEL SUELO	RESTRICCIÓN EN EL PORCENTAJE QUE PASA LA MALLA 200	OBSERVACIONES
1 A	SW ó SP	(1)	Asfalto			
		(2)	Cemento Pórtland			
		(3)	Cal-Cemento-Cenizas volantes	IP no excede de 25		
1 B	SW - SM ó SP - SM ó SW - SC ó SP - PC	(1)	Asfalto	IP no excede de 10		
		(2)	Cemento Pórtland	IP no excede de 30		
		(3)	Cal	IP no menor de 12		
		(4)	Cal-Cemento-Cenizas volantes	IP no excede de 25		
1 C	SM ó SC ó SM-SC	(1)	Asfalto	IP no excede de 10	No debe exceder el 30% en peso	
		(2)	Cemento Pórtland	(b)		
		(3)	Cal	IP no menor de 12		
		(4)	Cal-Cemento-Cenizas volantes	IP no excede de 25		
2 A	GW ó GP	(1)	Asfalto			Solamente material bien graduado.
		(2)	Cemento Pórtland			El material deberá contener cuanto menos 45% en peso de material que pasa la Malla N° 4.
		(3)	Cal-Cemento-Cenizas volantes	IP no excede de 25		
2B	GW - GM ó GP - GM ó GW - GC ó GP-GC	(1)	Asfalto	IP no excede de 10		Solamente material bien graduado.
		(2)	Cemento Pórtland	IP no excede de 30		El material deberá contener cuanto menos 45% en peso de material que pasa la Malla N° 4.
		(3)	Cal	IP no menor de 12		
		(4)	Cal-Cemento-Cenizas volantes	IP no excede de 25		
2C	GM ó GC ó GM - GC	(1)	Asfalto	IP no excede de 10	No debe exceder el 30% en peso	Solamente material bien graduado..
		(2)	Cemento Pórtland	(b)		El material deberá contener cuanto menos 45% en peso de material que pasa la Malla N° 4.
		(3)	Cal	IP no menor de 12		
		(4)	Cal-Cemento-Ceniza	IP no excede de 25		
3	CH ó CL ó MH ó ML ó OH ó OL ó ML-CL	(1)	Cemento Pórtland	LL no menor de 40 IP no menor de 20		Suelos orgánicos y fuertemente ácidos contenidos en esta área no son susceptibles a la estabilización por métodos ordinarios
		(2)	Cal	IP no menor de 12		
IP = Índice Plástico (b) $IP = 20 + (50 - \text{porcentaje que pasa la Malla N° 200}) / 4$				Sin restricción u observación No es necesario aditivo estabilizador	Fuente: US Army Corps of Engineers	

Figura 24. Guía Complementaria Referencial para la Selección del Tipo de Estabilizador. Adaptado del Manual de carreteras, sección suelos y pavimentos, MTC

3.3.5.1 Estabilización por combinación de suelos

La estabilización por combinación de suelos consiste en remover el suelo existente en 15 cm para mezclarlo con otro suelo de préstamo de mejor calidad, para ello se tiene que retirar las partículas menores a 75 mm y se pasará por un proceso de aireación y humedecimiento de tal forma que se cumplan los requerimientos de compactación.

Figura 25. Estabilización de suelos por combinación de material, Brackel constructions products, 2015.

3.3.5.2 Estabilización por sustitución de suelos

Implica la preparación del suelo con material totalmente de reemplazo; para ello, se debe remover el suelo natural según el nivel de excavación indicado, luego se coloca y compacta el suelo en capas hasta que se alcancen las cotas exigidas para la sub-rasante.

Figura 26. Estabilización por sustitución de suelos, Construir Nicaragua, 2016.

3.3.5.3 Estabilización de suelos con Cal

Para este proceso se emplean dos tipos de cal: Óxido cálcico (Cal Anhidra o cal viva) y el hidróxido cálcico (Cal hidratada o cal apagada), la cal que se utilice deberá cumplir con las especificaciones dadas en el Manual de Carreteras “Especificaciones Técnicas para la Construcción” en la sección 301.B.

La mezcla del suelo con cal, produce una reacción química llamado el proceso de floculación en donde las partículas de cal se desplazan sobre la superficie del suelo arcilloso y se realiza un intercambio iónico, haciendo que el suelo aumente su resistencia a la penetración y mitigue su expansión ante la presencia de agua. Asimismo, una de las características más importantes de la cal en el suelo, es el cambio en la plasticidad, aumentando o disminuyendo su límite líquido y límite plástico; también produce un aumento en la humedad óptima de compactación.

Figura 27. Estabilización de suelos con Cal, National Lime Association, 2006.

3.3.5.4 Estabilización de suelos con Cemento

Este tipo de estabilización se emplea para suelos sueltos granulares de tipo A-1, A-2 y A-3, de manera que se obtiene uno endurecido y con mayor resistencia. El contenido óptimo de agua a utilizar se determina mediante el ensayo Proctor. También, la compactación requerida es de 95% de la Máxima Densidad Seca según AASHTO T-180 en el nivel de la subrasante y se recomienda realizar un proceso adecuado de curado para evitar el fisuramiento de las estabilizaciones o las bases tratadas.

Figura 28. Estabilización de suelos con cemento, Asociación Colombiana de Productores de Concreto, 2017.

3.3.5.5 Estabilización con Escoria

Esta técnica es uno de los métodos amigables con la naturaleza, ya que no requiere de explorar nuevas canteras, por lo que no daña el paisaje, además no requiere ser procesado. Si en el material seleccionado hubiera escasez de finos, se puede agregar cal (excepto cal viva) y arena fina.

Figura 29. Estabilización de suelos con escoria, Sebre, 2017.

3.3.5.6 Estabilización con Cloruro de Sodio

La sal es un estabilizante natural e higroscópico compuesta en un 98% de cloruro de sodio y en un 2% de limos y arcillas, sus propiedades le permiten absorber la humedad del aire y del material que lo rodea, y mediante la coagulación se genera una densificación del suelo de manera más rápida y con mayor cohesión. Esto debido al intercambio iónico del Sodio y los minerales del suelo, haciendo el papel de un cementante.

Esta técnica debe emplearse para suelos que tengan menos de 3% en su composición de materia orgánica, índice de plasticidad mayor a 8%; para suelos pasantes de la malla N°200 se emplea un 12%. La cantidad de sal a emplear es entre 50 y 80 kg por metro cúbico de suelo a estabilizar.

Figura 30. Estabilización de suelo con cloruro de sodio, Alcaraz T.M, 2016.

3.3.5.7 Estabilización con Cloruro de Calcio

Este método se emplea debido a que el cloruro de sodio tiene un efecto oxidante, mientras que el cloruro de calcio previene el desmoronamiento del terreno, aumenta la resistencia del suelo y mantiene la humedad en la superficie de la carretera. La dosificación que se recomienda está entre 1 y 2% respecto al peso de suelo suelto.

Figura 31. Estabilización de suelos con cloruro de calcio, Cuchillo O, 2016.

3.3.5.8 Estabilización con Cloruro de Magnesio

El cloruro de magnesio es más efectivo en incrementar la tensión superficial a comparación del cloruro de calcio. Ello debido a que es un material higroscópico,

cohesionaste, de baja temperatura de congelamiento, resistente a la evaporación y altamente soluble en agua.

Figura 32. Estabilización del suelo con el uso de cloruro de magnesio, Miranda C, 2013.

3.3.5.9 Estabilización por compactación

Ugaz M. (2006) señala que:

“La estabilización por compactación parte de un principio básico de mecánica de suelos, que es el de aumentar la densificación del suelo con un contenido de humedad determinado para obtener una disminución en el porcentaje de vacíos, reducción de agua por infiltración y aumento de fricción interna; como consecuencia de todos estos cambios, se logra el aumento en las propiedades de resistencia. Este tipo de estabilización está en función de la energía de compactación. En la actualidad se emplea en los laboratorios geotécnicos la energía propia del ensayo Proctor Modificado con el fin de remoldear las muestras, considerando las condiciones de campo a las que estará sometida”. (p.8)

Figura 33. Compactación de suelos, Yepes V, 2014.

3.3.5.10 Estabilización geo sintéticos

La estabilización con geotextiles se aplica cuando se requiere conformar una capa de base granular sobre un terreno blando o de suelo fino; los geotextiles tienen como funciones: controlar el movimiento lateral del material en la base de la capa granular, separar la capa granular del terreno blando, mantener intacta la capacidad de soporte de la base, controlar la humedad excesiva del terreno blando (evitar la migración de finos y aumentar el grado de consolidación) y mejorar la distribución de cargas. Fiorini A. (2007) describe los tipos de geo-sintéticos utilizados en estabilización de suelos:

Geotextil no tejido utilizado para separación y drenaje, geotextil para refuerzo de subrasante y base, geomalla uniaxial (un sentido) para refuerzo de talud y base. Y geomalla biaxial (dos sentidos) para refuerzo de subrasante y base.

Figura 34. Estabilización de suelos con cloruro de calcio, Cuchillo O, 2016.

4 METODOLOGÍA Y RECOLECCIÓN DE DATOS

4.1 Diseño metodológico

4.1.1 De acuerdo al fin que persigue

Investigación Aplicada:

Borja, M. (2012) describe:

“Busca conocer, actuar, construir y modificar una realidad problemática; y está más interesada en la aplicación inmediata sobre una problemática antes que el desarrollo de un conocimiento de valor universal. Los proyectos de ingeniería civil están ubicados dentro de este tipo de clasificación, siempre y cuando solucionen alguna problemática”. (p.10).

4.1.2 De acuerdo a los tipos de datos analizados

Investigación Cuantitativa:

Borja, M. (2012) describe:

“Plantea que una forma confiable para conocer la realidad es a través de la recolección y análisis de datos, con lo que se podría contestar las preguntas de la investigación y probar las hipótesis. Este tipo de investigación confía en la medición numérica, el conteo y frecuentemente en el uso de la estadística para establecer con exactitud patrones de comportamiento en una población” (p.11).

4.1.3 De acuerdo a la metodología para demostrar la hipótesis

Investigación Experimental:

Borja, M. (2012) describe:

“Es aquella investigación en que la hipótesis se verifica mediante la manipulación deliberada por parte del investigador de las variables; esta investigación determinará la relación causa - efecto de un fenómeno físico o social.” (p.14).

4.2 Población y muestra

Población:

Suelo de la carretera Villa Rica-Oconal- Alto Cedropampa.

Muestra:

Calicata de exploración realizada en la carretera Villa Rica-Oconal-Alto Cedropampa ubicada en la coordenada: (10°44'54.68"S, 75°16'24.95"O) y progresiva 3+000 km.

Se extrajo aproximadamente 200 kg de muestra para la realización del ensayo de Proctor y CBR, ya que se requiere aproximadamente 25 kg por cada ensayo de Proctor y 20 kg para cada ensayo de CBR. Se realizó ensayos para suelo natural y para muestras con 9%, 15% y 21% de cal para cada tipo de ensayo. Para el ensayo CBR se realizó un curado de 4 días.

4.3 Localización y ubicación de la zona de extracción

La carretera seleccionada para esta investigación se encuentra ubicada en el departamento de Pasco, provincia de Oxapampa y distrito de Villa Rica.

Figura 35. Localización de la zona de extracción de muestras. Adaptado de Google Earth, 2017

Figura 36. Carretera Villa Rica-Oconal-Alto Cedropampa. Fuente propia

4.4 Trabajos de campo

1. Excavación de calicatas de 1.50m de profundidad en la progresiva 3+000 km de la carretera seleccionada.

Figura 37. Excavación con la máquina excavadora. Fuente propia

Figura 38. Calicata de 1.50 m de profundidad para extracción de suelo arcilloso. Fuente propia

2. Se extrajeron 200 kg de material arcilloso para que fuera analizado físicamente en el laboratorio.

Figura 39. Recolección de muestras alteradas del suelo arcilloso. Fuente propia.

4.5 Características del Estabilizante

El estabilizante que se usó para realizar los ensayos de laboratorio como el Proctor Modificado y CBR fue Cal de Obra la marca Martell con las siguientes características.

- Color : Blanco Humo o grisáceo
- Aspecto : Polvo
- %Ca(OH)₂ : 3-15%
- Olor : Inodoro
- Densidad Relativa : 2.73 g/cm³

Compuesto formado de trazas de carbonato de calcio, hidróxido de calcio o bien una mezcla de carbonato de calcio y partículas de rocas disgregadas. Es un aportante de calcio. El producto se encuentra disponible en la mayoría de las tiendas del rubro materiales de construcción.

Figura 40. Cal de obra. Adaptado de Sodimac.com.pe, 2018

4.6 Características del suelo

- Calicata : 01
- Lugar de extracción : Carretera “El Oconal”, progresivo km 3+000-
Villa Rica
- Gravedad Específica : 2.62
- Muestra extraída : 200 kg
- Profundidad de extracción : 1.5 m

4.7 Ensayos de laboratorio

Con las muestras extraídas de campo se procedió a realizar los ensayos de laboratorio. Los ensayos de granulometría y ensayos de consistencia servirán para justificar el tipo de estabilización elegido, ya que el MTC recomienda diversos tipos de estabilización según la clasificación SUCS y el Índice de Plasticidad del suelo ensayado.

Luego se procederá a realizar ensayos de Proctor modificado y CBR para muestras de suelo en estado natural, 9%,15% y 21% de cal, en donde se evaluará el comportamiento de sus características físicas de los suelos tales como su densidad seca, optimo contenido de humedad y resistencia a la penetración.

4.7.1 Gravedad específica

Este ensayo se realiza según las indicaciones de la Norma Técnica Peruana NTP 339.131 “SUELOS. Método de ensayo para determinar el peso específico relativo de las partículas sólidas de un suelo”.

Los resultados del ensayo se muestran en la tabla N°09 en el capítulo 5.

4.7.2 Análisis granulométrico por tamizado

Este ensayo se realizará según las indicaciones de la Norma Técnica Peruana NTP 339.128 “SUELOS. Método de ensayo para el análisis granulométrico “. Debido a que la muestra en estudio presenta gran cantidad de finos según antecedentes de la zona se realizará la clasificación por tamizado y por medio del hidrómetro. A continuación, se muestran algunos de los procedimientos en laboratorio del ensayo,

Figura 41. Secado de la muestra en cocina eléctrica. Fuente propia

Figura 42. Lavado de la muestra por la malla N° 200. Fuente propia.

Figura 43. Tamizado del suelo retenido en la malla N° 200 entre las mallas N°10, N°20, N°40, 60, N°140 y N° 200.

- Finalmente se pesaron las muestras retenidas en cada tamiz para proceder a graficar la curva granulométrica. Los resultados e interpretación de ellos se muestran en el capítulo 5 tabla N°10.

4.7.3 Análisis granulométrico por sedimentación

Este ensayo se realizará según las indicaciones de la Norma Técnica Peruana NTP 339.128 “SUELOS. Método de ensayo para el análisis granulométrico “

Algunos de los procedimientos principales son

- De la muestra tamizada que pasa la malla N°200 se toma 50g de suelo seco para realizar este ensayo.
- Como agente dispersante se uso NaPO_3
- Se toma mediciones de solido en el hidrómetro y temperatura de la misma intervalos de tiempo recomendados por la NTP 339.128.
- Se realizan las correcciones de medición; por menisco, por defloculacion y por temperatura.
- Finalmente se clasifica los suelos finos finos según diámetro de partículas

Los resultados se muestran en el capítulo 5 y en la tabla N°11

4.7.4 Ensayos de consistencia: Límites de Atterberg

Estos ensayos se realizaron según las indicaciones de la Norma Técnica Peruana NTP 339.129 “SUELOS. Método de ensayo para determinar el límite líquido, límite plástico, e índice de plasticidad”.

4.7.4.1 Límite Líquido

Los procedimientos realizados en el laboratorio se elaboraron de acuerdo a la norma mencionada. Inicialmente es recomendable reducir el tamaño de las partículas del suelo. Figura N°44. Los resultados se muestran en la tabla N°12.

Figura 44. Reducción del tamaño de las partículas del suelo, para realizar el ensayo de consistencia. Fuente propia

4.7.4.2 Límite Plástico e índice de plasticidad

A continuación, se muestra el procedimiento principal a realizar según la norma mencionada. Figura N°45.

El índice de plasticidad es el rango de humedad entre límite líquido y el límite plástico, los resultados se evidencian en el capítulo 5, tabla N°13 y tabla N°14.

Figura 45. Ensayo de límite plástico. Adaptado de Mecánica de Suelos UPC, 2017

4.7.5 Ensayo Proctor Modificado del suelo natural

Norma usada:

Se realizó según la Norma Técnica Peruana (NTP 339.141); “Suelos. Método de ensayo para la compactación del suelo en laboratorio utilizando energía modificada (2,700 kN-m/m³(56,000 pie-lbf/pie³))”.

Tipo de procedimiento

Según la clasificación granulométrica cumple con el requerimiento de uso del procedimiento “A”,

Procedimiento del método A

- Molde de 101.6 mm (4 pulg) de diámetro.
- Material que pasa la malla N° (4.75mm).
- Capas: 5
- Golpes por capas: 25.
- Uso: Se utiliza, si la malla N°4(4.75–mm) retiene 20% o menor del peso del material.

Los materiales usados, los equipos requeridos y el procedimiento detallado del ensayo en laboratorio se encuentran en la norma NTP. 339.121 mencionada.

Los resultados se muestran en el capítulo N°5 apartado 5.5. Figura N°50 y Tabla N°15.

4.7.6 Ensayo de CBR del suelo natural

Se realizó según la Norma Técnica Peruana (NTP 339.145); “Suelos. Método de ensayo de CBR (Relación de Soporte de California) de suelos compactados en el laboratorio

Resumen del método de ensayo

NTP 339.145 (1999) “Para ensayos realizados sobre materiales compactados a un contenido de agua se preparan tres especímenes. Los especímenes se compactan usando tres diferentes esfuerzos de compactación para obtener pesos unitarios, tanto por encima como por debajo del peso unitario deseado. Después de permitir que los especímenes se cubran de agua para humedecerse, u otro tratamiento específico como curado, cada espécimen estará sujeto a la penetración por un vástago cilíndrico. Los resultados de esfuerzo (carga) versus la profundidad de penetración se plotean para determinar el CBR de cada espécimen. El CBR a densidad especificada se determina con un gráfico de CBR versus el peso unitario seco.

Materiales:

- Muestra alterada seca.
- Papel filtro.

Equipos:

- Equipo CBR (3 moldes cilíndricos con placa de base y collar de extensión, 3 discos espaciadores, 3 placas de expansión, e sobrecarga cada una de 4.5kg. de peso y 3 trípodes)
- Pisón Proctor modificado.
- Balanza con aproximación de 1 gr
- Estufa con control de temperatura.
- Espátula.
- Probeta de 1 000 ml.
- Recipiente de 6 kg. De capacidad.
- Taras identificadas.

Procedimiento

Consta de 3 fases: ensayo de compactación CBR, ensayo de hinchamiento y ensayo carga- penetración.

A. Ensayo de compactación CBR.

- Se Preparó la muestra con el contenido óptimo de humedad determinado en el ensayo de compactación Proctor modificado.
- Se ensambló los moldes cilíndricos con sus placas de base, collares de extensión, discos espaciadores y papeles filtro.
- Se Compactó la muestra en los 3 CBR en cada uno de ellos en 5 capas, el primero con 12 golpes, el segundo con 25 golpes y el tercero con 56 golpes por capa.
- Se determinó la humedad de las muestras de cada molde.
- Se determinó la densidad seca de las muestras de cada molde.

B. Ensayo de hinchamiento

Se Invertió las muestras de tal manera que la superficie libre quede en la parte superior cuando se ensambla nuevamente los moldes en sus placas

- de base.
- • Se colocó sobre cada muestra el papel filtro, la placa de expansión, la sobrecarga, el trípode y el dial de expansión.
- • Se colocó los tres moldes debidamente equipados en un tanque de agua
- durante 4 días (96 horas), registrar las lecturas de expansión cada 24
- horas.

C. Ensayo de carga - penetración.

- Después de los 4 días se retiró los moldes del tanque, se dejó drenar durante 15 minutos.
- Se Colocó la sobrecarga en cada molde, luego se llevó a la prensa hidráulica, se procedió el ensayo de penetración aplicando un pisón a una velocidad de 0.05 pulg/min y se registró las lecturas de carga y de penetración de cada muestra.
- Se determinó nuevamente la densidad humedad y el contenido de humedad de las muestras de cada molde.
- Se Dibujó las 03 curvas esfuerzos - deformación correspondientes a las muestras de cada molde, en escala natural, los valores de la penetración se registraron en el eje de las abscisas y los valores de los esfuerzos en el eje de las ordenadas. (algunas veces es necesario corregir las curvas y cambiar el origen de las coordenadas.
- Se determinó los esfuerzos correspondientes a 0.1 y 0.2 de penetración de cada una de las curvas esfuerzo - deformación.
- Se determinamos los índices CBR para 0.1 y 0.2 de penetración, los cuales se obtienen dividiendo cada valor correspondiente a 0.1" y 0.2" de la muestra ensayada entre el esfuerzo correspondiente a 0.1" y 0.2" de la muestra ensayada entre el esfuerzo patrón correspondiente a 0.1" y 0.2" de la muestra ensayada entre el esfuerzo patrón correspondiente a 0.1" y 0.2".
- Se Dibujó las dos curvas densidad seca versus CBR correspondientes a 0.1" y 0.2" de penetración.
- El índice CBR de diseño es el menor valor obtenido correspondiente al 95% de densidad seca máxima.

*Figura 46.*Ensayo de CBR

4.8 Clasificación SUCS

Se realizó según la Norma Técnica Peruana (NTP 339.134); “Suelos. Método para la clasificación de suelos con propósitos de ingeniería (sistema unificado de clasificación de suelos, SUCS)”

El procedimiento general se menciona a continuación:

- Para la clasificación por este ensayo se necesitan los resultados de los ensayos de consistencia.
- EL primer paso es clasificar si son suelos granulares o suelos finos con el porcentaje de suelo que pasa la malla N° 200.
- Seguidamente se clasifica según el porcentaje del límite líquido, puede ser un ML, CL u OL si el LL es inferior al 50% y puede ser MH, CH u OH si el LL es mayor al 50%
- Finalmente se ingresa a la tabla con los valores exactos del Límite Líquido e Índice de plasticidad

DIVISION PRINCIPAL	SÍMBOLO DEL GRUPO	NOMBRES TÍPICOS	CRITERIO DE CLASIFICACION
SUELOS DE GRANOS GRUESOS 50% o más es retenido en el tamiz No. 200	GRAVAS 50% o más de la fracción gruesa es retenido en el tamiz No. 4	GW	Gravas bien gradadas y mezclas de arena y grava con pocos finos o sin finos
		GP	Gravas y mezclas de gravas y arenas mal gradadas con pocos finos o sin finos
		GM	Gravas limosas, mezclas de grava - arena y limo
		GC	Gravas arcillosas, mezclas de grava - arena y arcilla
	ARENAS Más del 50% de la fracción gruesa pasa por el tamiz No. 4	SW	Arenas y arenas gravosas bien gradadas con pocos finos o sin finos
		SP	Arenas y arenas gravosas mal gradadas con pocos finos o sin finos
		SM	Arenas limosas, mezclas de arena limo
		SC	Arenas arcillosas, mezclas de arena y arcilla
		Clasificación basada en el porcentaje de finos Menos del 5% pasa por el tamiz No. 200 GW, GP, SW, SP Más del 5% pasa por el tamiz No. 200 GM, GC, SM, SC Más del 12% pasa por el tamiz No. 200 Más del 15% a 12% pasa por el tamiz No. 200 Para clasificación de frontera se necesitan símbolos dobles	
		$C_u = D_{60}/D_{10}$ Mayor que 4 $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} D_{60}}$ Entre 1 y 3 Si los criterios para GW no se cumplen	
		Límites de Atterberg localizados bajo la línea "A" o índice de plasticidad inferior a 4. Límites de Atterberg sobre la línea "A" e índice de plasticidad superior a 7. Si los límites de Atterberg se localizan en el área sombreada se debe clasificar utilizando símbolos dobles	
		$C_u = D_{60}/D_{10}$ Superior a 6 $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} D_{60}}$ Entre 1 y 3 Si no se cumplen los criterios para SW	
		Límites de Atterberg localizados bajo la línea "A" o índice de plasticidad inferior a 4. Límites de Atterberg sobre la línea "A" e índice de plasticidad superior a 7. Para los límites de Atterberg localizados en el área sombreada se debe clasificar utilizando símbolos dobles.	
SUELOS DE GRANOS FINOS 50% o más pasa por el tamiz No. 200	LIMOS Y ARCILLAS Límite líquido de 50% o inferior	ML	Limos inorgánicos, arenas muy finas, polvo de roca, arenas finas limosas o arcillosas
		CL	Arcillas inorgánicas de plasticidad baja a media, arcillas gravosas, arcillas arenosas, arcillas limosas, suelos sin mucha arcilla
		OL	Limos orgánicos y arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad
	LIMOS Y ARCILLAS Límite líquido superior a 50%	MH	Limos inorgánicos, arenas finas o limos micáceos o de diatomeas limos elásticos
		CH	Arcillas inorgánicas de alta plasticidad, arcillas grasas
		OH	Arcillas orgánicas de plasticidad alta o media
Suelos altamente orgánicos	PT	Turba, estiércol y otros suelos altamente orgánicos	Para la identificación visual y manual, véase ASTM norma D 2488

Figura 47. Tabla para la clasificación SUCS. Adaptado de wikivia, 2017.

4.9 Clasificación AASHTO

Se realizó según las Normas de la American Association of State Highway and Transportation Officials “ASHTO” 1993.

- Para la clasificación por este ensayo se necesitan los resultados de los ensayos de granulometría y consistencia y del ensayo de granulometría
- La norma clasifica los suelos en siete grupos y se clasifica según los requerimientos de la figura N°55. Además, se calcula el índice de grupo
- Los resultados e interpretación se muestran en el siguiente capítulo.

4.10 Ensayos del suelo arcilloso con adición de 9%,15% y 21% de cal

Los ensayos anteriores son para muestras de suelos en estado natural. Para comprobar la hipótesis es necesario realizar ensayos de laboratorio con diferentes porcentajes de cal, los porcentajes seleccionados son 9%,15% y 21%. Los ensayos a realizar con estas dosificaciones son; Ensayos de consistencia, Proctor modificado y el ensayo de California Bearing Ratio (CBR).

Los resultados e interpretación se muestran en el capítulo siguiente.

5 RESULTADOS E INTERPRETACIÓN

5.1 Gravedad específica del suelo natural y la cal

Los resultados del ensayo de gravedad específica se aprecian en la tabla N° 9, en donde se puede concluir que la gravedad específica de la cal es mayor a la del suelo natural. Estos valores ayudaran a la interpretación de los resultados de futuros ensayos.

Tabla 9
Resultado del ensayo de gravedad específica del suelo natural y cal

SONDAJE		SUELO NATURAL		CAL	
Profundidad(m)		1.5		1.5	
Muestra		M-1		M-1	
Tipo de muestra		MAB		MAB	
N° Fiola		25	26	27	28
1	Peso de fiola + suelo seco (g)	85.15	85.27	74.87	75
2	Peso de fiola (g)	55.12	55.25	54.81	54.93
3	Peso del suelo seco (g)	30.03	30.02	20.06	20.07
4	Peso de fiola + agua + suelo (g)	173.25	173.38	167.08	167.24
5	Peso de fiola + agua (g)	154.68	154.79	154.38	154.49
6	Volumen del suelo (cm ³)	11.46	11.43	7.36	7.32
7	Temperatura (°C)	27	27	27	27
8	Corrección por Temperatura	0.9983	0.9983	0.9983	0.9983
9	Gs	2.62	2.62	2.72	2.74
10	Gs Promedio	2.62		2.74	
11	Diferencia	0.23%		0.60%	
12	Calificativo	Bien		Bien	

Nota: Los resultados obtenidos fueron obtenidos directamente del laboratorio de mecánica de suelos de la empresa MRA y ASOCIADOS

5.2 Ensayos de Granulometría y Consistencia del suelo natural

5.2.1 Análisis Granulométrico

Los resultados del análisis granulométrico por tamizado se muestran en la tabla 10. Este análisis se realizó en dos etapas, la primera el tamizado de la muestra entre la malla de 3" y la malla N°10 y la segunda fue el tamizado del sedimento, luego del lavado, entre la malla N°10 y la malla N°200. El gráfico de la curva granulométrica completa se muestra en el anexo 1.

Tabla 10

Análisis mecánico por tamizado

Sondeo	C-1
Profundidad	1.50-2.00
Tipo de muestra	MAS

Tamiz	Abertura(mm)	Porcentaje Acumulado que pasa (%)
3"	76.2	100
2"	50.8	99.66
1 1/2"	38.1	99.56
1"	25.4	99.46
3/4"	19.05	98.77
1/2"	12.7	97.79
3/8"	9.53	96.36
Nº 004	4.75	91.57
Nº010	2	88.65
Nº020	0.85	85.24
Nº040	0.43	81.13
Nº060	0.25	76.62
Nº140	0.11	71.22
Nº200	0.06	68.42

Nota: Los resultados fueron obtenidos directamente del laboratorio de mecánica de suelos de la empresa MRA y ASOCIADOS

Uno de los valores importantes de esta tabla es el porcentaje de suelo que pasa la malla N°10 de 88.65%, ya que este porcentaje pasa a ser el 100% de la muestra para la realización del ensayo de sedimentación por medio del hidrómetro.

También, según los resultados de la tabla N°10 se puede cuantificar porcentualmente los tipos de suelos, siendo 8.43% gravas, 23.15% arenas y 68.42% finos (arcillas y limos).

5.2.2 Ensayo de sedimentación

Los resultados del ensayo de sedimentación por medio del hidrómetro se muestran en la tabla N° 11. El gráfico de la curva granulométrica se muestra en el anexo 1. Luego de finalizar el ensayo se procede a realizar el lavado en la malla #200 para luego secarlo al horno y tamizar el sedimento el cual está considerado en la tabla anterior.

Tabla 11
Resultado del ensayo de sedimentación

Tiempo t (min)	CT	T (°C)	Ra	Rc	N (%)	N correg. (%)	R	L	m	Gw	K	D(mm)
0.25	0.20	21.80	43.68	37.58	75.92	67.30	44.68	8.97	0.01	1.00	0.014	0.0815
0.50	0.20	21.80	42.56	36.46	73.66	65.30	43.56	9.16	0.01	1.00	0.014	0.0582
1.00	0.20	21.80	40.75	34.65	69.99	62.05	41.75	9.45	0.01	1.00	0.014	0.0418
2.00	0.20	21.80	39.39	33.29	67.24	59.61	40.39	9.68	0.01	1.00	0.014	0.0299
5.00	0.20	21.80	38.04	31.94	64.52	57.20	39.04	9.90	0.01	1.00	0.014	0.0191
10.00	0.20	21.80	35.77	29.67	59.94	53.14	36.77	10.27	0.01	1.00	0.014	0.0138
15.00	0.20	21.80	34.65	28.55	57.66	51.12	35.65	10.45	0.01	1.00	0.014	0.0114
30.00	0.20	21.90	32.17	26.07	52.66	46.68	33.17	10.86	0.01	1.00	0.014	0.0082
60.00	0.40	22.30	29.65	23.75	47.97	42.53	30.65	11.27	0.01	1.00	0.013	0.0058
120.00	0.70	23.00	27.85	22.25	44.95	39.85	28.85	11.57	0.01	1.00	0.013	0.0041
240.00	1.30	25.10	23.30	18.30	36.96	32.77	24.30	12.31	0.01	1.00	0.013	0.0029
480.00	1.30	25.00	19.64	14.64	29.57	26.21	20.64	12.91	0.01	1.00	0.013	0.0021
1440.00	0.00	20.80	16.98	10.68	21.57	19.12	17.98	13.35	0.01	1.00	0.014	0.0013

Nota: Los resultados fueron obtenidos directamente del laboratorio de mecánica de suelos de la empresa MRA y ASOCIADOS

- Siguiendo los procedimientos de la norma se usó 50g de muestra secado al horno que pasa la malla N°10
- De la tabla, la columna Rc representa las mediciones del hidrómetro con la corrección por menisco, defloculante y temperatura.
- La columna N (%) representa el porcentaje de suelo de la muestra ensayada para cada tamaño de partícula obtenida en el ensayo.
- La columna Ncorreg. (%) representa el porcentaje de clasificación de suelos finos del total de la muestra.
- Se clasifica en 38.5% de arcillas y 29.7% de limos

5.2.3 Limite Líquido

Los resultados del ensayo de límite líquido se muestran en la tabla 12. El límite líquido obtenido de la muestra fue de 33.7 % que se aprecia en la figura 48.

Tabla 12

Resultados del ensayo de Limite Liquido

Recipiente	1	2	3
Peso de tara (g)	18.32	18.00	23.9
Peso del suelo húmedo + tara (g)	28.51	29.08	34.54
Peso del suelo seco + Recipiente gr	25.85	26.32	31.97
Peso del agua gr	2.66	2.76	2.57
Peso del suelo seco gr	7.53	8.32	8.04
% de humedad	35	33	32
Numero de golpes	17	28	38

Nota: Los resultados obtenidos fueron obtenidos directamente del laboratorio de mecánica de suelos de la empresa MR y ASOCIADOS S.A.C

Figura 48. Grafico de fluidez. Fuente propia, 2018

5.2.4 Limite Plástico

Del ensayo realizado se obtuvo un Limite Plástico de 19.79%. Los resultados se muestran en la tabla 13.

Tabla 13
Resultados del ensayo de Limite Plástico

Recipiente	1	2
Peso de tara (g)	23.35	21.33
Peso del suelo húmedo + tara (g)	29.42	27.49
Peso del suelo seco + tara (g)	28.41	26.48
Peso del agua (g)	1.01	1.01
Peso del suelo seco gr	5.06	5.15
% de humedad	19.96	19.61
% Promedio	19.79	

Nota: Los resultados obtenidos fueron obtenidos directamente del laboratorio de mecánica de suelos de la empresa MR y ASOCIADOS S.A.C.

5.2.5 Índice de plasticidad

El índice de plasticidad de la muestra ensayada resultó 13.7%, ver tabla 14.

Tabla 14
Índice de plasticidad

Límite Líquido (%)	33.70
Límite Plástico (%)	20
Índice de Plasticidad IP (%)	13.7

Nota: Los resultados obtenidos fueron obtenidos directamente del laboratorio de mecánica de suelos de la empresa MR y ASOCIADOS S.A.C.

5.3 Clasificación SUCS del suelo natural

Para un suelo con índice de plasticidad de 13.7% y Limite líquido de 33.7% el tipo de suelo según la clasificación SUCS es una arcilla de baja plasticidad (CL). Se calcula según los parámetros de la figura N°47.

5.4 Clasificación AASHTO del suelo natural

Parámetros:

- %Pasante malla N° 200 : 68.42%
- Límite líquido : 34%
- Índice de plasticidad : 14%

Con los resultados obtenidos la clasificación AASHTO del suelo es A-6, ver figura 49.

Clasificación general	Materiales granulares (35% o menos pasa el tamiz #200)							Materiales limoarcillosos (más de 35% pasa el tamiz #200)			
Clasificación de grupo	A-1		A-3 ^A	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5 A-7-6
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				
Tamizado, % que pasa											
No. 10 (2.00mm)	50 máx.	...	...	...	...	...	...	...	...		...
No. 40 (425µm)	30 máx.	50 máx.	51 mín.	...	...	...	...	...	...		...
No. 200 (75µm)	15 máx.	25 máx.	10 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.	N.P.	B				10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín. ^B
Tipos de materiales característicos	Cantos, grava y arena		Arena fina	Grava y arena limoarcillosas				Suelos limosos		Suelos arcillosos	
Calificación	Excelente a bueno							Regular a malo			

^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.

Figura 49. Clasificación de suelos según la Norma AASHTO. Adaptado de “clasificación AASHTO”, por Wikivia (2011).

Cálculo del Índice de grupo; esta expresada por la siguiente expresión

$$IG = (F_{200} - 35) \times [0.2 + 0.005(LL - 40)] + 0.01 \times (F_{200} - 15) \times (IP - 10)$$

$$IG = (68.42 - 35) \times [0.2 + 0.005(34 - 40)] + 0.01 \times (68.42 - 15) \times (14 - 10)$$

$$IG = 8$$

La clasificación del suelo en estudio es un suelo arcilloso plástico con índice de grupo igual a 8; A-6₍₈₎.

5.5 Resultados del ensayo Proctor Modificado y CBR del suelo natural

Según el ensayo Proctor Modificado, para el suelo natural, el óptimo contenido de humedad es 13.4 %, con el cual se logra la máxima densidad seca (MDS) igual a 1.85 g/cm³. En la figura 50 se puede apreciar la máxima densidad seca que se obtiene para el valor del óptimo contenido de humedad.

Figura 50. Curva de compactación de Proctor Modificado. Adaptado de MR & Asociados S.A.C

Luego de obtener el óptimo contenido de humedad y la máxima densidad seca se procedió a saturar los moldes con la muestra, por 96 horas, que servirán para calcular el CBR,

Tabla 15
CBR luego de la saturación

	MOLDE 1	MOLDE 2	MOLDE 3
DENSIDAD SECA (g/cm ³)	1.85	1.74	1.57
CBR (0.1" de Penetración)	3.7	3.2	2.3
CBR (0.2" de Penetración)	4.4	3.9	3
GOLPES	56	25	10
% DE EXPANSIÓN	3.99	5.15	5.54

Nota: Los resultados obtenidos fueron obtenidos directamente del laboratorio de mecánica de suelos de la empresa MRA y ASOCIADOS S.A.C

Con los valores del CBR para diferentes contenidos de humedad menores al óptimo se procede a graficar las curvas para cada perforación 0.1" y 0.2" para calcular el CBR del suelo al 95% de la MDS y al 100% de la MDS Figura 51 y los resultados se muestran en la tabla N°16.

Figura 51. Índice CBR vs Densidad Seca (g/cm³)

Tabla 16

Resultados del CBR al 95% y 100% de la MDS

MAXIMA DENSIDAD SECA (g/cm³):	1.85	
HUMEDAD OPTIMA:	13.40%	
PENETRACIÓN (pulg.)	0.1"	0.2"
CBR al 95% de la MDS:	3.3	4.0
CBR al 100% de la MDS:	3.7	4.4
CONDICIÓN DE LA MUESTRA	4 días de Saturación	
SOBRECARGAR	10 libras (4.55)	

Nota: Los resultados obtenidos fueron obtenidos directamente del laboratorio de mecánica de suelos de la empresa MRA y ASOCIADOS S.A.C

5.6 Resumen de los resultados de ensayos del suelo natural

Tabla 17

Resultados de ensayos del suelo natural

Límite Líquido (%)	34
Límite Plástico (%)	20
Índice de Plasticidad IP (%)	14
Clasificación SUCS	CL
Clasificación AASHTO	A-6(8)
Proctor modificado	
Dsmáx	1.85 g/cm ³
Wop	13.40%
Ensayo CBR	
CBR de diseño al 95% de MDS	3.3%
CBR de diseño al 100% de MDS	3.7%

Nota: Los resultados obtenidos fueron obtenidos directamente del laboratorio de mecánica de suelos de la empresa MRA y ASOCIADOS S.A.C

5.7 Resumen de los resultados de ensayos con 9% de cal

Tabla 18

Resultados de ensayos del suelo con cal al 9%

Límite Líquido (%)	30.18
Límite Plástico (%)	23.91
Índice de Plasticidad IP (%)	6.27
Proctor modificado	
Dsmáx	1.87 g/cm ³
Wop	14.60%
Ensayo CBR	
CBR de diseño al 95% de MDS	3.8%
CBR de diseño al 100% de MDS	5.1%

Nota: Los resultados obtenidos fueron obtenidos directamente del laboratorio de mecánica de suelos de la empresa MRA y ASOCIADOS S.A.C

5.8 Resumen de los resultados de ensayos con 15% de cal

Tabla 19

Resultados de ensayos del suelo con cal al 15%

Límite Líquido (%)	27.86
Límite Plástico (%)	24.57
Índice de Plasticidad IP (%)	3.29
Proctor modificado	
Dsmáx	1.89 g/cm3
Wop	14%
Ensayo CBR	
CBR de diseño al 95% de MDS	5.9%
CBR de diseño al 100% de MDS	6.4%

Nota: Los resultados obtenidos fueron obtenidos directamente del laboratorio de mecánica de suelos de la empresa MRA y ASOCIADOS S.A.C

5.9 Resumen de los resultados de ensayos con 21% de cal

Tabla 20

Resultados de ensayos del suelo con cal al 21%

Límite Líquido (%)	26.43
Límite Plástico (%)	24.65
Índice de Plasticidad IP (%)	1.78
Proctor modificado	
Dsmáx	1.88 g/cm3
Wop	13.60%
Ensayo CBR	
CBR de diseño al 95% de MDS	4.1%
CBR de diseño al 100% de MDS	5.1%

Nota: Los resultados obtenidos fueron obtenidos directamente del laboratorio de mecánica de suelos de la empresa MRA y ASOCIADOS S.A.C

5.10 Análisis de resultados

5.10.1 Limite Líquido, Limite Plástico e Índice de Plasticidad

Tabla 21

Resumen Límite Líquido, Limite Plástico e Índice de Plasticidad

% de Cal	Límite Líquido	Límite Plástico	Índice de plasticidad	% que decae IP
Suelo natural	33.70	19.79	13.73	
9%	30.18	23.91	6.27	55.21%
15%	27.86	24.87	2.99	78.64%
21%	26.43	24.65	1.78	87.29%

Nota: Los resultados obtenidos fueron obtenidos directamente del laboratorio de mecánica de suelos de la empresa MRA y ASOCIADOS S.A.C

Figura 52. Comportamiento del Límite Líquido frente a diferentes porcentajes de cal.

Figura 53. Comportamiento del Límite Plástico frente a diferentes porcentajes de cal.

Figura 54. Comportamiento del Índice de Plasticidad frente a diferentes porcentajes de cal

El Límite Líquido sufrió un decremento progresivo y significativo con el incremento de los porcentajes de cal, esto se debe al sellamiento que realiza el catión calcio de los espacios entre las partículas de arcilla, obstaculizando el ingreso del agua. La frontera superior del estado plástico tuvo un incremento apreciable y el índice de plasticidad decreció considerablemente.

Figura 55. Comportamiento de los límites de consistencia al variar la dosis de cal

5.10.2 Compactación Proctor y CBR

Tabla 22

Compactación Proctor y CBR

% de Cal	Dsmax (gr/cm ³)	W%	CBR (0.1'') al 95% de la MDS	CBR (0.1'') al 100% de la MDS	% de variación de CBR
0%	1.85	13.4	3.3	3.7	10.81%
9%	1.87	14.6	3.8	5.1	34.21%
15%	1.89	14	5.9	6.4	8.47%
21%	1.88	16.6	4.1	5.1	24.39%

Nota: Los resultados fueron obtenidos directamente del laboratorio de mecánica de suelos de la empresa MRA y ASOCIADOS

Figura 56. Comportamiento de la Dsmax sobre los porcentajes de cal.

Figura 57. Contenido de humedad (W%) vs porcentajes de cal.

Figura 58. Comportamiento del CBR al 100% de la MDS vs porcentajes de cal.

Figura 59. Comportamiento del CBR al 95% de la MDS vs porcentajes de cal.

- Según los resultados del ensayo de compactación la máxima densidad seca aumenta al incrementar dosis de cal. Esto ocurre debido a que la gravedad específica de la cal es mayor que la del suelo ensayado. (Figura 56).
- El contenido de humedad del suelo aumenta al incrementar porcentajes de cal al suelo, es decir a mayor dosis de cal mayor contenido de agua. (Figura 57).
- Para dosis mayores al 15% el valor del CBR decrece, ya que el elemento se comporta como un nuevo material y con características diferentes. (Figura 58).
- El CBR de diseño al 100% de la MDS aumenta desde 3.7 hasta un máximo de 6.4 y luego comienza a decrecer el valor.
- El CBR de diseño al 95% de la MDS aumenta desde 3.3 hasta un máximo de 5.9 y luego comienza a decrecer el valor.

6 ANÁLISIS COMPARATIVO DE COSTOS

En primer lugar, se realizará dos diseños de la estructura del pavimento, uno de ellos con una subrasante natural y el otro con una subrasante mejorada con cal, es decir con un mayor CBR.

Posteriormente se realizará un análisis comparativo de costos, que incluye mano de obra, materiales y equipos necesarios para construir 1 km de la estructura de pavimento diseñada con diferentes CBR. Este análisis se realizará con el fin de cuantificar la variación del costo de construcción del pavimento sobre una subrasante mejorada y sobre una subrasante en estado natural.

6.1 Diseño de la estructura de pavimento

Se realizó el diseño de un pavimento flexible mediante el Método “AASHTO 1993”. Se usó los valores de ejes equivalentes (EAL) del estudio realizado en una carretera cercana a la zona de estudio. Se diseñó para un valor de EAL de 1, 357,677 y para valores de CBR al 95% de la MDS. En donde se usó CBR de 3.3%, suelo natural, y de 5.9%, suelo mejorado. Todos los coeficientes estructurales fueron obtenidos de las tablas del MTC.

Los coeficientes estructurales a usar pueden ser los que figuran en la figura N°60, que son valores de una carretera experimental AASHTO, así como también se pueden adquirir con el uso de ábacos de la figura N°61, figura N°62 y figura N°63.

Componentes de un pavimento	Coeficientes (3)		
	a_1	a_2	a_3
<i>Capa de rodamiento</i>			
Mezcla en sitio (estabilidad baja)	0.20		
Mezcla en planta (estabilidad alta)	0.44*		
Arena asfalto	0.40		
<i>Capa Base</i>			
Grava arenosa		0.07 (2)	
Piedra picada		0.14*	
Base tratada con cemento			
(no un suelo-cemento):			
650 lb/pulg ² , o más (1)		0.23 (2)	
400 a 650		0.20	
400 " , o menos		0.15	
Base tratada con material bituminoso:			
De gradación gruesa		0.30 (2)	
Arena asfalto		0.25	
Base tratada con cal		0.15-0.30	
<i>Sub-base</i>			
Grava arenosa			0.11*
Arena o arcilla arenosa			0.05-0.10

(1) Resistencia a la compresión al cabo de 7 días.
(2) Estos valores se derivan de los ensayos de campo efectuados en la Carretera Experimental AASHO, pero no tienen la exactitud de los valores determinados que se señalan con un asterisco.
(3) Se recomienda analizar estos coeficientes y hacer los cambios que la experiencia aconseje.
* Valores tomados de la ecuación derivada de los ensayos efectuados en la Carretera Experimental AASHO.

Figura 60. Coeficientes estructurales AASHTO para el diseño de pavimentos flexibles. Adaptado de Wordpress, por Navarro (2008)

Figura 61. Curva de coeficiente estructural a_1 . Adaptado de AASHTO Guide for designing of pavement Structures 1993.

Figura 62. Curva de coeficiente estructural a_2 . Adaptado de AASHTO Guide for designing of pavement Structures 1993

Figura 63. Curva de coeficiente estructural a_3 . Adaptado de AASHTO Guide for designing of pavement Structures 1993

6.1.1 Diseño sobre la subrasante natural con un CBR 3.3 %

Para el cálculo de los coeficientes se considera los siguiente.

- Para el valor del coeficiente a_1 se considera 0.44 para un módulo de mezcla a una temperatura de 20°C de acuerdo a lo estipulado en la guía AASHTO y según se indica en la figura 59.

Tabla 23

Coficiente estructural para el diseño del pavimento flexible

Datos para el diseño	
Confiabilidad =	0.95
CBR =	3.3
$a_1 = 0.0052 \times E^{0.555} =$	0.44
$a_2 =$	0.14
$a_3 =$	0.11
$Z_r =$	-1.65
$S_o =$	0.45
PSI (4.2-2.2)	2.20
$p_t =$	2.00
$M_r (\text{psi}) = 2555 \times \text{CBR}^{0.64} =$	5,486
Inicial =	4.20

Nota: Los coeficientes fueron obtenidos del Manual de Suelos, Geología y Pavimentos del MTC

Tabla 24

Diseño de la estructura de pavimento

DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES	
TRAMO: Km. 3+000 - Km. 4+000	
CARRETERA Villa Rica- Oconal -Alto Cedropampa	
MÉTODO AASHTO 1993	
Espesor de la carpeta asfáltica (m)	0.12
Espesor de la Base (m) CBR=	0.22
Espesor de la Subbase (m) CBR=	0.18
SN =(a1*esp.c.asf/0.0254) +(a2*esp. base/0.0254) +a3*esp. subbase/0.0254)	4.07
Zr * So	-0.74
9.36*log (SN+1)-0.20	6.40
log (PSI/ (4.2-1.5)) /((0.40+(1094) /(SN+1)^{5.19}))	-0.139
2.32*log*M_R - 8.07	0.68
log w₁₈	6.20
EAL = w₁₈ DISEÑO	1,581,586.13
EAL REQUERIDO	1,357,677.00
EAL Diseño/EAL Requerido >1	1.16

Nota: Los resultados fueron obtenidos por el método iterativo

6.1.2 Diseño sobre una subrasante mejorada con un CBR 5.9 %

Tabla 25

Diseño con un CBR 5.90

Datos para el diseño	
Confiabilidad =	0.95
CBR =	5.90
$a_1 =$	0.44
$a_2 =$	0.14
	0.11
$Z_r =$	-1.65
$S_o =$	0.45
PSI (4.2-2.2)	2.20
$p_t =$	2.00
$Mr(psi) = 2555 \times CBR^{0.64} =$	7,957
Inicial =	4.20

Nota: Los coeficientes fueron obtenidos del MTC

Tabla 26

Diseño de la estructura de pavimento

DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES	
TRAMO: Km. 3+000 - Km. 4+000	
CARRETERA Villa Rica- Oconal -Alto Cedropampa	
MÉTODO AASHTO 1993	
Espesor de la carpeta asfáltica (m)	0.12
Espesor de la Base (m)	0.18
Espesor de la Subbase (m)	0.14
SN =(a1*esp.c.asf/0.0254) +(a2*esp. base/0.0254) +a3*esp. subase/0.0254)	3.68
Zr * So	-0.74
9.36*log (SN+1)-0.20	6.07
log (PSI/ (4.2-1.5)) / ((0.40+(1094) /(SN+1)^{5.19}))	-0.116
2.32*log*M_R - 8.07	0.98
log w₁₈	5.61
EAL = w₁₈ DISEÑO	1,563,764.50
EAL REQUERIDO	1,357,677
EAL Diseño/EAL Requerido >1	1.15

Nota: El valor del EAL fue adquirido del estudio y análisis de transito de una carretera cercana a la zona de estudio.

Los espesores de las capas de la estructura del pavimento sobre una subrasante mejorada de CBR igual a 5.9% son menores a los espesores de un pavimento sobre un suelo natural con CBR igual a 3.3 %. Con estos espesores se procedieron a realizar el análisis comparativo de costos para construir la estructura de pavimento.

6.2 Análisis de precios unitarios de la estructura del pavimento

6.2.1 Análisis de precios unitarios

Tabla 27

Precios Unitarios para la construcción de base de una estructura de pavimento

Partida	305 ^a					
Rendimiento	M3/Día	MO	357	EQ	357	60.306
Código	Descripción de Recurso	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.
Mano de Obra						
0147010001	Capataz	HH	1	0.0224	18.44	0.413
0147010004	Peón	HH	4	0.0896	11.58	1.038
						1.451
Equipos						
0337010001	Herramientas manuales	%MO	1	5	1.45	7.250
0349030046	Rodillo liso vibratorio autop 101-135 HP 10-12 T	HM	1	0.0224	135.08	3.026
0349090001	Motoniveladora 145-150 HP	HM		0.0224	187.97	4.211
						14.486
Subpartidas						
930101130101	Agua para la obra	M3		0.12	17.94	2.153
930101930301	Material granular	M3		1.2	35.18	42.216
						44.369

Nota: Adaptado de “Estudio de mejoramiento y construcción de carretera ruta 10, tramo Huamachuco-Juanjui”, 2011.

Tabla 28
Precios Unitarios para la construcción de Sub-base de una estructura de pavimento

Partida	305 ^a
----------------	------------------

Rendimiento	M3/Día	MO	357	EQ	357	Costo unitario directo por m3	40.2
Código	Descripción de Recurso	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.	
Mano de Obra							
0147010001	Capataz	HH	1	0.0189	18.44	0.349	
0147010004	Peón	HH	4	0.0755	11.58	0.874	
						1.223	
Equipos							
0337010001	Herramientas manuales	%MO	1	5	1.22	6.100	
0349030046	Rodillo liso vibratorio autop 101-135 HP 10-12 T	HM	1	0.0189	135.08	2.553	
0349090001	Motoniveladora 145-150 HP	HM		0.0189	187.97	3.553	
						12.206	
Subpartidas							
93010113010							
1	Agua para la obra	M3		0.12	17.94	2.153	
93010193030							
1	Material granular	M3		1.2	20.54	24.648	
						26.801	

Nota: Adaptado de “Estudio de mejoramiento y construcción de carretera ruta 10, tramo Huamachuco-Juanjui”, 2011.

Tabla 29
Precios unitarios para la construcción de la carpeta asfáltica

Partida	PAVIMENTO DE MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE					
Rendimiento	m3/DIA	360	360	CD	m3	443.93
		MO	EQP			
Código	Descripción Recurso	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.
Mano de Obra						2.34
147010001	CAPATAZ	hh	0.2	0.004	19.18	0.09
147010002	OPERARIO	hh	2	0.044	14.75	0.66
147010003	OFICIAL	hh	2	0.044	12.84	0.57
147010004	PEON	hh	4	0.089	11.58	1.03
Materiales						426.3222
221000001	CEMENTO PORTLAND TIPO I (42.5 kg)	bls		0.9	21.09	18.981
253000002	PETROLEO DIESEL # 2	gal		5	11.81	59.05
220010003	CEMENTO ASFALTICO PEN 60 - 70	gal		36	9.67	348.29
Equipos						15.27
337010001	HERRAMIENTAS MANUALES	%MO	3	1.99	0.06	0.36
349050004	CALENTADOR DE ACEITE 5 HP 468 p3	hm	1	0.0222	18.77	0.42
349050015	SECADOR ARIDOS 2 MOTOR EQUIPO 70 HP 60-115 ton/h	hm	1	0.0222	38.61	0.86
349150000	GRUPO ELECTROGENO 116 HP 75 KW	hm	1	0.0222	57.75	1.28
349150005	GRUPO ELECTROGENO 230 HP 150 KW	hm	1	0.0222	104.66	2.32
349040009	CARGADOR SOBRE LLANTAS 125 HP 2.5 yd3	hm	1	0.0222	153.29	3.40
349260006	PLANTA DE ASFALTO DE 150 ton/h	hm	1	0.0222	298.51	6.63

Nota: Adaptado de “Estudio de mejoramiento y construcción de carretera ruta 10, tramo Huamachuco-Juanjui”, 2011.

6.2.2 Presupuesto

Tabla 30

Presupuesto para la construcción de pavimento flexible sobre una subrasante de CBR igual a 5.9 %

Ítem	CBR	Espesor	Ancho	Longitud	Metrado (m3)	PU (S/ * M3)	Costo por capa (x km)
Base	5.9	0.14	7.2	1000	1008	60.31	60,792.48
Subbase	5.9	0.18	7.2	1000	1296	40.20	52,099.20
Carpeta Asfáltica	5.9	0.12	7.2	1000	864	443.93	383,555.52
TOTAL							496,447.20

Nota: El análisis del presupuesto se realizó por cada km de carretera construida.

Tabla 31

Presupuesto para la construcción de pavimento flexible sobre una subrasante de CBR igual a 3.3 %

Ítem	CBR	Espesor	Ancho	Longitud	Metrado (m3)	PU (S/ * M3)	Costo por capa (x km)
Base	3.3	0.18	7.2	1000	1296	60.31	78,161.76
Subbase	3.3	0.22	7.2	1000	1584	40.20	63,676.80
Carpeta Asfáltica	3.3	0.12	7.2	1000	864	443.96	383,555.52
TOTAL							525,394.08

Nota: El análisis del presupuesto se realizó por cada km de carretera construida.

Luego del análisis del presupuesto para la estructura de pavimento de una subrasante estabilizada con 15% de cal el ahorro de mano de obra, materiales y equipos es de S/ 28,946.88 por kilómetro. El costo de la construcción de la carretera disminuye por efecto del coste de terreno y menor material para la estructura de pavimento.

7 CONCLUSIONES

- Se realizó el estudio de sus propiedades físicas y se concluye que las características físicas del suelo en estudio son: gravedad específica 2.63, porcentaje de grava 8.43%, porcentaje de arena 23.15% y cantidad de finos 68.42% e índice de plasticidad de 13%.
- Se realizó la clasificación de los suelos por el método AASHTO Y SUCS y se concluye que la muestra en estudio fue una arcilla de baja plasticidad CL según SUCS y un suelo arcilloso plástico con índice de grupo 8; A-6(8) según AASHTO. Como terreno de fundación para obras viales está clasificado como regular a malo.
- Se determinó la máxima densidad seca (MDS) y el óptimo contenido de humedad del suelo con diferentes dosis de cal aplicando Proctor Modificado Método A. La MDS fue de 1.85 g/cm³ que se logra con un óptimo contenido de humedad de 13.40%.
- Con los valores obtenidos del ensayo de Proctor se procedió a estimar el valor del CBR, en la condición de suelo natural, el cual fue igual a 3.3% al 95% de la máxima densidad seca, por lo que cualitativamente es de baja capacidad de soporte.
- De los estudios realizados se comprobó que con una adición del 15% de cal al suelo natural, el CBR se incrementó en 78.8%, esto significaba que el nuevo valor de CBR al 95% de la MDS para este suelo estabilizado fue de 5.9%.
- En estudios anteriores la máxima densidad seca disminuye conforme se incrementa los porcentajes de cal, pero en esta investigación esta aumentó. Esto se debió a que la gravedad específica de la cal usada fue mayor a la del suelo, ver tabla 32.

Tabla 32

Variación de la Máxima Densidad Seca y CBR para diferentes porcentajes de cal

% de cal	Máxima Densidad Seca (MDS) (gr/cm ³)	CBR (0.1") al 95% de la MDS
Suelo natural	1.85	3.3
9%	1.87	3.8
15%	1.89	5.9
21%	1.88	4.1

Nota: Los resultados obtenidos fueron obtenidos directamente del laboratorio de mecánica de suelos de la empresa MRA y ASOCIADOS S.A.C

- Se determinó que el espesor de la estructura de pavimento a construir sobre el suelo estabilizado con 15% de cal y CBR de 5.9 se reduce en 15.4% con respecto a la estructura de pavimento sobre el suelo natural sin estabilizar. Ver tabla 33

Tabla 33

Cuadro comparativo de diseño de la estructura de pavimento flexible

% de cal	CBR (0.1") al 95% de la MDS	Sub Base (m)	Base (m)	Carpeta Asfáltica (m)	Estructura de pavimento (m)
Suelo natural	3.3	0.18	0.22	0.12	0.52
15%	5.9	0.14	0.18	0.12	0.44

Nota: Los resultados del fueron obtenidos por el método iterativo AASHTO 1993

- El costo disminuye por efecto de corte del terreno. Es decir, menor volumen a excavar, por ende, menor mano de obra y menor uso de materiales y equipos. El ahorro en costo de construcción por cada km de carretera es de S/ 28,946.88. Ver tabla 34.

Tabla 34

Comparativo de costos de construcción de 1 km de carretera

% de cal	CBR (0.1") al 95% de MDS	Costo (S/*km)
Suelo natural	3.3	S/ 525,394.08
15%	5.9	S/ 496,447.20

Nota: El costo solo implica MO

8 RECOMENDACIONES:

- Dada la condición de suelo parcialmente saturado, es recomendable tomar las muestras en épocas oportunas considerando como menos favorable la época lluviosa, ya que las arcillas tienden a expandirse.
- Es recomendable hacer un cuarteo adecuado para obtener muestras alteradas (Ma) representativas, para límites de Atterberg se recomienda utilizar el suelo que pase la malla número 40 que corresponde a la fracción fina.
- Es recomendable utilizar cal de cantera o cal viva, dado que este material contiene un mayor % de CaO_2 y se emplearía un menor porcentaje de cal para lograr un incremento considerable de CBR.
- Es recomendable considerar un tiempo de curado adecuado (4 días) para realizar en ensayo de CBR, ya que, al haber mayor tiempo de curado, la expansión de las arcillas es mayor por lo que el valor de CBR disminuye.
- Es recomendable utilizar el 15% de cal para estabilizar el suelo con las condiciones dadas según el tipo de material utilizado para garantizar un incremento de 5.9 % en el valor de CBR.
- Durante la prueba de lavado para la clasificación granulométrica, es recomendable realizarlo de manera cuidadosa para evitar perder partículas de muestra en el agua.
- La Norma CE.020 recomienda utilizar como máximo 8% de cal, estos deben cumplir con los requisitos de la NTP 334.125: 2002 “Cal viva y cal hidratada para estabilización de suelos”. Esta norma especifica que la cal debe contener óxido de Calcio y Magnesio como mínimo en 90%. Esta investigación, se realizó con cal que contiene como máximo 15% de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, es por ello que los porcentajes usados superan el 8% siendo 21% el máximo utilizado.
- Según el MTC- “Manual de carreteras de bajo volumen de tránsito” se recomienda que cuando las subrasantes presenten valores de CBR menores a 6% se proceda a eliminar el material y colocar como remplazo un material granular con CBR mayor a 10% y un índice de plasticidad menor a 10%. En esta investigación el CBR obtenido de la subrasante mejorada es de 5.9%, por lo que no se recomienda construir una estructura de pavimento sobre esta y se sugiere para futuras investigaciones trabajar con dosificaciones cercanas a lo especificado en la norma.

9 REFERENCIAS

- Carrillo, A. (1997). *Diseño geotécnico en los suelos de la selva*. Geotecnia de los suelos peruanos. Artículo 6, parte 1. Conferencia Especial, Lima, Perú.
- Diario El Siglo (2018). *Carretera Villa Rica- Puerto Bermudez en pésimo estado*. Recuperado de <http://diarioelsiglo.com/carretera-villa-rica-puerto-bermudez-pesimo-estado/> [Consulta: 20 de abril del 2018]
- Decky, M., Remisová, E., Hájek, M., & Pitoňák, M. (2016). *In situ determination of the California Bearing Ratio of pavement subgrade*. Proceedings of the International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM, pp 855-861.
- Ekeocha, N. E., & Egesi, N. (2014). *Evaluation of Subgrade Soils using California Bearing Ratio (Cbr) in Parts of Rivers State*. Journal Of Applied Sciences & Environmental Management, Vol. 18(2), pp 185-187. doi:10.4314/jasem.v18i2.5
- Stoltz, G; Cuisinier, O; Masrouri, F. (2012). *Multi-scale analysis of the swelling and shrinkage of a lime-treated expansive clayey soil*. Vol.61, pp44-51. doi: 10.1016/j.clay.2012.04.001
- Farook, K; Khalid, U; Mujtaba, H. (2015). *Prediction of Compaction Characteristics of Fine-Grained Soils Using Consistency Limits*. Vol.41, pp 1319-1328. doi: 10.1007/s13369-015-1918-0
- Leite, R., Cardoso, R., Cardoso, C., Cavalcante, E., & de Freitas, O. (2016). *Lime stabilization of expansive soil from Sergipe - Brazil*. E3S Web Of Conferences, Vol 9.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2013). *Manual de carreteras Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos*. Sección suelos y pavimentos. Pp 105-125.
- Norma Técnica Peruana NTP 339.128: 1999 SUELOS. *Método de ensayo para el análisis granulométrico*.
- Norma Técnica Peruana NTP 339.129: 1999 SUELOS. *Método de ensayo para determinar el límite líquido, límite plástico, e índice de plasticidad*.
- Norma Técnica Peruana NTP 339.141: 1999 Suelos. *Método de ensayo para la compactación del suelo en laboratorio utilizando energía modificada (2,700 kN-m/m³ (56,000 pie-lbf/pie³))*.
- Norma Técnica Peruana NTP 339.145: 1999 SUELOS. *Método de ensayo CBR (Relación de Soporte de California) de suelos compactados en laboratorio*.

- Norma Técnica Peruana NTP 339.146: SUELOS. *Método de ensayo de equivalente de arena.*
- Norma Técnica Peruana NTP 339.131: SUELOS. *Método de ensayo para determinar el peso específico relativo de las partículas sólidas de un suelo.*
- Norma Técnica Peruana NTP 339.134: SUELOS. *Método para la clasificación de suelos con propósitos de ingeniería (sistema unificado de clasificación de suelos, SUCS).*
- Norma Técnica Peruana NTP 339.135: 1999 SUELOS. *Método de clasificación de suelos para usos en vías de transporte.*
- Norma American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). 1993. *Clasificación de suelos para fines de obras viales.*
- Reglamento Nacional de Edificaciones (2012). Norma CE 020 - Estabilización de suelos y taludes.
- Reglamento Nacional de Edificaciones (2012). Norma E 050 – Suelos y cimentaciones.
- Gauzellino, P; Zyserman F. & Späth, F. (2010). *Respuesta de geófonos a campos electromagnéticos.* Recuperado de <http://www.scielo.org.ar/img/revistas/geoacta/v35n2/html/v35n2a05.htm>
[Consulta: 23 de octubre del 2017]
- Wikivia (2011). *Clasificación AASHTO.* Recuperado de http://www.wikivia.org/wikivia/index.php/Clasificaci%C3%B3n_AASHTO
[Consulta: 23 de octubre del 2017]
- Reyes & Asociados, F. (2009). *Imagen de ensayos de gravedad específica.* Recuperado de <http://www.reyesyassociados.com.ar/images/laboratorio/mecanica-suelos/gravedad-especifica.jpg> [Consulta: 20 de octubre del 2019]
- Sánchez, F. (2016). *Reacción puzolánica entre la cal y un suelo fino.* Recuperado de <https://www.slideshare.net/castilloaroni/mdulo-7-materiales-para-base-y-subbase-fernando-snchez-sabogal> [Consulta: 30 de octubre del 2019]
- D.E.J. (2010). *Ensayo del Hidrómetro.* Recuperado de <http://mecanicadelossuelos.blogspot.pe/p/analisis-mecanico-del-suelo-hidrometro.html> [Consulta: 30 de octubre del 2017]
- Wikivia (2009). *Clasificación SUCS.* Recuperado de <http://www.wikivia.org/wikivia/images/7/71/TablaClasificacionASTM.JPG>
[Consulta: 30 de octubre de 2017]

- Liberto de Pablo. (1964). Arcillas, clasificación, identificación, usos y especificaciones industriales. Recuperado de <http://boletinsgm.igeolcu.unam.mx/bsgm/vols/epoca03/2702/de-pablo.pdf> [Consulta : 30 de octubre de 2017]
- Olivo, K. (2014). *Sección transversal de una carretera*. Recuperado de <https://es.slideshare.net/kenolivo1/presentacion1-41056662> [Consulta: 30 de octubre del 2017]
- Brackel Constructions Products S.L. (2014). *Estabilización de suelos y control de erosión*. Recuperado de <http://estabilizaciondesuelos.blogspot.pe/2015/> [Consulta: 06 de noviembre del 2017]
- Asociación de Productores de Concreto. (2017). *Estabilización de suelos con cemento*. Recuperado de <http://blog.360gradosenconcreto.com/estabilizacion-de-suelos-con-cemento/> [Consulta: 06 de noviembre del 2017]
- Alcaraz, M. (2016). *Estabilización de suelos con cloruro de sodio*. Recuperado de <http://slideplayer.es/slide/10355962/> [Consulta: 06 de noviembre del 2017]
- Ugaz, R. (2016). *Estabilización de suelos y su aplicación en el mejoramiento de subrasante*. (Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Civil. Lima, Perú).
- Yepes, V. (16 de setiembre del 2014). *Tramos de prueba en la compactación de suelos*. Universidad Politécnica de Valencia. Recuperado de <http://victoryepes.blogs.upv.es/category/compactacion/> [Consulta: 07 de noviembre del 2017]
- Pavimento en carreteras (2019). *Pavimentos flexibles*. Recuperado de <https://pavimentoencarreteras.com/> [Consulta: 20 de octubre del 2019]
- Diseño de pavimentos (2019). *Pavimentos semirígidos*. Recuperado de <https://www.slideshare.net/hmartinezbarbosa/diseo-de-pavimentosdefinicionclasescomponentes> [Consulta: 20 de octubre del 2019]
- Coeficientes estructurales AASHTO (1993). *Coeficientes estructurales para el diseño de pavimentos estructurales*. Recuperado de <https://sjnavarro.files.wordpress.com/2008/08/aashto-931.pdf> [Consulta: 20 de octubre del 2019]

10 ANEXOS

Anexo 1: Curva granulométrica

<div> </div> <div>MIR & Asociados S.A.C. Ingenieros Consultores LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS</div>		PROYECTO:		PROYECTO DE ESTABILIZACION SUELO - CAL CARRETERA "EL OCONAL" PROGRESIVA KM 3+000							
		UBICACIÓN:		CARRETERA EL OCONAL, VILLA RICA, OXAPAMPA, PASCO							
		CLIENTE:		EBDY RIVERA, ALEXANDRA MOALE							
		Nº ESTUDIO:		ES-1805		EJEC. POR:		M. L. CH.		16-Abr-18	
		SONDEO:		C-1		REV. POR:		J.F.R.		16-Abr-18	
		PROFUNDIDAD:		1.50 - 2.00 m		CUADRO:		1805-GS-01			
ZONA:		PROGRESIVA KM 3+000		FORMATO:		PROC-LB-202					
ENSAYO DE GRAVEDAD ESPECÍFICA DE SÓLIDOS											
(ASTM D-854 / NTP339.131)											
Sondaje		SUELO NATURAL				CAL					
Profundidad (m.)		1.50				1.50					
Muestra		M-1				M-1					
Tipo de Muestra		MAB				MAB					
N° Fiole		25		26		27		28			
1	Peso de fiole + suelo seco (g)	85.15		85.27		74.87		75.00			
2	Peso de fiole (g)	55.12		55.25		54.81		54.93			
3	Peso del suelo seco (g)	30.03		30.02		20.06		20.07			
4	Peso de fiole + agua + suelo (g)	173.25		173.38		167.08		167.24			
5	Peso de fiole + agua (g)	154.68		154.79		154.38		154.49			
6	Volúmen del suelo (cm³)	11.46		11.43		7.36		7.32			
7	Temperatura (°C)	27.0		27.0		27.0		27.0			
8	Corrección por Temperatura	0.9983		0.9983		0.9983		0.9983			
9	Gs	2.62		2.62		2.72		2.74			
10	Gs Promedio	2.62				2.73					
11	Diferencia	0.23%				0.60%					
12	Calificativo	Bien				Bien

MR & Asociados S.A.C. Ingenieros Consultores LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS	
PROYECTO:	PROYECTO DE ESTABILIZACION SUELO - CAL CARRETERA "EL OCONAL" PROGRESIVA KM 3+000
UBICACION:	CARRETERA EL OCONAL, VILLA RICA, OXAPAMPA, PASCO
CLIENTE:	EDBY RIVERA, ALEXANDRA MOALE.
Nº ESTUDIO:	ES-1805
SONDEO:	CAL-01 / SUELO NATURAL
PROFUNDIDAD (m):	1.00 - 1.50 m
ZONA:	PROGRESIVA KM 3+100 - CARRETERAL EL OCONAL
	FORMATO:
	EJEC. POR: M.V.R. 19-Abr-18
	REV. POR: J.F.R. 24-Abr-18
	CUADRO: 1805-CB-01
	PROC-LB-211

ENSAYO CALIFORNIA BEARING RATIO - CBR
ASTM - D1883 / NTP 339.145

MR & Asociados S.A.C. Ingenieros Consultores LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS	
PROYECTO:	PROYECTO DE ESTABILIZACION SUELO - CAL CARRETERA "EL OCONAL" PROGRESIVA KM 3+000		
UBICACIÓN:	CARRETERA EL OCONAL, VILLA RICA, OXAPAMPA, PASCO		
CLIENTE:	EDBY RIVERA, ALEXANDRA MOALE.		
Nº ESTUDIO:	ES-1805	EJEC. POR:	M.V.R. 19-Abr-18
SONDEO:	CAL-01 / CAL 9%	REV. POR:	J.F.R. 24-Abr-18
PROFUNDIDAD (m):	1.00 - 1.50 m	CUADRO:	1805-CB-02
ZONA:	PROGRESIVA KM 3+100 - CARRETERAL EL OCONAL	FORMATO:	PROC-LB-211

ENSAYO CALIFORNIA BEARING RATIO - CBR
ASTM - D1883 / NTP 339.145

MIR & Asociados S.A.C. Ingenieros Consultores LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS	
PROYECTO:	PROYECTO DE ESTABILIZACION SUELO - CAL CARRETERA "EL OCONAL" PROGRESIVA KM 3+000		
UBICACIÓN:	CARRETERA EL OCONAL, VILLA RICA, OXAPAMPA, PASCO		
CLIENTE:	EDBY RIVERA, ALEXANDRA MOALE.		
Nº ESTUDIO:	ES-1805	EJEC. POR:	M.V.R. 19-Abr-18
SONDEO:	CAL-01 / CAL 21%	REV. POR:	J.F.R. 24-Abr-18
PROFUNDIDAD (m):	1.00 - 1.50 m	CUADRO:	1805-CB-04
ZONA:	PROGRESIVA KM 3+100 - CARRETERAL EL OCONAL	FORMATO:	PROC-LB-211

ENSAYO CALIFORNIA BEARING RATIO - CBR
ASTM - D1883 / NTP 339.145