



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA Y
METALÚRGICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA



**INFLUENCIA DE LA CAL EN LAS PROPIEDADES FISICO-
MECANICAS DEL SUELO DE SUBRASANTE DEL TRAMO
COASA – SACO, KM 62+295 – 62+545, PROVINCIA DE
CARABAYA, PUNO**

TESIS

PRESENTADA POR:

BACH. DIEGO ARTURO VALCARCEL AROCUTIPA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO GEÓLOGO

PUNO – PERÚ

2024



Reporte de similitud

NOMBRE DEL TRABAJO

INFLUENCIA DE LA CAL EN LAS PROPIEDADES FISICO-MECANICAS DEL SUELO DE SUBRASANTE DEL TRAMO COASA - S

AUTOR

DIEGO ARTURO VALCARCEL AROCUTIP A

RECuento de palabras

16727 Words

RECuento de caracteres

87122 Characters

RECuento de páginas

150 Pages

Tamaño del archivo

16.6MB

Fecha de entrega

Apr 4, 2024 6:51 PM GMT-5

Fecha del informe

Apr 4, 2024 6:54 PM GMT-5

● **16% de similitud general**

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos.

- 12% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 13% Base de datos de trabajos entregados
- 3% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

● **Excluir del Reporte de Similitud**

- Material bibliográfico
- Bloques de texto excluidos manualmente


ROGER GONZALES ALIAGA
ASESOR

Resumen



DEDICATORIA

A mis padres Anibal y Ruth, por su loable labor y sacrificio realizado a fin de que pueda culminar una carrera profesional. Por brindarme su apoyo incondicional en las etapas más complicadas de este proceso académico.

A mis hermanos, Marco y Carmen, por su cariño y soporte desinteresado a lo largo de estos años.

Diego Valcarcel



AGRADECIMIENTOS

A mi alma máter, la Universidad Nacional del Altiplano de Puno, por permitir mi desarrollo profesional en sus diversos recintos.

Por lo mismo, a la excelente plana docente de la Escuela Profesional de Ingeniería Geológica, quienes a través de su experiencia profesional y académica me dotaron del conocimiento necesario para poder desarrollarme durante mi preparación de pregrado.

Asi también, me queda agradecer al M. Sc. Roger Gonzales Aliaga, por darme la asesoría necesaria para el desarrollo de este trabajo de investigación, desde su postura como Director de Tesis.

Al mismo tiempo, a la empresa Calidra Perú por la donación del libro “Estabilización de suelos con cal” del Ing. Javier Castañeda, asi tambien, por su apoyo para la adquisición de su producto de cal viva en polvo.

Diego Valcarcel



ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTOS	
ÍNDICE GENERAL	
ÍNDICE DE TABLAS	
ÍNDICE DE FIGURAS	
ACRÓNIMOS	
RESUMEN	14
ABSTRACT.....	15
CAPÍTULO I	
INTRODUCCIÓN	
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	17
1.1.1 Problema general.....	18
1.1.2 Problemas específicos	18
1.2 HIPÓTESIS	18
1.2.1 Hipótesis general	18
1.2.2 Hipótesis específicas	18
1.3 JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO	19
1.4 OBJETIVOS.....	19
1.4.1 Objetivo general	19
1.4.2 Objetivos específicos	20
CAPÍTULO II	
REVISIÓN DE LITERATURA	
2.1 ANTECEDENTES	21



2.1.1	Antecedentes internacionales	21
2.1.2	Antecedentes nacionales	21
2.1.3	Antecedentes locales	22
2.2	MARCO TEÓRICO	23
2.2.1	Ingeniería geotécnica	23
2.2.1.1	Mecánica de suelos.	23
2.2.2	Suelo.....	24
2.2.2.1	Origen de los suelos.	24
2.2.2.2	Tipos de suelos.....	25
2.2.2.3	Límites de consistencia	25
2.2.2.4	Capacidad de Soporte de California.....	26
2.2.3	Carreteras	27
2.2.3.1	Pavimentos	27
2.2.3.2	Pavimento flexible	28
2.2.3.3	Pavimento rígido	28
2.2.3.4	Subrasante	28
2.2.4	Estabilización de suelos con cal	30
2.2.5	Cal hidratada	31
2.2.6	Cal viva	31
2.2.7	Óptimo contenido de cal	31

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1	METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN.....	32
3.1.1	Enfoque	32
3.1.2	Tipo	32



3.1.3	Alcance.....	32
3.1.4	Población.....	33
3.1.5	Muestra.....	33
3.2	ENSAYOS DE LABORATORIO	34
3.2.1	Suelo de subrasante (sin adición de cal)	34
3.2.1.1	Cuarteo	34
3.2.1.2	Granulometría por tamizado	36
3.2.1.3	Humedad natural	39
3.2.1.4	Límites de consistencia	41
3.2.1.5	Ensayo Proctor modificado.....	45
3.2.1.6	Capacidad de Soporte California	49
3.2.2	Suelo de subrasante (con adición de cal)	55
3.2.2.1	Límites de consistencia	55
3.2.2.2	Ensayo Proctor modificado.....	56
3.2.2.3	Capacidad de Soporte California	56

CAPITULO IV

CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

4.1	UBICACIÓN	59
4.2	ACCESIBILIDAD	59
4.3	GEOLOGÍA LOCAL	62
4.3.1	Granito de Coasa	62
4.3.2	Formación Sandia.....	63
4.3.3	Depósitos cuaternarios	63
4.3.3.1	Depósitos coluviales	63
4.4	CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA	65



4.5	GEOMORFOLOGÍA LOCAL	70
4.5.1	Vertiente fluvioglacial	70
4.5.2	Pie de monte	70
4.5.3	Valles fluvioglaciares	71
CAPÍTULO V		
RESULTADOS Y DISCUSIÓN		
5.1	INFLUENCIA DE LA CAL EN LOS LIMITES DE CONSISTENCIA	73
5.1.1	Adición de cal hidratada.....	73
5.1.2	Adición de cal viva.....	76
5.2	INFLUENCIA DE LA CAL EN LA CAPACIDAD DE SOPORTE CALIFORNIA (95% MDS, 0.1")	83
5.2.1	Adición de cal hidratada.....	83
5.2.2	Adición de cal viva.....	87
VI.	CONCLUSIONES	92
VII.	RECOMENDACIONES	93
VIII.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	94
ANEXOS	96

ÁREA : INGENIERÍA GEOTÉCNICA.

TEMA: ESTABILIZACIÓN DE SUELOS.

FECHA DE SUSTENTACIÓN: 30 de enero de 2024



ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 Valores de carga.....	27
Tabla 2 Clasificación de los suelos según el índice de plasticidad.....	29
Tabla 3 Categorías de subrasante.....	30
Tabla 4 Ubicación del área de estudio	59
Tabla 5 Accesibilidad del área de estudio.....	60
Tabla 6 Influencia de la cal hidratada en los límites de consistencia	74
Tabla 7 Influencia de la cal viva en los límites de consistencia	77
Tabla 8 Análisis de la influencia de la cal hidratada en el CBR.....	83
Tabla 9 Análisis de la influencia de la cal viva en el CBR.....	87



ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 Límites de consistencia.....	26
Figura 2 Proceso de cuarteo del suelo de subrasante	35
Figura 3 Equipos, herramientas y materiales para granulometría.....	36
Figura 4 Proceso de ensayo de granulometría por tamizado	37
Figura 5 Pesado de la muestra para obtención de la humedad natural	40
Figura 6 Secado de la muestra para obtención de la humedad natural	40
Figura 7 Preparación de muestra para ensayo de límites de consistencia.....	42
Figura 8 Humedecimiento de la muestra para ensayo de límites de consistencia	42
Figura 9 Ensayo de límite líquido	43
Figura 10 Ensayo de límite plástico.....	43
Figura 11 Preparado de muestra para el ensayo Proctor modificado.....	46
Figura 12 Muestras preparadas para el ensayo Proctor modificado	46
Figura 13 Ejecución del ensayo Proctor modificado	47
Figura 14 Obtención del contenido de humedad del suelo ensayado	47
Figura 15 Muestras preparadas para el ensayo CBR	50
Figura 16 Compactado de la muestra de suelo en los moldes CBR	50
Figura 17 Obtención del contenido de humedad del ensayo CBR	51
Figura 18 Colocado de las placas de expansión y pesas en los moldes CBR.....	51
Figura 19 Saturación de los moldes CBR y control de expansión.....	52
Figura 20 Penetración de los moldes CBR	52
Figura 21 Adición de cal hidratada.....	57
Figura 22 Adición de cal viva	57
Figura 23 Curado de los moldeos CBR por un periodo de 7 días.....	58



Figura 24	Mapa de ubicación.....	61
Figura 25	Granito de Coasa argilizado	62
Figura 26	Arenisca de la formación Sandia	63
Figura 27	Mapa geológico	64
Figura 28	Descripción de la calicata 01	65
Figura 29	Descripción de la calicata 02	66
Figura 30	Descripción de la calicata 03	67
Figura 31	Descripción de la calicata 04	68
Figura 32	Mapa geológico – geotécnico	69
Figura 33	Mapa geomorfológico	72
Figura 34	Gráfica de límites de consistencia vs % cal hidratada.....	75
Figura 35	Gráfica de límites de consistencia vs % cal viva.....	79
Figura 36	Análisis comparativo entre el uso de cal hidratada y cal viva.....	80
Figura 37	Índice de plasticidad vs % cal viva.....	82
Figura 38	Gráfica de CBR vs % cal hidratada	85
Figura 39	Gráfica de CBR vs % cal viva	88
Figura 40	Análisis comparativo entre el uso de cal hidratada y cal viva.....	89
Figura 41	CBR vs % cal viva.....	91



ACRÓNIMOS

°C:	Grados centígrados
%P:	Porcentaje pasante
%R:	Porcentaje retenido
%RA:	Porcentaje retenido acumulado
%W:	Porcentaje de humedad
AASHTO:	American Association of State Highway and Transportation Officials
ASTM:	American Society of Testing Materials
atm.:	Atmósfera
CBR:	California Bearing Ratio (Capacidad de Soporte California)
cm.:	Centímetro
cm ² :	Centímetro cuadrado
cm ³ :	Centímetro cúbico
DME:	Depósito de Material Excedente
g.:	Gramo
GC:	Grava arcillosa
Hr.:	Hora
in.:	Inches (pulgadas)
IP:	Índice de plasticidad
kg.:	Kilogramo
km.:	Kilómetro
kN:	KiloNewton
LL:	Limite líquido
LP:	Limite plástico



m.:	Metro
m ³ :	Metro cúbico
mm.:	Milímetro
MDS:	Máxima Densidad Seca
MPa.:	MegaPascal
msnm.:	Metros sobre el nivel del mar
MTC:	Ministerio de Transportes y Comunicaciones
NLA:	National Lime Association (Asociación Nacional de la Cal)
NP:	No plástico
NTP:	Norma Técnica Peruana
OCH:	Óptimo Contenido de Humedad
Pi:	Peso inicial
Pff:	Peso de fracción fina
Pr:	Peso retenido
psi.:	Pounds per square inch (Libras por pulgada cuadrada)
pulg.:	Pulgada
SUCS:	Sistema Unificado de Clasificación de Suelos
SW-SM:	Arena limosa bien gradada
USCS:	Unified Soil Classification System
WGS 1984:	World Geodetic System (Sistema Geodésico Mundial)



RESUMEN

El presente trabajo de investigación tuvo lugar en el suelo de subrasante ubicado entre las progresivas 62+295 – 62+545 del tramo Coasa – Saco, de la provincia de Carabaya, departamento de Puno, debido a que el suelo de subrasante de este sector presentaba características de plasticidad y resistencia cuestionables, por lo que se planteó como alternativa adicionar cal al suelo de la subrasante en cuestión. Como objetivos se planteó determinar la influencia de la cal en los límites de consistencia, además de, evaluar la influencia de la cal en el valor de CBR. La metodología sigue un enfoque cuantitativo de tipo experimental, además, para alcanzar los objetivos planteados se adicionó cal hidratada y cal viva en proporciones de 1%, 2%, 3% y 4% para buscar reducir el índice de plasticidad e incrementar el CBR del suelo de subrasante; adicional a ello, se compactó el suelo en moldes CBR considerando un curado de 7 días, a temperatura ambiente, para luego de este periodo, someterlo a 96 horas de saturación y posterior a ello ensayar los moldes en la prensa CBR. Los resultados de índice de plasticidad disminuyeron hasta en un 16% al aplicar cal hidratada y hasta en un 72% con cal viva; el CBR incrementó al adicionar cal hidratada hasta en un 19.64 % y 378.57% con cal viva. Se concluye que, en cuanto al límite plástico, este decrece ligeramente y el límite líquido incrementa, dando como resultado una mayor reducción del índice de plasticidad al agregar cal viva, de forma similar, el CBR se incrementa de manera considerable al adicionar cal viva.

Palabras clave: Cal hidratada, Cal viva, CBR, Índice de plasticidad, Subrasante.



ABSTRACT

This research took place in the subgrade soil located between the progressives 62+295 – 62+545 of the Coasa – Saco route, in the province of Carabaya, department of Puno, because it was observed that the subgrade soil of this sector had questionable plasticity and resistance characteristics, so it was proposed as an alternative to adding lime to the subgrade soil observed. The objectives are to determine the influence of lime on the consistency limits and to evaluate the influence of lime on the CBR value. The methodology follows a quantitative approach and an experimental type, also, for achieve the proposed objectives the soil was mixed with hydrated lime and quicklime with additions of 1%, 2%, 3% and 4% for reduce the plasticity index and increase the CBR value of the subgrade soil; in addition, the CBR molds was considered to cure for 7 days, at ambient temperature, then to put in a period of 96 hours of saturation and testing the molds in the CBR loading press. The results of the plasticity index was decreased by up to 16% and by up to 72% when applying hydrated lime and quicklime respectively, while the CBR increased by up to 19.64% and by up to 378.57% respectively when applying hydrated lime and quicklime to the evaluated subgrade soil. It is concluded that the plastic limit decreases slightly, on the other hand, the liquid limit increases, resulting in a greater decrease in the plasticity index when adding quicklime, similarly, the CBR increases considerably when adding quicklime.

Keywords: Hydrated lime, Quicklime, CBR, Plasticity index, Subgrade.



CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

La capa de subrasante es una de las más importantes en la estructura de un pavimento, ya que de la calidad que presente dependerá el espesor de las demás capas. Se evalúa mediante la capacidad de soporte, del mismo modo resulta relevante tomar en consideración la sensibilidad al agua del suelo de subrasante (Montejo, 2006).

Por lo que para esta investigación se propone analizar una alternativa para mejorar las características físicas y mecánicas del suelo de subrasante ubicado entre las progresivas 62+295 – 62+545 del tramo Coasa – Saco. Para ello, se propone como alternativa recurrir a las técnicas de estabilización de suelos con cal, este método es sugerido en el ámbito internacional por su eficacia y bajo costo, además, de haber sido usado por civilizaciones como los romanos en la construcción de vías, tal es el caso de la Vía Apia, la cual, después de 2000 años de su construcción aun prevalece (Castañeda, 2022).

La investigación desarrollada se divide en cinco capítulos. En el capítulo I, se expone una breve introducción del estudio realizado, así como, los objetivos propuestos para el desarrollo de este trabajo de investigación; el capítulo II describe las investigaciones realizadas anteriormente respecto a estabilización de suelos con cal, así como, el marco teórico que sirvió de soporte para entender los conceptos que se tratan en este trabajo; el capítulo III muestra el diseño metodológico planteado para alcanzar los objetivos propuestos, así como, los materiales y procedimientos empleados en el laboratorio de suelos; el capítulo IV detalla la caracterización del área de estudio, describiendo así la ubicación, accesibilidad, geología y geomorfología del lugar; en el capítulo V se presenta los resultados así como la discusión para cada objetivo específico



planteado; finalmente, en el capítulo VI y VII se detallan las conclusiones, así también, se brinda las recomendaciones para posterior investigaciones que se desarrollen en este tópico u otros fines aplicativos. A continuación, se exponen los objetivos planteados.

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los suelos de alta plasticidad y de baja capacidad de soporte requieren atención y/o recibir un tratamiento especial como puede ser el reemplazo o en este caso la estabilización. En tal sentido, en la ruta PE-34M, se tiene un tramo de 250m. entre las progresivas 62+295 – 62+545, en el cual, en base al estudio realizado para la ejecución del proyecto vial, determina ejecutar un mejoramiento de subrasante por reemplazo debido a que este suelo presenta una baja capacidad de soporte y de elevada plasticidad lo cual es un riesgo para las capas suprayacentes de la estructura del pavimento.

En el estudio realizado para este proyecto vial, indica realizar un reemplazo de la subrasante por un material granular de mejores características pero al realizar este procedimiento se perdería un volumen importante de material que puede ser aprovechado por las técnicas de estabilización de suelos, ya que al realizar el reemplazo del material de subrasante se tiene que ubicar un DME (Depósito de Material Excedente) para la colocación del material retirado, explorar y explotar canteras de mejores características, además de ello contar con los costos de transporte de este material para la conformación de la nueva capa de subrasante. Es por ello que, para esta investigación se considera estabilizar el suelo existente con adiciones de cal, a fin de incrementar su capacidad de soporte y reducir la plasticidad del material.

Por lo expuesto anteriormente, se plantean las siguientes cuestiones general y específicas.



1.1.1 Problema general

¿Cuál será el porcentaje de cal con el que se consiga estabilizar el suelo de subrasante del suelo ubicado entre los km 62+295 – 62+545?

1.1.2 Problemas específicos

¿Qué influencia tendrá la cal en los límites de consistencia del suelo de subrasante ubicado entre los km 62+295 – 62+545?

¿Qué influencia tendrá la cal en la capacidad de soporte del suelo de subrasante ubicado entre los km 62+295 – 62+545?

1.2 HIPÓTESIS

1.2.1 Hipótesis general

La cal al tener efectos cementantes entre las partículas de un suelo, además de, propiedades floculantes entre las partículas de arcilla, conseguirá estabilizar el suelo de subrasante ubicado entre los km 62+295 – 62+545.

1.2.2 Hipótesis específicas

La cal, provoca un efecto floculante en las partículas de arcilla, por lo que, se obtendría una reducción del límite líquido y un incremento del límite plástico, en efecto, una reducción en el índice de plasticidad del suelo de subrasante ubicado entre los km 62+295 – 62+545.

La cal, al ser un agente cementante incrementa las propiedades de resistencia del suelo de subrasante ubicado entre los km 62+295 – 62+545, por tanto, la capacidad de soporte se verá beneficiada con este efecto.



1.3 JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

Los suelos de subrasante tienen un impacto significativo en la duración de un pavimento, por lo que, para ello, se debe contar con suelos de buenas características físico-mecánicas para el asentamiento de la estructura de un pavimento y de esta manera se garantice un adecuado funcionamiento y durabilidad de la estructura. Actualmente, el crecimiento vehicular ha ido en incremento y es por ello que, se considera necesario que la población cuente con vías de transporte que garanticen una adecuada transitabilidad, fluidez y continuidad vehicular. El presente trabajo de investigación cuenta con la viabilidad, ya que se cuenta con los recursos económicos, humanos y bibliográficos necesarios para su desarrollo. En cuanto a la relevancia social, al mejorar un suelo de subrasante se asegura que la estructura del pavimento no tenga un fallo o presente un deterioro prematuro, lo que se ve reflejado en un beneficio socioeconómico al distrito de Coasa, ya que por medio de estas vías de transporte terrestre se viabiliza el traslado de productos agrícolas, agropecuarios y ganaderos, además de transporte de trabajadores y estudiantes. Por otra parte, esta investigación pretende contribuir a las evaluaciones y estudios que se realizan para el mejoramiento o construcción de carreteras, dando alcances de la influencia de la cal en la estabilización de suelos para un tipo de suelo determinado, además de, sugerir los impactos positivos, a nivel económico y ambiental, que conlleva estabilizar los suelos in situ.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo general

Establecer el porcentaje de cal que consiga estabilizar el suelo de subrasante ubicado entre los km 62+295 – 62+545.



1.4.2 Objetivos específicos

Determinar la influencia de la cal en los límites de consistencia del suelo de subrasante ubicado entre los km 62+295 – 62+545.

Evaluar la influencia de la cal en la capacidad de soporte del suelo de subrasante ubicado entre los km 62+295 – 62+545.



CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 ANTECEDENTES

2.1.1 Antecedentes internacionales

Elizondo et al. (2010), evalúa un suelo plástico y de baja resistencia para estabilizarlo con cal según dos metodologías de diseño, entre ellos de la NLA. Concluye que, la mejoría de las propiedades mecánicas es evidente y que la metodología NLA resulta más eficiente.

Sánchez (2014), se planteó como objetivo principal estabilizar un suelo expansivo, mediante la adición de cal y cemento; a 7% de cal se logra reducir el potencial de expansión de “ALTO” a “BAJO” a menor costo que realizar esta estabilización con cemento.

2.1.2 Antecedentes nacionales

Estrada & Pintado (2019), propone determinar las características físicas y mecánicas del suelo en estudio y posterior a ello indicar el CBR en laboratorio a determinados porcentajes en peso de cal hidratada. Se obtuvo un CBR de 11.15% a 4% de cal hidratada.

García (2015), sugiere evaluar las características de resistencia de una capa de subrasante al incorporar cal en un suelo limo arcilloso. Concluye que a 8% de cal reduce el índice de plasticidad de a 3.64% y el CBR incrementa a 8.05%.



Jara, (2014), menciona que, para un suelo de subrasante de tipo arcilloso se evaluará el efecto de la cal en las propiedades físicas y mecánicas. Se concluye que a 4% de cal en peso se mejora las características del suelo.

Moale & Rivera (2019), identificó un suelo de subrasante con un CBR inadecuado, por lo que, propone estabilizarlo con cal. En base a los ensayos y un análisis de costos, en base al diseño de pavimentos concluye que el óptimo contenido de cal sería 15%.

2.1.3 Antecedentes locales

Livisi (2023), plantea estabilizar con cal hidratada un suelo procedente de la cantera Salcedo adicionando 2%, 4%, 6% y 8% al agregado de cantera, logrando así, incrementar el CBR del suelo para que este material de cantera cumpla con los requerimientos técnicos solicitados por la normativa peruana para su uso como material de subbase.

Palli (2015), identificó un suelo de subrasante inadecuado para la construcción de una infraestructura vial, ello debido a sus características plásticas (límites de consistencia) y de soporte (CBR), por lo que propone verificar el comportamiento de cal hidratada en las propiedades mecánicas de un suelo plástico para un camino de bajo tránsito en la provincia de San Román, adicionando 2%, 4%, 6%, 8% y 10%. Concluye que, para las canteras Chullunquiani y Taparachi el óptimo de cal estaría dado por un 2% y 1% respectivamente, para que el índice de plasticidad (IP) y la capacidad de soporte (CBR) cumpla con las características para un afirmado en base a la EG 2013.

2.2 MARCO TEÓRICO

2.2.1 Ingeniería geotécnica

Como menciona Das & Sobhan (2016), “es una subdisciplina de la Ingeniería Civil, la cual estudia aquellos materiales naturales que se encuentran cercanos a la superficie de la tierra” (p. 1).

Adicionalmente, se afirma que “la complejidad de suelos y rocas es tal que, son necesarias muchas suposiciones que logren simplificarlas previo a la aplicación de la mecánica en problemas geotécnicos” (Chowdhury, 2010, p. 54).

En base a estos conceptos, podemos clasificar a la Ingeniería Geotécnica como la conjunción de dos grandes y complejos campos de estudio como son la mecánica de rocas y la mecánica de suelos. Cabe resaltar, que existen otros campos y ciencias que brindan soporte a la Ingeniería Geotécnica.

2.2.1.1 Mecánica de suelos.

La mecánica de suelos es definida por Terzaghi (1943) como la aplicación de las leyes de la mecánica e hidráulica a los problemas de ingeniería relacionados con sedimentos, como también otras acumulaciones no consolidadas de partículas sólidas producidos a raíz de la desintegración mecánica y química de las rocas pese a que contengan o no adiciones de constituyentes orgánicos. (p. 1)

En adición, es relevante el estudio del comportamiento de los suelos en las diferentes infraestructuras de ingeniería ya que dichas obras de ingeniería necesitarán asentarse sobre una masa de suelo, o roca, así también, hacer uso de estos. Haciendo especial énfasis en la infraestructura



vial. Rico & Del Castillo (1974) señala que “La construcción de las vías terrestres implica entonces el uso de los suelos, pero un uso selectivo, juicioso y, en lo posible, ‘científico’” (p. 17).

2.2.2 Suelo

Ya definido el concepto de mecánica de suelos, resulta importante definir el suelo. Rico & Del Castillo (1974), lo define como “aquél cumulo de partículas minerales, que tienen su origen en rocas preexistentes, las cuales pasan por procesos de disgregamiento mecánico o de descomposición mecánica” (p. 18). Sin embargo, Juárez & Rico (2005) indica que “el suelo representa todo tipo de material terroso, desde un relleno de desperdicio, hasta areniscas parcialmente cementadas o lutitas suaves” (p. 34), tal concepto, refuerza el concepto de suelo antes descrito, al abarcar materiales que puedan quedar fuera del concepto tradicional.

2.2.2.1 Origen de los suelos.

Como lo descrito líneas arriba, los suelos inorgánicos pueden tener su origen a través de procesos físicos (mecánicos) y químicos, Marin (1991), indica que dentro de los procesos físicos se tienen principalmente la fatiga y el desgaste, los cuales dan origen a las gravas, arenas y algunos limos inorgánicos, en cuanto a las arcillas, generalmente se originan por medio de los procesos químicos que sufren los minerales de las rocas. (p. 25)

Por otra parte, los suelos orgánicos, como describe Villalaz (2004), tienen lugar generalmente en zonas pantanosas, donde los restos de vegetación son tantos que forman depósitos de considerable espesor,



denominados turbas. Estos se caracterizan por su color negro o café oscuro, además de, su gran porosidad, compresibilidad y su disminuido peso cuando están secos. (p. 21)

2.2.2.2 Tipos de suelos

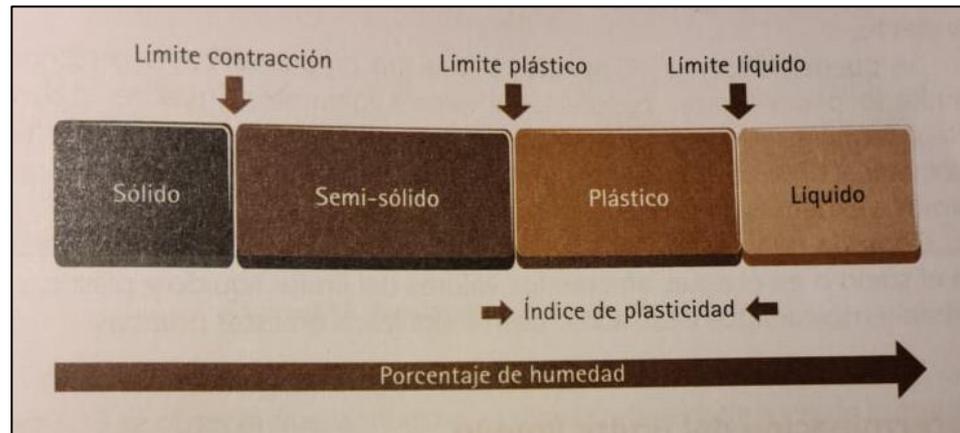
Para ello se toma en cuenta la distribución espacial que el suelo puede tener en la naturaleza, Juárez & Rico (2005) lo clasifican en dos tipos principales: Suelos residuales y suelos transportados. Con suelos residuales, hacemos referencia a aquellos que, resultado del desgaste físico o químico, permanecen sobre la roca preexistente. Por lo que se refiere a suelos transportados, hace mención al transporte que sufren los sedimentos disgregados y se depositan sobre otros materiales, con los cuales no tiene relación alguna. (p. 35)

2.2.2.3 Límites de consistencia

Los límites de consistencia son parámetros, que nos indican el estado del suelo respecto a su contenido de agua, tal como se muestra en la figura 1. Este concepto fue desarrollado por el sueco Albert Mauritz Atterberg, debido a ello se conocen como límites de Atterberg (Castañeda, 2022, p. 100).

Figura 1

Límites de consistencia



Nota. Tomado de Estabilización de Suelos con Cal (p. 101), por Francisco Javier Castañeda Garay, 2022.

2.2.2.4 Capacidad de Soporte de California

Es el resultado de un ensayo utilizado para determinar la capacidad de soporte de un suelo: entre más alto sea este valor, mayor será su capacidad. De este modo se mide la resistencia al corte de un suelo bajo condiciones de humedad y densidad controladas. El principio de la prueba consiste en la medición de la fuerza requerida para que un pistón normalizado (con un área de 19.4 cm^2) penetre hasta una profundidad determinada (Castañeda, 2022, p. 106). Los valores de la muestra patrón se presentan a continuación en la tabla 1.

Tabla 1

Valores de carga

mm	in	MPa	psi
2.5	0.1	6.9	1.000
5.0	0.2	10.3	1.500
7.5	0.3	13.0	1.900
10.0	0.4	16.0	2.300
12.7	0.5	18.0	2.600

Nota. Tomado de Estabilización de Suelos con Cal (p. 107), por Francisco Javier Castañeda Garay, 2022.

2.2.3 Carreteras

De acuerdo Kraemer et al. (2003), “en la actualidad, el uso de vías terrestres se ha acrecentado debido a la necesidad del ser humano por trasladarse de un punto a otro, así también, con un objetivo socioeconómico como es el transporte de mercancías”. (p. 3)

2.2.3.1 Pavimentos

Montejo (2006), señala que, la estructura de un pavimento consta de una serie de capas superpuestas relativamente horizontales, diseñadas y construidas con materiales adecuados y suficientemente compactos. Estas estructuras en capas están ubicadas sobre la subrasante creado por la excavación durante la exploración y deben resistir las fuerzas impuestas por cargas repetidas de vehículos sobre ellas durante el período para el cual se diseña la estructura del pavimento. (p. 1)



2.2.3.2 Pavimento flexible

Este tipo de pavimento consta de una capa bituminosa típicamente sostenida por dos capas flexibles: la base y la subbase. Sin embargo, dependiendo de las especificaciones o necesidades específicas del proyecto, es posible que pueda omitir la construcción de alguna de estas capas. (Montejo, 2006, p. 2)

2.2.3.3 Pavimento rígido

Se trata de un tipo de pavimento que consiste esencialmente en una losa de concreto hidráulico soportada por una subbase o capa de material seleccionado denominada subbase de pavimento duro. Debido a la alta rigidez del hormigón hidráulico y su alto coeficiente de elasticidad, la tensión se distribuye sobre una superficie muy grande. Además, debido a que el concreto puede soportar un cierto grado de tensión de tracción, la rigidez del pavimento es bastante buena, incluso cuando hay áreas de subrasante débiles. (Montejo, 2006, p. 5)

2.2.3.4 Subrasante

El espesor de un pavimento rígido o flexible depende en gran medida de la calidad de esta capa. El parámetro de evaluación para esta capa es la capacidad de soporte o resistencia a la deformación bajo el efecto de un esfuerzo cortante bajo el efecto de la carga del tráfico. Hay que tener en cuenta la sensibilidad del suelo a la humedad, tanto en términos de resistencia como de posibles cambios de volumen (hinchamiento-contracción). El cambio de volumen de suelo en este tipo de cimentación expansiva puede provocar graves daños a las estructuras

ubicadas sobre ella, por lo que al construir pavimento sobre este tipo de suelo se deben tomar medidas para evitar fluctuaciones en el nivel de humedad del suelo, para ello se tendrá que optar en la impermeabilización de la estructura. Otra forma de solucionar este problema es estabilizar este suelo con algunos aditivos. En nuestro entorno los mejores resultados se han conseguido estabilizando el suelo de subrasante con cal. (Montejo, 2006, p. 9)

Así mismo, en cuanto a la plasticidad se presenta la tabla 2 y para el CBR se muestra la tabla 3. En estas tablas mostradas se puede clasificar la plasticidad en cuatro categorías, como también, la subrasante en seis categorías según el CBR del suelo ensayado, las cuales se muestran a continuación:

Tabla 2

Clasificación de los suelos según el índice de plasticidad

Índice de Plasticidad	Plasticidad	Característica
$IP > 20$	Alta	Suelos muy arcillosos
$IP \leq 20, IP > 7$	Media	Suelos arcillosos
$IP < 7$	Baja	Suelos poco arcillosos
$IP = 0$	No Plástico (NP)	Suelos exentos de arcilla

Nota. Tomado de Manual de carreteras, sección suelos y pavimentos (p. 32), por Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC), 2014.

Tabla 3

Categorías de subrasante

Categorías de subrasante	CBR
S ₀ : Subrasante Inadecuada.	CBR < 3%
S ₁ : Subrasante Insuficiente.	De CBR ≥ 3% a CBR < 6%
S ₂ : Subrasante Regular.	De CBR ≥ 6% a CBR < 10%
S ₃ : Subrasante Buena.	De CBR ≥ 10% a CBR < 20%
S ₄ : Subrasante Muy Buena.	De CBR ≥ 20% a CBR < 30%
S ₅ : Subrasante Excelente.	De CBR ≥ 30%

Nota. Tomado de Manual de carreteras, sección suelos y pavimentos (p. 35), por Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC), 2014.

2.2.4 Estabilización de suelos con cal

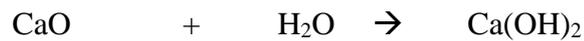
Castañeda (2022), señala que, para la estabilización de suelos, el uso de cal es una práctica reconocida internacionalmente por su probada eficacia y bajo costo. También mencionó que, para los romanos los caminos eran un elemento estratégico de su imperio, pues permitían la rápida movilización de ejércitos y el acceso a rutas comerciales; también, estaban muy familiarizados con el uso de la cal en la arquitectura y la construcción de carreteras, ya que después de casi 2000 años prevalecieron algunos ejemplos, como la Vía Apia. (p. 14)

El uso de cal para estabilización de suelos, como señala Montejó (2006), “en muchos casos reduce la plasticidad del suelo tratado, lo vuelve más friable y sobre todo aumenta significativamente su capacidad portante, tal efecto se ha demostrado que es persistente en el tiempo”. (p.100)



2.2.5 Cal hidratada

El concepto de la cal hidratada o también denominada como cal apagada es definido por Castañeda (2022), como el producto de la reacción de la cal viva con el agua, lo que forma el hidróxido de calcio. La reacción es la siguiente (p. 48):



2.2.6 Cal viva

Se obtiene de la disociación térmica de la caliza. Esta descomposición térmica, también conocida como calcinación, requiere una presión de disociación de 1 atm, que se alcanza con una temperatura de alrededor de los 900°C en hornos de calcinación. La reacción de disociación para el carbonato de calcio es la siguiente (Castañeda, 2022, p. 47):



2.2.7 Óptimo contenido de cal

Desde el punto de vista técnico económico, la cantidad óptima de cal para estabilizar un suelo es el menor porcentaje capaz de modificar las propiedades del suelo, hasta el extremo requerido por el destino que habrá de dársele en el proyecto. La comparación de los resultados debe hacerse entre los valores correspondientes al suelo solo mezclado con diferentes porcentajes de cal. La elección de la cantidad óptima recaerá en el menor porcentaje incorporado al suelo, capaz de conferirle las propiedades buscadas (Montejo, 2006, p. 107).



CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

Para el desarrollo del presente trabajo de investigación, se siguió el siguiente diseño de investigación:

3.1.1 Enfoque

Cuantitativo, se tomó este enfoque debido a que se mediría propiedades del suelo en base a magnitudes físicas y numéricas, las cuales serán usadas para su posterior interpretación.

3.1.2 Tipo

Experimental, para esta investigación se consideró este tipo ya que se realizó en el suelo de subrasante los ensayos de laboratorio en estado natural, posterior a ello, se evaluó su comportamiento físico y mecánico del suelo a diferentes contenidos de este aditivo.

3.1.3 Alcance

Descriptivo – Correlacional, se consideró seguir este alcance ya que a una primera instancia se especificará las características del suelo de subrasante en su estado natural, posteriormente se evaluó las propiedades del suelo a diferentes porcentajes de cal. Por último, el estudio pasará a un alcance correlacional, ello porque se evaluará la relación entre las variables dependientes (CBR e límites de consistencia) y la variable independiente (% de cal, adicionada al suelo).



3.1.4 Población

Estuvo constituida por el suelo de subrasante ubicado entre los km 62+295 al 62+545 del tramo Coasa – Saco.

3.1.5 Muestra

Se realizaron 4 calicatas a fin de realizar una descripción visual – manual de suelo de subrasante del área de estudio. De esta descripción realizada, se determinó que el suelo de subrasante es homogéneo en el área de estudio por tanto las muestras obtenidas de cada calicata se unieron en una muestra global, que representa a la población estudiada.

Para realizar los ensayos de laboratorio se siguió un procedimiento ordenado, a fin de no causar algún sesgo en la información obtenida, el cual se lista a continuación:

- Suelo de Subrasante, primeramente, se verificó la humedad del suelo mediante el ensayo de humedad natural. Luego, se caracterizó el suelo obtenido de la subrasante del sector evaluado, para ello, se mezcló y cuarteó el suelo hasta lograr reducirlo a la cantidad suficiente para el ensayo de granulometría, también de este cuarteo se extrajo material suficiente para el ensayo de límites de consistencia. Posteriormente, se realizó el mismo procedimiento de cuarteo hasta lograr la cantidad suficiente para el ensayo Proctor modificado. Así también, mediante una mezcla y cuarteos consecutivos se redujo la muestra hasta obtener las cantidades necesarias para el ensayo de capacidad de soporte California (CBR).
- Suelo con adición de cal, para esta etapa, se siguió el mismo procedimiento de mezclado y cuarteo de la muestra de suelo de subrasante para obtener las cantidades de muestra suficientes para los ensayos de límites de consistencia, Proctor modificado y capacidad de soporte California (CBR). Para la adición de



cal, se consideró determinar el contenido de humedad en las diferentes muestras obtenidas, a fin de que la cantidad de adición de cal sea determinada a partir de la fracción seca del suelo. Adicionalmente, se consideró un curado de 7 días a temperatura ambiente, hermetizada con la humedad propia de la muestra compactada, posterior a ello, se colocó la muestra a 4 días de sumergido para evaluar su expansión. Finalmente, luego del proceso de curado las muestras compactadas fueron sometidas a penetración en la prensa CBR.

De este modo, se llevó a cabo los ensayos de laboratorio, los cuales son descritos a continuación, así como, los materiales, equipos y procedimientos para cada ensayo ejecutado.

3.2 ENSAYOS DE LABORATORIO

3.2.1 Suelo de subrasante (sin adición de cal)

3.2.1.1 Cuarteo

Mediante este proceso lo que se busca es mezclar la muestra y partirla en cuatro partes iguales, como se muestra en la figura 2, de tal modo que cada parte sea representativa del total de la muestra de suelo. Como principal objetivo de este ensayo, el material obtenido del cuarteo para los diferentes ensayos debe ser representativo en campo.

Figura 2

Proceso de cuarteo del suelo de subrasante



- **Materiales y herramientas.**

- Pala.
- Suelo de subrasante.
- Regla de madera.
- Cucharones.
- Brochas.
- Bandejas.

- **Procedimiento.**

- Colocar el total de la muestra en una superficie limpia y mezclar repetidamente.
- Dividir la muestra en cuatro partes iguales y tomar la muestra requerida de dos lados opuestos diagonalmente.

- En caso de exceder el peso requerido, realizar el procedimiento descrito hasta obtener la cantidad necesaria.

3.2.1.2 Granulometría por tamizado

Este ensayo fue realizado para conocer la distribución granulométrica de las partículas del suelo, así también, tiene como objetivo determinar el tipo de suelo en los dos sistemas de clasificación usados, como es el USCS (Unified Soil Classification System) y AASHTO (American Association for State Highway and Transportation Officials), apoyándose en los resultados obtenidos de los ensayos de límites de consistencia que se detallan más adelante.

Figura 3

Equipos, herramientas y materiales para granulometría



Figura 4

Proceso de ensayo de granulometría por tamizado



- **Materiales y herramientas.**

- Suelo de subrasante.
- Cucharones.
- Escobillas de metal y plástico.
- Brochas.
- Agua potable.
- Recipientes (para lavado y pesado de muestra).

- **Equipos.**

- Tamices o Cribas (1 ½", 1", ¾", ½", ⅜", n°4, n°10, n°20, n°40, n°50, n°80, n°100, n°200, fondo).
- Balanzas.
- Horno eléctrico de secado.



- **Procedimiento.**

- Cuartear la muestra para obtener una cantidad representativa de suelo.
- Secar y pesar la muestra total obtenida (Pi: Peso Inicial).
- Separar la fracción gruesa (gravas) de la fracción fina (arenas, limos y arcillas) con el tamiz n°4.
- La fracción gruesa, como se aprecia en la figura 4, se tamizó desde el tamiz de 2” hasta el tamiz n°4.
- Anotar los pesos retenidos en cada tamiz (Pr: Peso retenido).
- De la fracción fina, se extrajo una muestra representativa de 500gr aproximadamente.
- Anotar el peso de fracción fina (Pff).
- Dejar remojando en agua para luego lavarlo sobre el tamiz n°200 con flujo de agua
- Colocar el suelo a secar en el horno eléctrico de secado a 110°C por 24 horas, hasta que su peso sea constante.
- Dejar enfriar a temperatura ambiente y tamizar desde el tamiz n°10 hasta el tamiz n°200, tal como se muestra en la Figura 3.
- Anotar los pesos retenidos en cada tamiz (Pr: Peso retenido).
- En la fracción gruesa, se calculó el porcentaje retenido (%R), en cada tamiz, de la siguiente manera:

$$\%R = \frac{Pr}{Pi} \times 100$$

- El cálculo del porcentaje retenido acumulado (%RA), para el primer tamiz (1 ½”), donde se retuvo material, es el mismo



valor obtenido. Para los tamices siguientes, se realiza una suma con %R del tamiz inmediato inferior y se coloca en la columna de %R de este último tamiz, así continúa hasta el tamiz n°4.

- Para el cálculo del porcentaje que pasa (%P), se coloca el valor de 100 % en la fila del tamiz donde no se tiene material retenido, posterior a ello, se realiza una resta con el %RA del tamiz inmediato inferior y se coloca el resultado en la fila de este último tamiz.
- En la fracción fina, el cálculo del porcentaje retenido (%R) viene dado por la fórmula:

$$\%R = \%P_{\#4} \left(\frac{Pr}{Pff} \times 100 \right)$$

- Para el cálculo del porcentaje retenido acumulado (%RA) y el porcentaje que pasa un tamiz (%P), se sigue el mismo procedimiento descrito en el punto anterior.

3.2.1.3 Humedad natural

El ensayo de humedad natural tiene como finalidad determinar la cantidad de agua que se encuentra en un volumen determinado de muestra de suelo. Adicionalmente, se usa este ensayo como herramienta de otros ensayos como son límites de consistencia, Proctor modificado y CBR

Figura 5

Pesado de la muestra para obtención de la humedad natural



Figura 6

Secado de la muestra para obtención de la humedad natural





- **Materiales y herramientas.**
 - Suelo de subrasante.
 - Cucharones.
 - Taras.
- **Equipos.**
 - Balanzas.
 - Horno eléctrico de secado.
- **Procedimiento.**
 - Pesar dos recipientes o taras limpias y secas, se anotó el peso de cada tara (P tara).
 - Como se muestra en la figura 5, fraccionar la muestra en los dos recipientes y se anotó el peso de la tara más suelo (P tara + suelo húmedo).
 - Colocar las taras en el horno eléctrico durante 24 horas, hasta que el peso sea constante, como se aprecia en la figura 6.
 - Dejar enfriar las taras con la muestra, pesar y anotar el peso de la tara más suelo seco (P tara + suelo seco).
 - Calcular el contenido de humedad natural (% W) de la siguiente manera.

$$\%W = \frac{P_{tara+suelo\ húmedo} - P_{tara+suelo\ seco}}{P_{tara+suelo\ seco} - P_{tara}} \times 100$$

3.2.1.4 Límites de consistencia.

Este ensayo tiene como propósito determinar la cantidad de agua necesaria para que un suelo llegue a los límites entre los estados líquido,

plástico y semisólido. Así mismo, es útil para clasificar un suelo en los sistemas USCS y AASHTO.

Figura 7

Preparación de muestra para ensayo de límites de consistencia



Figura 8

Humedecimiento de la muestra para ensayo de límites de consistencia



Figura 9

Ensayo de límite líquido



Figura 10

Ensayo de límite plástico





- **Materiales y herramientas**

- Suelo de subrasante.
- Agua potable.
- Espátulas.
- Taras.
- Recipiente con cierre hermético.

- **Equipos**

- Tamiz n°40.
- Copa de Casagrande.
- Ranurador de metal.
- Base de vidrio esmerilado.
- Balanza.
- Horno eléctrico.

- **Procedimiento**

Para el ensayo de limite líquido:

- Pasar la muestra por el tamiz n°40 y obtener 200 g aproximadamente, como se evidencia en la figura 7.
- Como se aprecia en la figura 8, mezclar la muestra obtenida con agua hasta lograr una pasta uniforme y colocar la muestra en un recipiente hermético por 24 h.
- Colocar el material en la copa de Casagrande y extender de forma uniforme.
- Partir la porción de suelo en la mitad con un ranurador de metal tal como se demuestra la figura 9.



- Girar la manivela a una razón constante de 2 giros/segundo hasta que las dos mitades se unan en una longitud de 13 mm.
- Extraer una muestra para obtener el contenido de humedad y anotar la cantidad de golpes.
- La cantidad de golpes debe encontrarse en los 3 diferentes rangos: 25 – 35 golpes, 20 – 30 golpes y 15 – 25 golpes.

Para realizar el ensayo de limite plástico:

- Como se nota en la figura 10, colocar la porción de suelo saturado sobre el vidrio esmerilado y con las yemas de los dedos se realizan rollitos de suelo hasta ver que la muestra de suelo se fisure y destrozce por completo en una sección de 3.2 mm.
- Obtener el contenido de humedad del suelo ensayado.

3.2.1.5 Ensayo Proctor modificado.

Mediante este ensayo se determinan dos parámetros el óptimo contenido de humedad (O.C.H.) y la máxima densidad seca (M.D.S.), de un suelo sometida a una energía modificada de 2696 kJ/m³. El primero, es un parámetro que nos indica la cantidad de agua necesaria para que los vacíos del suelo, durante la aplicación de una energía modificado, se llenan casi en su totalidad de agua, de forma tal, que no queden vacíos llenos de aire. El segundo parámetro, nos indica la máxima densidad que puede alcanzar determinado suelo sin considerar la cantidad de agua presente en su volumen. Estos parámetros son útiles para los controles de compactación de un suelo sometido a tal proceso.

Figura 11

Preparado de muestra para el ensayo Proctor modificado



Figura 12

Muestras preparadas para el ensayo Proctor modificado



Figura 13

Ejecución del ensayo Proctor modificado



Figura 14

Obtención del contenido de humedad del suelo ensayado





- **Materiales y herramientas.**

- Suelo de subrasante.
- Agua potable.
- Cucharones.
- Taras.
- Bolsas de plástico.
- Regla enrazadora.

- **Equipos.**

- Moldes Proctor de 6" con collarines.
- Martillo Proctor modificado de 10 lb.

- **Procedimiento.**

- Tal como se muestra en la figura 11, separar la muestra necesaria para cada ensayo Proctor a realizar.
- Saturar con agua potable el material en una bandeja, de forma medida y progresivamente a razón de 2% para cada muestra.
- Verter las muestras en bolsas de plástico, como se aprecia en la figura 12, a fin de saturarlas en un ambiente hermético.
- Compactar el suelo en los moldes Proctor, distribuidas en 5 capas homogéneas a razón de 56 golpes por capa, como se puede notar en la figura 13
- Nivelar la superficie del molde donde quedó suelo restante.
- Limpiar el molde, pesar y anotar el peso obtenido.



- Desmoldar el suelo del molde Proctor y del núcleo de esta extraer una muestra para obtener el contenido de humedad en el horno eléctrico de acuerdo a lo mostrado en la figura 14.
- Para los demás puntos de verificación, seguir el mismo procedimiento.
- Graficar la densidad seca (eje de las abscisas) y el contenido de humedad (eje de las ordenadas).
- El punto máximo alcanzado dará como resultado la máxima densidad seca y el óptimo contenido de humedad.

3.2.1.6 Capacidad de Soporte California

El valor CBR se obtiene en porcentaje (%), teniendo una de sus aplicaciones en el diseño de las capas de un pavimento ya sea rígido o flexible. Se realiza la penetración, con un pistón normado, en un suelo compactado a una energía determinada (en este caso energía modificada) y con una humedad optima con la que se logre alcanzar la máxima densidad seca de un determinado suelo.

Figura 15

Muestras preparadas para el ensayo CBR



Figura 16

Compactado de la muestra de suelo en los moldes CBR



Figura 17

Obtención del contenido de humedad del ensayo CBR



Figura 18

Colocado de las placas de expansión y pesas en los moldes CBR



Figura 19

Saturación de los moldes CBR y control de expansión



Figura 20

Penetración de los moldes CBR





- **Materiales.**

- Suelo de subrasante.
- Agua potable.
- Cucharones.
- Taras.
- Bolsas de plástico.
- Regla enrazadora.
- Papel filtro.

- **Equipos.**

- Moldes CBR con collarines.
- Discos espaciadores.
- Placas de expansión.
- Pesas o sobrecargas.
- Trípode de verificación de expansión.
- Martillo Proctor modificado.

- **Procedimiento.**

- Verificar el contenido de humedad de la muestra.
- Adicionar la cantidad de agua faltante para llegar al óptimo contenido de humedad.
- Como se aprecia en la figura 15, colocar las muestras de suelo en bolsas herméticas para que los materiales finos como las arcillas se hidraten en su totalidad previo a su compactación.
- Después de 16 horas, se compactó las muestras con el martillo de energía modificada (10 lb), en los moldes CBR,



distribuyendo el suelo en cada molde en 5 capas homogéneas, con el disco separador en el interior, como se muestra en la figura 16.

- Para el primer molde, considerar realizar 12 golpes, para el segundo molde 25 golpes, y el tercer molde 56 golpes.
- De la mezcla, para cada molde, extraer una muestra para verificar el contenido de humedad al cual se está compactando en cada molde, como se puede notar en la figura 17.
- Concluido el proceso de compactado y enrasado, se invirtió el molde, dejando el disco espaciador en la parte superior, se retiró el disco espaciador y en su lugar se colocó un papel filtro en la superficie de suelo expuesta.
- Como se evidencia en la figura 18, se volvió a ajustar en el molde CBR, y sobre él se colocó la sobrecarga y la placa de expansión.
- De acuerdo a la figura 19, saturar una posa con agua y colocar los moldes CBR.
- Sobre los moldes CBR, colocar los trípodes con un medidor de expansión o deformímetro, tal como se muestra en la figura 19.
- Registrar las lecturas del deformímetro cada 24 h por un periodo de 96 h para verificar la expansión del suelo ensayado.
- Posterior a este periodo de saturación, retirar los moldes CBR de la posa y escurrir por 20 min.
- Retirar la placa de expansión y dejar la sobrecarga en el molde.



- Colocar los moldes en la prensa de penetración hidráulica, ajustar el dial en 0 y, como se evidencia en la figura 20, iniciar con la aplicación de la carga a razón de 0.05” por minuto, a velocidad constante.
- Registrar la carga aplicada en cada molde, a determinada penetración.
- Verificar la cantidad de carga aplicada a 0.1” y 0.2” y para cada molde realizado (12, 25 y 56 golpes).

3.2.2 Suelo de subrasante (con adición de cal)

Para la evaluación de la influencia de la cal en el suelo de subrasante, se consideró realizar los ensayos de límites de consistencia, Proctor modificado y CBR. Para los tres casos, se consideró añadir la cantidad de cal viva, así como se muestra en la figura 21 y cal hidratada como se evidencia en la figura 22, en base a la fracción seca del suelo. Para lograr ello, fue necesario, previo a cada adición y ensayo, realizar una verificación del contenido de humedad de la muestra de suelo a evaluar.

3.2.2.1 Límites de consistencia

- Para la obtención del límite líquido y plástico del suelo, añadir cal, en distintos porcentajes en una muestra global cuarteada (antes de pasarlo por el tamiz n°40).
- Tamizar por el tamiz n°40, y seguir con el procedimiento para obtención del límite líquido y plástico.



3.2.2.2 Ensayo Proctor modificado

- Añadir el porcentaje de cal de la fracción seca del suelo.
- Seguir con el procedimiento descrito anteriormente para la obtención de los parámetros de compactación.

3.2.2.3 Capacidad de Soporte California

- Para la preparación y compactación de la muestra de suelo, seguir con el procedimiento descrito anteriormente.
- Al culminar con la compactación del suelo, como se muestra en la figura 23, considerar un curado de 7 días a temperatura ambiente, cubriendo los moldes CBR.
- Concluido este periodo, continuar con el procedimiento de sumergido y verificación de expansión de la muestra de suelo con adición de cal.
- Finalmente, posterior a la saturación de los moldes CBR de suelo con cal, seguir con la penetración de la muestra descrito anteriormente.

Figura 21

Adición de cal hidratada



Nota: Figura 20.a, Adición de cal hidratada al suelo de subrasante. Figura 20.b, Cal hidratada usada para los ensayos de estabilización.

Figura 22

Adición de cal viva



Nota: Figura 21.a, Adición de cal viva al suelo de subrasante. Figura 21.b, Cal viva usada para los ensayos de estabilización.

Figura 23

Curado de los moldeos CBR por un periodo de 7 días





CAPITULO IV

CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

4.1 UBICACIÓN

La zona de estudio se encuentra ubicada entre las progresivas: km 62+295 al 62+545, del tramo Coasa – Saco, entre las coordenadas descritas en la tabla 4. En cuanto a su ubicación política, como se muestra en la figura 24, se encuentra localizada en el centro poblado de Cuticarca, distrito de Coasa, Provincia de Carabaya, Departamento de Puno, el cual se puede ver a más detalle en el anexo 1.

Tabla 4

Ubicación del área de estudio

Punto	Progresiva	Este	Norte	Cota
INICIO	62+295	395275.37 m.	8455968.45 m.	3939 m.s.n.m.
FIN	62+545	395301.68 m.	8456228.31 m.	3938 m.s.n.m.

4.2 ACCESIBILIDAD

El acceso a la zona evaluada es por vía terrestre, desde la ciudad de Puno a la ciudad de Juliaca, continúa por la vía de salida a Cusco, hasta llegar al desvío Cusco – Interoceánica, tomar el desvío del lado derecho que se enrumba por la carretera interoceánica, luego continuar por esta ruta hasta llegar al óvalo-desvío Asillo, en este punto, tomar el desvío del lado derecho que se dirige a San Antón, pasar por este distrito hasta llegar al desvío Ajoyani, continuar por este desvío hasta Coasa. Al llegar a Coasa, se continúa el viaje por la ruta Coasa – Saco, hasta llegar al centro poblado de Cuticarca.



En la tabla 5 se presenta de forma resumida lo descrito anteriormente, a fin de contar con una fácil interpretación del acceso al área de estudio.

Tabla 5

Accesibilidad del área de estudio

Tramos	Tiempo	Tipo de Vía
Puno – Juliaca	1 h.	Asfaltado
Juliaca – Ajoyani	3 h.	Asfaltado
Ajoyani – Coasa	1 h.	Pavimentado
Coasa – Cuticarca	15 min.	Pavimentado

4.3 GEOLOGÍA LOCAL

Como se muestra en la figura 27, en el área de estudio se identificaron 3 formaciones geológicas, las cuales se detallan en el anexo 3.

4.3.1 Granito de Coasa

En zonas aledañas del área de estudio se observó rocas plutónicas como es el granito de Coasa, de color gris blanquecino, debido a la abundancia de feldespatos alcalinos en su estructura mineralógica. Se encuentra en contacto con la formación Sandia. Tal tipo de roca se evidenció que se encuentra en proceso de alteración, principalmente argilizada, como se muestra en la figura 25. Así mismo, este tipo de litología se pudo apreciar mayormente al sur del área de estudio como se aprecia en la figura 27, además de encontrarse relacionado con el suelo usado para el afirmado del área de estudio, por tanto, se presume que para la construcción de este usaron el suelo residual producido de esta roca.

Figura 25

Granito de Coasa argilizado



4.3.2 Formación Sandia

Circundante al área de estudio se observó rocas de tipo sedimentarias, estas fueron areniscas de grano muy fino de color pardo. Esta formación fue intruída por el granito de Coasa, Se observó que las areniscas se encuentran en proceso de erosión, ello se muestra en la figura 26. Adicionalmente, se relaciona este tipo de suelo a la subrasante encontrada, el cual pudo ser de origen natural o colocado en el sitio de forma antrópica.

Figura 26

Arenisca de la formación Sandia



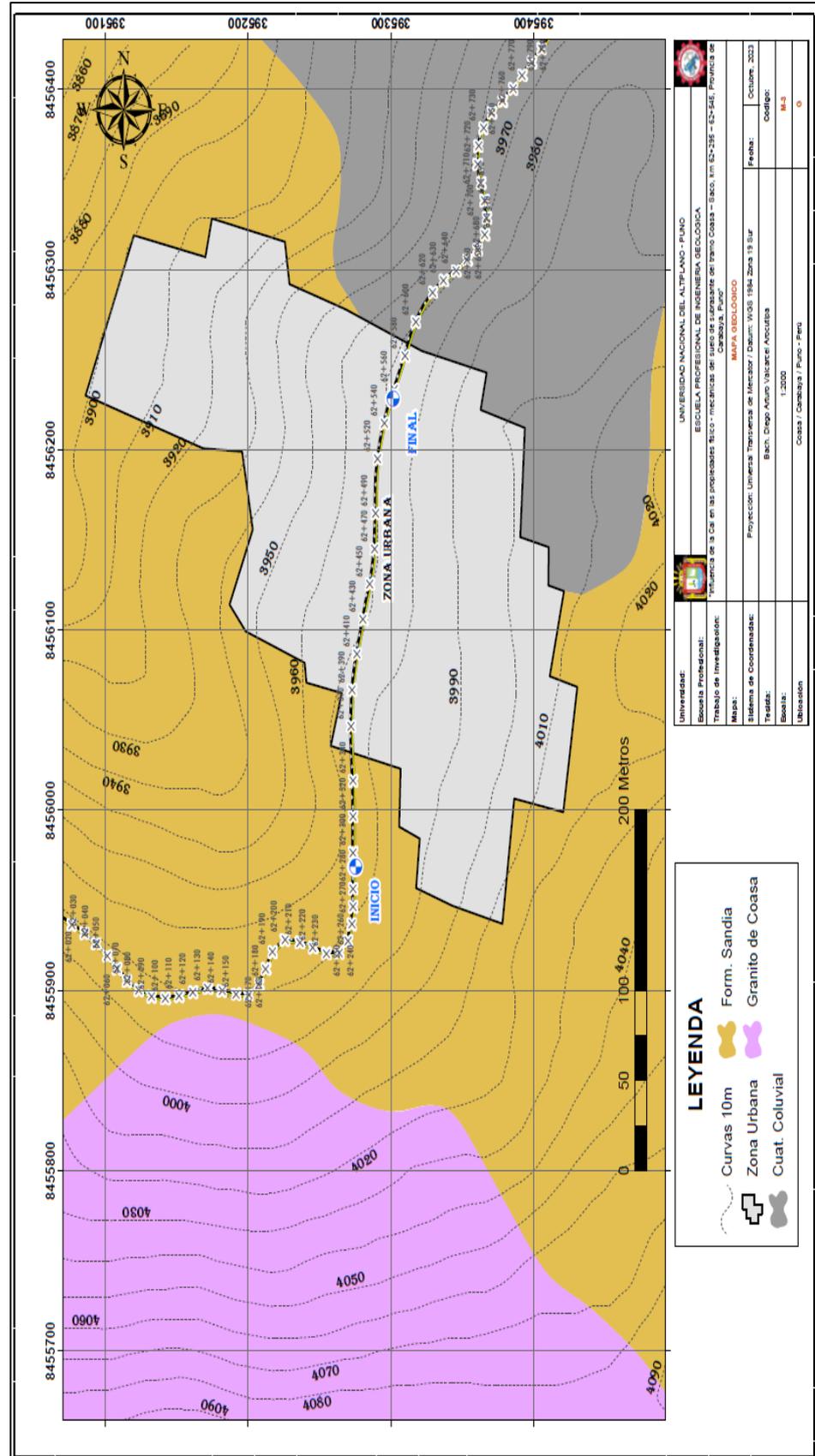
4.3.3 Depósitos cuaternarios

4.3.3.1 Depósitos coluviales

En el área de estudio se pudo encontrar la presencia de material cuaternario de tipo coluvial, clasificado así ya que debido a los procesos de geodinámica externa estas rocas son erosionadas en el mismo sitio, formando rocas angulosas así como suelos residuales de características similares a la roca circundante.

Figura 27

Mapa geológico

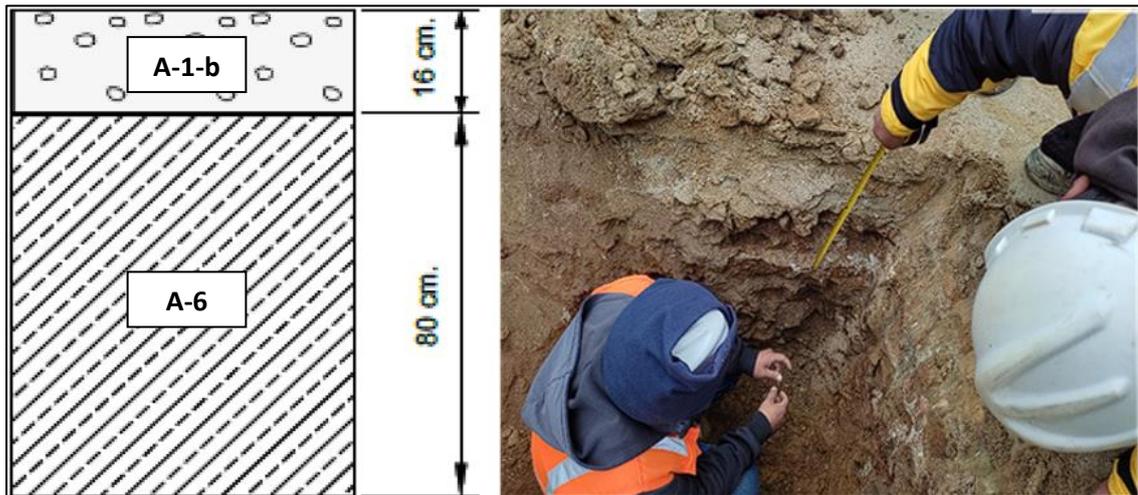


4.4 CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA

Como se puede apreciar en la figura 32, para determinar las características geotécnicas del área de estudio se realizaron 4 calicatas, esta distribución se muestra con más detalle en el anexo 4.

Figura 28

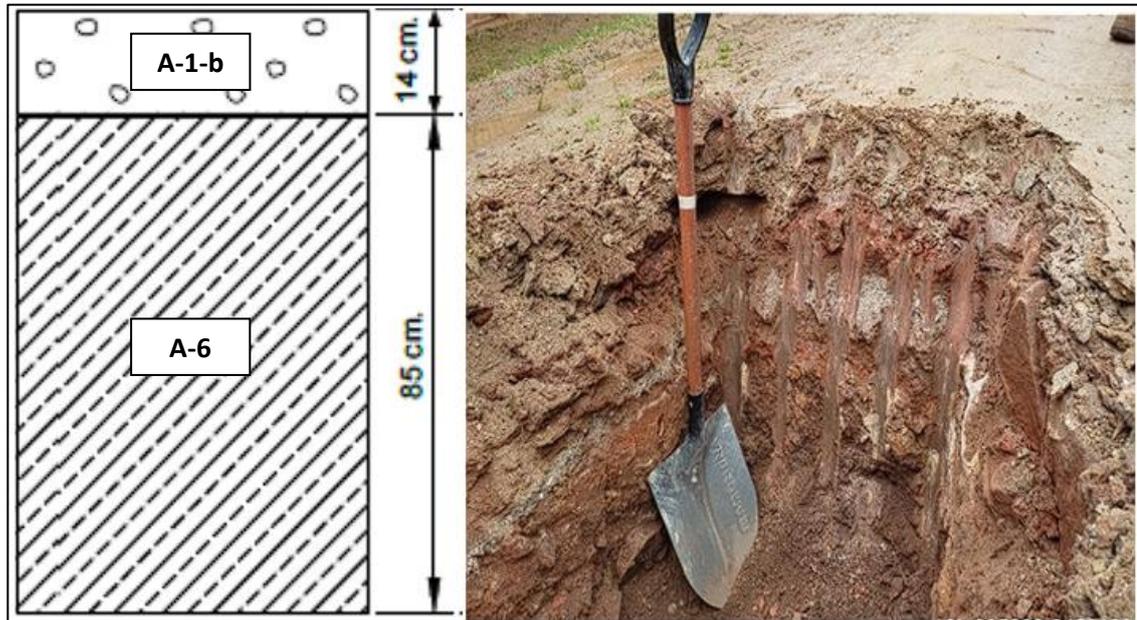
Descripción de la calicata 01



Como se muestra en la figura 28, en la calicata 01, se encontró el estrato 1 de 16 cm de espesor, está compuesto por un suelo compactado a nivel de afirmado, el cual es de tipo A-1-b (0) en la clasificación AASHTO y una arena limosa bien gradada (SW-SM) en la clasificación SUCS, de plasticidad nula o muy reducida, formado principalmente de granos de arena de diámetro 0.5 – 1 cm, de color blanco grisáceo, matriz limosa, con humedad reducida. Los granos de arena del cual está compuesto este suelo son en su mayoría procedentes de una roca tipo granito en estado de alteración, la cual se encuentra en la geología de la zona como el granito de Coasa. El estrato 2, de 80 cm de espesor, compuesto por un suelo medianamente compacto, el cual es un suelo de tipo A-6 (2) en la clasificación AASHTO y una grava arcillosa (GC) en la clasificación SUCS, con un índice de plasticidad igual a 17.5 %, formado de gravas menores a 8” de diámetro, además de arenas y limos, de color marrón rojizo, matriz limo arcillosa, ligeramente húmeda

Figura 29

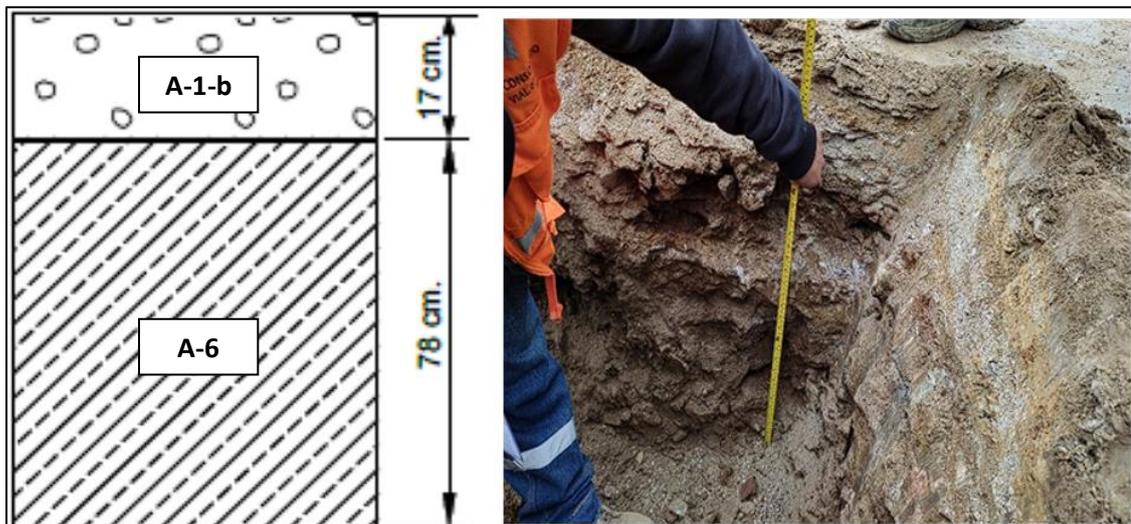
Descripción de la calicata 02



En la figura 29, se muestra la calicata 02, en donde se encontró el estrato 1, de 14 cm de espesor, compuesto por un suelo compactado a nivel de afirmado, el cual es un suelo de tipo A-1-b (0) en la clasificación AASHTO y una arena limosa bien gradada (SW-SM) en la clasificación SUCS, de plasticidad nula o muy reducida, formado principalmente de granos de arena de diámetro 0.5 – 1 cm, con presencia de algunas gravas de diámetro menor a 3”, de color blanco grisáceo, matriz limosa, con humedad reducida. Los granos de arena del cual está compuesto este suelo son en su mayoría procedentes de una roca tipo granito en estado de alteración, la cual se encuentra en la geología local de la zona como el granito de Coasa. El estrato 2, de 85 cm de espesor, compuesto por un suelo medianamente compacto, de tipo A-6 (2) en la clasificación AASHTO y una grava arcillosa (GC) en la clasificación SUCS, con un índice de plasticidad igual a 17.5 %, formado de gravas menores a 12” de diámetro, además de arenas y limos, de color marrón rojizo, matriz limo arcillosa, ligeramente húmeda.

Figura 30

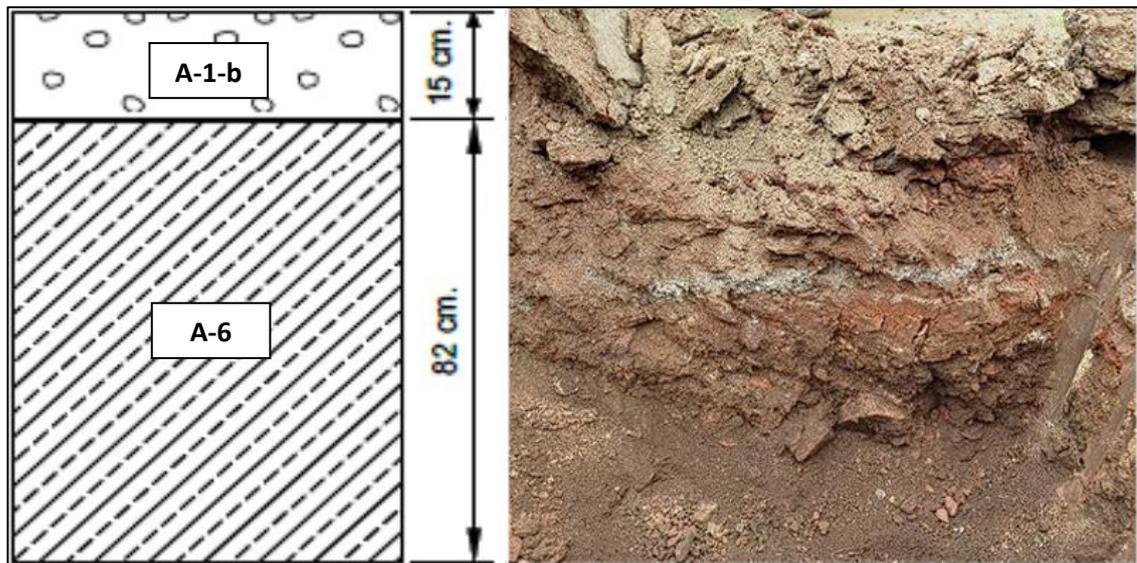
Descripción de la calicata 03



Como se puede notar en la figura 30, en la calicata 03, se encontró el estrato 1, de 17 cm de espesor, compuesto por un suelo compactado a nivel de afirmado, el cual es un suelo de tipo A-1-b (0) en la clasificación AASHTO y una arena limosa bien gradada (SW-SM) en la clasificación SUCS, de plasticidad nula o muy reducida, formado principalmente de granos de arena de diámetro 0.5 – 1 cm, de color blanco grisáceo, matriz limosa, con humedad reducida, presenta también algunos granos finos de color amarillo lo cual daría indicio de minerales en estado de oxidación presentes en la matriz de este suelo. Los granos de arena del cual está compuesto este suelo son en su mayoría procedentes de una roca tipo granito en estado de alteración, la cual se encuentra en la geología local de la zona como el granito de Coasa. El estrato 2, de 78 cm de espesor, compuesto por un suelo medianamente compacto, es un suelo de tipo A-6 (2) en la clasificación AASHTO y una grava arcillosa (GC) en la clasificación SUCS, con un índice de plasticidad igual a 17.5 %, formado de gravas menores a 8” de diámetro, además de arenas y limos, de color marrón rojizo, matriz limo arcillosa, ligeramente húmeda.

Figura 31

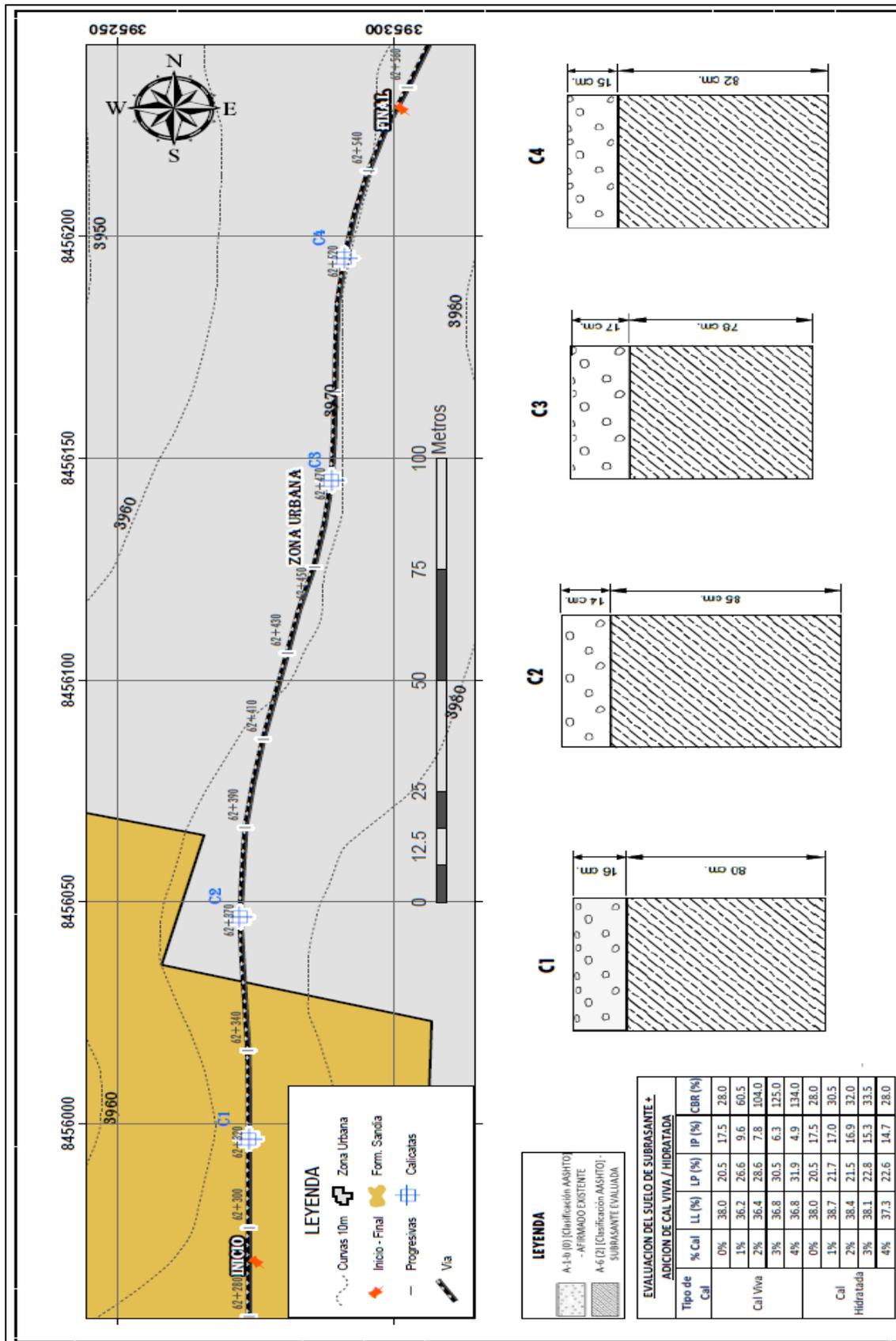
Descripción de la calicata 04



De la figura 31, en la calicata 04, se encontró el estrato 1, de 15 cm de espesor, compuesto por un suelo compactado a nivel de afirmado, el cual es un suelo de tipo A-1-b (0) en la clasificación AASHTO y una arena limosa bien gradada (SW-SM) en la clasificación SUCS, de plasticidad nula o muy reducida, formado principalmente de granos de arena de diámetro 0.5 – 1 cm, con presencia de algunas gravas de diámetro menor a 3”, de color blanco grisáceo, matriz limosa, con humedad reducida. Los granos de arena del cual está compuesto este suelo son en su mayoría procedentes de una roca tipo granito en estado de alteración, la cual se encuentra en la geología de la zona como el granito de Coasa. El estrato 2, de 82 cm de espesor, compuesto por un suelo medianamente compacto, presenta además un lente de 5 cm de suelo arenoso de características similares al estrato 1, el estrato 2 es un suelo de tipo A-6 (2) en la clasificación AASHTO y una grava arcillosa (GC) en la clasificación SUCS, con un índice de plasticidad igual a 17.5%, formado de gravas menores a 12” de diámetro, además de arenas y limos, de color marrón rojizo, de matriz limo arcillosa, ligeramente húmeda

Figura 32

Mapa geológico – geotécnico





4.5 GEOMORFOLOGÍA LOCAL

El área de estudio está ubicado en el centro poblado de Cuticarca, el cual, como se aprecia en la figura 33, está asentado en un relieve accidentado de pendientes abruptas, lo que da origen a las distintas unidades geomorfológicas como son, vertiente fluvio-glaciario, pie de monte y valles fluvio-glaciario, esta distribución se aprecia de manera más detallada en el anexo 2 y se describe a continuación.

4.5.1 Vertiente fluvio-glaciario

El área de estudio se encuentra emplazada, en una vertiente fluvio-glaciario, sobre el cual se asentó la población de Cuticarca, tiene una elevación aproximada de 500 m. desde el valle fluvio-glaciario. Sobre esta superficie, por acción de la escorrentía superficial, producida por las precipitaciones del lugar se desplazan materiales sueltos. Forma una ladera de pendiente entre $15 - 20^\circ$, en las zonas de corte para la habilitación de las vías terrestres se producen erosión de laderas producto de la escorrentía superficial, lo que en algunos casos da origen a ligeros derrumbes.

4.5.2 Pie de monte

Esta unidad geomorfológica se puede ubicar en la parte baja de la vertiente fluvio-glaciario descrita anteriormente, con una inclinación entre $20 - 30^\circ$. Así también, en esta zona se depositan parte de los materiales arrastrados en la vertiente fluvio-glaciario así como depósitos de materiales de los cursos de agua del valle fluvio-glaciario.

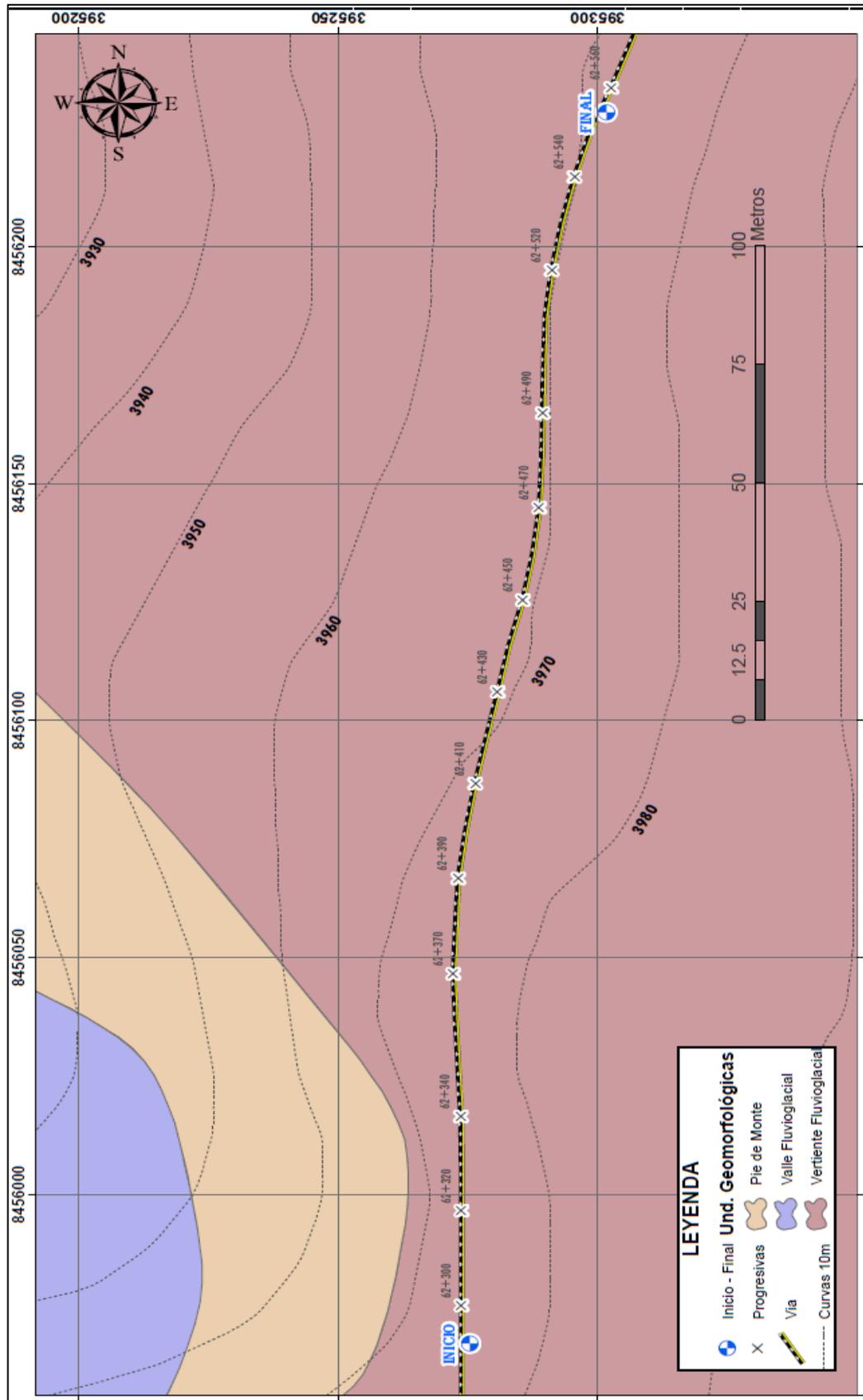


4.5.3 Valles fluvioglaciares

Depresión en forma de “U”, de relieve accidentado, producto de la erosión glacial a la cual está expuesta esta zona. En esta unidad son depositados los materiales aluviales y fluvioglaciares, arrastrados por los cursos de agua y desprendidos de los afloramientos rocosos de las laderas adyacentes a esta.

Figura 33

Mapa geomorfológico





CAPÍTULO V

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 INFLUENCIA DE LA CAL EN LOS LIMITES DE CONSISTENCIA

5.1.1 Adición de cal hidratada

En la tabla 6, se muestra los resultados obtenidos al adicionar cal hidratada al suelo de subrasante del sector evaluado. Del cual podemos indicar que, respecto al valor del suelo natural, el límite líquido al agregar el 1% de cal hidratada se incrementa en 1.84%, luego, al agregar 2% el incremento es igual a 1.05%, al agregar 3% el incremento es de 0.26%, más por el contrario, al agregar 4% se tiene un decrecimiento del 1.84%. En cuanto al límite líquido, respecto al valor obtenido del suelo natural, al adicionar 1% de cal hidratada se tiene un incremento del 5.85%, al adicionar 2% se tiene un incremento del 4.88%, luego, al agregar 3% se tiene un incremento considerable igual a 11.22% y al agregar 4% se tiene un incremento de 10.24%. Por otra parte, el índice de plasticidad resulta de la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico, por lo que, respecto al índice de plasticidad del suelo natural, al adicionar 1% de cal hidratada, se observó una disminución de 2.86%, al adicionar 2% se tiene una disminución del 3.43%, con el 3% de adición se tiene una disminución del 12.57% y al adicionar 4% se tiene una disminución del 16%.

Entonces, al adicionar cal hidratada a este suelo de subrasante se logra hasta un 1.84% de disminución del límite líquido, así también, el límite plástico, alcanza su mayor incremento de 11.22% con la adición de 3% de cal hidratada.

Estas dos variables dan como resultado el índice de plasticidad, el cual alcanza su mayor disminución de 16% al adicionar un 4% de cal hidratada.

Tabla 6

Influencia de la cal hidratada en los límites de consistencia

% Cal	% LL		% LP		% IP	
	Incremento o Decremento		Incremento o Decremento		Incremento o Decremento	
0	38.0	-	20.5	-	17.5	-
1	38.7	1.84	21.7	5.85	17.0	-2.86
2	38.4	1.05	21.5	4.88	16.9	-3.43
3	38.1	0.26	22.8	11.22	15.3	-12.57
4	37.3	-1.84	22.6	10.24	14.7	-16.00

Nota. El signo negativo (-), implica que existe decrecimiento, por el contrario, hay un incremento de la propiedad analizada. Estos resultados se detallan en el Anexo F.

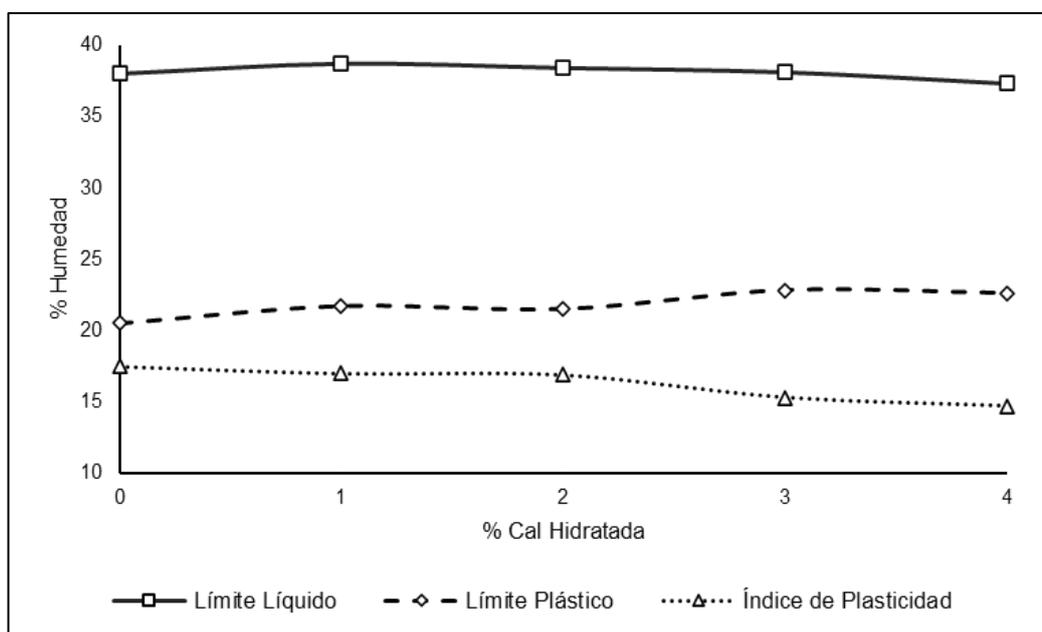
Los resultados mostrados obtenidos en la tabla 6, son similares a los obtenidos por Moale & Rivera (2019), quienes analizaron un suelo con un índice de plasticidad igual a 13.73, al cual, al añadir cal hidratada al 9%, 15% y 21%, se obtuvo una disminución del límite líquido de un 33.70 a 26.43, el límite plástico se ve incrementado del 19.79 al 24.65, lo que da como resultado una disminución del índice de plasticidad a 1.78. Así también, Palli (2015) realizó una evaluación de los índices de plasticidad de dos canteras para afirmado añadiendo cal hidratada a estos suelos, se notó una disminución del límite líquido de 30.69 a 23.79, el límite plástico se ve incrementado del 16.39 al 22.60, dando como resultado una disminución del índice de plasticidad del 14.30 a 1.19 al agregar 10% de cal hidratada a la primera cantera evaluada; para la segunda cantera, se redujo el límite

plástico de 29.46 a 20.23, el límite plástico se incrementó del 15.34 a 20.21, y el índice de plasticidad se redujo de 14.12 a 0.02 al adicionar 10% de cal hidratada.

En la figura 34, se observa que la influencia que tiene la cal hidratada en el límite líquido es imperceptible, dando una línea regular, casi horizontal, notándose un descenso en la adición del 4% de cal hidratada. Respecto al límite plástico, se observa una ligera tendencia positiva, mostrando así una línea semi-oblicua la cual se vuelve casi horizontal entre el 3% y 4% de adición de cal hidratada. Por lo tanto, mientras más cercanas se encuentre la línea del límite líquido y del límite plástico se tendrá una mayor disminución del índice de plasticidad, por lo que, la línea del índice de plasticidad sigue una tendencia negativa, esto quiere decir que, a mayor porcentaje de cal hidratada añadida, se tendrá un menor valor de índice de plasticidad, por tanto, la susceptibilidad al agua que este suelo de subrasante presenta será menor a mayor cantidad de cal hidratada añadida.

Figura 34

Gráfica de límites de consistencia vs % cal hidratada





Por lo tanto, según el análisis del índice de plasticidad realizado por Moale & Rivera (2019), se observa un efecto similar con la figura 34, el límite líquido sigue una tendencia negativa hasta el 21% de cal hidratada añadida, de forma similar, el límite plástico sigue una tendencia positiva hasta el 21% de cal hidratada añadida, esto da como resultado un menor índice de plasticidad a mayor cantidad de cal hidratada añadida. De forma similar, Palli (2015) al graficar la evolución del índice de plasticidad, para ambas canteras analizadas se observa que el límite líquido sigue una tendencia negativa, el límite plástico sigue una tendencia positiva, en ambos casos al añadir hasta el 10% de cal hidratada, esto da como resultado un menor índice de plasticidad a mayor cantidad de cal hidratada adicionada.

5.1.2 Adición de cal viva

En la Tabla 7 se muestran los resultados obtenidos al agregar cal viva al suelo de subrasante. Esto muestra que, en relación al valor natural del suelo, el límite líquido con la adición de 1% de cal viva se reduce en un 4.74%, mientras que con la adición de un 2% se reduce en un 4.21%, añadiendo un 3% se reduce en un 3.16%, así como, al añadir 4% se tiene una disminución del 3.16%. El límite plástico, respecto al obtenido del suelo natural aumenta en un 29.76% cuando se agrega 1% de cal viva, al agregar 2% aumenta en un 39.51%, cuando se agrega un 3% aumenta en un 48.78% y al agregar 4% da un aumento del 55.61%. Entonces, el índice plástico respecto al obtenido del suelo natural disminuyó un 45.14% cuando se añadió un 1% de cal viva, un 55.43% con un 2% adicionada, al añadir un 3% se redujo en un 64%, y al agregar un 4% se redujo en un 72%.

Por lo tanto, al adicionar cal viva al suelo de subrasante, el límite líquido disminuye hasta en un 4.74% al adicionar 1% de cal viva, por otra parte, el límite plástico, alcanza su mayor incremento con la adición de 4% de cal viva. Estas dos variables dan como resultado el índice de plasticidad, el cual alcanza su mayor disminución al adicionar un 4% de cal viva.

Tabla 7

Influencia de la cal viva en los límites de consistencia

% Cal	LL	% Incremento o Decremento		LP	% Incremento o Decremento		IP	% Incremento o Decremento	
0	38.0	-		20.5	-		17.5	-	
1	36.2	-4.74		26.6	29.76		9.6	-45.14	
2	36.4	-4.21		28.6	39.51		7.8	-55.43	
3	36.8	-3.16		30.5	48.78		6.3	-64.00	
4	36.8	-3.16		31.9	55.61		4.9	-72.00	

Nota. El signo negativo (-), implica que existe decrecimiento, por el contrario, hay un incremento de la propiedad analizada. Estos resultados se detallan en el Anexo F.

En relación a ello, se observa un comportamiento similar de los límites de consistencia con los obtenidos por Sánchez (2014), quien analizó el comportamiento del suelo extraído de tres pozos al añadir distintas dosificaciones de cal viva, siendo estas adiciones del 3% al 10%, para el pozo 1 consiguió reducir el límite líquido de 98.1 a 89.9 al añadir 7% de cal viva, el límite plástico resulta incrementado de 30.41 a 35.69 al añadir 7% de cal viva, dando como resultado una mayor disminución del índice de plasticidad pasando de 67.69 a 54.21 al añadir 7% de cal viva; para el pozo 2 consiguió reducir el límite líquido de 99.25

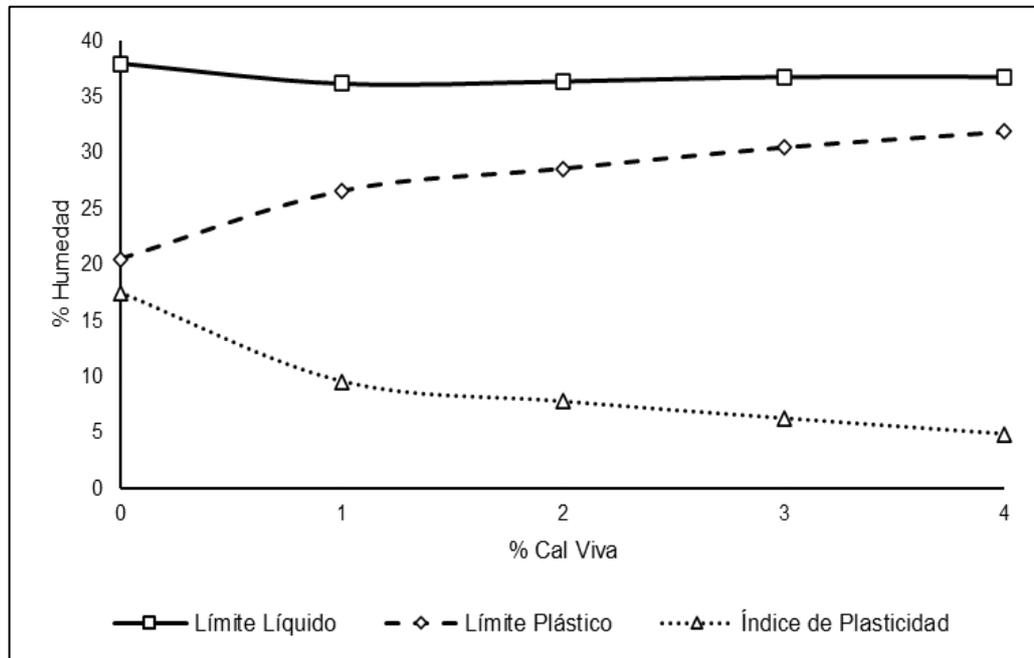


a 89.8 al añadir 7% de cal viva, el límite plástico resulta incrementado de 31.83 a 36.40 al añadir 7% de cal viva, dando como resultado una mayor disminución del índice de plasticidad pasando de 67.42 a 53.40 al añadir 7% de cal viva; y para el pozo 3 consiguió reducir el límite líquido de 98.3 a 91.0 al añadir 7% de cal viva, el límite plástico resulta incrementado de 31.99 a 35.14 al añadir 6% de cal viva, dando como resultado una mayor disminución del índice de plasticidad pasando de 66.31 a 56.58 al añadir 7% de cal viva.

En la figura 35, se observa que el efecto de la cal viva sobre el límite líquido es casi imperceptible, produciendo una línea regular, casi horizontal. En cuanto al límite plástico, hay una tendencia positiva continua. Por lo tanto, cuanto más cerca esté la línea del límite líquido y el límite plástico, mayor será la disminución en el índice de plasticidad, por lo que la línea del índice de plasticidad tiende a ser negativa, es decir, cuanto mayor sea la proporción de cal viva, menor será el índice de plasticidad, por lo que la sensibilidad al agua que el suelo de subrasante presente será menor cuanto cantidad de cal viva sea añadida.

Figura 35

Gráfica de límites de consistencia vs % cal viva



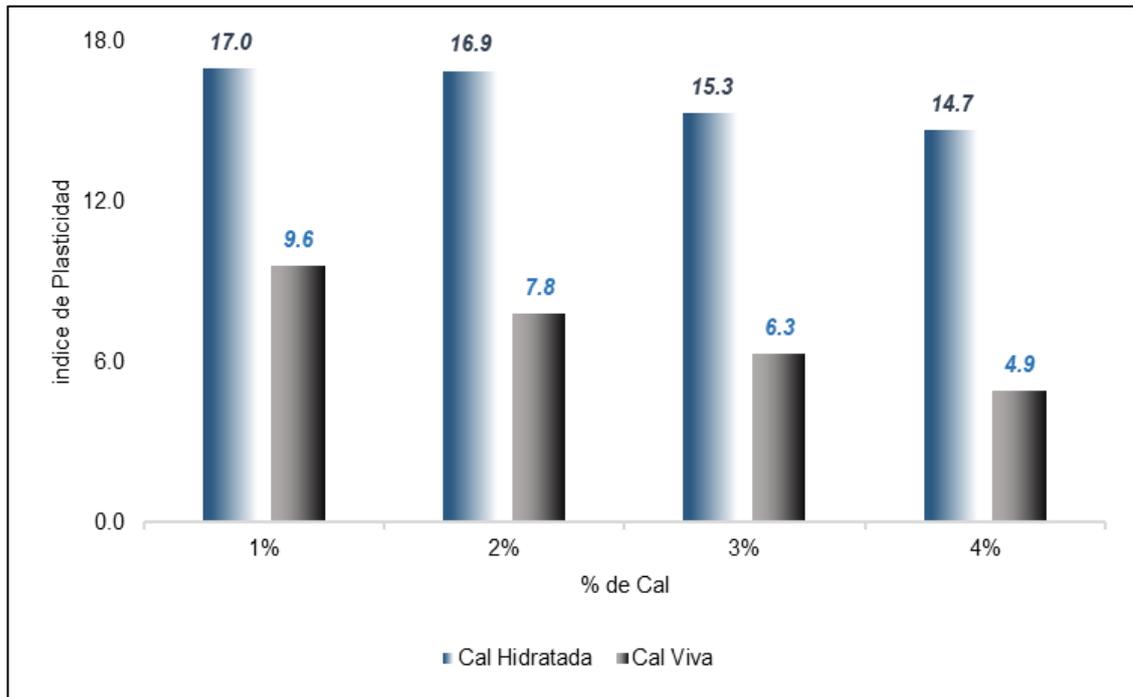
Un comportamiento similar se observa en la evaluación realizada por Sánchez (2014), donde para los 3 pozos evaluados, el límite líquido disminuye, el límite plástico se incrementa y por ende el índice de plasticidad se ve disminuido a mayor cantidad de cal viva adicionada.

Por tanto, de lo descrito párrafos anteriores, existe una diferencia considerable entre el uso de la cal hidratada y la cal viva para la variable de límites de consistencia, de la cual se tiene que para un 4% de cal añadida, que es el porcentaje que mayor disminución se obtuvo en ambos tipos de cal, se tiene que para la adición de cal hidratada se redujo al el índice de plasticidad a 14.7, mientras que, al adicionar esta misma cantidad de cal viva se obtuvo un índice de plasticidad igual a 4.9. Entonces, en base a la figura 36, para cada porcentaje de cal añadida se puede notar que se tiene una mayor disminución del índice de plasticidad al añadir cal viva en comparación a la adición de cal hidratada.

Entonces, para la variable de índice de consistencia, se obtuvo una influencia más favorable al añadir cal viva al suelo de subrasante evaluado.

Figura 36

Análisis comparativo entre el uso de cal hidratada y cal viva



Por lo descrito por Moale & Rivera (2019), se verifica que en su investigación un suelo con un índice de plasticidad igual a 13.73, con una clasificación A-6 en el sistema AASHTO, para lo cual, se plantea reducir el índice de plasticidad agregando cal hidratada a este suelo en proporciones de 9%, 15% y 21%. De lo cual obtiene una reducción del 78.22%, en relación al índice de plasticidad del suelo natural, agregando el 15% de cal hidratada a este suelo. Entonces, se puede detallar que en la investigación realizada, se analizó también un suelo de tipo A-6 en el sistema de clasificación AASHTO, con un índice de plasticidad similar, el cual, al adicionar solo un 4% de cal viva, se obtuvo una disminución del 72% respecto al índice de plasticidad del suelo natural, el cual evidencia la efectividad del uso de la cal viva en la reducción del índice de plasticidad con menores



cantidades en comparación con el uso de la cal hidratada, el cual requiere de mas cantidad de este aditivo en el suelo para obtener resultados similares.

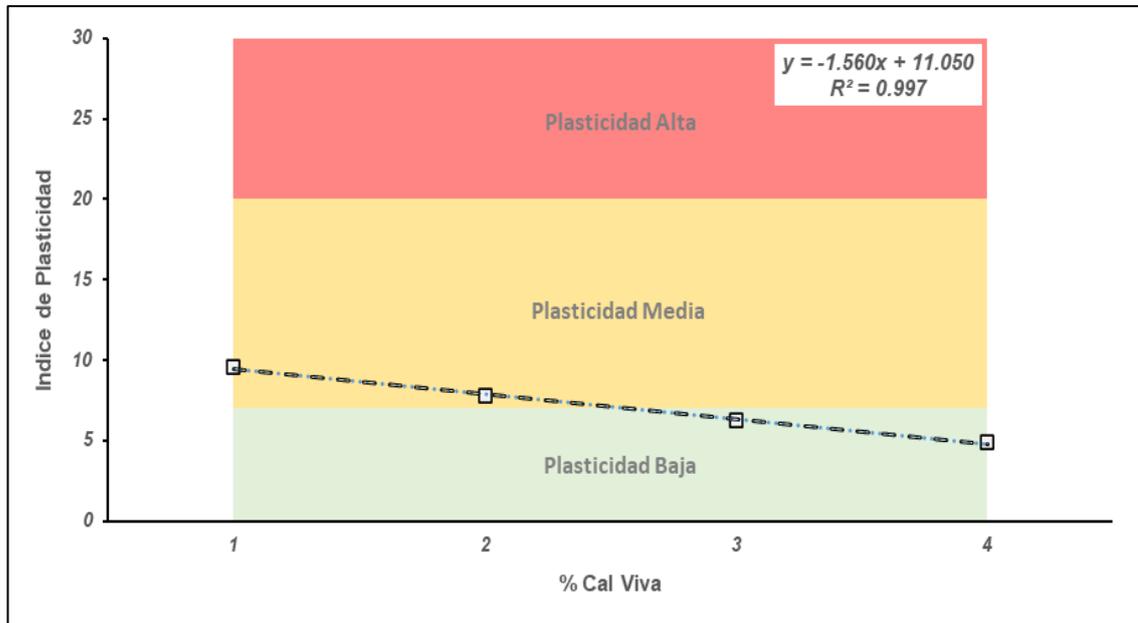
En la figura 37, se evalúa el comportamiento del indice de plasticidad en base a la valoración del suelo de subrasante según su indice de plasticidad descrito en la tabla 1. Por lo que, al añadir mayor cantidad de cal, se observa que el indice de plasticidad sigue una tendencia negativa, donde se logra que el suelo pase de un suelo de “plasticidad media” en estado natural, a uno de “plasticidad baja” con la adición del aditivo estabilizador. Para ello, se sigue una tendencia lineal, de correlacion positiva con un coeficiente de correlacion igual 0.997, la cual da una correlación favorable entre las variables de indice de plasticidad y la cantidad de cal añadida. La linea de tendencia esta definida por la ecuación:

$$y = -1.560x + 11.050$$

Por consiguiente, para obtener un indice de plasticidad igual o menor a 7, deberemos añadir cantidades mayores a 2.60 % de cal viva, según la ecuacion antes descrita, a fin que el suelo sea caracterizado como un suelo de “plasticidad baja”.

Figura 37

Índice de plasticidad vs % cal viva



5.2 INFLUENCIA DE LA CAL EN LA CAPACIDAD DE SOPORTE CALIFORNIA (95% MDS, 0.1”)

5.2.1 Adición de cal hidratada

En la tabla 8 se describen los resultados obtenidos en cuanto a la capacidad de soporte California (CBR), al adicionar cal hidratada al suelo de subrasante en cuestión. De ello se desprende que el suelo natural presenta un valor de CBR igual a 28, el cual se evaluó con adición de cal hidratada, obteniendo así que al agregar 1% se obtuvo un CBR igual a 30.5, el cual representa un incremento del 8.93%, al agregar 2% se consiguió un valor de CBR igual a 32.0, lo que representa un incremento del 14.29%, al agregar 3% se obtuvo un CBR igual a 33.5, incrementando así en un 19.64% pero cuando se agregó 4% se notó que el CBR fue igual al CBR del suelo natural.

Por lo tanto, al adicionar cal hidratada a este suelo de subrasante se consiguió como máximo un 19.64% de incremento del índice CBR al agregar un 3% de cal hidratada, incrementando de esta manera el CBR inicial, en estado natural, de 28.0 a un CBR igual a 33.5, con el aditivo estabilizador.

Tabla 8

Análisis de la influencia de la cal hidratada en el CBR

% Cal	% CBR	% Incremento
0	28.0	-
1	30.5	8.93
2	32.0	14.29
3	33.5	19.64
4	28.0	0.00



Nota. Estos resultados se detallan en el Anexo F.

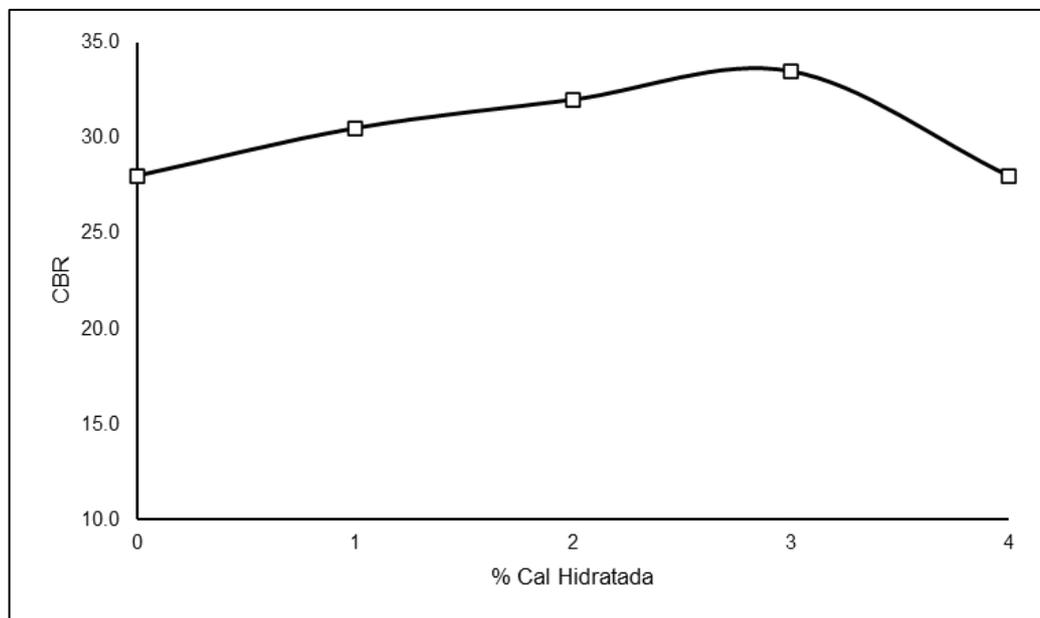
Los resultados mostrados se asemejan de forma parcial con los obtenidos por Estrada & Pintado (2019), quienes evaluaron un suelo con un CBR igual a 4.60 en estado natural, para lo cual adicionaron 2%, 4% y 6% de cal hidratada al suelo evaluado, obteniendo así valor de CBR iguales a 9.05, 11.15 y 10.50 respectivamente. De forma similar, Jara (2014) evalúa un suelo con un CBR igual a 2.55, el cual al adicionar cal hidratada en proporciones de 2%, 4% y 6% obtiene valores de CBR iguales a 7.50, 11.48 y 10.75 respectivamente. Así mismo, Moale & Rivera (2019), evalúan un suelo con un CBR igual a 3.3, el mismo que se procede a analizar con adiciones de cal hidratada en proporciones de 9%, 15% y 21%, obteniendo de esta manera valores de CBR iguales a 3.8, 5.9 y 4.1 de forma respectiva. Por lo tanto, según los resultados presentados anteriormente, los suelos evaluados con adición de cal hidratada, hasta determinado porcentaje de aditivo añadido, presentan una tendencia creciente, para luego decaer de forma ligera, así también, estos suelos estabilizados con cal hidratada no incrementan de forma significativa en relación al CBR del suelo natural obtenido, lo cual genera un comportamiento e influencia similar de la cal hidratada en un determinado suelo como se obtuvo en esta investigación. En cambio, según la evaluación realizada por García (2015), analizó un suelo con un CBR igual a 5.20, el mismo que al ser evaluado con adiciones de cal hidratada de 2%, 4%, 6% y 8% se obtuvo resultados de CBR iguales a 5.30, 6.30, 7.20 y 8.05 respectivamente. De ello se puede indicar que, sigue una tendencia creciente sin indicio a decaer en algún punto, lo cual se diferencia de los resultados obtenidos en la presente investigación, así también, existe una semejanza en la influencia de la cal hidratada en el suelo evaluado, ya que el incremento del CBR no resulta tan significativo con la adición de este

aditivo, incluso siendo aún mayores las adiciones de cal hidratada añadida en la investigación antes descrita.

La figura 38, muestra que la cal hidratada añadida al suelo evaluado sigue una tendencia positiva, hasta el 3% de aditivo agregado al suelo, pero al añadir el 4% de cal hidratada se nota una interrupción de esta tendencia.

Figura 38

Gráfica de CBR vs % cal hidratada



De esta manera, en el estudio realizado por Estrada & Pintado (2019), quienes realizaron la evaluación del CBR a distintas proporciones de cal hidratada, observando así que el CBR sigue una tendencia positiva hasta la adición de 4% de este aditivo, pero ya al agregar 6%, existe una disminución de esta variable. Del mismo modo, Jara (2014) en su estudio, realiza una evaluación del comportamiento del CBR en base a los porcentajes de cal hidratada añadida, encontrando así que este sigue una tendencia positiva hasta la adición del 4%, en cuanto agrega 6%, se tiene una ligera disminución del índice CBR en relación a la cantidad de cal hidratada antes añadida. Igualmente, Moale & Rivera (2019)



evaluaron la variación del CBR a diferentes dosificaciones de suelo con cal hidratada, obteniendo así una tendencia positiva hasta el 15% de cal hidratada agregada, cuando pasan a adicionar 21%, el CBR se ve reducido en relación a este último porcentaje.

Los estudios expuestos en el párrafo anterior muestran un comportamiento similar del CBR con los obtenidos en el presente estudio, en donde la gráfica obtenida para el CBR sigue una tendencia positiva para llegar a un punto donde este valor se vea disminuido.

Sin embargo, puede darse el caso que este comportamiento no resulte del todo absoluto, como es el caso del estudio realizado por García (2015) en donde evalúa un suelo con un CBR igual a 5.20, el cual es evaluado a diferentes dosificaciones de cal hidratada, obteniendo así una gráfica de CBR que sigue una tendencia positiva, sin algún punto de disminución del CBR. Cabe recalcar que, el CBR es incrementado sin alguna interrupción o disminución, pero este mismo se ve incrementado de forma mínima.

Por lo tanto, de los antecedentes antes descritos en comparación con los obtenidos en la presente investigación se puede indicar que la influencia de la cal hidratada en el CBR puede seguir una tendencia positiva y tener un punto de disminución o se puede dar el caso donde el CBR siga una tendencia positiva sin indicio de decrecimiento. En ese mismo contexto, si hay una coincidencia entre los estudios analizados y la presente investigación, y es que, la cal hidratada produce un incremento del CBR, pero este incremento no resulta muy significativo en el suelo evaluado.

5.2.2 Adición de cal viva

La tabla 9 describe los resultados obtenidos del CBR cuando se añadió cal viva al suelo evaluado. De esta manera, el suelo natural tiene un valor CBR de 28.0, el cual, evaluado al agregar cal viva en una cantidad de 1% se obtiene un valor CBR de 60.5, lo que representa un aumento de 116.07%, al añadir un 2% el valor de CBR es igual a 104.0 dando así un incremento del 271.43%, luego, al agregar 3% el valor de CBR obtenido es 125.0, el cual resulta en un incremento del 346.43% y al añadir 4% el CBR es igual a 134.0, lo que resulta en un incremento del 378.57%. Adicional a ello, se observa que con el 2% de adición de cal viva se supera el 100% de CBR, observando así un incremento considerable del CBR en el suelo de subrasante evaluado.

Tabla 9

Análisis de la influencia de la cal viva en el CBR

% Cal	% CBR	% Incremento
0	28.0	-
1	60.5	116.07
2	104.0	271.43
3	125.0	346.43
4	134.0	378.57

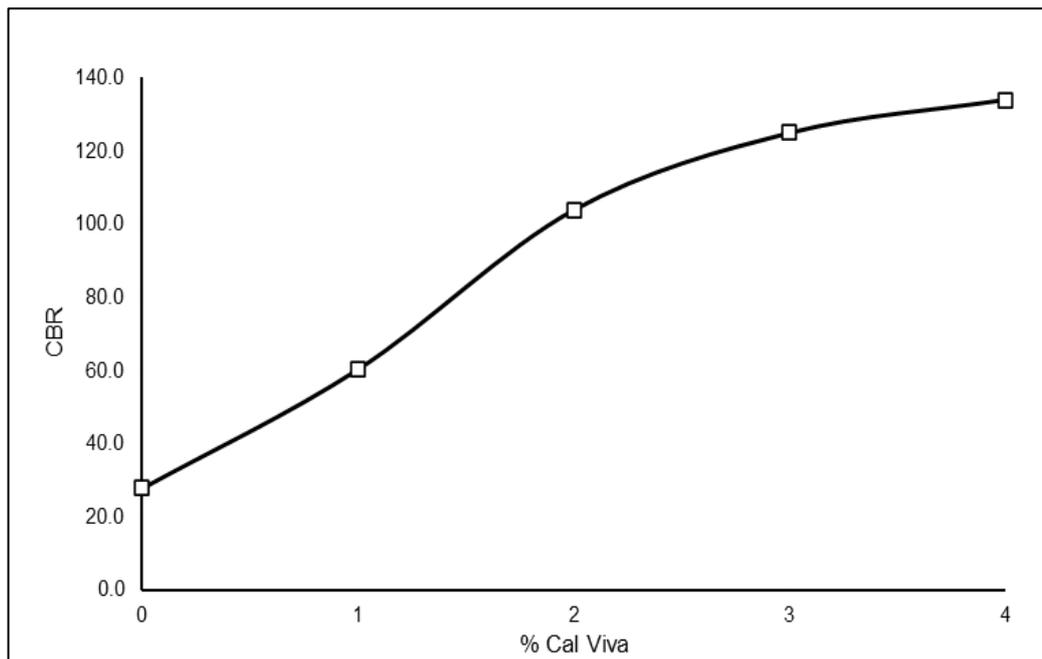
Nota. Estos resultados se detallan en el Anexo F.

Por lo tanto, al agregar cal viva a este suelo se logró un incremento del CBR sin algún punto de disminución, comportamiento similar a lo encontrado por García (2015), que consigue incrementar el CBR del suelo sin encontrar alguna disminución pero trabajando con cal hidratada.

De la figura 39, se observa que la adición de cal viva en el suelo incrementa de forma significativa el CBR, produciendo una tendencia positiva, superando así el 100% del CBR. Cabe indicar que al agregar 3% y 4% se puede notar que el incremento empieza a ser menor.

Figura 39

Gráfica de CBR vs % cal viva



En ese contexto, se pudo observar que esta gráfica obtenida se asemeja a lo expuesto por García (2015), el cual evalúa el comportamiento del CBR de un suelo con adiciones de cal hidratada, obteniendo así una gráfica donde el CBR sigue una tendencia positiva, pero con un incremento poco significativo como el obtenido en la presente investigación.

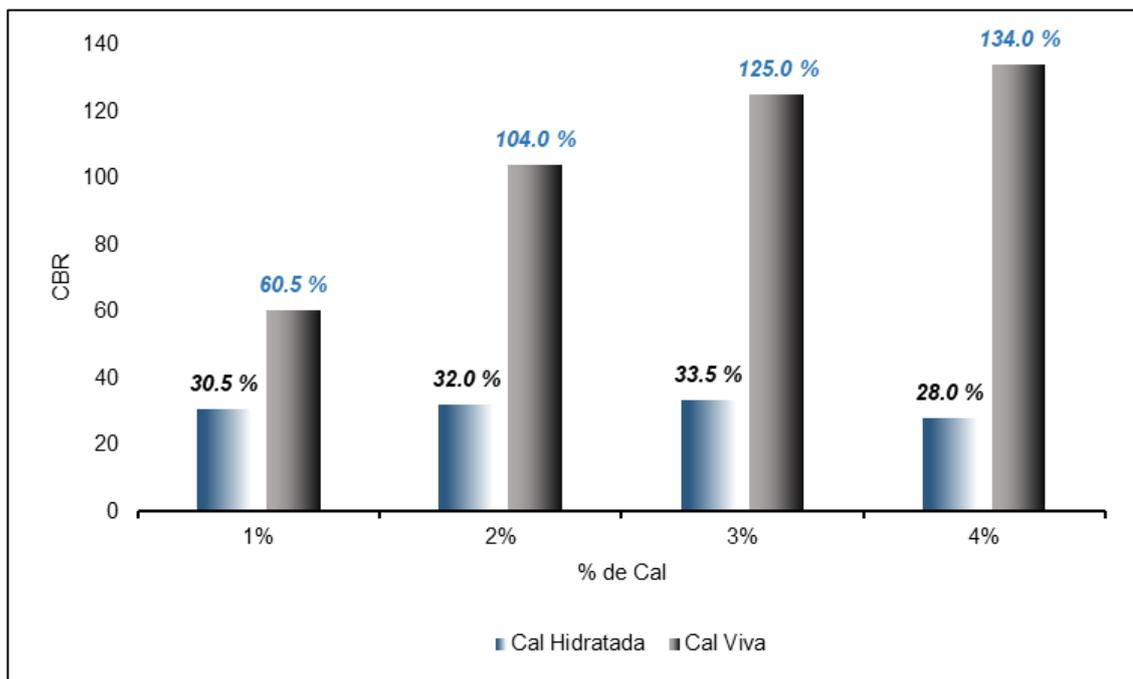
De lo descrito anteriormente, la variable del CBR se ve afectado de diferente manera al añadir cal hidratada y cal viva, en las mismas proporciones, al suelo de subrasante evaluado. Al adicionar la cal hidratada se observó que se tiene un punto máximo de crecimiento con un CBR igual a 33.5% al agregar 3% de cal, de la misma

manera, al agregar 3% de cal viva, el CBR es igual a 125%, además se observa que el crecimiento de esta variable continúa, sin algún indicio de decaer cuando se hace uso de la cal viva.

De este modo, en la figura 40, se observa que el valor de CBR para cada porcentaje de cal añadida al suelo de subrasante se tiene valores mayores de CBR con la cal viva, por lo que, haciendo uso de la cal viva se tiene una mejor influencia de la cal en el valor de CBR, en comparación con el uso de la cal hidratada para este fin.

Figura 40

Análisis comparativo entre el uso de cal hidratada y cal viva



Vinculado a esto, se encuentra el estudio realizado por Elizondo et al. (2010), el cual evalúa un suelo con cal (óxido de calcio) de primera y segunda, encontrando que las propiedades mecánicas del suelo mejoran con la incorporación de este aditivo, concluyendo que para que el caso del parámetro de compresión inconfina se tiene un mayor incremento de este valor cuando se hace uso de cal de primera que al usar cal de



segunda, esto debido a que la cal de primera tiene mayor contenido de oxido de calcio en comparación a la segunda.

Por tanto, se puede indicar que estos resultados coinciden de manera parcial con esta investigación realizada, ya que como se tiene en el Anexo E, la cal viva usada, tiene un contenido de oxido de calcio igual a 80.6%, en comparación a la cal hidratada, el cual tiene un contenido de hidroxido de calcio entre el 10 – 12 %; por lo cual, se tiene un incremento mas significativo del parámetro de resistencia evaluado, en este caso el CBR.

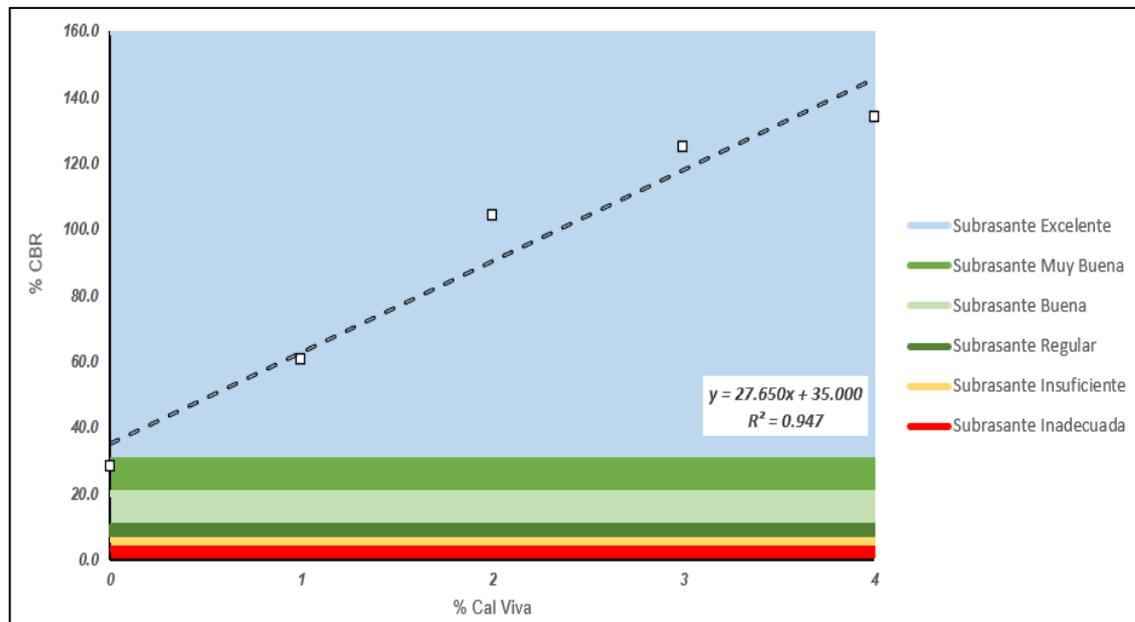
Seguidamente, en la figura 41 se verifica la valoración que tiene el suelo de subrasante en base a la tabla 2 para cada porcentaje de cal viva añadida. En estado natural, el suelo estudiado se encontraba en el sector de “SUBRASANTE MUY BUENA”, pero solo con adicionar el 1% de cal viva, el suelo pasará al sector de una “SUBRASANTE EXCELENTE”, y permanecerá en este sector con incrementos mayores de cal viva. Asi también, se señala la existencia de una tendencia lineal, de correlacion positiva igual a 0.947, entre las variables de CBR y la cantidad de cal viva añadida. La linea de tendencia esta definida por la ecuación:

$$y = 27.650x + 35.000$$

Por consiguiente, para obtener un CBR (95% MDS y 0.1”) igual o mayor al 100% del valor de CBR, deberemos añadir cantidades mayores a 2.35% de cal viva, según la ecuacion antes descrita, a fin que este suelo supere el máximo valor de CBR.

Figura 41

CBR vs % cal viva





VI. CONCLUSIONES

- De acuerdo con el objetivo planteado, se establece que el óptimo contenido de cal que estabiliza la plasticidad del suelo, y al mismo tiempo, el CBR del suelo de subrasante ubicado entre los km 62+295 – 62+545, es igual al 2.60 % de cal viva.
- Se determinó que la adición de cal reduce el límite líquido, por otra parte, el límite plástico se incrementa, dando como resultado una disminución en el índice de plasticidad. Así mismo, para lograr la estabilización, respecto al índice de plasticidad, se requiere adicionar el 2.60% de cal viva al suelo de subrasante de los km 62+295 – 62+545.
- Se verificó una influencia positiva de la cal, resultando en un incremento del CBR (al 95% MDS y 0.1”) del suelo, siendo este igual o mayor al 100% cuando se agrega 2.35% o más cantidad de cal viva al suelo de subrasante de los km 62+295 – 62+545.



VII. RECOMENDACIONES

- Se recomienda que, para obtener la influencia de la cal en los límites de consistencia de forma más certera, se realicen varias pruebas para cada porcentaje de cal añadida.
- Se sugiere que, para determinar la influencia de la cal en la capacidad de soporte del suelo se evalúe a partir de ensayos CBR a diferentes días de curado y diferentes temperaturas.



VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Castañeda, J. (2022). *Estabilización de Suelos con Cal* (Primera Ed). Editorial Trillas.
- Chowdhury, R. (2010). *Geotechnical slope analysis*. Taylor & Francis Group.
- Das, B. M., & Sobhan, K. (2016). *Principles of Geotechnical Engineering* (Ninth Edit). Cengage Learning.
- Elizondo, F., Navas, A., & Sibaja, D. (2010). Efecto de la cal en la estabilización de subrasantes. *Revista Ingenierías Universidad de Costa Rica*, 20, 93–108.
- Estrada, F. J., & Pintado, J. F. (2019). *Capacidad Portante (CBR) del suelo del sector 9 de cajamarca, incorporando 2%, 4% y 6% de cal hidratada, 4%, 6% y 8% de cemento portland tipo I y 4%, 8% y 12% de cloruro de sodio*. [Tesis de Pregrado, Universidad Privada del Norte]. Repositorio Institucional - Universidad Privada del Norte.
- García, A. (2015). *Determinación de la resistencia de la subrasante incorporando cal estructural en el suelo limo arcilloso del sector 14 Mollepampa de Cajamarca, 2015*. [Tesis de Pregrado, Universidad Privada del Norte]. Repositorio Institucional - Universidad Privada del Norte.
- Jara, R. (2014). *Efecto de la cal como estabilizante de una subrasante de suelo arcilloso*. [Tesis de Pregrado, Universidad Nacional de Cajamarca]. Repositorio Institucional - Universidad Nacional de Cajamarca.
- Juarez, E., & Rico, A. (2005). *Mecánica de Suelos. Tomo I* (Tercera Ed). LIMUSA.
- Kraemer, C., Pardillo, J. M., Rocci, S., Romana, M. G., Sanchez, V., & Del Val, M. A. (2003). *Ingeniería de Carreteras - Volumen I* (Primera Ed). Mc Graw Hill.
- Livisi, J. V. (2023). *Estabilización química de suelo con cal para el mejoramiento de subbase del tramo km 08+000 al 10+000 de la carretera Puno – Mañazo*. [Tesis de Pregrado, Universidad Nacional del Altiplano]. Repositorio Institucional - Universidad Nacional del Altiplano.
- Marin, L. (1991). *Mecánica de Suelos* (Quinta Edi). Universidad de Guayaquil.



- Moale, A. B., & Rivera, E. J. (2019). *Estabilización química de suelos arcillosos con cal para su uso como subrasante en vías terrestres de la localidad de Villa Rica*. [Tesis de Pregrado, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas]. Repositorio Académico - Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas.
- Montejo, A. (2006). Ingeniería de Pavimentos - Fundamentos, estudios básicos y diseño - Tomo I. In *Ciencia e Ingeniería Neogranadina* (Tercera Ed, Vol. 7, Issue 1). Universidad Católica de Colombia.
- MTC. (2014). *Manual de Carreteras, Sección Suelos y Pavimentos*.
- Palli, E. E. (2015). *Guía básica para estabilización de suelos con cal en caminos de baja intensidad vehicular en la provincia de San Roman*. [Tesis de Pregrado, Universidad Nacional del Altiplano]. Repositorio Institucional - Universidad Nacional del Altiplano.
- Rico, A., & Del Castillo, H. (1974). *La Ingeniería de Suelos en las Vías Terrestres. Carreteras, Ferrocarriles y Aeropistas* (Primera Ed). LIMUSA.
- Sánchez, M. A. (2014). *Estabilización de suelos expansivos con cal y cemento en el sector Calcical del Cantón Tosagua provincia de Manabí*. [Tesis de Pregrado, Pontificia Universidad Católica del Ecuador]. Repositorio de Tesis de Grado y Posgrado - Pontificia Universidad Católica del Ecuador.
- Terzaghi, K. (1943). *Theoretical Soil Mechanics*. John Wiley and Sons, INC.
- Villalaz, C. (2004). *Mecánica de suelos y cimentaciones* (Quinta Ed). LIMUSA.



ANEXOS

ANEXO 1: Mapa de ubicación.

ANEXO 2: Mapa geomorfológico.

ANEXO 3: Mapa geológico.

ANEXO 4: Mapa geológico – geotécnico.

ANEXO 5: Certificados de calidad de cal hidratada y cal viva.

ANEXO 6: Certificados de laboratorio.



DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Por el presente documento, Yo DIEGO ARTURO VALCARCEL AROCUTIPA
identificado con DNI 70092798 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional, Programa de Segunda Especialidad, Programa de Maestría o Doctorado

INGENIERÍA GEOLÓGICA

informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación para la obtención de Grado
 Título Profesional denominado:

"INFLUENCIA DE LA CAL EN LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECANICAS DEL SUELO DE
SUBRASANTE DEL TRAMO COASA-SACO, KM 62+295-62+545 PROVINCIA DE CARABAYA, PUNO
" Es un tema original.

Declaro que el presente trabajo de tesis es elaborado por mi persona y **no existe plagio/copia** de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación (tesis, revista, texto, congreso, o similar) presentado por persona natural o jurídica alguna ante instituciones académicas, profesionales, de investigación o similares, en el país o en el extranjero.

Dejo constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en el trabajo de investigación, por lo que no asumiré como tuyas las opiniones vertidas por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o Internet.

Asimismo, ratifico que soy plenamente consciente de todo el contenido de la tesis y asumo la responsabilidad de cualquier error u omisión en el documento, así como de las connotaciones éticas y legales involucradas.

En caso de incumplimiento de esta declaración, me someto a las disposiciones legales vigentes y a las sanciones correspondientes de igual forma me someto a las sanciones establecidas en las Directivas y otras normas internas, así como las que me alcancen del Código Civil y Normas Legales conexas por el incumplimiento del presente compromiso

Puno 24 de ENERO del 2024

FIRMA (obligatoria)



Huella



Universidad Nacional
del Altiplano Puno



Vicerrectorado
de Investigación



Repositorio
Institucional

AUTORIZACIÓN PARA EL DEPÓSITO DE TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Por el presente documento, Yo DIEGO ARTURO VALCARCEL AROCUTIPA identificado con DNI 70092798 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional, Programa de Segunda Especialidad, Programa de Maestría o Doctorado

INGENIERÍA GEOLOGICA
informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación denominada:

“ INFLUENCIA DE LA CAL EN LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECANICAS DEL SUELO DE SUBRASANTE DEL TRAMO COASA-SACO, KM 62+295 - 62+545 PROVINCIA DE CARABAYA, PUNO ”

para la obtención de Grado, Título Profesional o Segunda Especialidad.

Por medio del presente documento, afirmo y garantizo ser el legítimo, único y exclusivo titular de todos los derechos de propiedad intelectual sobre los documentos arriba mencionados, las obras, los contenidos, los productos y/o las creaciones en general (en adelante, los “Contenidos”) que serán incluidos en el repositorio institucional de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno.

También, doy seguridad de que los contenidos entregados se encuentran libres de toda contraseña, restricción o medida tecnológica de protección, con la finalidad de permitir que se puedan leer, descargar, reproducir, distribuir, imprimir, buscar y enlazar los textos completos, sin limitación alguna.

Autorizo a la Universidad Nacional del Altiplano de Puno a publicar los Contenidos en el Repositorio Institucional y, en consecuencia, en el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto, sobre la base de lo establecido en la Ley N° 30035, sus normas reglamentarias, modificatorias, sustitutorias y conexas, y de acuerdo con las políticas de acceso abierto que la Universidad aplique en relación con sus Repositorios Institucionales. Autorizo expresamente toda consulta y uso de los Contenidos, por parte de cualquier persona, por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales de autor y derechos conexos, a título gratuito y a nivel mundial.

En consecuencia, la Universidad tendrá la posibilidad de divulgar y difundir los Contenidos, de manera total o parcial, sin limitación alguna y sin derecho a pago de contraprestación, remuneración ni regalía alguna a favor mío; en los medios, canales y plataformas que la Universidad y/o el Estado de la República del Perú determinen, a nivel mundial, sin restricción geográfica alguna y de manera indefinida, pudiendo crear y/o extraer los metadatos sobre los Contenidos, e incluir los Contenidos en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover su difusión.

Autorizo que los Contenidos sean puestos a disposición del público a través de la siguiente licencia:

Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional. Para ver una copia de esta licencia, visita: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

En señal de conformidad, suscribo el presente documento.

Puno 24 de ENERO del 2024

FIRMA (obligatoria)



Huella