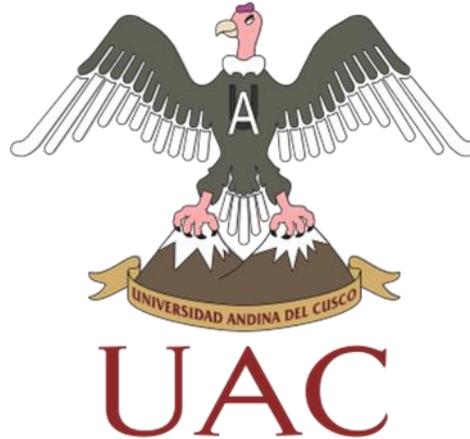




UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS

ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS EN LA APV. PICOL ORCOMPUGIO MEDIANTE LA ADICIÓN DE CAL AL 10% Y PUZOLANA VOLCÁNICA DE LA CANTERA DE RAQCHI AL 15, 25 Y 30% PARA SUB RASANTE DE VÍAS PAVIMENTADAS SEGÚN EL MANUAL DE CARRETERAS SUELOS, GEOLOGÍA, GEOTECNIA Y PAVIMENTOS.

Presentado por:

Mamani García, Jherson

Ramírez Rondán, Mario Brennan Indrex

Para otorgar el Título Profesional de Ingeniero Civil

Asesor:

Ing. Mg. José Alberto Montesinos Cervantes

CUSCO - PERÚ

2020



Dedicatoria

A Dios por darme la salud y fuerza para seguir adelante con la realización de mis proyectos personales y profesionales.

A mis padres Efraín Mamani Tijera y Rosa García Quispe por haberme brindado todo su apoyo y su enorme sacrificio en todo momento y formarme como la persona que soy.

A mis hermanos Diego Mamani García y Lucero Eloíza Mamani García por darme ese apoyo moral y estar presentes a lo largo de nuestras vidas.

A mis amigos que me apoyaron en todo este proceso de la realización de esta investigación.

Jherson Mamani García

A nuestro señor Dios, por darme voluntad para continuar, que siempre guía mi camino y me acompaña en esta travesía.

A mis padres Mario Ramírez Lazo y Susana Rondan Zúñiga, por haberme apoyado durante todo este tiempo, por guiarme todos estos años por ser esa fuerza que necesite para poder continuar.

A mis hermanos, por preocuparse que sea siempre un buen profesional y sobre todo una buena persona.

A mis familiares y amigos, quienes me apoyaron durante el proceso de mi investigación, y se preocuparon en que la terminara.

Mario Ramírez Rondan



Agradecimiento

A la Universidad Andina del Cusco por nuestra formación profesional, que nos brindó en los años que duró el pre grado y por la calidad de ingenieros y profesionales que hacen quedar en alto el nombre de nuestra universidad.

A nuestro asesor Mg. Ing. José Alberto Montesinos Cervantes por su destacado, constante apoyo y compromiso que nos brindó con su asesoría se pudo lograr esta investigación y concretarse nuestra tesis.

A nuestros ingenieros dictaminantes Ing. Einer Román Villegas y Ronald Vera Gallegos por sus consejos y compartir sus conocimientos durante el proceso de la investigación y agradecerles por su apoyo que hicieron posible concretar esta investigación.

A la Municipalidad Distrital de San Jerónimo que nos brindaron los permisos y a los vecinos de la APV. Pícol Orcompugio que nos permitieron realizar las excavaciones de las calicatas y la extracción de las muestras.

A los pobladores de la comunidad de Raqchi que se encuentra ubicada en el distrito de San Pedro de la provincia de Canchis, del departamento de Cusco, que nos permitieron la extracción de la puzolana para la presente investigación.

A los todos los amigos que nos ayudaron de alguna manera a realizar esta investigación.



Resumen

El presente trabajo de investigación está referido a realizar el “Análisis y evaluación de la estabilización de suelos arcillosos en la APV. Pícol Orcompugio mediante la adición de cal al 10% y puzolana volcánica de la cantera de Raqchi al 15, 25 y 30% para la sub rasante de vías pavimentadas según el Manual de Carreteras Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos” cuyo objetivo es determinar cómo varían las propiedades físico, mecánicas y químicas del suelo arcilloso mediante la estabilización química al adicionarse cal al 10% y puzolana volcánica al 15%, 25% y 30% para mejorar la calidad de la sub rasante de vías pavimentadas en la APV. Pícol Orcompugio.

El presente trabajo de investigación tiene enfoque de tipo cuantitativo, el nivel de investigación es de tipo correlacional y teniendo método de investigación hipotética deductiva; se realizó una exploración del área a estudiar en el cual se estableció realizar 6 calicatas para poder obtener el material con las características de: contar con mayores partículas de finos y con mayor índice de plasticidad.

Al estabilizar el suelo con las combinaciones de cal al 10% y puzolana volcánica al 15%, 25% y 30%; se verificó un incremento del porcentaje de CBR de esta forma obteniendo un material con el porcentaje de CBR al 95% mayor al 6% del CBR. Solo en las combinaciones de suelo estabilizado con cal 10% con puzolana volcánica al 25 y 30%; el cual es apto para el uso en sub rasante según el Manual de Carreteras Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos.

Con la combinación del estabilizante de cal al 10% y puzolana al 15%, 25% y 30% se pudo verificar el incremento de la densidad máxima seca del suelo arcilloso, en la primera estabilización con puzolana volcánica al 15% se incrementó en un 6.67%, con la estabilización con puzolana volcánica al 25% se incrementó en 8.48% y con la estabilización de puzolana volcánica al 30% se incrementó en un 10.3%.

Con los resultados obtenidos con la combinación del estabilizante de cal al 10% y puzolana al 15%, 25% y 30% se observa que el límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad disminuye. Se pudo verificar que el material estabilizante al momento de la reacción química con el suelo provoca que nuestro suelo arcilloso se vuelva cada vez más alcalino.

Palabras clave: Porcentaje de CBR, densidad máxima seca, límite líquido, límite líquido, índice de plasticidad, alcalino y reacción química.



Abstract

This research work refers to the "Analysis and Evaluation of the stabilization of clay soils in the APV. Pícol Orcompugio by adding 10% lime and volcanic pozzolana from the 15, 25 and 30% Raqchi quarry for the sub-slope of paved roads according to the soil, geology, geotechnical and pavement roads manual". Whose objective is to determine how the physical, mechanical and chemical properties of clay soil vary by chemical stabilization by adding 10% lime and 15% volcanic pozzolana, 25% and 30% to improve the sub-slope of paved roads in the APV. Pícol Orcompugio.

For the present research work it has a quantitative approach, the level of research is correlational and having a research method, hypothetical deductive; He made an exploration of the area to study in which it was established to make 6 calicatas to be able to obtain the material with the characteristics of: containing larger particles of fines and with greater plasticity limit.

By stabilizing the soil with combinations of 10% lime and 15% volcanic pozzolana, 25%, 30%; an increase in the percentage of CBR was verified; in this way obtaining a material with the percentage of CBR at 95% greater than 6%, only in the combinations of soil stabilized with 10% lime with 25% and 30% volcanic pozzolana; which is suitable for underground use according to the Manual of Roads, Geology, Geotechnics and Pavement Roads.

With the combination of the 10% lime stabilizer and 15%, 25% and 30% pozzolana, the increase in the maximum dry density DMS of the clay soil could be verified, in the first stabilization with 15% volcanic pozzolana it was increased by 6.67%, with stabilization with 25% volcanic pozzolana increased by 8.48% and with 30% volcanic pozzolan stabilization increased 10.3%

With the results obtained with the combination of 10% lime stabilizer and 15% pozzolan, 25% and 30% it is observed that the liquid limit, plastic limit and plasticity index decreases. It was possible to verify that the stabilizing material, when making chemical reaction with the soil causes our soil to become increasingly alkaline.

Keywords: CBR percentage, maximum dry density, liquid limit, liquid limit, plasticity index, alkaline and chemical reaction.



Introducción

Esta tesis busca “El análisis y la evaluación de la estabilización de suelos arcillosos en la APV. Pícol Orcompugio que se encuentran en la ciudad del Cusco, mediante la adición de cal al 10% y puzolana volcánica al 15, 25 y 30% para sub rasante de vías pavimentadas según el Manual de Carreteras Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos - MTC-2013”. La estabilización es un proceso de mejoramiento de las propiedades físicas, mecánicas y químicas del suelo a través de distintos procesos tanto mecánico, físicos o incorporación de aditivos, la investigación busca la estabilización a través de la incorporación de aditivos tales como la cal y puzolana volcánica como mezcla con el suelo arcilloso. En las mezclas se utilizarán diferentes porcentajes de puzolana y cal, la cal será de procedencia comercial la cual se empleará en un porcentaje estable, en combinación de la puzolana volcánica será en distintos porcentajes, obtenida de la cantera de Raqchi que está ubicada en el distrito de San Pedro, de la Provincia de Canchis, del Departamento del Cusco.

Se quiere atender los problemas de inestabilidad de suelos, que surgen al encontrarse con suelos arcillosos durante la construcción de una vía mediante la incorporación al suelo de cal y puzolana volcánica en porcentajes ya mencionados. La presencia de los suelos arcillosos muchas veces si no son tratados pueden causar demoras en la ejecución física de la obra, la paralización de una obra vial e incrementar en su costo, por tanto, es necesario plantear algún tipo de solución rápida y económica; por lo que, la aplicación de aditivos estabilizantes como el uso de cal y puzolana volcánica planteada en esta investigación pueden ser muy factibles, por su facilidad de obtención en nuestra región puede minimizar los problemas de estos suelos.

Los procedimientos tanto para la obtención de muestras y los ensayos de laboratorio llevados a cabo al suelo arcilloso, a la puzolana volcánica y a todas las combinaciones de cal y puzolana volcánica, todos los ensayos se realizaron de acuerdo a normas ASTM, AASHTO, SUCS y NTP para muestreo y ensayos de laboratorio. Los resultados de los ensayos de laboratorio utilizando estabilizantes se compararán si cumple con los parámetros exigidos por el Manuales de Carreteras Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos del MTC.

Se realizó graficas del valor de CBR obtenido a cada porcentaje de mezcla de cal y puzolana para visualizar el incremento del mismo conforme varía los porcentajes de las mezclas, ver como varia la densidad máxima seca del suelo, determinar la variación del PH para ver la



interacción química que hubo entre la cal, puzolana volcánica y suelo arcilloso, los cuales son los principales indicadores que mostrarán la mejora del suelo.

En el Capítulo I se hizo el diagnóstico de la situación problemática, se planteó nuestro objetivo para la investigación, se realizó la justificación y formulamos los problemas de investigación. También se planteó los objetivos de la investigación, el tipo, nivel y el método de investigación. En el Capítulo II se tocó el marco teórico relacionado a la investigación, antecedentes tanto a nivel nacional e internacional acerca de la estabilización de suelos arcillosos utilizando cal y algún tipo de puzolana, también se da a conocer las hipótesis y variables de la investigación. En el Capítulo III se encuentra la metodología la cual sustenta esta investigación, en el Capítulo IV contempla todos los resultados obtenidos, en el Capítulo V se tiene la discusión de la investigación y finalmente las conclusiones y recomendaciones.



Índice general

Dedicatoria..... II

Agradecimiento..... III

Resumen IV

Abstract V

Introducción VI

Índice general VIII

Índice de tablas XIV

Índice de figuras XXV

CAPITULO I: Planteamiento del problema30

1.1. Identificación del problema.....30

1.1.1. Descripción de problema.....30

1.1.2. Formulación del problema33

1.1.2.1. Formulación del problema general33

1.1.2.2. Formulación interrogativa de los problemas específicos33

1.2. Justificación e importancia de la investigación33

1.2.1. Justificación técnica33

1.2.2. Justificación social.....34

1.2.3. Justificación por viabilidad34

1.2.4. Justificación por relevancia34

1.3. Limitaciones de la investigación35

1.4. Objetivos36

1.4.1. Objetivo general36

1.4.2. Objetivos específicos36

CAPITULO II: Marco teórico38

2.1. Antecedentes de la tesis38

2.1.1. Antecedentes a nivel nacional38

2.1.2. Antecedentes a nivel internacional40

2.2. Aspectos teóricos pertinentes42

2.2.1. Clasificación de los suelos42

2.2.1.1. Tipos de suelos42

2.2.2. Las arcillas.....43

2.2.2.1. Estructura de los filosilicatos.....45



2.2.2.2. Clasificación de los filosilicatos	46
2.2.2.3. Propiedades de las arcillas.....	47
2.2.2.3.1. Superficie específica	47
2.2.2.3.2. Capacidad de absorción.....	48
2.2.2.3.3. Hidratación e hinchamiento.....	49
2.2.2.3.4. Plasticidad.....	49
2.2.2.3.5. Tixotropía	50
2.2.2.4. Algunos tipos de arcilla más comunes	50
2.2.2.4.1. Caolines y arcillas caoliníferas	51
2.2.2.4.2. Bentonitas	52
2.2.2.4.3. Paligorskita sepiolita	52
2.2.2.4.4. Otros tipos de arcillas especiales	52
2.2.2.5. Aplicación de las arcillas en la ingeniería civil	52
2.2.3. La cal.....	53
2.2.4. Relación suelo cal.....	54
2.2.5. Principales factores que influyen en la estabilización de suelos con cal	54
2.2.5.1. Suelo.....	54
2.2.5.2. Modificación del suelo	56
2.2.5.3. Cementación del suelo	56
2.2.6. Factores secundarios que influyen en la estabilización de suelo con cal.....	56
2.2.6.1. Humedad óptima del suelo	56
2.2.6.2. Aplicación de la cal en polvo o en lechada	58
2.2.6.3. Efecto del esfuerzo de compactación.....	59
2.2.6.4. Tiempo de curado	59
2.2.6.5. Efectos del retraso de la compactación	60
2.2.6.6. Plasticidad	60
2.2.6.7. Resistencia	62
2.2.6.8. Hinchamiento.....	63
2.2.7. La puzolana	64
2.2.7.1. Historia de las puzolanas.....	64
2.2.7.2. Propiedades físicas y químicas	65
2.2.7.3. Puzolanas volcánicas.....	66
2.2.8. Estabilización de suelos arcillosos con cal – puzolanas	66
2.2.9. Estabilización de suelos con cal más el uso de ceniza volante	67



2.2.9.1. Relación entre la cal y cenizas volantes67

2.2.9.2. Los tipos de cal68

2.2.9.3. Tipos de suelo69

2.2.9.4. Proporciones y cantidad de cal y cenizas volantes69

2.2.9.5. Relación humedad densidad resistencia69

2.2.9.6. Efecto de la potencia de compactación69

2.2.9.7. El PH (Potencial de hidrogeno)70

2.2.10. Sub rasante de un camino70

2.2.11. Estabilización de suelo con cal según el Manual de Carreteras Suelos, Geología,
Geotecnia y Pavimentos del MTC71

2.2.12. Propiedades del suelo a evaluar en la caracterización de la sub rasante72

2.2.12.1. Registro de excavación.....73

2.2.12.2. Descripción de los suelos74

2.2.13. Propiedades físico mecánicas a determinar76

2.2.13.1. Granulometría76

2.2.13.2. La plasticidad76

2.2.13.3. Índice de grupo77

2.2.13.4. Humedad natural.....78

2.2.13.5. Clasificación de los suelos.....78

2.2.13.6. CBR (Valor soporte California).....79

2.2.13.7. Módulo de resiliencia Mr79

2.3. Hipótesis.....80

2.3.1. Hipótesis general80

2.3.2. Sub hipótesis.....80

2.4. Definición de variables81

2.4.1. Variables independientes81

2.4.1.1. Descripción de las variables:81

2.4.1.2. Indicadores:81

2.4.2. Variables dependientes81

2.4.2.1. Descripción de las variables:81

2.4.2.2. Indicadores:82

2.4.3. Cuadro de operacionalización de variables83

CAPITULO III: Metodología85

3.1. Metodología de la investigación.....85



3.1.1. Enfoque de la investigación	85
3.1.2. Nivel de la investigación	85
3.1.3. Método de la investigación	85
3.2. Diseño de la investigación	86
3.2.1. Diseño metodológico	86
3.2.2. Diseño de ingeniería	87
3.3. Población y muestra.....	88
3.3.1. Población.....	88
3.3.1.1. Descripción de la población	88
3.3.1.2. Cuantificación de la población	88
3.3.2. Muestra.....	89
3.3.2.1. Descripción de la muestra	89
3.3.2.2. Cuantificación de la muestra	90
3.3.2.3. Método de muestreo.....	91
3.3.2.4. Criterios de evaluación de la muestra	91
3.3.3. Criterios de inclusión	92
3.4. Instrumentos	92
3.4.1. Instrumentos metodológicos o instrumentos de recolección de datos	92
3.4.1.1. Guías documentarias	102
3.4.2. Instrumentos de ingeniería	102
3.4.2.1. Instrumentos de campo	102
3.4.2.2. Instrumentos de gabinete.....	103
3.5. Procedimiento de recolección de datos.....	104
3.5.1. Exploración y toma de muestra.	104
3.5.2. Ensayo de contenido de humedad.....	105
3.5.3. Ensayo de análisis granulométrico	107
3.5.4. Ensayo para determinar el límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad de suelos.....	109
3.5.5. Clasificación de suelos.....	115
3.5.6. Ensayo de compactación de suelos en laboratorio utilizando energía modificada (Proctor Modificado).....	116
3.5.7. Triturado y molienda de la puzolana volcánica.....	125
3.5.8. Datos de capacidad de soporte del suelo CBR	128
3.5.9. Ensayo para la determinación del Potencial de Hidrogeno (PH)	139



3.6. Procedimiento de análisis de datos 140

3.6.1. Análisis de datos obtenidos en el ensayo de contenido de humedad 140

3.6.2. Análisis de datos obtenidos en el ensayo de análisis granulométrico..... 143

3.6.3. Análisis de datos del ensayo límite líquido 150

3.6.4. Análisis de datos del ensayo limite plástico 158

3.6.5. Análisis del índice de plasticidad 160

3.6.6. Análisis de clasificación de suelos 162

3.6.7. Análisis del ensayo de compactación de suelos en laboratorio utilizando energía
modificada (Proctor Modificado) 171

3.6.8. Análisis y procesamiento del ensayo de Soporte California (CBR)..... 184

3.6.8.1. Determinación del contenido de humedad del ensayo de Soporte California (CBR)
antes de sumergir 184

3.6.8.2. Determinación del contenido de humedad del CBR antes de sumergir..... 186

3.6.8.3. Determinación del porcentaje de Humedad absorbida del ensayo de soporte California
(CBR)..... 188

3.6.8.4. Determinación de la expansión del ensayo de soporte California (CBR). 190

3.6.8.5. Determinación del ensayo de soporte California (CBR)..... 195

3.6.8.6. Determinación de la curvatura de esfuerzo de penetración..... 200

3.6.8.7. Determinación de la densidad seca y el CBR..... 203

3.6.8.8. Resultados finales del Ensayo de Soporte California (CBR) 205

CAPITULO IV: Resultados 207

4.1. Estratigrafía 207

4.2. Determinación del contenido de humedad 207

4.3. Resultado de límites de Atterberg 208

4.4. Clasificación de suelo 211

4.5. Resultado de Proctor Modificado 212

4.6. Resultado de Ensayo de Soporte California (CBR)..... 213

4.7. Resultados del ensayo de Ph 215

4.8. Módulo de Resiliencia (Mr) 215

CAPITULO V: Discusión..... 215

Glosario 218

Acrónimos 220

Conclusiones 221

Recomendaciones..... 224



Bibliografía	225
Anexos	227



Índice de tablas

Tabla 1: Clasificación de los filosilicatos.47

Tabla 2: Valores de superficie específica de algunas arcillas.48

Tabla 3: Resistencia a la compresión de suelos estabilización con cal en muestras sumergidas sin confirmar.....55

Tabla 4: Resultado de los ensayos de plasticidad en arcillas muy plásticas y varias mezclas de suelo-cal.62

Tabla 5: CBR para compactación normal ASTM-AASHO de suelo arcilloso muy plástico tratado con cal.63

Tabla 6: Evaluación comparativa de la durabilidad de mezclas seleccionadas.67

Tabla 7: Numero de calicatas para exploración de suelos.73

Tabla 8: Numero de ensayos de Mr y CBR74

Tabla 9: Signos convencionales para perfil de calicata.75

Tabla 10: Signos convencionales para perfil de calicatas75

Tabla 11: Clasificación de los suelos según tamaño de partículas. (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2013)76

Tabla 12: Clasificación de suelos según su índice de plasticidad.77

Tabla 13: Clasificación de suelos según el índice de grupo.78

Tabla 14: Correlación de tipos de suelos AASTHO y SUCS.79

Tabla 15: CBR para subrasante.79

Tabla 16: tabla de ubicación UTM de calicatas88

Tabla 17: Estratigrafía de la C-0590

Tabla 18: Estratigrafía de la C-0690

Tabla 19: Número de calicatas y de ensayos realizados.91

Tabla 20 Softwares computacionales utilizados en la investigación 103



Tabla 21: Contenidos de humedad de las calicatas 106

Tabla 22: Resumen de los datos obtenido de la granulometría de las 6 calicatas..... 109

Tabla 23: Datos de la muestra de la calicata C-01 y C-02 para determinar límite líquido..... 112

Tabla 24: Datos de la muestra de la calicata C-01 y C-02 para determinar límite plástico..... 112

Tabla 25: Datos de la muestra de la calicata C-03 para determinar límite líquido. 112

Tabla 26: Datos de la muestra de la calicata C-03 para determinar límite plástico. 112

Tabla 27: Datos de la muestra de la calicata C-04 para determinar límite líquido. 113

Tabla 28: Datos de la muestra de la calicata C-04 para determinar límite plástico. 113

Tabla 29: Datos de la muestra de la calicata C-05 para determinar límite líquido. 113

Tabla 30: Datos de la muestra de la calicata C-05 para determinar límite plástico. 113

Tabla 31: Datos de la muestra de la calicata C-06 para determinar límite líquido. 113

Tabla 32: Datos de la muestra de la calicata C-06 para determinar límite plástico. 114

Tabla 33: Datos de la muestra de la calicata C-05, C-06 más cal al 10% y 15% de puzolana volcánica para determinar límite líquido. 114

Tabla 34: Datos de la muestra de la calicata C-05, C-06 más cal al 10% y 15% de puzolana volcánica para determinar límite plástico. 114

Tabla 35: Datos de la muestra de la calicata C-05, C-06 más cal al 10% y 25% de puzolana volcánica para determinar límite líquido. 114

Tabla 36: Datos de la muestra de la calicata C-05, C-06 más cal al 10% y 25% de puzolana volcánica para determinar límite plástico. 115

Tabla 37: Datos de la muestra de la calicata C-05, C-06 más cal al 10% y 30% de puzolana volcánica para determinar límite líquido. 115

Tabla 38: Datos de la muestra de la calicata C-05, C-06 más cal al 10% y 30% de puzolana volcánica para determinar límite plástico. 115

Tabla 39: Pesos de moldes más suelo de las calicatas C-01 y C-02. 119



Tabla 40: Pesos de las taras más suelo húmedo y suelo seco de las C-01 y C-02. 119

Tabla 41: Pesos de moldes más suelo de las calicatas C-03 y C-04 120

Tabla 42: Pesos de las taras más suelo húmedo y suelo seco de las C-03 y C-04. 120

Tabla 43: Pesos de moldes más suelo de las calicatas C-05 y C-06. 121

Tabla 44: Pesos de las taras más suelo húmedo y suelo seco de las calicatas C-05 y C-06... 121

Tabla 45: Mezclas de suelo de las calicatas C-05, C-06 y cal 10% más 15%, 25% y 30% de puzolana volcánica. 122

Tabla 46: Pesos de moldes más suelo de las calicatas C-05, C-06 y cal 10% más 15% de puzolana volcánica. 122

Tabla 47: Pesos de las taras más suelo húmedo y suelo seco de las calicatas C-05 y C-06 combinadas con cal al 10% y 15% de puzolana volcánica. 123

Tabla 48: Pesos de moldes más suelo de las calicatas C-05 y C-06 más cal al 10% y puzolana volcánica al 25%. 123

Tabla 49: Pesos de taras más suelo húmedo y suelo seco de las calicatas C-05 y C-06 más cal al 10% y puzolana volcánica 25%..... 124

Tabla 50: Pesos de moldes más suelo de las calicatas C-05 y C-06 más cal al 10% y 15% de puzolana volcánica. 124

Tabla 51: Pesos de taras más suelo húmedo y suelo seco de las calicatas C-05 y C-06 más cal 10% y 15% de puzolana volcánica. 125

Tabla 52 Cantidades de puzolana volcánica utilizada en los ensayos. 127

Tabla 53: Determinación de los pesos para cada combinación. 130

Tabla 54: Detalle de moldes para suelo arcilloso de las calicatas C-05 y C-06. 131

Tabla 55: Detalle de moldes para suelo arcilloso de las calicatas C-05 y C-06 estabilizado con cal al 10% y puzolana volcánica al 15%..... 131



Tabla 56: Detalle de moldes para suelo arcilloso de las calicatas C-05 y C-06 estabilizado con cal al 10% y puzolana al 25%.131

Tabla 57: Detalle de moldes para suelo arcilloso de las calicatas C-05 y C-06 estabilizado con cal al 10% y puzolana al 30%.132

Tabla 58: Contenido de humedad suelo arcilloso de las calicatas C-05 y C-06 antes de inmersión en poza de curado.....132

Tabla 59: Contenido de humedad suelo arcilloso de las calicatas C-05 y C-06 estabilizado con cal al 10% y puzolana volcánica al 15% antes de inmersión en poza de curado...132

Tabla 60: Contenido de humedad suelo arcilloso C-05 y C-06 estabilizado con cal al 10% y puzolana volcánica al 25% antes de inmersión en poza de curado.133

Tabla 61: Contenido de humedad suelo arcilloso de las calicatas C-05 y C-06 estabilizado cal al 10% y puzolana volcánica al 30% antes de inmersión en poza de curado.133

Tabla 62: Contenido de humedad Suelo arcilloso de las calicatas C-05 y C-06 después de inmersión en poza de curado.....133

Tabla 63: Contenido de humedad suelo arcilloso de las calicatas C-05 y C-06 estabilizado con cal al 10% y puzolana al 15% después de inmersión en poza de curado.134

Tabla 64: Contenido de humedad suelo arcilloso de las calicatas C-05 y C-06 estabilizado con cal al 10% y puzolana al 25% después de inmersión en poza de curado134

Tabla 65: Contenido de humedad suelo arcilloso de las calicatas C-05 y C-06 estabilizado con cal al 10% y puzolana al 30% después de inmersión en poza de curado.134

Tabla 66: Datos de hinchamiento de la muestra de suelo arcilloso de las calicatas C-05 y C-06 con dial de 0.001”.....135

Tabla 67: Datos de hinchamiento del suelo arcilloso de las calicatas C-05 y C-06 estabilizado con cal al 10% y puzolana volcánica al 15% con dial de 0.001”.....135



Tabla 68: Datos de hinchamiento del suelo arcilloso de las calicatas C-05 y C-06 estabilizado con cal al 10% y puzolana volcánica al 25% con dial de 0.001” 136

Tabla 69: Datos de hinchamiento del suelo arcilloso C-05 y C-06 estabilizado cal al 10% y puzolana volcánica al 30% con dial de 0.001” 136

Tabla 70: Datos obtenidos de la máquina de CBR del suelo arcilloso de las calicatas C-05 y C-06. 137

Tabla 71: Dato obtenido de la máquina de CBR del suelo arcilloso de las calicatas C-05 y C-06 estabilizado con cal al 10% y puzolana volcánica al 15%. 137

Tabla 72: Dato obtenido de la máquina de CBR del suelo arcilloso de las calicatas C-05 y C-06 estabilizado con cal al 10% y puzolana al 25%. 138

Tabla 73: Dato obtenido de la máquina de CBR del suelo arcilloso de las calicatas C-05 y C-06 estabilizado con cal al 10% y puzolana volcánica al 25%. 138

Tabla 74: Resultados del ensayo de Ph. 140

Tabla 75: Determinación del peso del agua por tara para cada calicata. 141

Tabla 76: Determinación del peso del suelo seco de cada tara para cada calicata. 141

Tabla 77: Determinación de los contenidos de humedad por calicata. 142

Tabla 78: Análisis granulométrico de la calicata C-01. 144

Tabla 79: Análisis granulométrico C-02. 145

Tabla 80: Análisis granulométrico C-03. 146

Tabla 81: Análisis granulométrico C-04. 147

Tabla 82: Análisis granulométrico C-05. 148

Tabla 83: Análisis granulométrico C-06. 149

Tabla 84: Análisis de los datos del límite líquido C-03. 151

Tabla 85: Análisis de los datos del límite líquido C-04. 152

Tabla 86: Análisis de los datos del límite líquido C-05. 153



Tabla 87: Análisis de los datos del límite líquido C-06. 154

Tabla 88: Análisis de los datos del límite líquido C-05 y C-06 adicionado con cal 10% y puzolana volcánica 15%. 155

Tabla 89: Análisis de los datos del límite líquido C-05 y C-06 adicionado con cal 10% y puzolana volcánica 25%. 156

Tabla 90: Análisis de los datos del límite líquido C-05 y C-06 adicionado con cal 10% y puzolana volcánica 30%. 157

Tabla 91: Análisis del límite plástico de la calicata C-3 158

Tabla 92: Análisis del límite plástico de la calicata C-4 158

Tabla 93: Análisis del límite plástico de la calicata C-5 159

Tabla 94: Análisis del límite plástico de la calicata C-6 159

Tabla 95: Análisis del límite plástico de la calicata C-5 y C-06 más la mezcla con cal 10% y puzolana volcánica al 15%..... 159

Tabla 96: Análisis del límite plástico de la calicata C-5 y C-06 más la mezcla con cal 10% y puzolana volcánica al 25%..... 160

Tabla 97: Análisis del límite plástico de la calicata C-5 y C-06 más la mezcla con cal 10% y puzolana volcánica al 30%..... 160

Tabla 98: Resumen de los límites líquidos, límites plásticos e índices de plasticidad..... 161

Tabla 99: Criterio de clasificación SUCS..... 163

Tabla 100: Criterio de clasificación AASTHO 164

Tabla 101: Datos utilizados clasificación SUCS C-01 165

Tabla 102: Datos utilizados clasificación AASTHO C-01..... 165

Tabla 103: Datos utilizados clasificación SUCS C-02..... 166

Tabla 104: Datos utilizados clasificación AASTHO C-02..... 166

Tabla 105: Datos utilizados clasificación SUCS C-03..... 167



Tabla 106: Datos utilizados clasificación AASTHO C-03 167

Tabla 107: Datos utilizados clasificación SUCS C-04..... 168

Tabla 108: Datos utilizados clasificación AASTHO C-04..... 168

Tabla 109: Datos utilizados clasificación SUCS C-05..... 169

Tabla 110: Datos utilizados clasificación AASTHO C-05..... 169

Tabla 111: Datos utilizados clasificación SUCS C-05..... 170

Tabla 112: Datos utilizados clasificación AASTHO C-05..... 170

Tabla 113: Densidad húmeda compactada de la C-01 y C-02 171

Tabla 114: Contenidos de humedad promedio y densidad seca compactada C-01 y C-02.... 172

Tabla 115: Densidad húmeda compactada de la C-03 y C-04..... 173

Tabla 116: Contenidos de humedad promedio y densidad seca compactada C-03 y C-04.... 174

Tabla 117: Densidad húmeda compactada de la C-05 y C-06..... 175

Tabla 118: Contenidos de humedad promedio y densidad seca compactada C-05 y C-06.... 176

Tabla 119: Densidad húmeda compactada de la C-05 y C-06 estabilizado con cal 10% y puzolana volcánica 15% 177

Tabla 120: Contenidos de humedad promedio y densidad seca compactada C-05 y C-06 estabilizado con cal 10% y puzolana volcánica 15% 178

Tabla 121: Densidad húmeda compactada de la C-05 y C-06 estabilizado con cal 10% y puzolana volcánica 25% 179

Tabla 122: Contenidos de humedad promedio y densidad seca compactada C-05 y C-06 estabilizado con cal 10% y puzolana volcánica 25% 180

Tabla 123: Densidad húmeda compactada de la C-05 y C-06 estabilizado con cal 10% y puzolana volcánica 30% 181

Tabla 124: Contenidos de humedad promedio y densidad seca compactada C-05 y C-06 estabilizado con cal 10% y puzolana volcánica 30% 182



Tabla 125: Contenido de humedad del suelo arcilloso de las calicatas C-05 y C-06 antes de sumergir en poza de curado:184

Tabla 126: Contenido de humedad del suelo arcilloso de las calicatas C-05 y C-06 estabilizado con cal al 10% + puzolana al 15% antes de inmersión en poza de curado:184

Tabla 127: Contenido de humedad del suelo arcilloso de las calicatas C-05 y C-06 estabilizado con cal al 10% + puzolana al 25% antes de inmersión en poza de curado:185

Tabla 128: Contenido de humedad del suelo arcilloso de las calicatas C-05 y C-06 estabilizado con cal al 10% y puzolana al 30% antes de inmersión en poza de curado185

Tabla 129: Densidad de CBR del suelo arcilloso.....186

Tabla 130: Densidad de CBR del suelo arcilloso de las calicatas C-05 y C-06 estabilizado con cal al 10% y puzolana al 15% antes de inmersión en poza de curado187

Tabla 131: Densidad de CBR del suelo arcilloso de las calicatas C-05 y C-06 estabilizado con cal al 10% y puzolana al 25% antes de inmersión en poza de curado187

Tabla 132: Densidad de CBR del suelo arcilloso de las calicatas C-05 y C-06 estabilizado con cal al 10% y puzolana al 30% antes de inmersión en poza de curado188

Tabla 133: Porcentaje de absorción del ensayo de Soporte California (CBR) para el suelo arcilloso de las calicatas C-05 y C-06188

Tabla 134: Porcentaje de absorción del ensayo de Soporte California (CBR) para el suelo arcilloso de las calicatas C-05 y C-06 estabilizado con cal al 10% y puzolana al 15% antes de inmersión en poza de curado.189



Tabla 135: Porcentaje de absorción del ensayo de Soporte California (CBR) para el suelo arcilloso de las calicatas C-05 y C-06 estabilizado cal al 10% y puzolana al 25% antes de inmersión en poza de curado.189

Tabla 136: Porcentaje de absorción del ensayo de Soporte California (CBR) para el suelo arcilloso de las calicatas C-05 y C-06 estabilizado con cal al 10% y puzolana al 30% antes de inmersión en poza de curado.190

Tabla 137: Determinación de la expansión del suelo arcilloso para 55 golpes.190

Tabla 138: Determinación de la expansión del suelo arcilloso de las calicatas C-05 y C-06 para 26 golpes.191

Tabla 139: Determinación de la expansión del suelo arcilloso de las calicatas C-05 y C-06 para 12 golpes.191

Tabla 140: Determinación de la expansión del suelo arcilloso de las calicatas C-05 y C-06 estabilizado con cal al 10% y puzolana volcánica al 15% para 55 golpes.191

Tabla 141: Determinación de la expansión del suelo arcilloso de las calicatas C-05 y C-06 estabilizado cal al 10% y puzolana volcánica al 15% para 26 golpes.....192

Tabla 142: Determinación de la expansión del suelo arcilloso de las calicatas C-05 y C-06 cal al 10% y puzolana volcánica al 15% para 12 golpes.192

Tabla 143: Determinación de la expansión del suelo arcilloso de las calicatas C-05 y C-06 estabilizado con cal al 10% y puzolana volcánica al 25% para 55 golpes.192

Tabla 144: Determinación de la expansión del suelo arcilloso de las calicatas C-05 y C-06 estabilizado con cal al 10% y puzolana volcánica al 25% para 26 golpes.193

Tabla 145: Determinación de la expansión del suelo arcilloso de las calicatas C-05 y C-06 estabilizado cal al 10% y puzolana volcánica al 25% para 12 golpes.....193

Tabla 146: Determinación de la expansión del suelo arcilloso de las calicatas de C-05 y C-06 estabilizado cal al 10% y puzolana volcánica al 30% para 55 golpes.....193



Tabla 147: Determinación de la expansión del suelo arcilloso de las calicatas C-05 y C-06 estabilizado con cal al 10% y puzolana volcánica al 30% para 26 golpes.194

Tabla 148: Determinación de la expansión del suelo arcilloso de las calicatas C-05 y C-06 estabilizado con cal al 10% y puzolana volcánica al 30% para 12 golpes.194

Tabla 149: Penetración suelo arcilloso de las calicatas C-05 y C-06 a 55 golpes.195

Tabla 150: Penetración suelo arcilloso de las calicatas C-05 y C-06 a 26 golpes.195

Tabla 151: Penetración suelo arcilloso de las calicatas C-05 y C-06 12 golpes.196

Tabla 152: Penetración suelo arcilloso de las calicatas C-05 y C-06 estabilizado cal al 10% y puzolana volcánica al 15% para 55 golpes.196

Tabla 153: Penetración suelo arcilloso de las calicatas C-05 y C-06 estabilizado con cal al 10% y puzolana volcánica al 15% para 26 golpes.197

Tabla 154: Penetración suelo arcilloso de las calicatas C-05 y C-06 estabilizado con cal al 10% y puzolana volcánica al 15% para 12 golpes.197

Tabla 155: Penetración suelo arcilloso de las calicatas C-05 y C-06 estabilizado con cal al 10% y puzolana volcánica al 25% para 55 golpes.198

Tabla 156: Penetración suelo arcilloso de las calicatas C-05 y C-06 estabilizado con cal al 10% y puzolana volcánica al 25% para 26 golpes.198

Tabla 157: Penetración suelo arcilloso de las calicatas C-05 y C-06 estabilizado con cal al 10% y puzolana volcánica al 25% para 12 golpes.199

Tabla 158: Penetración del suelo arcilloso de las calicatas C-05 y C-06 estabilizado con cal al 10% y puzolana volcánica al 30% para 55 golpes.199

Tabla 159: Penetración suelo arcilloso de las calicatas C-05 y C-06 estabilizado con cal al 10% y puzolana volcánica al 30% para 26 golpes.200

Tabla 160: Penetración suelo arcilloso de las calicatas C-05 y C-06 estabilizado con cal al 10% y puzolana volcánica al 30% para 12 golpes.200



Tabla 161: Suelo arcilloso de las calicatas C-05 y C-06205

Tabla 162: Suelo arcilloso de las calicatas C-05 y C-06 estabilizado con cal al 10% +
puzolana volcánica al 15%205

Tabla 163: Suelo arcilloso de las calicatas C-05 y C-06 estabilizado con cal al 10% y
puzolana volcánica al 25%205

Tabla 164: Suelo arcilloso de las calicatas C-05 y C-06 estabilizado con cal al 10% y
puzolana volcánica al 30%206

Tabla 165: Resumen de los contenidos de humedad.....207

Tabla 166: Resultados del ensayo de límites líquidos.....208

Tabla 167: Resultados de los ensayos de límite plástico209

Tabla 168: Resultados del índice de plasticidad por calicata y suelo estabilizado210

Tabla 169: Resumen de los tipos de suelos obtenidos según211

Tabla 170: Resultados del ensayo de Proctor Modificado212

Tabla 171: Resumen de los resultados obtenidos de los ensayos de CBR213

Tabla 172: Resultados del ensayo de Ph.....215

Tabla 173: Resultados del ensayo de módulo de resiliencia (Mr)215

**Índice de figuras**

Figura Nro.1 Ubicación nacional, regional, provincial y dsitrital de la APV. Picol Orcompugio	32
Figura Nro. 2 Sílice tetraédrico, sílice, aluminio octaédrico, gibsita, sílice gibsita elemental (Braja M., 2015).....	45
Figura Nro. 3 Estructura de los filosilicatos.	46
Figura Nro. 4 Diagrama de la estructura de una caolinita	51
Figura Nro. 5 Efecto de varios aditivos en los límites de Atterberg de un suelo arcilloso muy plástico (Mateos de Vicente, 2014).....	57
Figura Nro.6 Efecto de varios aditivos en la residencia de loes (depósitos sedimentarios arcilloso de origen eólico) friable.....	58
Figura Nro. 7 Efecto de la aplicación en forma de lechada y en forma de polvo de una cal viva dolomítica en la resistencia de un suelo limoso	58
Figura Nro. 8 Efectos de la adición de diferentes cantidades y tipos de cal en la resistencia de un suelo montmorillonitico.	59
Figura Nro. 9 Efecto de la adición de cal en el límite plástico de los suelos.....	61
Figura Nro. 10 Efecto de la adición de cal en el CBR de un suelo arcilloso limoso.	63
Figura Nro. 11 Efecto del esfuerzo de compactación en la resistencia de una mezcla de 76.5% de arena de duna, 6% de cal calcárea hidratada y 17.5% de cenizas volantes	70
Figura Nro. 12 Flujo grama para realizar la estabilización de suelo arcilloso para sub rasante en la APV. Picol Orcompugio.....	87
Figura Nro. 13 Ubicación de calicatas en la APV. Picol Orcompugio	89
Figura Nro. 14: Equipos de protección personal para realizar los trabajos en campo	102
Figura Nro. 15 Reconocimiento de la zona de estudio.....	104
Figura Nro. 16 Extracción de muestras de las calicatas	105



Figura Nro. 17 Muestras para determinar el contenido de humedad 106

Figura Nro. 18 Muestras y equipos que se utilizó para determinar el contenido de humedad
..... 106

Figura Nro. 19 Pesado y triturado del suelo arcilloso 107

Figura Nro. 20 Lavado del suelo arcilloso y secado en horno por 24 horas para el análisis
granulométrico. 108

Figura Nro. 21 Ensayo de análisis granulométrico de las calicatas C-01 y C-02 108

Figura Nro. 22 Ensayo de análisis granulométrico de las calicatas C-05 y C-06 109

Figura Nro. 23 Determinación del límite líquido de las muestras de la C-03 y C-04 111

Figura Nro. 24 Ensayo de límite líquido del suelo con combinaciones de cal 10 % y puzolana
15, 25 y 30%. 111

Figura Nro. 25 Ensayo de límite plástico de la calicata C-5 y C-6 y mezclas. 112

Figura Nro. 26 Ensayo de Proctor Modificado, materiales y preparado del suelo para el
compactado en los moldes de 4” 117

Figura Nro. 27 Combinación del suelo y saturado con agua, mezclas de suelo más cal 10% y
arcilla 15, 25 y 30% 118

Figura Nro. 28 Compactado y pesado de los moldes de 4” 118

Figura Nro. 29 Extracción de puzolana volcánica de la cantera de Raqchi. 126

Figura Nro. 30 Molienda de la puzolana volcánica por medios manuales y uso de la máquina
de los Ángeles. 126

Figura Nro. 31 Molienda y tamizado de la puzolana volcánica. 127

Figura Nro. 32 Combinación del suelo arcilloso adicionado con estabilizantes. 129

Figura Nro. 33 Compactado en los moldes. 129

Figura Nro. 34 Medición de la deformación del suelo durante el sumergido por 96 horas. .130

Figura Nro. 35 Utilización de la máquina de CBR. 130



Figura Nro. 36 Materiales necesarios para el ensayo de PH..... 139

Figura Nro. 37 Lecturas del Ph-metro. 140

Figura Nro. 38 Contenidos de humedad por cada tara y calicata..... 142

Figura Nro. 39 Curva granulométrica de la calicata C-01..... 144

Figura Nro. 40 Curva granulométrica de la calicata C-02..... 145

Figura Nro. 41 Curva granulométrica de la calicata C-03..... 146

Figura Nro. 42 Curva granulométrica de la calicata C-04..... 147

Figura Nro. 43 Curva granulométrica de la calicata C-05..... 148

Figura Nro. 44 Curva granulométrica de la calicata C-06..... 149

Figura Nro. 45 Grafico límite líquido C-03..... 151

Figura Nro. 46 Grafico límite líquido C-04..... 152

Figura Nro. 47 Grafico límite líquido C-05..... 153

Figura Nro. 48 Grafico límite líquido C-06..... 154

Figura Nro. 49 Grafico límite líquido C-05 y C-06 adicionado con cal 10% y puzolana volcánica 15%..... 155

Figura Nro. 50 Grafico límite líquido C-05 y C-06 adicionado con cal 10% y puzolana volcánica 25%..... 156

Figura Nro. 51 Grafico límite líquido C-05 y C-06 adicionado con cal 10% y puzolana volcánica 30%..... 157

Figura Nro. 52 Carta de plasticidad de Casagrande para suelos finos 164

Figura Nro. 53 Gráfica de la densidad seca y contenido de humedad C-01 y C-02 173

Figura Nro. 54 Gráfica de la densidad seca y contenido de humedad C-03 y C-04 175

Figura Nro. 55 Gráfica de la densidad seca y contenido de humedad C-05 y C-06 177

Figura Nro. 56 Gráfica de la densidad seca y contenido de humedad C-05 y C-06 estabilizado con cal 10% y puzolana volcánica 15% 179



Figura Nro. 57 Gráfica de la densidad seca y contenido de humedad C-05 y C-06 estabilizado con cal 10% y puzolana volcánica 25%:181

Figura Nro. 58 Gráfica de la densidad seca y contenido de humedad C-05 y C-06 estabilizado con cal 10% y puzolana volcánica 30%183

Figura Nro. 59 Suelo arcilloso de las calicatas C-05 y C-06201

Figura Nro. 60 Suelo arcilloso de las calicatas C-05 y C-06 estabilizado con cal al 10% y puzolana volcánica al 15%201

Figura Nro. 61 Suelo arcilloso de las calicatas C-05 y C-06 estabilizado con cal al 10% y puzolana volcánica al 25%202

Figura Nro. 62 Suelo arcilloso de las calicatas C-05 y C-06 estabilizado con cal al 10% y puzolana volcánica al 30%202

Figura Nro. 63 Gráfico de suelo arcilloso de las calicatas C-05 y C-06203

Figura Nro. 64 Suelo arcilloso de las calicatas C-05 y C-06 estabilizado con cal al 10% y puzolana volcánica al 15%203

Figura Nro. 65 Suelo arcilloso de las calicatas C-05 y C-06 estabilizado con cal al 10% y puzolana volcánica al 25%204

Figura Nro. 66 Suelo arcilloso de las calicatas C-05 y C-06 estabilizado con cal al 10% y puzolana volcánica al 30%204

Figura Nro. 67 Contenidos de humedad natural208

Figura Nro. 68 Limite líquido vs tipo de suelo209

Figura Nro. 69 Limite plástico vs tipo de suelo210

Figura Nro. 70 Índice de plasticidad vs tipo de suelo211

Figura Nro. 71 Densidad máxima seca vs tipo de suelo212

Figura Nro. 72 Contenido de humedad óptimo vs tipo de suelo213

Figura Nro. 73 CBR del suelo arcilloso y estabilizado al 100% y 95%214



Figura Nro. 74 Comparación de densidad máxima seca obtenida en el CBR214

Figura Nro. 75 CBR al 100% vs Ph215



CAPITULO I: Planteamiento del problema

1.1. Identificación del problema

1.1.1. Descripción de problema

Algunos suelos durante la construcción de una vía pavimentada o no pavimentada no cumplen con los requerimientos geotécnicos necesarios como: los suelos que conforman una sub rasante; puesto que sus propiedades físicas y mecánicas no satisfacen las exigidas para conformar dicha sub rasante ya que se presentan suelos arcillosos, estos poseen baja capacidad de soporte (CBR) debido a su comportamiento intrínseco como: súbitos cambios volumétricos por la presencia de humedad, variación de temperatura ambiental, su estado de compactación, sus altos índices de plasticidad entre otros.

Uno de los medios de comunicación más importante y útiles para el desarrollo de una ciudad y del país es por medio de la construcción de vías de acceso, los cuales en muchos casos presentan problemas durante su construcción, y uno de los factores es la presencia de suelos malos como la arcilla. La estabilización es una opción viable en la construcción de una vía el cual se define como un proceso de mejoramiento de las características del suelo mejorando sus propiedades físicas, mecánicas y químicas.

La estabilización no solo brinda la mejora de las propiedades físicas, mecánicas y químicas del suelo sino soluciona problemas de desechos de construcción, en este caso la mayoría de suelos que no son aptos para su uso como sub rasante son desechado en depósitos de material excedente (DME); por lo que, la estabilización hace que el material que se iba a desechar se reutilice. De este modo se posibilita la reducción de los costos en movimientos de tierras en un proyecto y sobre todo la disminución del impacto al medio ambiente.

Para obtener una vía en buen estado se debe seguir las normas establecidas de diseño en la etapa de construcción, como prever ciertos cuidados antes, durante y después de la construcción de la misma. Siendo la sub rasante uno de los componentes más importantes para el buen comportamiento del pavimento frente a los diferentes esfuerzos ya tomados en cuenta en el pre diseño, esta debe cumplir los parámetros mínimos de resistencia, pero si la sub rasante presenta problemas de estabilidad se debe introducir algún componente estabilizante que ayude a mejorar sus características físicas, mecánicas y químicas del suelo. No se ha determinado exactamente cuál es la solución más adecuada que se debe aplicar en un



proyecto vial cuando este se encuentra frente a un suelo problemático con presencia de arcillas de alta plasticidad (Índice de Plasticidad >20), por lo cual es necesario el estudio de este tipo de suelo y la introducción de agentes estabilizadores para la mejora de las propiedades del suelo, ya sea la disminución del grado de erosión como el incremento en resistencia CBR.

La presente investigación busca, no solo agregar cal, sino lograr su estabilización con la adición de puzolana volcánica. La cal por si misma puede reaccionar de manera muy efectiva, pero puede ser combinada con un agente adicional que en su composición contengan sílice y alúmina componentes mayoritarios de las puzolanas volcánicas. La sílice y alúmina reaccionan con la cal para formar un fuerte matriz cementante característico de una estructura de pavimento, concluyendo que las mezclas, correctamente proporcionadas de cal y puzolanas, pueden estabilizar suelos arcillosos.

Como opción de solución a este problema se emplean distintas alternativas de estabilización, para mejorar las magnitudes físico mecánicas del suelo, evitando problemas con la estabilidad del suelo que puede conllevar a elevar el costo de una obra.

La zona de estudio se ubica en la APV. Pícol Orcompugio ubicado en el distrito de San Jerónimo, provincia del Cusco, departamento del Cusco en el sector 9 de la APV. en una vía y tres calles donde se realizaron las calicatas (vía03, calle 03, calle 05 y calle 08). En esta zona en general el distrito de San Jerónimo se caracteriza por poseer suelos arcillosos y en la zona de estudio se ha identificado un estrato de arcilla de alta plasticidad (Índice de Plasticidad >20) la cual podría causar problemas de inestabilidad en la construcción de futuras vías en la APV. Pícol Orcompugio.

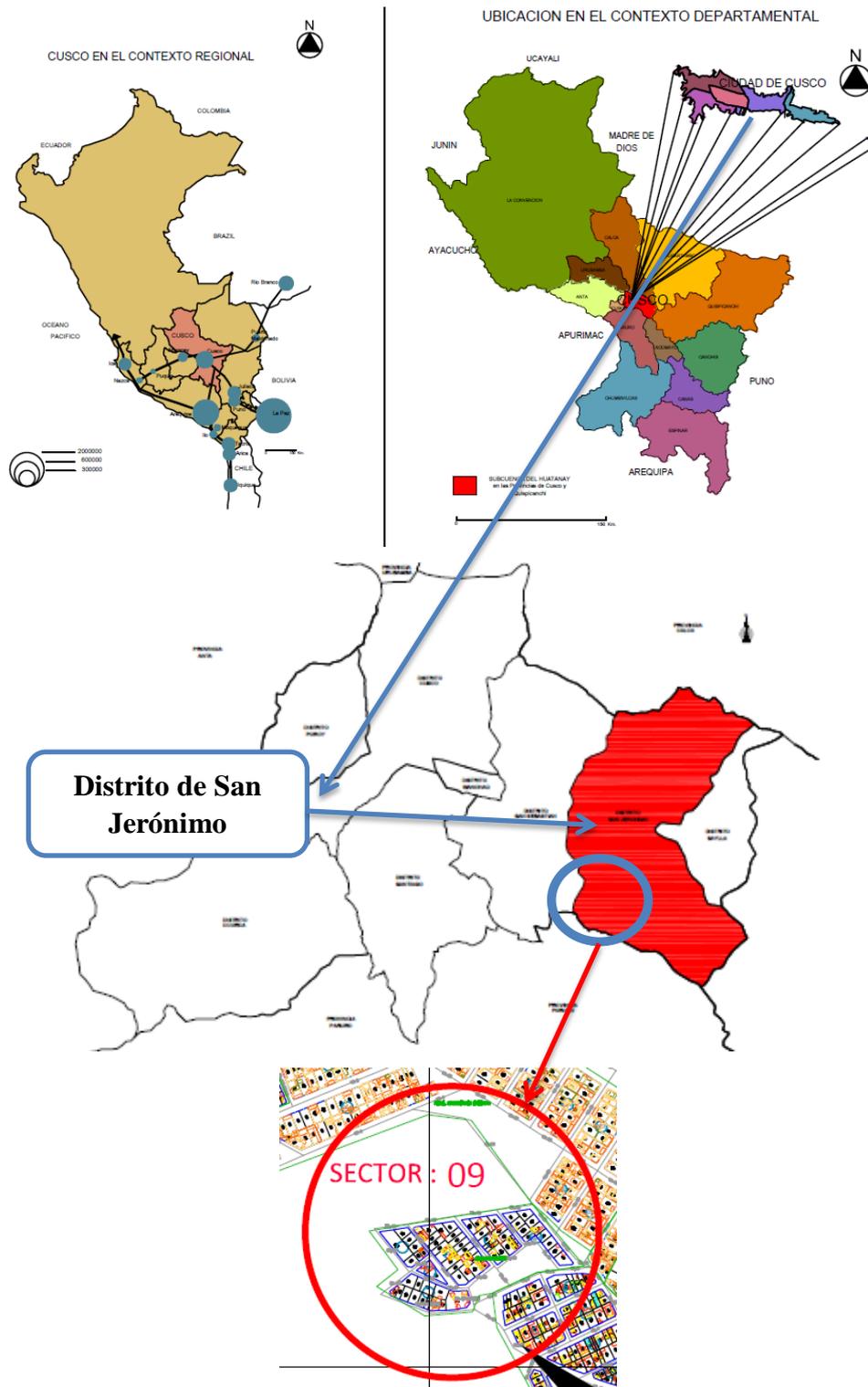


Figura Nro. 1 Ubicación nacional, regional, provincial y dsitrital de la APV. Pícol Orcompugio



1.1.2. Formulación del problema

1.1.2.1. Formulación del problema general

¿Cómo afecta la adición de cal al 10% y la puzolana volcánica al 15, 25 y 30% como estabilización química para mejorar las propiedades físicas, mecánicas y químicas del suelo arcilloso, para sub rasante de vías pavimentadas en la APV. Pícol Orcompugio?

1.1.2.2. Formulación interrogativa de los problemas específicos

PE 1: ¿Cuánto varía la magnitud de la capacidad de soporte (CBR) del suelo arcilloso, estabilizado con la adición de cal al 10% y puzolana volcánica al 15, 25 y 30% para sub rasante de vías pavimentadas en la APV. Pícol Orcompugio?

PE 2: ¿Cuánto es la variación de la densidad seca máxima (DMS) del suelo arcilloso, estabilizado con adición de cal al 10% y puzolana volcánica al 15, 25 y 30% para para sub rasante de vías pavimentadas en la APV. Pícol Orcompugio?

PE 3: ¿Cuánto es la variación del índice de plasticidad del suelo arcilloso, estabilizado con la adición de cal al 10% y puzolana volcánica al 15, 25 y 30% para sub rasante de vías pavimentadas en la APV. Pícol Orcompugio?

PE 4: ¿Cuánto varía el PH del suelo arcilloso al adicionarse cal al 10% y puzolana volcánica al 15, 25 y 30% para sub rasante de vías pavimentadas en la APV. Pícol Orcompugio?

PE 5: ¿En qué medida varía el Módulo de Resiliencia de una sub rasante de suelo arcilloso estabilizado con cal al 10% y puzolana volcánica al 15, 25 y 30% para sub rasante de vías pavimentadas en la APV. Pícol Orcompugio?

1.2. Justificación e importancia de la investigación

1.2.1. Justificación técnica

La investigación se encuentra en la rama técnica de la Geotecnia y Transportes, siendo importante estos conocimientos para la realización de los diferentes ensayos, como también para determinar el comportamiento del suelo al adicionarse cal y puzolana volcánica en el proceso de estabilización; así mismo, si los resultados de la estabilización cumplen con lo requerido para su uso en sub rasantes. También es de mucha importancia conocer las propiedades físicas mecánicas de la arcilla, ya que se podrá verificar si estas propiedades mejoran después de la estabilización.



1.2.2. Justificación social

La investigación beneficiará en primer lugar a los estudiantes de la escuela profesional de Ingeniería Civil de la Universidad Andina del Cusco que realizarán posteriores investigaciones tomando como referencia esta investigación, y también a estudiantes de otras universidades interesados en este tema de tesis. Y si en la medida se logren compartir los resultados obtenidos en la tesis con la sociedad, será posible alternativa para solucionar problemas con material arcilloso que se encuentren en carreteras, permitiendo que este suelo no se deseché y se aproveche al estabilizarlo alternativamente con la mezcla de cal y la puzolana volcánica.

1.2.3. Justificación por viabilidad

Para la investigación se evaluó lo siguiente:

La investigación es viable puesto que se cuenta con los equipos necesarios para lograr la realización de los ensayos, en el laboratorio de suelos y asfaltos de la Universidad Andina del Cusco, Facultad de Ingeniería y Arquitectura siendo la máquina de CBR (relación de soporte californiana), moldes de CBR y Proctor Modificado, pisonés de compactación, aparatos para determinar los límites de consistencia del suelo, serie de tamices, etc.

En cuanto se refiere a la recopilación de información hemos tomado primordialmente del Manual de Carreteras Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos del MTC, Manual de ensayos de material del MTC, tesis de investigación, etc.

También se contó con el acceso a terrenos y material a usar en la estabilización del suelo, la cal será de procedencia comercial y la puzolana volcánica será extraída de la cantera de Raqchi del distrito de San Pedro, provincia de Canchis, departamento del Cusco. En cuanto al uso de software se hizo uso de hojas Excel, Word y un software especializado Autodesk Civil 3D.

1.2.4. Justificación por relevancia

La problemática surge por encontrarse suelos arcillosos plásticos los cuales, no son aptos para su uso en la sub rasante en construcción de alguna infraestructura vial, por lo que este suelo se cambia o desecha causando el aumento del presupuesto del proyecto y pérdida de tiempos de ejecución de obra. La investigación tiene por objeto establecer una alternativa de estabilizar los suelos arcillosos al agregarse la cal y puzolana en distintos porcentajes, los cuales



mejorarán las propiedades físicas, mecánicas y químicas del suelo arcilloso, comprobado a través de los ensayos de laboratorio. Así también se busca que durante la construcción de una carretera al encontrarse suelos arcillosos perjudiciales no se desechen, sino que se reutilicen al estabilizarse con cal y puzolana volcánica.

1.3. Limitaciones de la investigación

Se limita al estudio y la estabilización del suelo arcilloso que se encuentra en la APV. Pico Orcompugio en el distrito de San Jerónimo, porque se vio que los suelos presentes en esta zona son arcillosos, la presencia de gran cantidad de ladrilleras hace constar esto.

Se limita a la estabilización de arcillas muy plásticas que se encuentren en la APV. Pico Orcompugio, porque se quiere llevar los aditivos estabilizantes (cal y puzolana volcánica) a su punto más crítico con arcillas muy plásticas.

Se limita el ensayo de CBR (Relación de Soporte California) del suelo arcilloso más plástico de los puntos de exploración según la norma MTC E 132, el ensayo mide la resistencia al corte de un suelo que se somete a una humedad y densidad controlada, para alcanzar cierta profundidad de penetración en relación de una muestra estándar.

Se limita al uso de cal comercial y puzolana volcánica triturada pasante la malla N°50 de la cantera de Raqchi, porque este material es natural proveniente del volcán Quinsachata y la cantera de Raqchi está concesionada y protegida por la Dirección Desconcentrada de Cultura del Cusco garantizando que el material a utilizar se encuentra limpio.

Se limita a agregarse como aditivos estabilizadores en las siguientes dosificaciones: cal 10% la cual permanecerá estable en todas las mezclas, cambiando solo la puzolana volcánica la cual será añadida en la mezcla en proporciones de 15, 25 y 30% del peso seco del suelo a estabilizar.

Se limita solo al estudio de las propiedades físicas, mecánicas y químicas del suelo antes de la estabilización y posterior a estabilizar con las mezclas de cal y puzolana volcánica. Las propiedades físicas a evaluar son: la densidad máxima seca (DMS), contenido de humedad óptimo y índice de plasticidad; dentro de las propiedades mecánicas son: CBR (Relación de Soporte California) y Módulo de Resiliencia (Mr); dentro de las propiedades químicas se evaluará el Ph.



Se limita a la determinación del Módulo de Resiliencia (M_r) a través de una fórmula matemática en función del CBR Relación de Soporte California), dicha fórmula se encuentra en el Manual de Carreteras Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Determinar cómo varían las propiedades físicas, mecánicas y químicas del suelo arcilloso mediante la estabilización química al adicionarse cal al 10% y puzolana volcánica al 15, 25 y 30%, para mejorar la sub rasante de vías pavimentadas en la APV. Pícol Orcompugio.

1.4.2. Objetivos específicos

Objetivo específico N°1

Determinar la variación de la magnitud de la Relación de Soporte California (CBR) del suelo arcilloso estabilizado con la adición de cal al 10% y puzolana volcánica al 15, 25 y 30% para sub rasante de vías pavimentadas en la APV. Pícol Orcompugio.

Objetivo específico N°2

Determinar la variación de la Densidad Máxima Seca (DMS) del suelo arcilloso estabilizado al adicionarse cal 10% y puzolana volcánica al 15, 25 y 30% para la sub rasante de vías pavimentadas en la APV. Pícol Orcompugio.

Objetivo específico N°3

Determinar la variación del Índice de Plasticidad del suelo arcilloso estabilizado con la adición de cal al 10% y puzolana volcánica al 15, 25 y 30% para la sub rasante de vías pavimentadas en la APV. Pícol Orcompugio.

Objetivo específico N°4

Determinar cómo es la variación del el PH del suelo arcilloso estabilizado con cal al 10% y puzolana volcánica al 15, 25 y 30% para la sub rasante de vías pavimentadas en la APV. Pícol Orcompugio.



Objetivo específico N°5

Determinará la variación del Módulo de Resiliencia de la sub rasante estabilizada con cal al 10% y puzolana volcánica al 15, 25 y 30% para la sub rasante de vías pavimentadas en la APV. Pícol Orcompugio.



CAPITULO II: Marco teórico

2.1. Antecedentes de la tesis

La presente tesis realiza una investigación en temas de estabilidad de suelos problemáticos, en este caso suelos arcillosos, los cuales están presentes en muchos proyectos y se realiza investigación acerca de ello. Para la tesis se tomó los siguientes antecedentes:

2.1.1. Antecedentes a nivel nacional

Para la siguiente investigación se tomó las siguientes investigaciones de tesis relacionadas al tema de estabilización de suelos arcillosos con ayuda de aditivos estabilizantes que incluyan cal y puzolanas.

“Estabilización de suelos arcillosos con cenizas de carbón para su uso como subrasante mejorada y/o sub base de pavimentos”

- Autor: Rocío del Carmen Pérez Collantes.
- Universidad Nacional de Ingeniería (UNI), para optar el grado de maestro en ciencias con mención en Ingeniería Geotécnica.
- Perú - setiembre del 2012.
- **Resumen**

El principal objetivo de esta tesis fue mejorar las características mecánicas del suelo arcilloso con la utilización de cenizas de carbón (volantes) para uso como estabilizante en suelos arcillosos los cuales se utilizaron como sub rasante mejorada y/o sub base de pavimentos. La tesis no indica la metodología utilizada, pero analizándola se identificó que es correlacional ya que se hace comparación entre el comportamiento de la arcilla estabilizada con carbón y cemento.
- **Conclusión**

La tesista llegó a la conclusión de que las cenizas volantes funcionan como un aditivo inhibidor de las propiedades de expansión del suelo arcilloso, pero este requiere cantidades grandes de ceniza volantes en promedio de un 20%. También indico que en combinación de ceniza volantes y cemento en un 3% se obtiene buenos resultados, mejorando el CBR (Relación de soporte California) de suelos arcillosos desde 7.7% hasta 51% de CBR al 100% de la MDS del Próctor modificado.



- **Aporte a la investigación**

Para la utilización de los porcentajes de puzolana volcánica en un promedio de 20%, según sugiere la tesista en la utilización de ceniza volante (polvo producido por quemadores de centrales termoeléctricas) de la quema para que se logre disminuir las propiedades de expansión del suelo arcilloso.

“Análisis comparativo de la estabilización de limos de baja plasticidad (Ccontay) con cal, cemento y aceites sulfonados para subrasantes en la APV República de Francia en el sector de Alto Qosqo para pavimentos urbanos”

- Autos: bachilleres Peña Pinedo Osman David y Ramos Fernández Nataly Jovita.
- Universidad Andina del Cusco (UAC) para optar el título profesional de Ingeniero Civil.
- Perú – 2015.

- **Resumen**

El objetivo de la tesis fue hacer un análisis de las propiedades geotécnicas de los suelos limosos de baja plasticidad (Ccontay) estabilizados químicamente utilizando cal, cemento y aceites sulfatados. Dentro de la metodología, la investigación es de tipo cuantitativo, el nivel de investigación es de tipo descriptivo y el método de investigación es de tipo hipotético-deductivo. La investigación llevada a cabo un análisis comparativo de la estabilización de limos de baja plasticidad, contraria a una arcilla muy plástica, para una sub rasante añadiendo cal, cemento y aceites sulfonados.

- **Conclusión**

Concluyendo que existe una dosificación adecuada para cada uno de los aditivos: 10% de cemento, 6% de cal y 0.07ml/ (1m²*15cm) de aceite sulfatado. Se observó que los valores de CBR y resistencia inconfina que los datos de resistencia se incrementan superando por mucho los requeridos por la norma CE.010 Pavimentos Urbanos y el Manual de suelos, geología, geotecnia y pavimentos del MTC. La tesis también indica que según los estudios realizados al suelo limoso de baja plasticidad en Ccontay en el sector de Alto Qosqo presentaba propiedades mecánicas no adecuadas, poseyendo un CBR de 5.3% las cuales según el Manual de Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos del MTC no es suficiente para su uso como sub rasante. Pero después de agregarse las dosificaciones de aditivos se obtuvo los siguientes CBRs: relación suelo cemento de 108.7%, suelo cal 50.3% y suelo aceite sulfatado 27.3%.



- **Aporte de a la investigación**

La dosificación de cal en un 6% para mejorar las propiedades de los suelos limosos de baja plasticidad. Para esta investigación se tomó como referencia estos porcentajes para la estabilización del suelo arcilloso.

2.1.2. Antecedentes a nivel internacional

A nivel internacional se tomaron tesis que dan un enfoque muy distinto tanto en la forma de la obtención de los aditivos estabilizantes y de los problemas que representan los suelos arcillosos para la región en estudio, cuanto mejoran sus propiedades y las recomendaciones que nos brindan.

“Estabilización de suelos cohesivos por medio de arenas volcánicas y cal viva”

- Autor: Denis Robín Ruano López para optar el título de ingeniero civil.
- Universidad San Carlos de Guatemala, para optar el título de ingeniero civil.
- Guatemala - septiembre de 2012.

- **Resumen**

La investigación tiene por objetivo el uso arenas volcánicas las cuales tienen cualidades que ayudan muy bien a la estabilización de suelos cohesivos y la cal viva utilizada. En la metodología el nivel de la investigación es de tipo correlacional porque se busca el incremento de las propiedades físicas y mecánicas y de tipo experimental porque busca obtener resultados mediante ensayos de laboratorio.

- **Conclusión**

En conclusión, las mezclas que utilizo el tesista para la estabilización entre la cal y la puzolana fue desde 10%, 25% y 50% sobre los suelos cohesivos y cal viva 10% para todas las mezclas, logrando el aumento de los valores de CBR desde 52.6% hasta 91.5% los que da un amplio margen de aplicación del suelo para conformar la carpeta asfáltica. Los suelos utilizados fueron extraídos del norte de Guatemala los cuales según el autor de la tesis son suelos muy cohesivos. La extracción de la puzolana fue en calidad de arena la cual no paso por ningún procediendo mecánico de triturado.\

- **Aporte de la investigación**

Para la investigación se tomó de referencia los porcentajes de cal de 10% estable y arenas volcánicas en los porcentajes entre 10 y 50% para la utilización de la puzolana volcánica.



“Estudio del comportamiento de un suelo arcilloso estabilizado por métodos químicos (cal y cloruro de sodio)”

- Autor: Israel Isaías Guamán Iler para optar el título de ingeniero civil.
- Universidad Técnica de Ambato, para optar el título de ingeniero civil.
- Ecuador - 2016.

- Resumen

La tesis presentada tiene por objetivo analizar el comportamiento de los suelos arcillosos estabilizado químicamente con cal y cloruro de sodio todo llevado en laboratorio, así como analizar las propiedades que mejora en el suelo. En la metodología determinaron que la investigación es de tipo descriptiva ya que es necesario un análisis de las propiedades del suelo estabilizado por los componentes químicos, la investigación es de tipo experimental debido a que se realiza un estudio de la estabilización con cloruro de sodio y de tipo explicativa ya que indica las propiedades del suelo natural, así como las propiedades que tiene cada una de las estabilizaciones.

- Conclusión

Se concluyó que el suelo estabilizado con cloruro de sodio mejoro su trabajabilidad y su compactación a diferencia del suelo estabilizado con cal. En cuanto con los límites de Atterberg según con las especificaciones generales del Ministerio de Obras Públicas de la Republica de Ecuador el limite liquido no alcanzo, pero con los últimos porcentajes de 12.5% con la estabilización de cal y cloruro de sodio con porcentajes de 37.4% y 36.7% de acercan a lo mínimo de 35 por lo que serían aceptables y el índice de plasticidad en ambos es menor que 9 siendo aceptable. En cuanto al CBR del suelo estabilizado con cal en porcentajes de 7.5% y 12.5% alcanzo valores 20.8% y 26% y con cloruro de sodio quedándose en 9% no cumpliendo con lo especificado con las especificaciones generales del Ministerio de Obras Públicas de la Republica de Ecuador todo para una subrasante. En cuanto al PH alcanzo valores de 10.9 y 10.83 con los porcentajes anteriores estabilizado con cal.

- Aporte de la investigación

Para nuestra investigación se tomó como referencia el porcentaje de cal utilizada entre 7.5 y 12.5% y también las mejoras del PH del suelo arcilloso entre 10.83 y 10.90.

“Estabilización de suelo arcilloso con cal hidratada, para ser utilizada como capa subrasante de pavimentos en la colonia San Juan Capistrano de ciudad Obragon Son.”



- Autor: Mario Alberto Beltran Parra y José Aloix Copado Beltran para optar el título de Ingeniero Civil.
- Instituto Tecnológico de Sonora, para optar el título de ingeniero civil.
- Mexico – Obregón 2011.

- **Resumen**

La investigación tenía por objetivo estabilizar un suelo arcilloso mediante el uso de cal hidratada la cual sería utilizada como sub rasante para vías, según las especificaciones de la Secretaría de Comunidades y Transportes (SCT). La investigación es de nivel correlacional ya que relaciona cal con el suelo natural con el aumento del porcentaje del CBR y de tipo experimental porque busca resultados por ensayos de laboratorio.

- **Conclusión**

Se concluyó que al añadir un porcentaje de cal de 2.5% en función del peso del suelo arcilloso se logró alcanzar un CBR de 22%, también se reduce el índice de plasticidad de 21% a 6% y el porcentaje de expansión de 2.7-9% a 0.99% y según la Secretaria de Comunidades Y transportes (SCT) el suelo es apto para como sub rasante. En cuanto al adicionarse un porcentaje 6% de cal los valores anteriores aumentan mucho CBR de 76.43%, índice de plasticidad de 4% y índice de expansión de 0.17% determinando que este suelo puede utilizarse como sub base.

- **Aporte de la investigación**

También se tomó como referencia el aumento del valor de CBR el cual se incrementó hasta un 76.43% con un porcentaje de cal hidratada de 6%.

2.2. Aspectos teóricos pertinentes

2.2.1. Clasificación de los suelos

2.2.1.1. Tipos de suelos

De acuerdo a los estudios tanto en tamaños y composición de las partículas del suelo, estas se pueden clasificar en diferentes grupos de acuerdo a una metodología de definiciones y la evaluación de sus propiedades del suelo. Teniendo esto en cuenta, el suelo se puede clasificar de acuerdo a normas (ASTM, AASHTO, DIN, AENOR, SUCS, etc.) en:

-**Gravas**, estas poseen tamaños entre 8 a 10cm y 2mm; estas se caracterizan porque las partículas de estas son diferenciables y observables a simple vista. Dentro de sus características podemos señalar que estas no pueden retener agua por su superficie inactiva y



los grandes espacios entre las partículas de estas. (Gonzales de Vallejo, Ferrer, Ortuño, & Oteo, 2002)

-Arenas, estos suelos poseen partículas entre 2 y 0.060mm, estas aún son observables y en contacto de agua no pueden formar una masa uniforme y continua, ya que esta se separa fácilmente. (Gonzales de Vallejo, Ferrer, Ortuño, & Oteo, 2002)

-Limos, poseen partículas que están entre los 0.060 y 0.002mm, este suelo retiene muy bien el agua a diferencia de los suelos anteriores. Si se satura este suelo en la mano y se golpea con la misma se observará que el agua se exuda muy fácilmente. (Gonzales de Vallejo, Ferrer, Ortuño, & Oteo, 2002)

-Arcillas, son suelos que están formados por partículas que son inferiores a los (0.002mm). Es un suelo que se comporta como un gel y sufre muchos cambios en su volumen con la presencia de agua, para su formación tuvo que haber una intervención de procesos químicos y que sus partículas llegarán a ese tamaño. Estos están compuestos principalmente de minerales de silicatos, formado por cadenas de elementos tetraédricos y octaédricos, las cuales están unidas por enlaces covalentes débiles por donde entran las moléculas de agua, causando cambios en su volumen la cual recupera al evaporarse el agua. Por estas razones son suelos que absorben y retienen muy bien el agua causando que sean suelos muy problemáticos (tiempos muy elevados para su consolidación o de expulsión de agua bajo esfuerzos). (Gonzales de Vallejo, Ferrer, Ortuño, & Oteo, 2002)

2.2.2. Las arcillas

La arcilla se puede definir de diferente forma, como lo que describe a continuación:

- Si lo describimos a partir de un punto mineralógico, esta encierra a un grupo de diversos minerales los cuales podemos definir como “minerales de la arcilla”, la cual está compuesta por filosilicatos en su mayor parte, de las cuales sus propiedades físico-químicas dependen de la estructura y tamaño de grano generalmente inferior a los $2\mu\text{m}$ ya que son granos muy finos. (García Romero & Suárez Barrio)
- Si los vemos desde un punto de vista petrológico, la arcilla está considerada como una roca sedimentaria, en su mayor parte de origen detrítico. Para un sedimentólogo y en la ingeniería civil arcilla abarca todo material inferior de las $2\mu\text{m}$ o que pasa el tamiz #200 en un ensayo de análisis granulométrico. (García Romero & Suárez Barrio)



- Para un ceramista la arcilla es un material que en mezcla de agua aprovecha sus propiedades plásticas para fabricar diferentes objetos. Y en la parte industrial y económica es un material que posee diferentes tipos de usos y aplicaciones. (García Romero & Suárez Barrio)

Los minerales de arcillas son silicatos de aluminio complejos los cuales se componen de una de las unidades básicas: sílice tetraédrica y aluminio octaédrico. Cada una de las unidades del tetraedro consiste de cuatro átomos de oxígeno que reaccionan con el átomo de silicio. La combinación de unidades tetraédricas de sílice y alúmina da una lámina de sílice. Tres átomos de oxígeno en la base de cada tetraedro son compartidos por tetraedros en la vecindad. Las distintas unidades octaédricas poseen seis hidróxilos rodeando un átomo de aluminio y la combinación de las distintas unidades hidróxilo de aluminios octaédricos de una capa octaédrica al que se le llama una lámina de gibsita. En algunos casos el magnesio sustituye a los átomos de aluminio en cual caso la capa octaédrica se llama lamina de brucita. (Braja M., 2015)

En síntesis, las arcillas son material no solo de estructuras mineralógicas, sino que dependen del tamaño, ya que cualquier material que tenga un tamaño inferior a la $2\mu\text{m}$ podría considerarse arcilla a excepción de partículas orgánicas con presencia de carbono. Los filosilicatos que cumplan lo anterior descrito son considerados arcilla, pero materiales como él (cuarzo, feldespatos, etc.) que cumplan con las medidas de una arcilla, podría considerarse arcilla. (García Romero & Suárez Barrio)

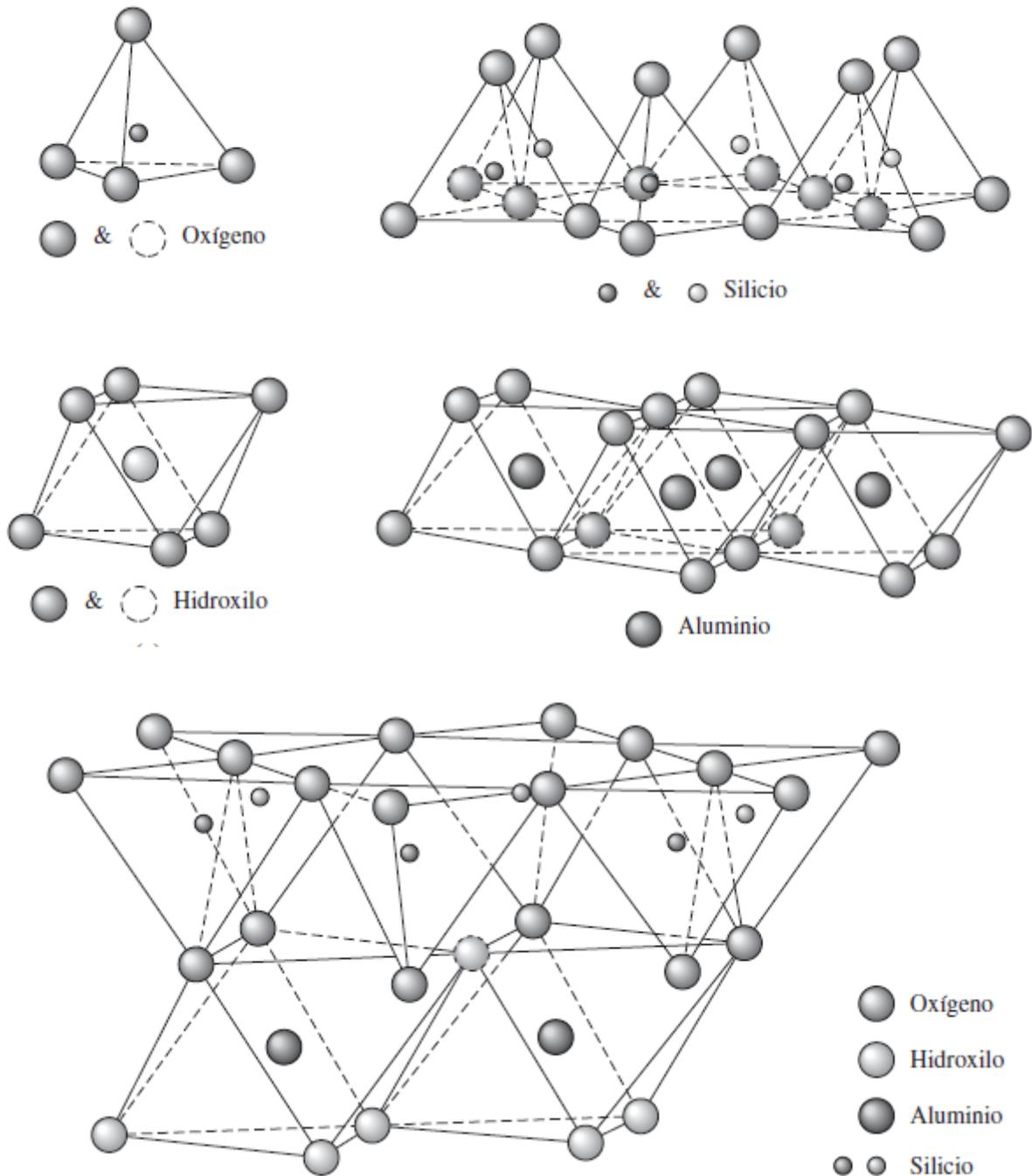


Figura Nro. 2 Sílice tetraédrico, sílice, aluminio octaédrico, gibsita, sílice gibsita elemental
(Braja M., 2015)

2.2.2.1. Estructura de los filosilicatos

Como se observó, las propiedades que tiene la arcilla es producto de sus características de su estructura interna, es decir es importante conocer las propiedades de los filosilicatos los cuales componen una gran parte de una arcilla.

Las arcillas, del mismo modo que los filosilicatos, presentan una estructura basada en el apilamiento de diferentes planos de iones oxígeno e hidroxilos. Los grupos tetraédricos $(\text{SiO})_4^{4-}$ se unen compartiendo tres de sus cuatro oxígenos con otros formando capas, de una extensión infinita y fórmula $(\text{Si}_2\text{O}_5)^{2-}$, que incluye la unidad fundamental de los filosilicatos. El silicio se distribuye en forma de hexágono. El silicio puede estar remplazado con Al o Fe. (García Romero & Suárez Barrio)

Las capas se unen con otras de tipo gibbsita o brucita. En las que algunos Al y Mg pueden ser remplazados por Fe y raramente por Li, Cr, Mn, Ni, Cu o Zn. El plano por la que esta unidos están compuestos por oxígenos, y por grupos de (OH) de la capa de brucitica o gibsitica, por lo que en el plano quede un (OH) en el centro de cada hexágono formado por 6 oxígenos aplicables. (García Romero & Suárez Barrio)

En una unión parecida los filosilicatos dependiendo de las capas por la que están formadas pueden formarse capas bilaminares, trilaminares y lámina.

Las fuerzas que unen las distintas unidades estructurales son más débiles que las existentes entre los iones de una sola lámina, por esta razón los filocilicatos tienen una clara dirección de exfoliación paralela a las láminas que se encuentren. (García Romero & Suárez Barrio)

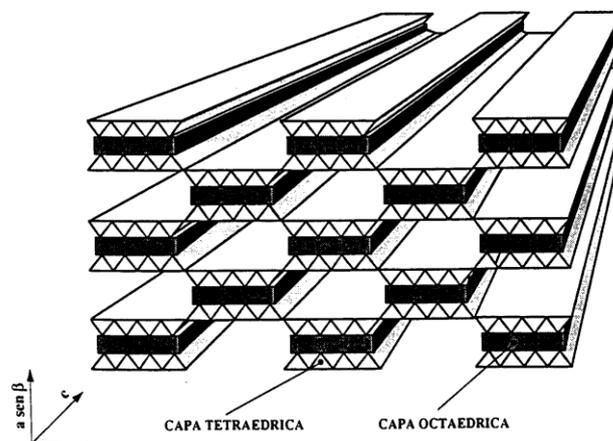


Figura Nro. 3 estructura de los filosilicatos (García Romero & Suárez Barrio).

2.2.2.2. Clasificación de los filosilicatos

Los filosilicatos están clasificados de acuerdo a que sean bilaminares, trilaminares y di octaédricos. Como se observa pertenecen a los filosilicatos materiales como la arcilla y las micas.

Tabla 1: Clasificación de los filosilicatos.

	DIOCTAÉDRICOS		TRIOCTAÉDRICOS		CARGA
BILAMINARES T : O 1:1		Caolinita		Antigorita	
	CANDITAS	Nacrita	SERPENTINA	Crisotilo	
		Dickita		Lizardita	
		Halloisita		Bertierina	X = 0
TRILAMINARES T : O : T 2 : 1		Pirofilita		Talco	X = 0
		Montmorillonita		Saponita	X = 0,2-0,6
	ESMECTITAS	Beidellita	ESMECTITAS	Hectorita	
		Nontronita			
		Vermiculitas	Vermiculitas		X = 0,6-0,9
		Illitas			X = 0,9
		Moscovita		Biotita	X = 1
MICAS	Paragonita	MICAS	Flogopita		
			Lepidolita		
T : O . T : O 2 : 1 : 1	CLORITAS				
FIBROSOS	Paligorskita		Sepiolita		

Fuente: García Romero & Suárez

2.2.2.3. Propiedades de las arcillas

Las propiedades de las arcillas se deben principalmente a los siguientes factores:

- Poseen un tamaño muy pequeño que es inferior a los 2µm.
- Poseen una formación laminar en su estructura.
- Las sustituciones isomórficas, que estas dan lugar a la aparición de carga en las diferentes laminas y a la presencia de cationes débiles que están relacionados al espacio intersticial. (García Romero & Suárez Barrio)

Como resultado de los anteriores factores, las arcillas poseen una gran cantidad de superficie activa con los enlaces no saturados. Por esta razón pueden interaccionar con muchas sustancias, en particular con compuestos polares, ocasionando que adquiera un comportamiento plástico en mezclas de agua y arcilla, capaces de provocar hinchamientos, con el desarrollo de propiedades reológicas en contacto acuoso. (García Romero & Suárez Barrio)

2.2.2.3.1. Superficie específica

La superficie específica o también llamada área superficial de una arcilla definida como el área de la superficie externa más el área de la superficie interna de la arcilla de todas las partículas que la constituyen, dada por unidad de masa m²/gr. Las arcillas poseen una alta superficie específica especialmente buena para su uso como material industrial, la cual ayuda

en su iteración suelo-fluido la cual depende directamente de esta propiedad. (García Romero & Suárez Barrio)

Tabla 2: Valores de superficie específica de algunas arcillas.

Tipo de arcilla	Superficie específica
Caolinita de elevada cristalinidad	hasta 15m ² /gr
Caolinita de baja cristalinidad	hasta 50m ² /gr
Halloisita	hasta 60m ² /gr
Illita	hasta 50m ² /gr
Montmorillonita	80 a 300m ² /gr
Sepiolita	100 a 240m ² /gr
Paligorskita	100 a 200m ² /gr

Fuente: García Romero & Suárez.

2.2.2.3.2. Capacidad de absorción

Las arcillas encuentran su principal aplicación en el campo de la absorción ya que estos pueden absorber gran cantidad de agua u otras sustancias entre sus moléculas en los espacios intersticiales (esmeclitas) que éstas tienen o también en los canales estructurales de esta (sepiolita y estas paligorskita).

La capacidad de absorción de estos suelos está muy relacionada con sus propiedades de superficie específica y porosidad de esta. Y hay dos tipos de procesos que casi nunca se dan de forma aislada las cuales son:

- La absorción la cual se da principalmente por procesos físicos como por ejemplo la retención de agua por capilaridad del suelo arcilloso. (García Romero & Suárez Barrio)
- Y la segunda forma de absorción cuando se da una interacción de tipo químico entre el absorbente que sería la arcilla y el líquido o sustancia que es absorbida que se le denominaría absorbato. (García Romero & Suárez Barrio)

La capacidad de absorción está dada en función cantidad de sustancia a absorber con respecto a la masa de la arcilla y dependerá, para la misma arcilla, de la sustancia o líquido que se absorba. En caso de la relación de absorción del agua y la arcilla esta posee más de 100% con respecto a su peso. (García Romero & Suárez Barrio)



2.2.2.3.3. Hidratación e hinchamiento

“La hidratación y deshidratación en el espacio interlaminar es una propiedad que características de las esméctitas, la cual posee o le dan diferentes usos en el campo industrial. Estos fenómenos pasan con independencia del tipo de catión de cambio que se tenga, y el grado de hidratación de la arcilla está ligada al tipo de catión que se tenga y la carga de la lámina en los espacios interlaminares de la arcilla.” (García Romero & Suárez Barrio)

“Cuando el agua es absorbida en los espacios interlaminares, se produce la separación entre las láminas, provocando que se produzca hinchamiento. Tal proceso depende entre la atracción electrostática entre la relación catión-lamina y la energía que hay en la hidratación del catión. En cuanto la cantidad de agua se sigue intercalando en capas y la separación de las láminas aumenta, las fuerzas que más presentes están son las de repulsión electrostática entre las láminas, lo que ocasiona que el proceso de hinchamiento aumente y deforme completamente una lámina de otras. Si se tiene que un catión interlaminar es de sodio (Na) como las esmectitas estas tienen una gran capacidad de hinchamiento, lo que puede causar la completa disociación de minerales de esmectitas lo que produce su gran capacidad de hinchamiento, sacando como resultado un alto grado de dispersión y un alto desarrollo de sus propiedades coloidales. Pero si en vez de sodio (Na) posee (Ca) o magnesio (Mg) como unos cationes de cambio, la capacidad de hinchamiento se verá muy reducida.” (García Romero & Suárez Barrio)

2.2.2.3.4. Plasticidad

Las arcillas poseen una gran capacidad de deformarse siempre y cuando estas estén en contacto de agua o alguna sustancia líquida. Esto produce grandes problemas para la construcción de edificaciones u obras civiles.

Esta propiedad se debe principalmente por la presencia de agua, la cual forma una envuelta sobre las partículas laminares lo que produce un efecto lubricante lo que hace más fácil que unas partículas se deslice una sobre otra cuando se ejerce presión sobre la arcilla. (García Romero & Suárez Barrio)

El que el suelo arcilloso sea tan plástico se debe a las propiedades ya expuestas como: su elevada área superficial y alta capacidad de hincharse. Las cuales hacen mucho énfasis en su estructura laminar la que causa su elevada plasticidad.



La granulometría de un suelo proporciona un primer visto para determinar el tipo de suelo, pero a veces esto no es suficiente, especialmente en suelos arcillosos y limosos, por lo que se puede utilizar otros tipos de índices para terminar esto, la cual se hará en función del agua a través de la determinación de la humedad. Estos datos adicionales son llamados lentes de Atterberg dados en tres límites: el de contracción o consistencia, el límite plástico que comprende el estado semi sólido y el límite líquido el cual separa el estado plástico del semi líquido, los dos últimos son los más usados en práctica y se determina con la fracción de suelo que pasa el tamiz N° 40 o 0.1mm según normas ASTM. (Gonzales de Vallejo, Ferrer, Ortuño, & Oteo, 2002)

De acuerdo a los autores podremos decir que los límites de Atterberg proporcionan gran información valiosa de la granulometría, su comportamiento y cantidad de arcilla. La variación que existe para que exista más o menos plasticidad en un suelo se debe principalmente al tamaño de las partículas y la perfección de la estructura. Es decir, en cuanto más pequeña e imperfecta la estructura de arcilla más plástica será.

2.2.2.3.5. Tixotropía

Esta se define como el fenómeno en el cual hay una pérdida de la resistencia de un coloide al amasarlo y su posterior recuperación a medida que transcurre el tiempo. Las arcillas que son tixotrópicas cuando son amasadas se convierten en un verdadero líquido. Pero en cuanto pierden humedad y secan están recuperan su resistencia y empiezan a comportarse como sólido. Pero en la fase de su límite plástico no hay posibilidad de un comportamiento tixotrópico. (García Romero & Suárez Barrio)

2.2.2.4. Algunos tipos de arcilla más comunes

Las arcillas son un material muy versátil en el uso comercial e industrial por sus diferentes propiedades que poseen y por lo tanto son muy explotadas mayormente para su uso para la fabricación de materiales de construcción y una pequeña parte para su uso como elementos de artesanías, decoraciones, productos químicos, agricultura, etc.

Las arcillas más utilizadas para la fabricación de materiales de construcción se las denomina arcillas cerámicas, arcillas para la construcción o arcillas comunes, son arcillas conformadas por dos o más minerales de arcilla las cuales generalmente son illita y esmectita, con grandes cantidades de otros minerales tales como son filosilicatos (carbono, cuarzo, etc.). (García Romero & Suárez Barrio)

Y hay un segundo tipo que son denominadas arcillas especiales, están formadas principalmente por un solo tipo de minerales de arcilla, y sus propiedades dependen de las características de ese mineral. Estas a pesar de ser en menos volumen de las anteriores conforman un a valor superior hasta por un 70% que las anteriores. (García Romero & Suárez Barrio)

2.2.2.4.1. Caolines y arcillas caoliníferas

Un caolín es un tipo de roca que contiene algunas proporciones de minerales de grupo caolín que puede ser fácilmente extraído y concentrado y estas son muy baratas para obtener. Estas son principalmente una arena caolinifera, y que es necesario realizar un refinado para enriquecer en minerales del grupo del caolín. (García Romero & Suárez Barrio)

La arcilla caolinifera es también un caolín. Esta se trata de una arcilla compuesta, fundamentalmente de minerales del grupo caolín. Y esta no es necesario procesarla porque posee un amplio contenido de minerales del grupo caolín inicialmente más que el caolín mismo en el 50%. (García Romero & Suárez Barrio)

El caolín se obtiene de una explotación minera como mineral caolín bruto, el cual está conformada de un contenido variable entre caolinita y halloysita la cual a veces no llega al 20%, además suele poseer en muchas ocasiones cuarzo, feldespatos, micas y otros minerales mas según la roca madre de donde provenga esta. Para aumentar la concentración de mineral es preciso señalar que se somete a distintos procesos que suelen elevar los contenidos de filosilicatos por encima del 80%. Y el producto final recibe el nombre de caolín lavado. (García Romero & Suárez Barrio)

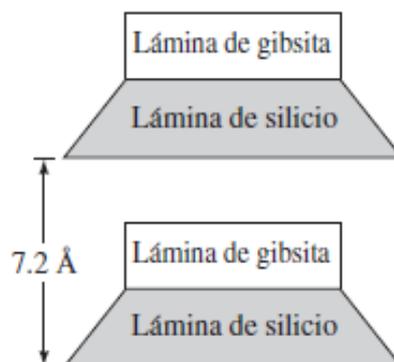


Figura Nro. 4 Diagrama de la estructura de una caolinita (Braja M., 2015)



2.2.2.4.2. Bentonitas

Una bentonita es una roca que está conformada esencialmente por minerales del grupo de las esmectitas. Estas pueden clasificarse en muchos tipos de acuerdo a sus propiedades físicas químicas (García Romero & Suárez Barrio), estas se pueden clasificar en las siguientes:

- Bentonitas muy hinchables o sódicas
- Bentonitas poco hinchables o cálcicas
- Bentonitas moderadamente hinchables o intermedias

2.2.2.4.3. Paligorskita sepiolita

Estas arcillas tanto las sepiolitas y paligorskitas tienen un contenido de dichos minerales superior al 50%. Son minerales que poseen una gran área superficial debido al pequeño tamaño de las partículas que la conforman y su porosidad que presenta su estructura del material. La superficie específica que esta arcilla tiene es aproximada a $900\text{m}^2/\text{gr}$. (García Romero & Suárez Barrio)

Su estructura especial proporciona una serie de propiedades tales como: forman suspensiones poco afectadas por su concentración iónica y su capacidad sorcitiva (es la capacidad de adsorción y absorción). También son capaces de formar geles y suspensiones estables de alta viscosidad a bajas concentración de sólido. (García Romero & Suárez Barrio)

2.2.2.4.4. Otros tipos de arcillas especiales

Estas arcillas se pueden considerar en este grupo a las siguientes: las halloysitas, compuestas por minerales del grupo caolín y también se puede considerar como arcilla especial a las hectoritas las cuales están conformadas de una esmectita. En resumen, las halloysitas se pueden considerar como un tipo de caolines y las hectoritas un tipo de bentonitas. (García Romero & Suárez Barrio)

Otras arcillas a considerar como especiales por algunos autores pueden ser la sepiolita o hectorita, la paligorskita y bentonitas blancas. También a arcillas tratadas químicamente como las bentonitas activadas con ácidos o organofílicas.

2.2.2.5. Aplicación de las arcillas en la ingeniería civil

Las bentonitas se empezaron a utilizar en este campo en Europa en los años 50, y estos usos se desarrollaron aún más en los Estados Unidos. Estas pueden utilizarse para cementar fisuras



y grietas de rocas, las cuales absorben la humedad para prevenir que haya derribamiento de túneles o excavaciones, para impermeabilizar trincheras, estabilización de charcas, etc. (García Romero & Suárez Barrio)

Estas son muy utilizadas por sus propiedades de un marcado carácter tixotrópico, viscosidad, alta capacidad de hinchamiento y buena dispersabilidad. Dentro de los muchos usos de la bentonita podemos señalar las siguientes:

- Fabricación de membranas impermeables en torno a barreras de suelos y como soporte de excavaciones
- Prevención de hundimientos
- Protección de tuberías
- En cemento, ayuda a mejorar su capacidad de ser trabajado y su plasticidad.
- En túneles, mejora la estabilización y soporte de la construcción de los túneles utilizándose generalmente bentonitas.
- En tomas de tierra, da seguridad en el caso de ruptura de cables enterrados.
- Y en el transporte de sólidos en suspensión.

2.2.3. La cal

La cal también denominada óxido de calcio (CaO) la cual es una sustancia alcalina que posee un color blanco grisáceo. Se produce por la calcinación de piedra caliza por debajo de la descomposición del óxido de calcio. Podemos indicar que para el tratamiento de suelos se puede utilizar cal viva (óxido de calcio CaO), cal hidratada (hidróxido de calcio $\text{Ca}[\text{OH}]_2$) o una lechada de cal. La cal viva es producida de la transformación química del carbonato de calcio (piedra caliza CaCO_3) en óxido de calcio. La cal hidratada es obtenida al ponerla en contacto con el agua. La cal hidrata o hidróxido de calcio es la que reacciona con las partículas arcillas y esta la convierte permanentemente en un fuerte matriz cementante. (Asociación Americana de Constructores de Carreter, 2006)

La cal más utilizada en la estabilización de suelos es la cal alta en calcio, la cual contiene un máximo de 5% óxido o hidróxido de magnesio. Pero en ocasiones se puede utilizar cal dolomítica. Esta cal dolomítica contiene de 35 a 46% de óxido o hidróxido de magnesio. Con la presencia de cal dolomítica se puede obtener una estabilización, aunque la fracción de magnesio del material reacciona más lentamente que la parte de calcio que se tenga. (Asociación Americana de Constructores de Carreter, 2006)



También se refieren a la “cal” como sub productos de la fabricación de cal, es decir polvo de horno de cal, la cual puede reaccionar con el suelo arcilloso ya que posee una mínima fracción de óxido e hidróxido del producto original. (Asociación Americana de Constructores de Carreter, 2006)

2.2.4. Relación suelo cal

La cal es un aditivo para los suelos, la cual proporciona varios cambios beneficiosos a los suelos que contienen partículas de arcillas. Como este material es un producto que puede ser fabricado de forma muy barata en la mayoría de países del mundo, la utilización en la estabilización de suelos con cal puede llevar el ahorro de mucho dinero y al ser común su fabricación puede ser utilizado en países sub desarrollados. (Mateos de Vicente, 2014)

La utilización de la cal en la construcción de autopistas no es común de hoy en día. Los romanos utilizaban este material sola o con materiales puzolánicos, en la construcción de sus vías. La investigación del uso de la cal como material de estabilización ha demostrado que puede ser utilizado como estabilizante mejorando ampliamente la calidad del suelo estabilizado. (Mateos de Vicente, 2014)

2.2.5. Principales factores que influyen en la estabilización de suelos con cal

2.2.5.1. Suelo

Muchas de las variables del suelo que pueden afectar en la estabilización con el uso de cal son la graduación, la cantidad y los tipos de minerales de arcilla, la materia orgánica, la humedad y la cantidad de sulfatos y otros diferentes minerales en el suelo. (Mateos de Vicente, 2014)

No se han encontrado las cantidades exactas de material arcilloso que debería tener el suelo para ser estabilizado de forma eficaz utilizando la cal. Por ejemplo, en suelos que son ricos en montmorillonita, las cantidades mínimas necesarias para que se desarrolle una adecuada resistencia por cementación del suelo es de aproximadamente el 15% de arcilla que sea menor de 2 micras. (Mateos de Vicente, 2014)

Los suelos que son arcillosos y algunos que son cenagosos se benefician mucho de la utilización de cal. Los suelos arenosos no deberían ser estabilizados con la utilización de cal aunque muchas veces muestran un incremento de la resistencia por la adición de cal. Por ejemplo, después de 7 días de aplicar cal a 21,1°C y un día sumergido una arena que extraída de duna con solo 4% de arcilla, alcanza una resistencia a la compresión de 16.9kg/cm² con el

15% de cal viva calcárea, 22,5kg/cm² con el 15% de cal dolomítica y 3.7kg/cm² con el 15% de cal dolomítica monohidratada. (Mateos de Vicente, 2014)

El principal factor que influye cuando se realiza una estabilización de suelo-cal es el tipo de arcilla. Los suelos que poseen montmorillonita y caolinita responden de mejor manera al tratamiento con la cal que los otros suelos con illita y clorita. Los suelos que poseen halloysita alcanzan menores resistencias que los demás. (Mateos de Vicente, 2014)

Tabla 3: Resistencia a la compresión de suelos estabilización con cal en muestras sumergidas sin confirmar.

		Tipo de cal			
		calcárea hidratada		Dolomítica monohidratada	
Tipo de suelo	Tiempo de curado, en días	Contenido óptimo de cal, en %	Resistencia, en kg/cm ²	Contenido óptimo de cal, en %	Resistencia en kg/cm ²
Rico en caolinita y montmorillonita	7	2-8	4,2-8,4	8-12	7,0-14,0
	28	2-8	10,5-17,6	8-14	17,6-28,0
Rico en illita y clorita	7	3-5	3,5-7,0	4-6	7,0-10,5
	28	4-6	9,1-12,0	4-8	14,0-17,0
Rico en halloysita	7	4-8	3,5-7,0	4-8	3,5-7,0
	28	4-8	5,3-8,8	6-14	10,5-14,0

Fuente: Mateos de Vicente (2104).

No se han realizado muchos estudios, pero los suelos que son uniformemente graduados darán menos resistencia al ser estabilizados con cal que los suelos bien graduados. También se puede expresar que los suelos que son del horizonte B y C responden mejor al ser estabilizados con cal que los suelos del horizonte A. la humedad óptima de los suelos estabilizados con cal son reducidos por acción de la cal, las cales vivas absorben parte de la humedad para el proceso de hidratación y por eso se reduce la humedad. La cal flocula las partículas de arcilla del suelo y los hace esponjoso. Los que aumenta la aireación natural del suelo arcilloso causando pérdida de la humedad. En síntesis, la humedad óptima aumenta para el mismo esfuerzo de compactación la que aumenta más con un retraso de la compactación. (Mateos de Vicente, 2014)



2.2.5.2. Modificación del suelo

Los cambios en suelo por la incorporación de un agente estabilizante al suelo, como lo resultante en el cambio de las propiedades físicas tales como la plasticidad y la retracción pueden considerarse cambios en el suelo. (Mateos de Vicente, 2014)

En estudios de comparación se comprobó que las cales hidratadas, la cal calcárea baja el índice de plasticidad de un suelo arcilloso a su punto más bajo. Los hidróxidos cálcicos es el principal responsable de bajar la plasticidad de las cales hidratadas, el hidróxido de magnesio en la práctica no produce nada de reducción y el óxido de magnésico. Las cales vivas bajan más la plasticidad más que la cantidad de cal hidratada. (Mateos de Vicente, 2014)

2.2.5.3. Cementación del suelo

El incremento de la resistencia del suelo-cal a la formación de compuestos cementantes durante el curado, puede considerarse como una cementación del suelo. Los incrementos de resistencia resultados de algunas cales vivas dolomíticas superan los debidos a las cales dolomíticas monohidratadas. Las cales dolomíticas dihidratadas proporcionan menos resistencia que las cales dolomíticas monohidratadas y las cales dolomíticas. Las cales vivas calcáreas pueden ser mejores que las cales calcáreas hidratadas en cantidades pequeñas, de hasta 3%. (Mateos de Vicente, 2014)

Las diferentes cales dolomíticas tanto vivas y monohidratadas dan mayores resistencias que las otras cales calcáreas, si se tiene temperaturas de curado de hasta 21 °C, excepto con suelos caoliniticos donde las cales calcáreas hidratadas y las dolomíticas monohidratadas dan casi las mismas resistencias. Si se aumenta la temperatura en el estado de curado del suelo es posible que el suelo alcance más resistencia que las dolomíticas. (Mateos de Vicente, 2014)

2.2.6. Factores secundarios que influyen en la estabilización de suelo con cal

2.2.6.1. Humedad óptima del suelo

El aumento de cal en un suelo disminuye la densidad máxima en varias décimas de kg/cm², y suele ser acompañado del aumento de la humedad óptima del suelo. Ello se ha observado incluso con cantidades de adición de cal tan pequeñas como el 1%.

La cal dolomítica monohidratada baja la densidad máxima seca menos que la cal calcares hidratada. (Mateos de Vicente, 2014)

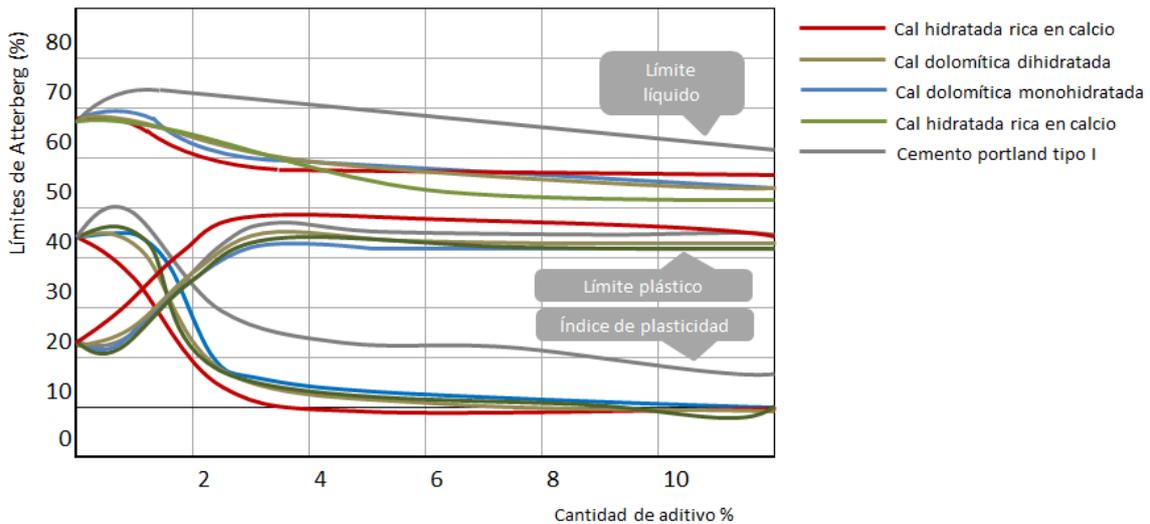


Figura Nro. 5 Efecto de varios aditivos en los límites de Atterberg de un suelo arcilloso muy plástico (Mateos de Vicente, 2014).

En los suelos con un alto contenido de montmorillonita, la adición de cal puede distorsionar la forma de la curva humedad densidad de compactación, de manera que no se vea una densidad máxima bien definida. Este fenómeno se produce tanto en compactación normal como en la modificada. La humedad óptima de estos suelos muy arcillosos en la compactación debería dar la máxima resistencia.

La humedad óptima para la compactación es difícil de determinar a partir de la curva densidad humedad, pero la curva de humedad resistencia debería indicar cuál es en realidad el óptimo deseado en el momento de la compactación. Se puede decir en síntesis que para la densidad máxima en la mayoría de suelos está cercana de la humedad óptima para la resistencia.

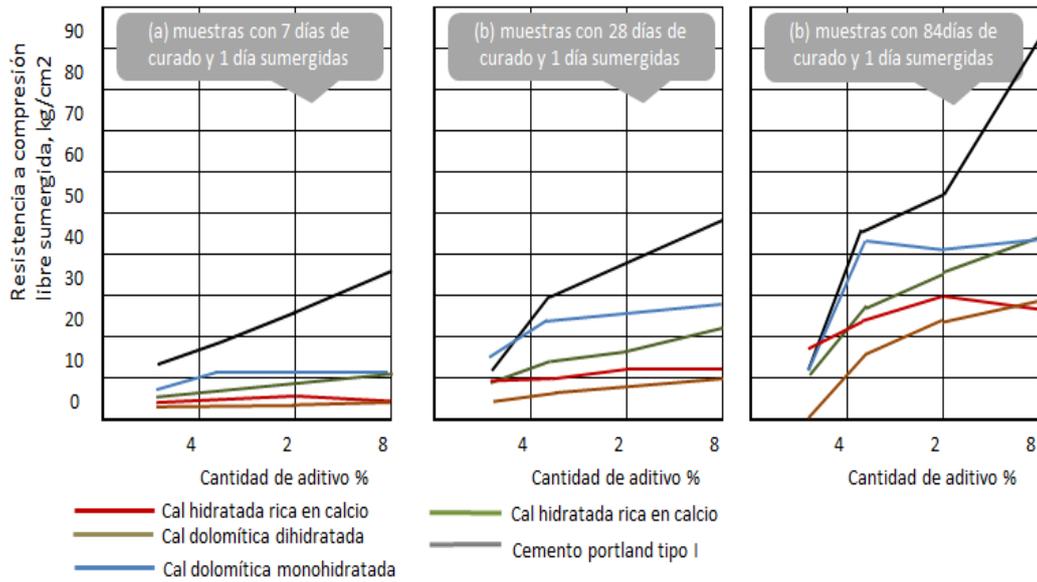


Figura Nro. 6 Efecto de varios aditivos en la residencia de loes (depósitos sedimentarios arcilloso de origen eólico) friable. (Mateos de Vicente, 2014)

2.2.6.2. Aplicación de la cal en polvo o en lechada

Las cales vivas son muy causticas y pueden dañar la piel si se tiene contacto con ella. Este riesgo puede eliminarse si se utiliza cales vivas, pero en su forma de lechada. Estas cales vivas dan mejores resultados que las cales añadidas en forma de polvo. Las cales hidratadas dan aproximadamente la misma resistencia que al ser utilizada en forma de polvo que al ser utilizadas en forma de lechada. (Mateos de Vicente, 2014)

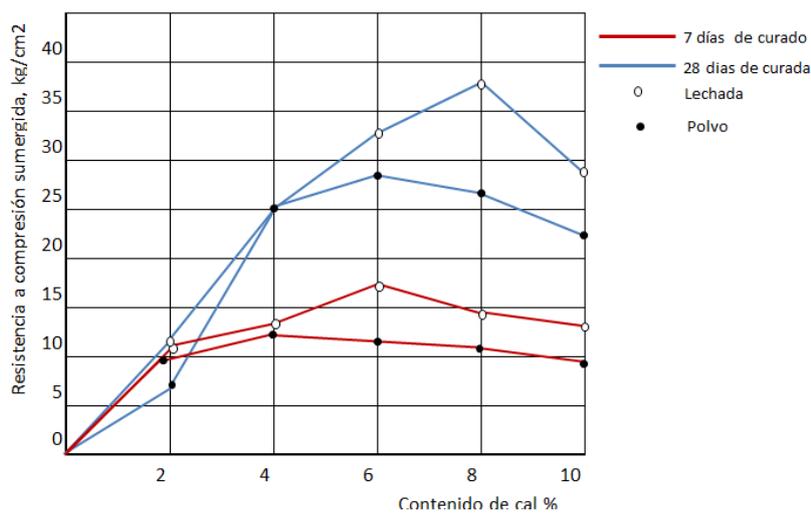


Figura Nro. 7 Efecto de la aplicación en forma de lechada y en forma de polvo de una cal viva dolomítica en la resistencia de un suelo limoso. (Mateos de Vicente, 2014)

2.2.6.3. Efecto del esfuerzo de compactación

Este esfuerzo de compactación influye en gran medida a la resistencia. Cuando el esfuerzo de compactación se aumenta del estándar ASTM-AASHTO al modificado, la resistencia a la compresión aumenta la resistencia de 50% a 250%, ya se apara periodos de curado de 7 días a 28 días. El aumento de la resistencia está relacionado con el aumento de la densidad máxima seca hasta un 10%. Por lo tanto, se debería aumentar lo máximo posible la anergia de compactación el máximo posible en el campo, lo que aumentaría la resistencia del suelo. (Mateos de Vicente, 2014)

2.2.6.4. Tiempo de curado

El incremento de la resistencia en el tiempo depende del tiempo de curado del suelo, del tipo, cantidad de cal, de la humedad del moldeo, de la temperatura del curado y el esfuerzo de compactación. La relación que existe en el tiempo de curado después de 28 días y la resistencia después de los 7 días varía desde una disminución del 2% hasta un aumento del 155%. Lo que pasa lo mismo con las resistencias a los 90 días y 28 días. (Mateos de Vicente, 2014)

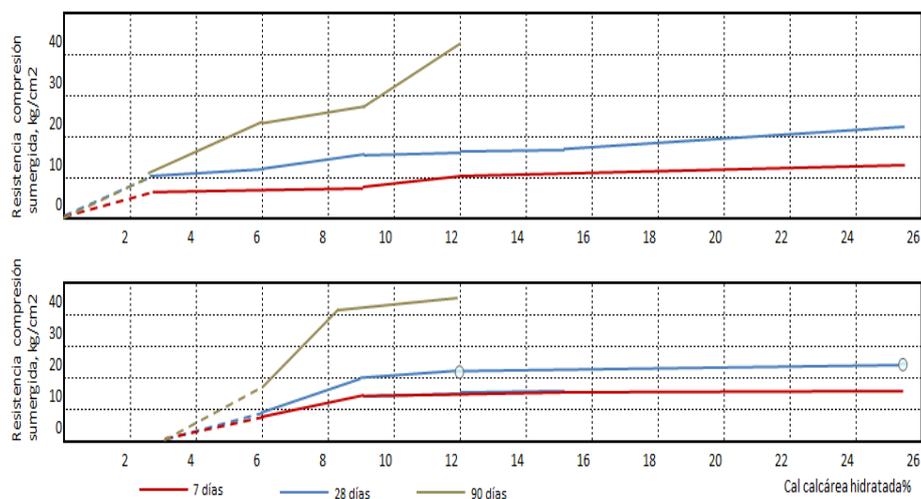


Figura Nro. 8 Efectos de la adición de diferentes cantidades y tipos de cal en la resistencia de un suelo montmorillonítico (gumbotil, suelo arcillosos muy plásticos) (Mateos de Vicente, 2014)

Si se añade pequeñas cantidades de cal toda la resistencia parece ser obtenida en unos cuantos días. Si se quiere que la resistencia del suelo aumente progresivamente durante todos los meses, se debería usar la mayores cantidades de cal. para que las mezclas de suelo-cal aumente la resistencia durante varios meses y años es posible la utilización de cal entre 3% a



10%, esto depende del tipo de suelo arcilloso y de la cantidad de cal. (Mateos de Vicente, 2014)

2.2.6.5. Efectos del retraso de la compactación

Muchas veces cuando se realiza la estabilización en obra es difícil compactarla un vez terminado de humectar completamente el suelo. Por ejemplo, si un suelo después de ser humectado se retrasa la compactación por 24 horas, su densidad máxima seca será de 22,5%. Si no se retrasa la compactación la densidad máxima seca obtenida sería de 20,0%. Por lo que se puede decir que la densidad máxima para el mismo esfuerzo de compactación es 2% más baja pero la resistencia máxima a compresión no varía.

2.2.6.6. Plasticidad

La cal es capaz de cambiar las propiedades físico químicas de un suelo arcilloso, un suelo arcilloso plástico mezclado con cal se convierte en un suelo friable. La cal adicionada a suelos arcillosos aumenta el límite plástico (LP) hasta un determinado punto para luego estabilizarse y no cambiar mucho. A su vez el límite líquido se ve disminuido (LL). Por lo tanto, el índice de plasticidad se reduce bastante ($IP=LL-LP$). (Mateos de Vicente, 2014)

Los suelos que son tratados con cal pueden cambiar su clasificación de suelos debido a los cambios de sus características de plasticidad. Si se tiene un suelo que posee una clasificación de A-7-6 puede pasar a ser un A-5 después de un tratamiento de 48 horas con un 2% de cal viva calcárea. Para lograr estos cambios generalmente se necesita pequeñas cantidades de cal generalmente entre un 1% a 3%. La cantidad mínima de cal calcárea hidratada para obtener un máximo descenso del límite plástico (Lom) en suelos montmorilloníticos.

$$Lom = \frac{\text{porcentaje de arcilla menor de 2 micras}}{35} + 1.25$$

La cantidad de cal Lom es la que se necesita para obtener una fijación completa de la arcilla con la cal. la “fijación con cal” es un proceso por el cual cambia el LP de un suelo hasta que se estabiliza. Solo la cal restante del punto de fijación contribuye a la cimentación. En suelo de horizonte C de tillita de lowa, el punto donde se fija la cal ocurre entre el 2% y el 3% de cal dolomítica monohidratada, y parece estar está relacionada con el tamaño de las partículas y la edad geológica. La fijación completa con cal en los suelos del horizonte C de loes de lowa ocurre al adicionarse el 2% y el 4% de cal dolomítica monohidratada, la cantidad

necesaria es proporcional a la cantidad de arcilla y al tamaño del material del suelo, fuera del contenido de carbono. (Mateos de Vicente, 2014)

Los distintos químicos que posee la cal afectan a la plasticidad de diferente forma. Por ejemplo, entre los compuestos químicos que puede poseer una cal hidratada, el hidróxido cálcico es el principal responsable de la disminución del índice de plasticidad; el hidróxido de magnesio produce una reducción insignificante y el óxido de magnésico baja el índice de plasticidad aun un punto intermedio entre el hidróxido de cálcico y el hidróxido magnésico. Estos efectos también suceden lo mismo con las cales comerciales como las dolomíticas. Las cales vivas son más eficaces en la reducción de la plasticidad que las cales hidratadas. (Mateos de Vicente, 2014)

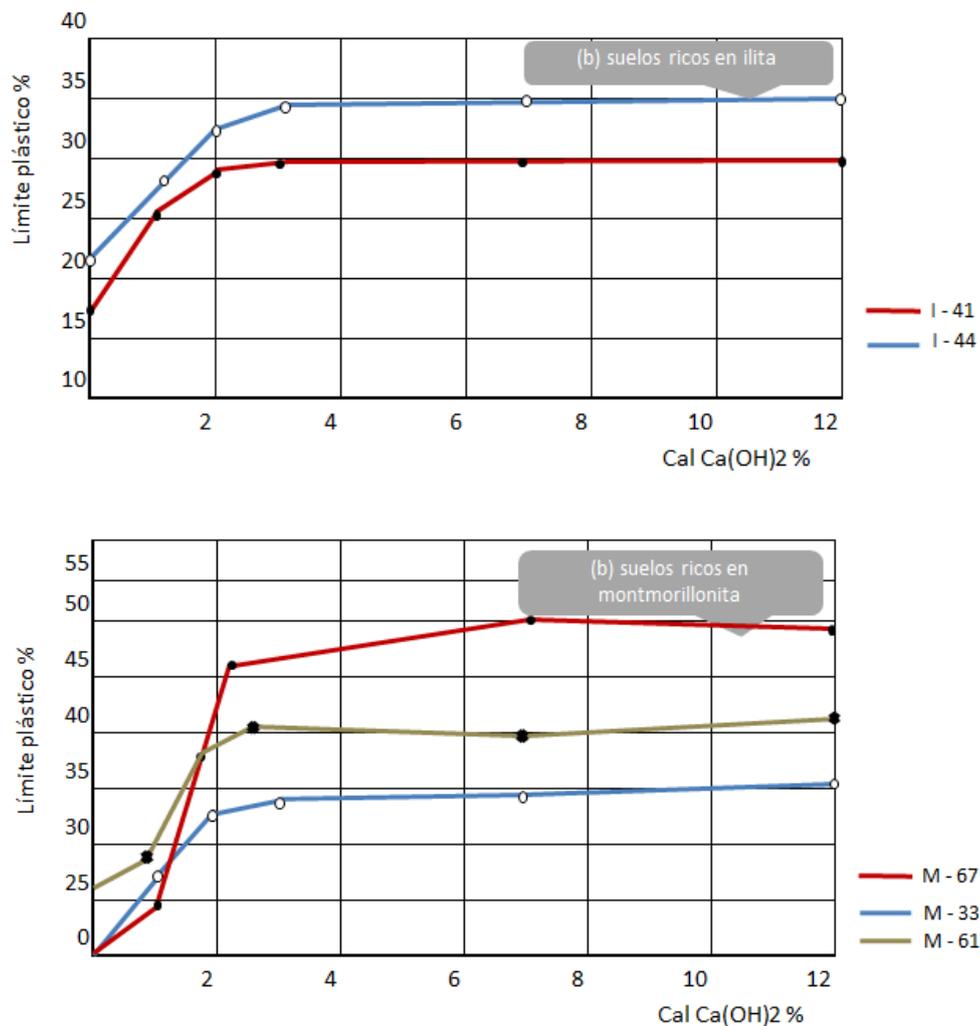


Figura Nro. 9 Efecto de la adición de cal en el límite plástico de los suelos. (Mateos de Vicente, 2014)

Tabla 4: Resultado de los ensayos de plasticidad en arcillas muy plásticas y varias mezclas de suelo-cal.

Tipo de suelo	1 hora de hidratación			48 horas de hidratación			Clasificación AASHO
	LL	LP	IP	LL	LP	IP	
Suelo arcilloso	69.0	27.3	41.7				A-7-6 (20)
Suelo +1% de cal	64.0	47.0	17.0	60.5	46.0	13.5	A-7-5 (13)
Suelo +1% de cal	61.5	49.5	12.5	55.5	47.5	8.0	A-5 (11)
Suelo +1% de cal	57.0	46.0	11.0	51.0	46.0	5.0	A-5 (10)
Suelo +1% de cal	54.5	44.5	10.0	48.5	44.5	4.0	A-5 (10)
Suelo +1% de cal	51.0	43.5	7.5	45.5	43.5	2.0	A-5 (9)

LL: Límite Líquido en %
LP: Límite Plástico en %
IP: Índice de Plasticidad

Fuente: Mateos de Vicente (2104).

2.2.6.7. Resistencia

Se puede evaluar la resistencia inmediata obtenida de algunos suelos al adicionarse cal, mejorando su calidad para utilizarlos como material de construcción y que estas soporten cargas. Los suelos arcillosos plásticos generalmente son tratados para ser utilizados como material de construcción para soportar cargas. Se utiliza la cal para estos suelos que serán tratados con cal y utilizados con subrasante, los cuales reducirá los espesores de las capas de sub bases y en algunos casos de bases del pavimento. (Mateos de Vicente, 2014)

El CBR de un suelo de partículas muy finas se incrementa inmediatamente cuando se adiciona cal, y continúa subiendo con el tiempo si hay cal en exceso en la fijación o retención de cal. las muestras que son curadas por 28 días y después rotas y remoldadas, muestran una mejora mayor que las sin curar. (Mateos de Vicente, 2014)

Tabla 5: CBR para compactación normal ASTM-AASHO de suelo arcilloso muy plástico tratado con cal.

Mezcla	CBR a 2.54mm de penetración		
	Moldeado	Sumergido 4 días	
	CBR	CBR	Hinchamiento en %
suelo arcilloso	4	2	1.0
suelo +2% de cal	17	45	0.0

Fuente: Mateos de Vicente (2104).

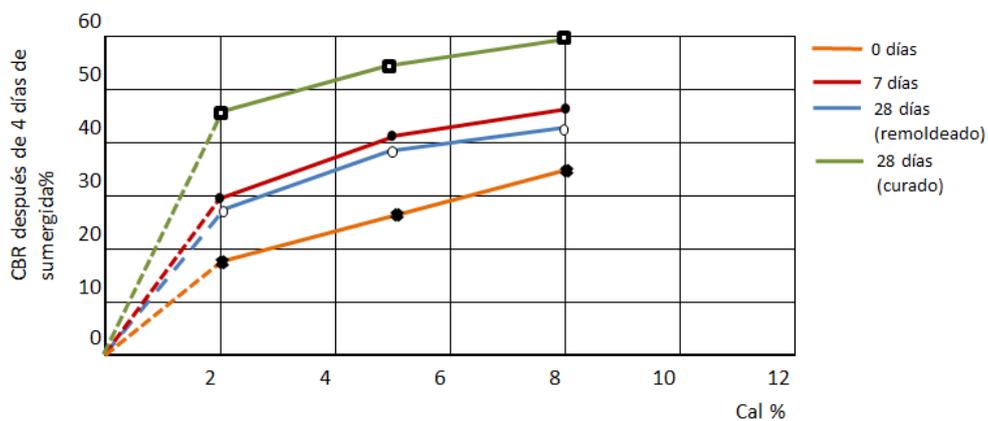


Figura Nro. 10 Efecto de la adición de cal en el CBR de un suelo arcilloso limoso. (Mateos de Vicente, 2014)

Lo usual es saturar el suelo cuando se hace una estabilización, todas las muestras de suelo antes de evaluar su resistencia. Realizado para simular las peores situación del suelo estabilizado que puede ser sometido al estabilizarse en campo. La inmersión destruye la cohesión aparente y disminuye cualquier compuesto cementante soluble que se forma en el proceso de estabilización. En estudio realizados con cal calcáreas hidratadas después de un día sumergida, la resistencia obtenida fue aproximadamente la mitad que la sin sumergir. En otros estudios con cal dolomítica monohidratada la resistencia después de sumergir ha sido aproximadamente el 75% de la resistencia sin sumergir.

2.2.6.8. Hinchamiento

Uno de los efectos y beneficios inmediatos obtenido al adicionar cal a suelos expansivos es lograr la reducción o eliminación el aumento de volumen al sumergir en agua. La reducción del hinchamiento, que se debe a la sustitución de otros cationes de calcio, que es de



importancia en muchas obras de edificaciones y ejecución de pavimentos. (Mateos de Vicente, 2014)

2.2.7. La puzolana

Es un material que principalmente silicosa que si es finamente dividida no posee ninguna propiedad hidráulica, este material posee esencialmente sílice y alúmina, que son capaces a temperatura ambiente hidróxido de calcio para brindar algunas propiedades hidráulicas. (Salazar J.)

Según Alejandro Salazar J. indica que las puzolanas pueden clasificarse de la siguiente manera:

- Puzolanas naturales
- Materiales de origen volcánico
- Materiales sedimentarios de origen animal o vegetal
- Puzolanas artificiales
- Materias tratadas (tratamiento térmico 600 y 900°C)
- Subproductos de fabricación industrial
- Cenizas volantes
- Humo de sílice
- Arcillas naturales
- Ceniza de cascarilla de arroz
- Escorias granuladas de industrias metálicas no ferrosas

Las puzolanas con materiales que contienen sílice reactiva y aluminio, que por sí solas no poseen aglomerantes, pero si estas se mezclan con cal y agua hará que fragüe y endurezca como el cemento. Además son materiales que se usan de forma alternativa al cemento Portland (OPC). (Practical Action Technology challenging poverty, 1994)

2.2.7.1. Historia de las puzolanas

Los griegos, 400 a.c. utilizaron por primera vez las puzolanas en morteros de cal. Después, los que utilizaron la puzolana fueron los romanos los que utilizaron para piezas de cerámica, ladrillos y tejas pulverizados que formaron las primeras puzolanas artificiales, también descubrieron que algunos suelos volcánicos mezclados con cal eran muy buenos para producir morteros hidráulicos (un mortero hidráulico fragua y endurece bajo el agua y es más resistente y duradero que un mortero solo hecho de cal). Estos suelos utilizados fueron encontrados en



alrededores de la población de Pozzuoli, cerca de Napoles, y de aquí el origen del nombre de la puzolana. (Practical Action Technology challenging poverty, 1994)

El desarrollo del cemento hidráulico que se basaba en la mezcla de puzolana y cal significó un gran avance en el arte de la construcción en la antigua Roma. Su incremento de la resistencia a lo largo del tiempo, sus propiedades hidráulicas y la resistencia que ofrecía al agua del mar, permitió que no solo se construyeran arcos, vías y bóvedas, sino también estructuras marítimas. Esta mezcla de cal y puzolana sirvió para dar impermeabilidad a baños, tanques, acueductos, etc. (Practical Action Technology challenging poverty, 1994)

En tiempos más recientes entre los años 1910 y 1912, más de 100,000 toneladas de puzolana fueron usadas en la construcción de acueductos en los Ángeles. Desde esa fecha la puzolana fue utilizada en la construcción de estructuras de concreto masivo tanto en Europa, USA y Japón. Pero es sorprendente que la comercialización y explotación de la puzolana en países del tercer mundo fue más lenta, hecho muy sorprendente ya que es un material de construcción muy barato. (Practical Action Technology challenging poverty, 1994)

2.2.7.2. Propiedades físicas y químicas

La actividad puzolánica se refiere a la cantidad de hidróxido de calcio que posee con la que la puzolana y la velocidad a la cual se dan esta reacción:

Puzolana + Cal + Agua → Silicatos y Aluminatos de calcio hidratados

La actividad puzolánica se dará de acuerdo a la naturaleza y proporción de las fases activas que están presentes en la puzolana (composición mineralógica), de la reacción entre la cal – puzolana de la mezcla, de las partículas finas (superficie específica) de la puzolana y de la temperatura de la reacción que se tenga. Los productos de la reacción cal – puzolana generalmente son los mismos que suceden en la hidratación del cemento portland los cuales son los silicatos cálcicos hidratados (CSH), aluminatos cálcicos hidratados (CAH) y sílico – aluminatos cálcicos hidratados (CSAH). (Salazar J.)

Generalmente la puzolana está formada de la siguiente estructura química:

Sílice + alúmina + óxido de hierro no menor al 70%.

Otros óxidos y álcalis no deben exceder más del 15%.

Perdida por ignición no más de 15%.



La sílice es el más importante de los óxidos y no deben reducir d 40% del total. Algunas de las mejores puzolanas poseen más de 90% de sílice.

El carbono se encuentra de manera común en la puzolana y su contenido debe ser mínimo, menos del 12% es lo más recomendable. Las cenizas que se extraen de plantas generalmente tienen más carbono, pero mientras más alto sea el contenido del carbono este será menos resistente. (Practical Action Technology challenging poverty, 1994)

2.2.7.3. Puzolanas volcánicas

Donde se encuentra ceniza volcánica generalmente son depósitos de ahí o recientemente hubo algún tipo de actividad volcánica, así se tiene por ejemplo en el Mediterráneo, en el África central y oriental, y en la región del pacífico. La forma como es este depósito varía mucho en función de su reactividad puzolánica. Casi siempre estos materiales no necesitan calcinarse nuevamente pero generalmente no se tiene la suerte de encontrarla en polvo, por lo que se tiene que muchas veces triturarla. Otros tipos de rocas como la piedra pómez pulverizadas también pueden ser puzolánicas. (Practical Action Technology challenging poverty, 1994)

2.2.8. Estabilización de suelos arcillosos con cal – puzolanas

La cal por si misma puede reaccionar por si solo con suelos que contienen arcilla tan poca como un 7% e índice de plasticidad tan bajos como 10. Para lograr una mejor reacción de la cal y el suelo con puzolanas, cenizas volantes y escoria de altos hornos. La sílice y la alúmina que contienen las puzolanas reaccionan con la cal formando una matriz de suelo muy cementante. Las mezclas de cal + puzolanas por su reacción pueden estabilizar casi todo tipo de suelos, pero comúnmente se utiliza para suelos arcillosos con plasticidad baja a media. (Asociación Americana de Constructores de Carreter, 2006)

Las diferentes cenizas volantes son las más comúnmente usadas. Esta el residuo fino que se obtiene de la combustión de carbón, que son pulverizadas en calderas de centrales eléctricas. El empleo de ceniza volante de horno de cal (LKD por sus siglas en ingle) es una opción que se hace cada vez más popular. El LKD es le es el resultado de la combustión y tratado de carbón y ceniza en un horno, para procesar la piedra en cal y que es retirado de los gases de escape de horno. El LKD por lo general contiene cantidades significativas de cal, aluminio y silicio los que puede decir que es un pre mezcla entre cal y puzolana. Las cantidades de cal, alúmina y sílice varía de acuerdo a la caliza que se quemó, el combustible y el tipo de

operaciones del horno usadas durante el proceso de fabricación de la cal. (Asociación Americana de Constructores de Carreter, 2006)

2.2.9. Estabilización de suelos con cal más el uso de ceniza volante

Las cenizas volantes son un subproducto obtenidas de las centrales térmicas que queman carbón en polvo. Estas son consideradas puzolanas artificiales y como tal son elementos que se utilizan para la fabricación de cemento, hormigo y o en la relación suelo cemento. Estas también han sido utilizadas con cal para la estabilización de suelos. Algunos factores que afectan la estabilización de suelos con el empleo de cal y cenizas volantes son las siguientes: el tipo de suelo, el tipo de cal que se utilice y las cenizas volantes; la relación densidad humedad residencia; el efecto de la potencia de compactación; el efecto de la temperatura de tratamiento; el efecto de la adición de agua a la mezcla antes de la compactación. (Mateos de Vicente, 2014)

Tabla 6: Evaluación comparativa de la durabilidad de mezclas seleccionadas.

Proporción de la mezcla	Densidad gr/cm ²	Resistencia a la compresión kg/cm ²		
		(1)	(2)	(3)
88% arcilla, 4% cal, 8% cemento	1.52	50	45	39
69% arcilla, 6% cal dol. 25% c.v. n°2	1.44	43	46	38
88% suelo aluvial arcilloso 3% cal, 9% cemento	1.52	41	36	38
69% suelo aluvial arcillosos 6% cal, 25% c.v. n°3	1.50	37	34	40
(1) Después de 28 días de curado y 24 horas de inmersión en agua destilada.				
(2) Después de 28 días de curado y 24 horas de inmersión en agua destilada.				
(3) Después de 28 días de curado y 11 días de inmersión en agua destilada.				

Fuente: Mateos de Vicente (2104).

2.2.9.1. Relación entre la cal y cenizas volantes

Se piensa que, si se mezcla ceniza volante más cal con un suelo, una de las partes de cal se combina con las partículas del suelo, otra parte con el óxido de carbono que está presente en el suelo – aire y el suelo – agua y otra de las partes con las cenizas volantes en una de las relaciones puzolánicas. (Mateos de Vicente, 2014)



La cal que se utiliza puede reaccionar con los minerales de la arcilla de dos maneras. Una iónica por naturales, es una reacción compleja en la que el exceso de cationes de calcio, que es dado por la cal causa una floculación en suelo por su acción de saturación sobre las partículas de la arcilla y un intercambio de calcio con otros cationes en la estructura de arcilla. Consecuencia de esto la plasticidad del suelo disminuye, su manejabilidad mejora mucho, y sus cambios de volumen causados por el aumento de humedad disminuyen mucho. La otra reacción que ocurre cuando el suelo esta compactado es puzolánica por naturaleza. Los minerales de cuarzo, del tamaño de limo fino además de minerales de arcilla que forman parte de esta reacción que ocurre. Provocando la formación de nuevos productos que mejoran la capacidad de resistencia del suelo. Estos productos cementantes principalmente son silicatos y aluminatos de calcio. (Mateos de Vicente, 2014)

También el óxido de calcio se combina con la cal para formar carbonato de calcio o carbonato de calcio-magnesio, de acuerdo a la cal utilizada. Esta combinación se hace nuevamente a un ritmo muy bajo en las mezclas de suelo-cal-ceniza volante (puzolana). Se ha corroborado que la presencia de óxido de carbono no afecta la resistencia a la compresión del suelo limoso y arcilloso que desarrolle al estabilizar con cal y ceniza volante. (Mateos de Vicente, 2014)

2.2.9.2. Los tipos de cal

En los diferentes estudios realizados para determinar el mejor tipo de cal que sea eficaz para mezclar con cenizas volantes, solo se ha utilizado cales hidratadas, ya que las no hidratadas son muy peligrosas para utilizar en obras. Entre las cales hidratadas que se han utilizado son las siguientes: cales calcáreas Ca(OH)_2 , y dolomíticas monohidratadas $\text{Ca(OH)}_2 + \text{MgO}$. (Mateos de Vicente, 2014)

No es tan fácil determinar cuál es el tipo de cal que mejor se comporte en la estabilización de un suelo utilizando cal y cenizas volantes sin suelo, pero se demostró que la cal dolomítica monohidratada ha producido generalmente una resistencia en un 30% mayores que la cal calcárea hidratada. Pero en algunas cenizas volantes, la cal calcárea ha producido resistencias mayores que las dolomíticas. La superficie específica de las cenizas volantes de acuerdo a su finura y de su cantidad de carbón que no haya sido quemado y por esta razón no es buena para saber la reactividad con la cal. (Mateos de Vicente, 2014)

2.2.9.3. Tipos de suelo

Los suelos que mejor reaccionan con la combinación de cal y ceniza volante son los que son más friables, suelo. Estos suelos son las arenas o gravillas de granos uniformes que mejor se estabilizan al utilizar cal y ceniza volante. Estos suelos generalmente tienen la necesidad de añadirse otros suelos adicionales para cumplir su granulometría, pero al añadirse en combinación cal y ceniza volante ya no es muy necesario. Los suelos arcillosos y limosos responden muy bien a la estabilización con cal y ceniza volante en cuanto se tengan cenizas de buena calidad y baratas. (Mateos de Vicente, 2014)

2.2.9.4. Proporciones y cantidad de cal y cenizas volantes

No se tiene una relación general entre los contenidos de cal y cenizas volantes y la resistencia del suelo estabilizado. Las proporciones a aplicar generalmente dependen del tipo de suelo y las cenizas que se empleen. Para suelos que son friables, la cantidad de cal debería estar entre el 3 y 6% de cal y la cantidad de cenizas volantes entre 10 y 25%, para suelos arcillosos, la cantidad de cal debería estar entre el 5 y 9% y las cantidades de cenizas volantes entre 10 y 25%. (Mateos de Vicente, 2014)

2.2.9.5. Relación humedad densidad resistencia

En las mezclas de suelo-cal-ceniza volantes la máxima resistencia que se quiera alcanzar es producida por un contenido de humedad durante la compactación que no es exactamente el contenido de humedad óptimo por una densidad máxima óptima. La humedad en cuanto a la compactación para una resistencia máxima de las muestras con los suelos arenosos es del lado seco de la humedad óptima. En cambio, en suelos que poseen grandes cantidades de arcilla, en el caso de montmorillonita, la humedad de la compactación será del lado húmedo. (Mateos de Vicente, 2014)

Si en el caso que no se añada agua durante el tratamiento, los contenidos de humedad variaran según la compactación requiera para producir la misma resistencia máxima cambiara según el periodo de tratamiento. En cuanto mayor sea el periodo de tratamiento mayor será el contenido de humedad óptimo. (Mateos de Vicente, 2014)

2.2.9.6. Efecto de la potencia de compactación

Este factor en la compactación de los suelos es muy importante. Tal es el caso, que el hecho de paso de una compactación de Proctor Standard a Proctor modificado aumentara la

resistencia de las mezclas de suelo-cal-ceniza volante. Su aumento de resistencia es variable, y es habitualmente de 50 a 160%. (Mateos de Vicente, 2014)

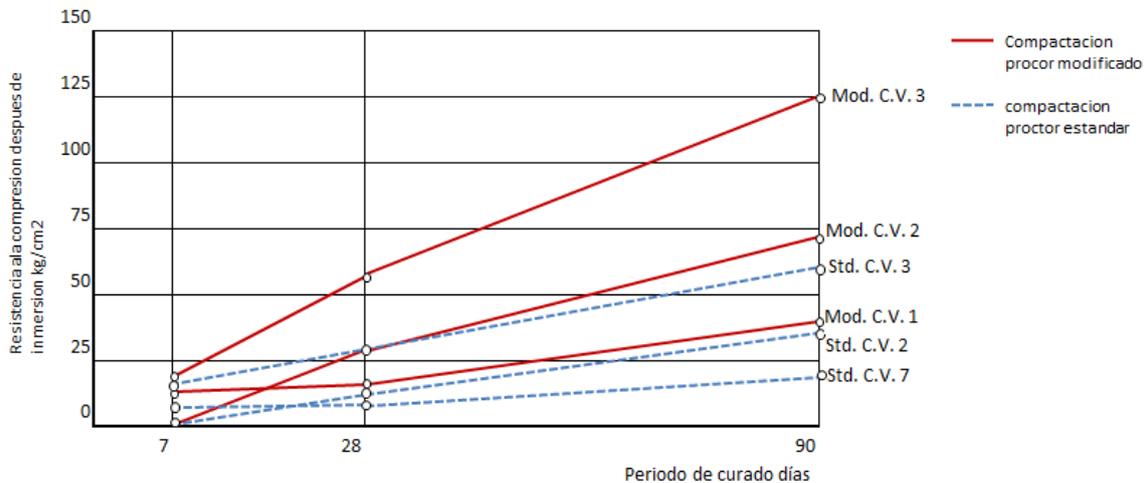


Figura Nro. 11 Efecto del esfuerzo de compactación en la resistencia de una mezcla de 76.5% de arena de duna, 6% de cal calcárea hidratada y 17.5% de cenizas volantes (Mateos de Vicente, 2014)

2.2.9.7. El PH (Potencial de hidrógeno)

Comúnmente se define como la medida de la alcalinidad o acidez de una mezcla que se homogénea y esta debe estar a un estado molecular de dos o muchas sustancias que no deben reaccionar entre ambas.

El caso de la estabilización de un suelo arcilloso al añadirse las cantidades adecuadas de cal y agua, se puede indicar que el PH del suelo aumenta rápidamente arriba de 10.5, lo que permite o indica que se rompieron las partículas de arcillas. Se puede comprobar que la sección estabilizada tiene la profundidad correcta, cavando pequeños agujeros y luego rociar el suelo con un indicador de PH, como la fenolftaleína. La fenolftaleína cambia de color los papeles indicadores indicando el PH del suelo de 8.3 a 10. (Asociación Americana de Constructores de Carreter, 2006). Esto indicará que si la mezcla realizada esta bien hecha o hay alguna duda o sospecha que no se haya hecho una buena mezcla de la cal-puzolana y suelo arcilloso.

2.2.10. Sub rasante de un camino

La sub rasante es la superficie acabada de la carretera que se considera a nivel de movimiento de tierras, tanto de corte y relleno, sobre la cual podemos colocar la estructura del pavimento afirmado. (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2013)



La subrasante es donde se apoya directamente el pavimento y forma parte importante de una carretera, que es construida entre el terreno natural nivelado o explanada y la estructura del pavimento. La subrasante es la capa superior del terraplén o el fondo de las excavaciones en terreno natural, la que contendrá la estructura del pavimento, y esta está construida de material seleccionado de suelos seleccionados de unas características que sean aceptables y que es compactado en distintas capas para construir un cuerpo estable en optimo estado, ya que esta no debe ser afectada por la carga del trasto que soportará. La capacidad de soporte en condiciones de servicio, junto con el tránsito y las características de los materiales que se utilicen en la construcción de la superficie de rodadura, conforman las variables básicas para tener un diseño de la estructura del pavimento que es colocado encima. En la etapa de construcción los últimos 0.30m de suelo que este debajo del nivel superior de la subrasante, deberá ser compactado al 95% de la máxima densidad seca que es obtenida en el ensayo de proctor modificado. (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2013)

Los suelos que estén por debajo del nivel superior de la subrasante, en una profundidad no menor de 0.60m, deberán ser suelos aceptables que posean un $CBR \geq 6\%$. En el caso que sean suelos debajo del nivel superior de la subrasante deben de tener un $CBR < 6\%$ (considerada subrasante pobre o inadecuada), correspondiendo a estabilizar el suelo por lo que el ingeniero responsable analizará según la naturaleza del suelo la mejor opción. (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2013)

2.2.11. Estabilización de suelo con cal según el Manual de Carreteras Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos del MTC

La cal que se usa en la estabilización es oxido de calcio o cal viva, que es obtenida por la calcinación de materiales calizos, o el hidróxido cálcico que es la cal hidratada o cal apagada. Las mencionadas también se llaman cales aéreas por su propiedad de endurecerse en el aire al ser mezclado con agua, por la acción del anhídrido carbónico. (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2013)

Las estabilizaciones ya hechas demuestran que los productos de la hidratación del cemento pueden ser recreados al combinar dos o más componentes principales de este producto como: CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , FC_2O_3 en proporciones adecuadas y con la presencia de agua. (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2013)



Al mezclar el suelo con cal, se produce una reacción de floculación e intercambio iónico, seguida de una más lenta de naturaleza puzolánico, que empiezan a formar nuevos productos químicos. La sílice y alúmina de las partículas del suelo que se quiere estabilizar se combinada con la cal en ayuda del agua para formar silicatos y aluminatos cálcicos insolubles. El efecto más trascendente que ocurre de la cal en el suelo, es de modificar mucho la plasticidad del suelo. Por ejemplo, suelos de plasticidad $IP < 15$, aumentan tanto su LL como el LP, y también de manera muy pequeña su IP; en cambio, en suelos que tienen una plasticidad con $IP > 15$, causa la disminución del IP. (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2013)

Así también se puede apreciar un aumento de la humedad óptima de compactación, lo que permitiría la densificación del suelo que posee una elevada humedad natural, que de otra manera no permitiría la construcción de una capa de rodadura. Los suelos que mejor se estabilizan con cal son los de granulometría fina y que posean cierta plasticidad. En cortes y también en terraplenes donde se encuentre la presencia de material arcilloso, es mejor aumentar pequeños porcentajes de cal que permitiría proteger la explanación y formar una plataforma para la construcción de una capa de rodadura. (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2013)

Debe tenerse en cuenta, el problema que puede surgir por fisura miento al realizar estas estabilizaciones o de las bases que son tratadas con cal, que puede ser causado por una falta o descuido en el curado causado que se pierda humedad a la capa estabilizada, en los periodos previos a la colocación de las siguientes capas. Este proceso es agravado cuando la cantera se ubica en zonas calurosas; por lo que es importante considerar el curado de estas capas estabilizadas con cal. (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2013)

2.2.12. Propiedades del suelo a evaluar en la caracterización de la sub rasante

Con un objetivo de evaluar las características físico-mecánicas del material que se encuentra en la sub rasante se lleva a cabo pozos de exploración o calicatas de 1.50m de profundidad mínima (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2013), de acuerdo a lo siguiente:

Tabla 7: Numero de calicatas para exploración de suelos.

Tipo de Carretera	Profundidad (m)	Número mínimo de Calicatas	Observación
Autopistas: carreteras de IMDA mayor de 6000 veh/día, de calzadas separadas, cada una con dos o más carriles	1.50m respecto al nivel de subrasante del proyecto	<ul style="list-style-type: none"> Calzada 2 carriles por sentido: 4 calicatas x km x sentido Calzada 3 carriles por sentido: 4 calicatas x km x sentido Calzada 4 carriles por sentido: 6 calicatas x km x sentido 	Las calicatas se ubicarán longitudinalmente y en forma alternada
Carreteras Duales o Multicarril: carreteras de IMDA entre 6000 y 4001 veh/día, de calzadas separadas, cada una con dos o más carriles	1.50m respecto al nivel de subrasante del proyecto	<ul style="list-style-type: none"> Calzada 2 carriles por sentido: 4 calicatas x km x sentido Calzada 3 carriles por sentido: 4 calicatas x km x sentido Calzada 4 carriles por sentido: 6 calicatas x km x sentido 	
Carreteras de Primera Clase: carreteras con un IMDA entre 4000-2001 veh/día, de una calzada de dos carriles.	1.50m respecto al nivel de subrasante del proyecto	<ul style="list-style-type: none"> 4 calicatas x km 	Las calicatas se ubicarán longitudinalmente y en forma alternada
Carreteras de Segunda Clase: carreteras con un IMDA entre 2000-401 veh/día, de una calzada de dos carriles.	1.50m respecto al nivel de subrasante del proyecto	<ul style="list-style-type: none"> 3 calicatas x km 	
Carreteras de Tercera Clase: carreteras con un IMDA entre 400-201 veh/día, de una calzada de dos carriles.	1.50m respecto al nivel de subrasante del proyecto	<ul style="list-style-type: none"> 2 calicatas x km 	
Carreteras de Bajo Volumen de Tránsito: carreteras con un IMDA \leq 200 veh/día, de una calzada.	1.50m respecto al nivel de subrasante del proyecto	<ul style="list-style-type: none"> 1 calicata x km 	

Fuente: Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2013).

2.2.12.1. Registro de excavación

De las calicatas deben obtenerse muestras representativas, así también se tomará registro de los espesores de cada estrato que se llegue a identificar en el sub suelo, sus características de gradación y el estado de compacidad de cada uno de los materiales. Así también se extraerán muestras representativas para la determinación del CBR y Módulo de Resiliencia (Mr) (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2013), la cantidad de ensayos dependerá de lo siguiente:

Tabla 8: Numero de ensayos de Mr y CBR

Tipo de Carretera	N° Mr y CBR
Autopistas: carreteras de IMDA mayor de 6000 veh/día, de calzadas separadas, cada una con dos o más carriles	<ul style="list-style-type: none">• Calzada 2 carriles por sentido: 1 Mr cada 3 km x sentido y 1 CBR cada 1 km x sentido• Calzada 3 carriles por sentido: 1 Mr cada 2 km x sentido y 1 CBR cada 1 km x sentido• Calzada 4 carriles por sentido: 1 Mr cada 1 km y 1 CBR cada 1 km x sentido
Carreteras Duales o Multicarril: carreteras de IMDA entre 6000 y 4001 veh/día, de calzadas separadas, cada una con dos o más carriles	<ul style="list-style-type: none">• Calzada 2 carriles por sentido: 1 Mr cada 3 km x sentido y 1 CBR cada 1 km x sentido• Calzada 3 carriles por sentido: 1 Mr cada 2 km x sentido y 1 CBR cada 1 km x sentido• Calzada 4 carriles por sentido: 1 Mr cada 1 km y 1 CBR cada 1 km x sentido
Carreteras de Primera Clase: carreteras con un IMDA entre 4000 - 2001 veh/día, de una calzada de dos carriles.	<ul style="list-style-type: none">• Cada 1 km se realizará un CBR
Carreteras de Segunda Clase: carreteras con un IMDA entre 2000 - 401 veh/día, de una calzada de dos carriles.	<ul style="list-style-type: none">• Cada 1.5 km se realizará un CBR
Carreteras de Tercera Clase: carreteras con un IMDA entre 400 - 201 veh/día, de una calzada de dos carriles.	<ul style="list-style-type: none">• Cada 2 km se realizará un CBR
Carreteras de Bajo Volumen de Tránsito: carreteras con un IMDA \leq 200 veh/día, de una calzada.	<ul style="list-style-type: none">• Cada 3 km se realizará un CBR

Fuente: Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2013).

2.2.12.2. Descripción de los suelos

Los suelos que se encuentren serán descritos y clasificados de acuerdo a la metodología de la construcción de vías, la clasificación se realiza obligatoriamente por AASHTO y SUCS (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2013), esto se realiza mediante los siguientes:

Tabla 9: Signos convencionales para perfil de calicata.

Simbología	Clasificación	Simbología	Clasificación
	A-1-a		A-5
	A-1-b		A-6
	A-3		A-7-5
	A-2-4		A-7-6
	A-2-5		MATERIA ORGANICA
	A-2-6		ROCA SANA
	A-2-7		ROCA DESINTEGRADA
	A-4		

Fuente: AASHTO

Tabla 10: Signos convencionales para perfil de calicatas

	Gravas bien mezclada arena, grava con poca o nada de material fino, variación en tamaños granulares.		Materiales finos sin plasticidad o con plasticidad muy baja.
	Grava mal graduada, mezcla de arena-grava con poca nada de material fino.		Arenas arcillosas, mezclas de arena-arcillosa.
	Gravas limosas mezclas de grava-arena limosa.		Limos orgánicos y arenas muy finas, polvo de roca, arenas finas limosas o arcillosas o limas arcillosas con ligera plasticidad.
	Gravas arcillosas, mezclas de grava-arena-arcilla grava con material fino cantidad apreciable de material fino.		Arcillas inorgánicas de plasticidad baja o mediana, arcillas gravas, arcillas arenosas, arenas limosas, arcillas magras.
	Arena bien graduada, arenas con grava, poca o nada de material fino. Arenas limpas poca o nada, amplia variación en tamaño granulares y cantidades de partículas en tamaño intermedios.		Limos orgánicos y arcillas limosas orgánicas, baja plasticidad.
	Arena mal graduada con grava poca o nada de material fino. Un tamaño predominante o una serie de tamaños con ausencia de partículas interras.		Limo inorgánicas suelos finos granosos o limosos, micáceos o diatomáceos, limos elásticos.
	Arcillas inorgánicas de elevada plasticidad, arcillas grasosas.		
	Arcillas orgánicas de mediana o elevada plasticidad, limos orgánicos.		
	Turba, suelos considerablemente orgánicos.		

Fuente: SUCS

2.2.13. Propiedades físico mecánicas a determinar

2.2.13.1. Granulometría

Es la que representa la configuración de los tamaños del suelo que posee después de realizar un tamizado según las especificaciones en el ensayo (MTC EM 107). A partir de esta se puede estimar, con mayor o menor seguridad, las otras propiedades que sean necesarias. (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2013)

Tabla 11: Clasificación de los suelos según tamaño de partículas. (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2013)

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

Fuente: Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2013).

2.2.13.2. La plasticidad

Es una propiedad que presenta los suelos de deformarse hasta un cierto límite de humedad sin disgregarse, a causa de esto la plasticidad del suelo depende, no de sus elementos gruesos que esta contiene, sino en cambio de sus elementos finos. El análisis granulométrico permite distinguir esto, por lo que es necesario determinar los límites de Atterberg. (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2013)

Estos límites de Atterberg determina la sensibilidad en el comportamiento del suelo en la relación a sus contenidos de humedad, estos se pueden diferenciar en tres estados los suelos son: límite líquido (LL, según ensayo MTC EM 110), límite plástico (LP, según el ensayo MTC EM 111) y el límite de contracción (LC, según el ensayo MTC EM 112). (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2013)

Límite líquido LL, se da cuando el suelo da paso de un estado semilíquido a un estado plástico moldeable

Límite plástico LP, es cuando el suelo ensayos pasa de un estado plástico a un tener un estado semisólido y puede romperse.

Y también se puede determinar una característica adicional que servirá en la clasificación del tipo de suelo, esta es el índice de plasticidad (IP, por ensayo MTC EM 111) la cual se determina por la diferencia del LL y el LP en ese orden.

Tabla 12: Clasificación de suelos según su índice de plasticidad.

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

Fuente: Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2013).

2.2.13.3. Índice de grupo

Es un índice normado por AASHTO que generalmente se usa para la clasificación de suelos, está basado en gran medida a los límites de Atterberg, esta se puede determinar mediante:

$$IG = 0.2(a) + 0.005(ac) + 0.01(bd)$$

Dónde:

- a = F-35 (F = fracción del porcentaje que pasa el tamiz N° 200) expresado por un número entero positivo comprendido entre 1 y 40.
- b = F-15 (F = fracción del porcentaje que pasa el tamiz N° 200) expresado por un número entero entre 1 y 40.
- c = LL-40 (LL = límite líquido). Expresado por un número entero comprendido entre 0 y 20.
- d = IP-10 (IP = índice de plasticidad). Expresado por un número entero comprendido entre 0 y 20 o más.

Tabla 13: Clasificación de suelos según el índice de grupo.

Índice de grupo	Suelo de Subrasante
IG>9	Muy pobre
IG está entre 4 a 9	Pobre
IG está entre 2 a 4	Regular
IG está entre 1 a 2	Bueno
IG está entre 0 a 1	Muy Bueno

Fuente: Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2013).

2.2.13.4. Humedad natural

Otra de la característica de un suelo es su humedad natural; ya que la resistencia del suelo de una subrasante, en particular si se tiene suelos finos, está ligada directamente a las condiciones de humedad y densidad que estos suelos presenten. (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2013)

La cuantificación de humedad natural se hace mediante el ensayo MTC EM 108, que permitirá comparar con la humedad óptima que se obtenga de los ensayos de Proctor para obtener el CBR del suelo (ensayo MTC EM 132). Si la humedad natural resulta igual o inferior a la óptima obtenida en el ensayo de Proctor se le dará el aporte necesario de agua. Pero si en cambio resulta ser superior se podrá plantear alternativas como airear el suelo o reemplazarlo. (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2013)

2.2.13.5. Clasificación de los suelos

Determinar las propiedades anteriores permitirá determinar con una aproximación suficiente el comportamiento del suelo ensayado tanto de la granulometría, límites de Atterberg y se podrá clasificarlos mediante los dos sistemas que se tienen AASHTO y SUCS.

Tabla 14: Correlación de tipos de suelos AASTHO y SUCS.

Clasificación de suelos AASTHO AASHTO M-145	Clasificación de suelos SUCS ASTM-D-2487
A-1-a	GW, GP, GM, SW, SP, SM
A-1-b	GM, GP, SM, SP
A-2	GM, GC; SM, SC
A-3	SP
A-4	CL, ML
A-5	ML, MH, CH
A-6	CL, CH
A-7	OH, MH, CH

Fuente: Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2013).

2.2.13.6. CBR (Valor Soporte California)

Este ensayo se realiza para determinar la resistencia potencial del suelo. Este ensayo (la ASTM la denomina el ensayo simplemente de relación de soporte) este mide la resistencia al corte de un suelo bajo las condiciones de humedad y densidad controlada. El ensayo permite obtener un número de soporte, pero el cual no es constante y que se aplica solo al estado en el que se encontraba el suelo durante el ensayo.

Tabla 15: CBR para subrasante.

Categorías de subrasante	CBR
S ₂ : Subrasante inadecuada	CBR < 3%
S ₁ : Subrasante pobre	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%

Fuente: Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2013).

2.2.13.7. Módulo de resiliencia Mr

El objetivo de este ensayo es analizar las propiedades del suelo bajo las cargas dinámicas como las ruedas de un vehículo que circula por la vía. Para calcular este factor se puede utilizar la siguiente relación.

$MR (\text{psi}) = 2555 \times \text{CBR}^{0.64}$, Relación entre el CBR para calcular el módulo resiliencia (Mr).

(Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2013)



2.3. Hipótesis

2.3.1. Hipótesis general

El uso de cal al 10% y puzolana volcánica al 15, 25 y 30% como estabilizadores mejora las propiedades físicas, mecánicas y químicas del suelo arcilloso, utilizado en la sub rasante de vías pavimentadas en la APV. Pícol Orcompugio.

2.3.2. Sub hipótesis

Sub hipótesis N° 1

El uso de la cal 10% y puzolana volcánica 15, 25 y 30% como estabilizador del suelo arcilloso mejora por encima del 6% de CBR (Relación de Soporte California) para la sub rasante de vías pavimentadas en la APV. Pícol Orcompugio.

Sub hipótesis N° 2

La adición de cal al 10% y puzolana volcánica al 15, 25 y 30% como agente estabilizador influye positivamente en el suelo arcilloso aumentando la Densidad Máxima Seca (DMS) del suelo arcilloso de la sub rasante de vías pavimentadas en la APV. Pícol Orcompugio.

Sub hipótesis N° 3

Disminuye los porcentajes de límite líquido por debajo del 40% y límite plástico por debajo de 25% al adicionarse la cal al 10% y puzolana volcánica al 15, 25 y 30% como estabilizador al suelo arcilloso de la sub rasante de vías pavimentadas en la APV. Pícol Orcompugio.

Sub hipótesis N° 4

Incrementa la alcalinidad del suelo arcilloso al estabilizarse con cal al 10% y puzolana volcánica al 15, 25 y 30% para la sub rasante de vías pavimentadas en la APV. Pícol Orcompugio.

Sub hipótesis N° 5

El suelo arcilloso incrementa su Módulo de Resiliencia al estabilizarse con cal al 10% y puzolana volcánica al 15, 25 y 30% para la sub rasante de vías pavimentadas en la APV. Pícol Orcompugio.



2.4. Definición de variables

2.4.1. Variables independientes

- a) Cal.
- b) Puzolana volcánica.
- c) Suelo arcilloso seco.

2.4.1.1. Descripción de las variables:

Para la tesis la cantidad de cal y puzolana volcánica será dada en función del peso seco del suelo, para cumplir como un suelo apto para su uso como sub rasante según el Manual de Carreteras Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos del MTC.

2.4.1.2. Indicadores:

- a) Cal, el peso de cal a utilizar en función de peso seco del suelo (kg).
- b) Puzolana volcánica, el peso de puzolana volcánica a utilizar en función de peso seco del suelo (kg).
- c) Suelo arcilloso seco (kg).

2.4.2. Variables dependientes

- a) Propiedades físicas.
- b) Propiedades químicas.
- c) Propiedades mecánicas.

2.4.2.1. Descripción de las variables:

- a) **Propiedades físicas**, para la tesis las propiedades físicas del suelo son parámetros que son aquellas que determinan los componentes internos de la estructura de cada suelo (estratos) y los cuales se ven reflejados en la apariencia de cada uno.
- b) **Propiedades químicas**, para la tesis las propiedades químicas son aquellas que determinan las interacciones en sus estructuras químicas de los aditivos estabilizantes y el suelo arcilloso.
- c) **Propiedades mecánicas**, para la tesis serán propiedades de resistencia que miden la capacidad del suelo para resistir deformaciones causadas por el ciclo de cargas de los vehículos.



2.4.2.2. Indicadores:

a) **Propiedades físicas:**

Es el resultado de alcanzar el contenido de humedad óptimo de compactación (gr/cm³).

Es el contenido de humedad con el cual una masa de suelo colocado en aparato cuchara de Casagrande logre unirse una ranura de 1cm después de 25 golpes (%).

Es el contenido de humedad con el cual un cilindro de este, se rompe al amasado presentando un diámetro de 3mm (%).

b) **Propiedades químicas:**

La acidez o alcalinidad del suelo definido en una escala de 1 a 15.

c) **Propiedades mecánicas:**

La resistencia al esfuerzo cortante de un suelo, bajo condiciones de densidad y humedad cuidadosamente controladas (%).

El esfuerzo desviador aplicado y la deformación unitaria elástica en cada ciclo de carga (PSI).



2.4.3. Cuadro de operacionalización de variables

Tipo de variable	Nombre de la variable	Descripción de la variable	Dimensión o nivel de la variable	Indicadores	Unidad de medida
Variable independiente	Cal.	Para la tesis la cantidad de cal y puzolana volcánica será dada en función del peso seco del suelo, para cumplir como un suelo apto para su uso como sub rasante según el manual de carreteras suelos, geología, geotecnia y pavimentos del MTC.	Porcentaje de cal.	El porcentaje de cal a utilizar en función de peso seco del suelo.	Peso (kg)
	Puzolana volcánica.		Porcentaje de puzolana.	El porcentaje de puzolana volcánica a utilizar en función de peso seco del suelo.	Peso (kg)
	Suelo arcilloso seco.		Porcentaje de suelo arcilloso seco.	El peso de suelo arcilloso seco.	Peso (kg)
Variable dependiente	Propiedades físicas	Para la tesis las propiedades físicas del suelo son parámetros que son aquellas que determinan los componentes internos de la estructura de cada suelo (estratos) y los cuales se ven reflejados en la apariencia de cada uno.	Densidad máxima seca de la sub rasante arcillosa (PROCTOR).	Es el resultado de alcanzar el contenido de humedad óptimo de compactación.	gr/cm ³
			Limite líquido y limite plástico del suelo arcilloso.	Es el contenido de humedad con el cual una masa de suelo colocado en aparato cuchara de Casagrande logre unirse una ranura de 1cm después de 25	Porcentaje (%) Porcentaje (%)



Tipo de variable	Nombre de la variable	Descripción de la variable	Dimensión o nivel de la variable	Indicadores	Unidad de medida
				golpes. Es el contenido de humedad con el cual un cilindro de este, se rompe al amasado presentando un diámetro de 3mm.	
	Propiedades químicas	Para la tesis las propiedades químicas son aquellas que determinan las interacciones en sus estructuras químicas de los aditivos estabilizantes y el suelo arcilloso.	El PH del suelo estabilizado con cal y puzolana volcánica.	La acidez o alcalinidad del suelo definido en una escala de 1 a 15.	Adimensional
	Propiedades mecánicas	Para la tesis serán propiedades de resistencia que miden la capacidad del suelo para resistir deformaciones causadas por el ciclo de cargas de los vehículos.	Capacidad de soporte del suelo estabilizado con cal y puzolana volcánica (CBR).	La resistencia al esfuerzo cortante de un suelo, bajo condiciones de densidad y humedad cuidadosamente controladas.	Porcentaje (%)
			El módulo de resiliencia de la subrasante de estudio.	El esfuerzo desviador aplicado y la deformación unitaria elástica en cada ciclo de carga	PSI



CAPITULO III: Metodología

3.1. Metodología de la investigación

3.1.1. Enfoque de la investigación

La investigación es de tipo cuantitativa porque en el desarrollo de los ensayos de laboratorio como: Contenidos de Humedad, Análisis Granulométrico, Límites de Atterberg, Proctor Modificado, CBR en laboratorio y ensayo de PH, tanto para el suelo arcilloso sin estabilizar y estabilizado con cal y puzolana volcánica en sus distintos porcentajes, se obtuvieron resultados numéricos los cuales se procesaron para obtener magnitudes que demostraron la mejora de las propiedades físicas, mecánicas y químicas del suelo arcilloso; y estos resultados numéricos se comparó con el Manual de Carreteras, Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos del MTC, para demostrar que el suelo arcilloso estabilizado cumple como sub rasante de la APV. Pícol Orcompugio a través de un parámetro numérico (CBR).

3.1.2. Nivel de la investigación

La presente investigación presenta un nivel de tipo correlacional porque existe una relación entre las variables planteadas ya que al variar alguna variable existirá la modificación de otras de las variables, por lo que se responde a las preguntas ¿Se incrementara la densidad máxima seca del suelos con la adición de los estabilizantes?, ¿Aumentará el porcentaje de CBR con la adición de las combinaciones de estabilizantes?, ¿Cuánto disminuye el índice de plasticidad? Las que se comparo con lo exigido por el Manual de Carreta Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos del MTC; esto significa que tenemos como objetivo indagar la incidencia de los diferentes porcentajes de cal y puzolana volcánica planteada en la investigación.

3.1.3. Método de la investigación

Para el desarrollo de la investigación se plantearon hipótesis las cuales fueron validadas a través del procesamiento de los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio; por lo tanto, la investigación tendrá por método de investigación hipotético deductivo. También se dio una alternativa de solución a la inestabilidad de suelos arcillosos añadiendo cal y puzolana volcánica como aditivos estabilizantes en sus distintos porcentajes y si este suelo es apto para su uso como sub rasante según Manual de Carreta Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos del MTC.



3.2. Diseño de la investigación

3.2.1. Diseño metodológico

La presente investigación tiene un diseño experimental; puesto que, para la obtención de las magnitudes de las propiedades físicas, mecánicas y químicas se tuvo que realizar ensayos de laboratorio y para lograr la estabilización del suelo arcilloso se manipularon las variables como las cantidades de suelo arcilloso, cal y puzolana volcánica, los cuales produjeron cambios en las propiedades mencionadas como: límites de Atterberg, densidad máxima seca, el valor de CBR y el módulo de Resiliencia.

3.2.2. Diseño de ingeniería

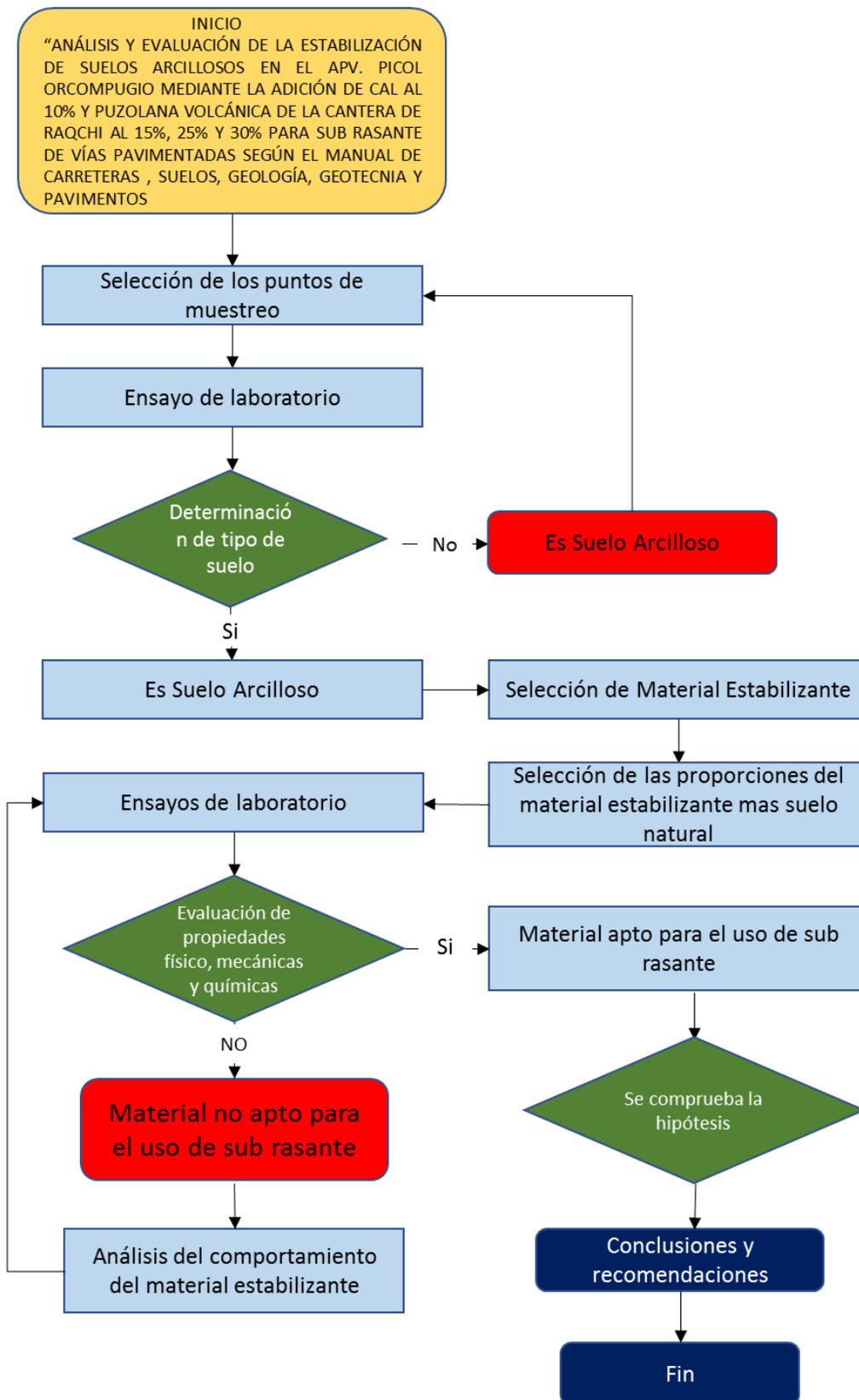


Figura Nro. 12: Flujo grama para realizar la estabilización de suelo arcilloso para sub rasante en la APV. Picol Orcompugio

3.3. Población y muestra

3.3.1. Población

3.3.1.1. Descripción de la población

La APV. Pícol Orcompugio tiene calles que no se encuentran pavimentadas, en nuestra tesis nos enfocaremos como población en los suelos de dichas calles teniendo 2.5km de longitud en estudio.

3.3.1.2. Cuantificación de la población

La población es única, conformada por el estrado geológico arcilloso que se encontró en los puntos de prospección (C-01, C-02, C-03, C-04, C-05 y C-06) de las calles sin pavimentar de la APV. Pícol Orcompugio. La profundidad de las calicatas fue de 1.60m despejando 0.10m de material orgánico.

Se realizó 6 calicatas a una profundidad de 1.60 m.

Tabla 16: tabla de ubicación UTM de calicatas

Calicata	Coordenadas UTM
Calicata N°01	Sur 8500312.513 m Este 186314.613 m Altura 3234.59 m
Calicata N°02	Sur 8500297.359 m Este 186183.145 m Altura 3241.29 m
Calicata N°03	Sur 8500360.106 m Este 186108.147 m Altura 3252.29 m
Calicata N°04	Sur 8500207.460 m Este 186100.263 m Altura 3253.00 m
Calicata N°05	Sur 8500403.131 m Este 186248.224 m Altura 3236.82m
Calicata N°06	Sur 8500508.224 m Este 186163.125 m Altura 3241.65 m

Fuente: Elaboración Propia

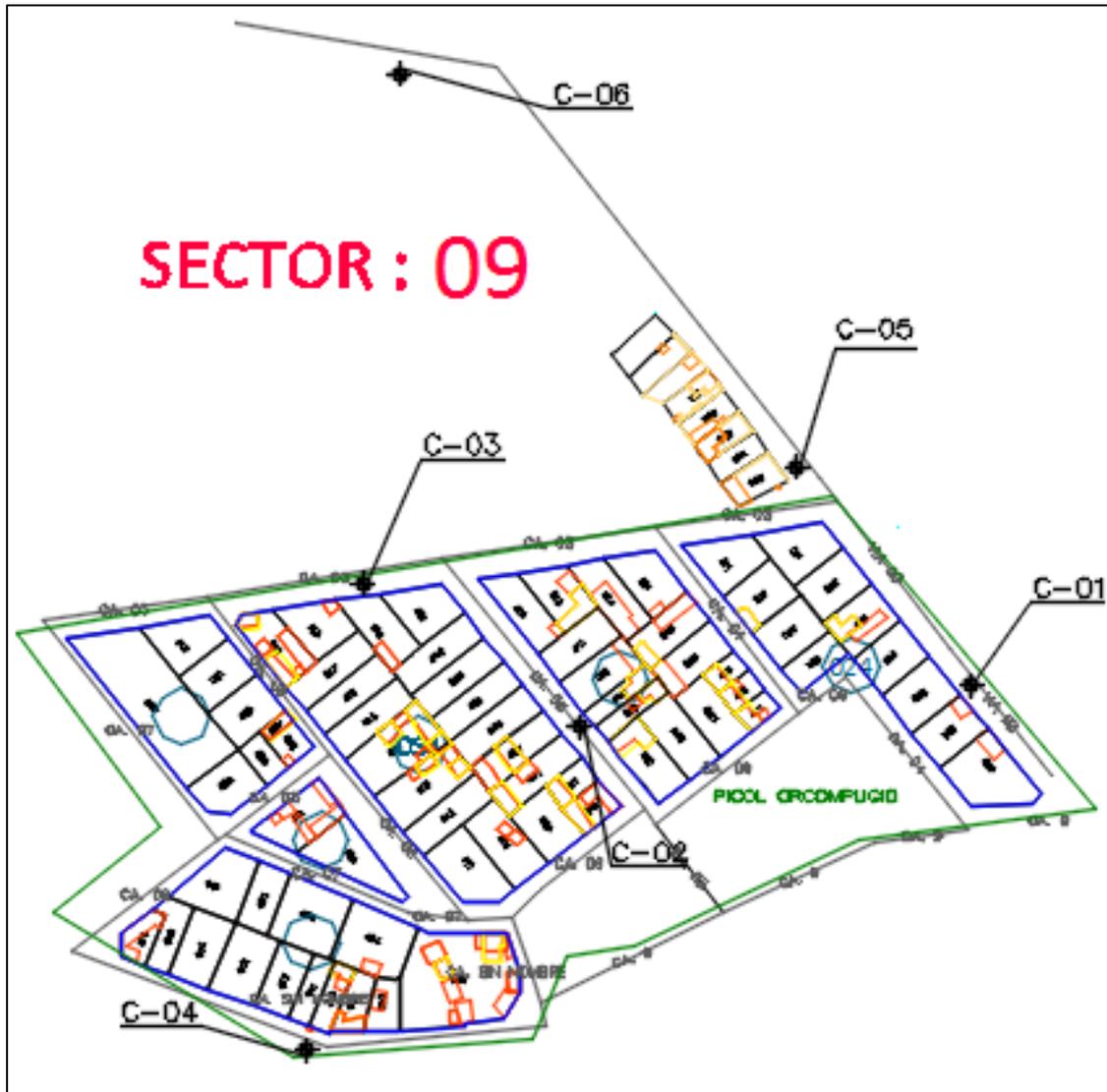


Figura Nro. 13 Ubicación de calicatas en la APV. Pícol Orcompugio

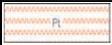
La ubicación se detalla de mejor manera en el plano de ubicación de las calicatas y la zona en estudio, presentado en el anexo N° 28.

3.3.2. Muestra

3.3.2.1. Descripción de la muestra

De acuerdo con la cuantificación de la población, nuestra muestra sería única delimitada por el estrato según clasificación SUCS “CH” (arcilla de alta plasticidad tanto en la calicata C-05 y C-06), y según clasificación AASHTO “A-7-5 (13) de la calicata C-05 y A-7-5 (16) de la calicata C-06” de la APV. Pícol Orcompugio.

Tabla 17: Estratigrafía de la C-05

PROFUNDIDAD (m)	ESTRATO	SIMBOLO		DESCRIPCIÓN		CLASIFICACIÓN	
		SUCS	AASHTO	SUCS	AASHTO	SUCS	AASHTO
-0.10	E-1			Turba	Material organico	Turba	Materia orgánica
-1.60	E-2			Arcilla inorgánica de alta plasticidad	Arcilla muy plástica	CH (Arcilla densa de alta plasticidad)	A-7-5(13)

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 18: Estratigrafía de la C-06

PROFUNDIDAD (m)	ESTRATO	SIMBOLO		DESCRIPCIÓN		CLASIFICACIÓN	
		SUCS	AASHTO	SUCS	AASHTO	SUCS	AASHTO
-0.10	E-1			Turba	Material organico	Turba	Materia orgánica
-1.60	E-2			Arcilla inorgánica de alta plasticidad	Arcilla muy plástica	CH (Arcilla densa de alta plasticidad)	A-7-5(16)

Fuente: Elaboración propia.

3.3.2.2. Cuantificación de la muestra

La muestra es el estrato denominado según clasificación SUCS “CH” (arcilla de alta plasticidad), y según clasificación AASHTO “A-7-5” de la APV. Pico1 Orcompugio en la cual se realizaron 6 calicatas según el Manual de Carreteras “Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos” para realizar los ensayos necesarios en laboratorio.

Tabla 19: Número de calicatas y de ensayos realizados.

N° de Muestras Ensayo	Suelo arcilloso	Suelo + cal 10% + puzolana 15%	Suelo + cal 10%+ puzolana 25%	Suelo + cal 10% + puzolana 30%	Total de ensayos por
Calicatas	6				6
Limite líquido	1	1	1	1	4
Limite plástico	1	1	1	1	4
Granulometría					6
Ensayo de proctor estándar	4	5	5	5	19
Ensayo de CBR	3	3	3	3	12
Total de ensayos por suelo	54	6	6	6	68

Fuente: Elaboración propia.

3.3.2.3. Método de muestreo

Puesto que los puntos seleccionados a criterio de los investigadores, solo en función de la tabla antes señalada, la accesibilidad, y la estratigrafía de suelo y los puntos críticos; realizando esto según al Manual de Carreteras Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos; realizando los puntos de exploración según el manual mencionado para poder establecer la estratigrafía a estudiar; así mismo dichos puntos son el resultado de una exhaustiva interpretación de la geología del terreno, por haber realizado las exploraciones visuales del terreno; habiéndose se realizado el análisis correspondiente podemos definir que nuestro método de muestreo es no probabilístico y de conveniencia.

3.3.2.4. Criterios de evaluación de la muestra

Habiéndose seleccionado la muestra para la investigación, se ha evaluado está bajo los diversos ensayos de los laboratorios.

Primero: Se realizó la evaluación de la estratigrafía del terreno hasta la profundidad de 1.50m según el Manual de Carreteras Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos.



Segundo: Se realizó la evaluación de los porcentajes de incremento en peso por cada combinación entre suelo arcilloso adicionado con cal y puzolana.

Tercero: Se realizó la evaluación de los resultados del ensayo Proctor Modificado según el MTC 116.

Cuarto: Se realizó la evaluación de los resultados obtenidos en el ensayo de CBR según MTC 132.

Quinto: Se realizó la comparación de los resultados obtenidos por cada combinación realizada entre suelo, cal y puzolana volcánica.

3.3.3. Criterios de inclusión

- Se tomó en cuenta la APV. Pícol Orcompugio, puesto que esta es una Asociación Pro Vivienda que está en crecimiento y cuenta con calles sin pavimentar.
- Se realizó una distribución lineal de la APV. Pícol Orcompugio para su delimitación espacial comprendiendo el sector 9 de la APV. Pícol Orcompugio; teniendo una vía principal (Vía 03) y también considerando 3 calles (Calle 03, Calle 05, Calle 12) para el estudio.
- Se realizó una distribución estratigráfica y geológica del suelo para la selección del estrato.
- Se analizaron los distintos tipos de suelos de los cuales se realizó la selección del suelo con mayor cantidad de arcillas y mayor índice de plasticidad.

3.4. Instrumentos

3.4.1. Instrumentos metodológicos o instrumentos de recolección de datos

En la presente investigación se utilizaron los siguientes formatos para la recolección de datos de los siguientes ensayos:

a) Contenido de Humedad

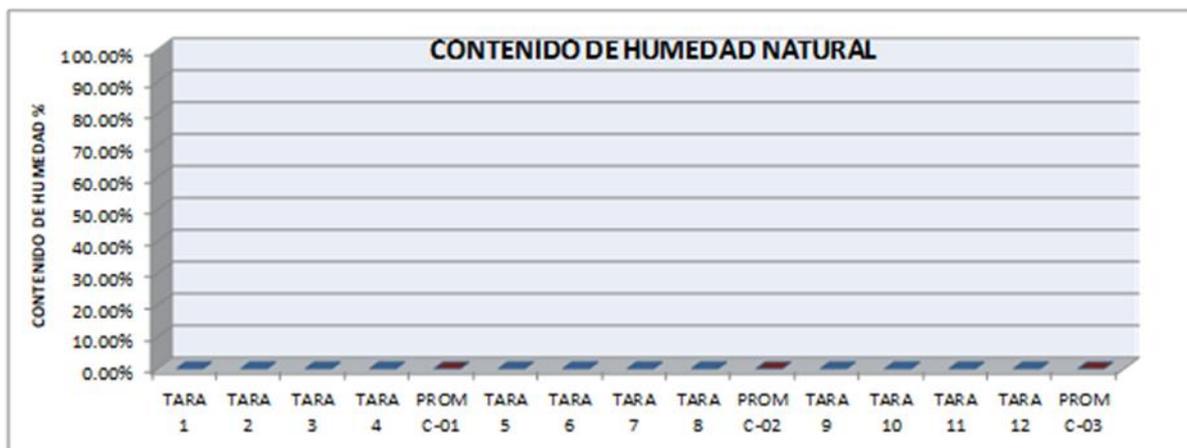
	<h2>UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO</h2>
	FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
	ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL
TESIS:	ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS EN EL APV. PICOL ORCOMPUGIO MEDIANTE LA ADICIÓN DE CAL AL 10% Y PUZOLANA VOLCANICA DE LA CANTERA DE RAQCHI AL 15, 25 Y 30% PARA SUB BASE DE VÍAS PAVIMENTADAS SEGÚN EL MANUAL DE CARRETERAS SUELOS, GEOLOGÍA, GEOTECNIA Y PAVIMENTOS.

DATOS DE LA MUESTRA

RESPONSABLES:	JHERSON MAMANI GARCIA Y MARIO RAMIREZ RONDAN	FECHA:	22/04/2019
UBICACION:	APV. PICOL ORCOMPUGIO	PROFUNDIDAD CALICATA:	1.50m
CALICATA:	C-01, C-02, C-03, C-04, C-05 y C-06	PROFUNDIDAD MUESTRA:	0.40m

ENSAYO DE CONTENIDO DE HUMEDAD NTP 339.127:1998

CALICATA	MUESTRA	Peso de recipiente (gr)	Peso de la muestra húmeda + recipiente (gr)	Peso de suelo seco + recipiente (gr)	Peso del agua (gr)	Peso de suelo seco (gr)	HUMEDAD %	HUMEDAD NATURAL PROMEDIO %
C-01	TARA 1							
	TARA 2							
	TARA 3							
	TARA 4							
C-02	TARA 5							
	TARA 6							
	TARA 7							
	TARA 8							
C-03	TARA 9							
	TARA 10							
	TARA 11							
	TARA 12							





b) Ensayo de análisis granulométrico

	UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
	FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
	ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL
TESIS:	ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS EN EL APV. PICOL ORCOMPUGIO MEDIANTE LA ADICIÓN DE CAL AL 10% Y PUZOLANA VOLCANICA DE LA CANTERA DE RAQCHI AL 15, 25 Y 30% PARA SUB BASE DE VÍAS PAVIMENTADAS SEGÚN EL MANUAL DE CARRETERAS SUELOS, GEOLOGÍA, GEOTECNIA Y PAVIMENTOS.

DATOS DE LA MUESTRA

RESPONSABLES:	JHERSON MAMANI GARCIA Y MARIO RAMIREZ RONDAN	FECHA:	24/04/2019
UBICACION:	APV. PICOL ORCOMPUGIO	PROFUNDIDAD CALICATA:	1.50m
CALICATA:	C-01 y C-02	PROFUNDIDAD MUESTRA	0.40m

MÉTODO DE ENSAYO PARA EL ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO ASTM D 422, AASHTO T 88

TAMICES	DIAMETROS (mm)	PESO RETENIDO (gr)	PESO RETENIDO CORREGIDO (gr)	% RETENIDO PARCIAL	% RETENIDO ACUMULADO	% QUE PASA	DESCRIPCION DE LA MUESTRA	
3/8"							PESO DE LA MUESTRA	
N° 4							PESO TOTAL SECO (gr)	
N° 8							PESO DESPUES DE LAVAR (gr)	
N° 16							PERDIDA POR LAVADO (gr)	
N° 30							DATOS GENERALES	
N° 50							% de Gruesos	0.00%
N° 100							% de Finos	0.00%
N° 200							Total	0.00%
CAZUELA							Fraciones de Grava, Arena, Finos	
SUB TOTAL							% de Grava (Ret. Tamiz N° 4)	0.00%
LAVADO							% de Arena (Pasa N° 4 y Ret. N° 200)	0.00%
TOTAL							% de Finos (Pasa Tamiz N° 200)	0.00%
							% que pasa el tamiz N° 10	0.00%
							% que pasa el tamiz N° 40	0.00%
							% que pasa el tamiz N° 200	0.00%



Tamaño Máximo Absoluto =

Tamaño Máximo Nominal =

D60 =	NO PRESENTA POR QUE MAS DEL 12% PASA EL TAMIZ #200
D30 =	
D10 =	

Cu =	NO PRESENTA POR QUE MAS DEL 12% PASA EL TAMIZ #200
Cc =	

c) Clasificación de suelos SUCS

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO				
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL				
ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS EN EL APV. PICOL ORCOMPUGIO MEDIANTE LA ADICIÓN DE CAL AL 10% Y PUZOLANA VOLCANICA DE LA CANTERA DE RAQCHI AL 15, 25 Y 30% PARA SUB BASE DE VÍAS PAVIMENTADAS SEGÚN EL MANUAL DE CARRETERAS SUELOS, GEOLOGÍA, GEOTECNIA Y PAVIMENTOS.				
TÍTULO:				
FECHA: 24/04/2019				
UBICACION: JHERSON MAMANI GARCIA Y MARIO RAMIREZ RONDAN				
CALICATA: APV. PICOL ORCOMPUGIO				
PROFUNDIDAD CALI 1.50m				
PROFUNDIDAD MUE 0.40m				
DATOS DE LA MUESTRA				
SISTEMA UNIFICADO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS (SUCS) ASTM D-2487				
GRAVAS Más del 50% de la fracción gruesa es retenida en la malla N° 4	GRAVAS LIMPIAS Menos del 5% pasa la malla N° 200	SÍMBOLO GW GP	NOMBRE DE GRUPO Grava bien graduada Grava mal graduada	DATOS PARA CLASIFICACIÓN Tipo de Suelo Tipo = Inorgánico De la Gradimetría % de Gruesos = 0.00% % de Finos = 0.00% Total = 0.00% % de Grava = 0.00% % de Arena = 0.00% Total = 0.00% Fracción Gruesa % de Grava = 0.00% % de Arena = 0.00% Total = 0.00% Coeficientes Cu = Cc = De Límites de Consistencia LL = LP = IP =
	GRAVAS CON FINOS Mas del 12% pasa la malla N° 200	IP < 4.6 abajo de la línea "A" en la carta de plasticidad IP > 7 y arriba de la línea "A" en la carta de plasticidad 4 ≤ IP ≤ 7 y arriba de la línea "A" en la carta de plasticidad	GW - GM GM GC - GM	
SUELOS DE PARTICULAS GRUESAS Más del 50% es retenido en la malla N° 200	GRAVAS LIMPIAS Y CON FINOS Entre el 5 y 12% pasa malla N° 200	GW - GM GW - GC GP - GM GP - GC	Grava bien graduada con limo Grava bien graduada con arcilla Grava mal graduada con limo Grava mal graduada con arcilla	
	ARENAS LIMPIAS Menos del 5% pasa la malla N° 200	Cumple los criterios para GW y GM Cumple los criterios para GW y GC o para GW y GC - GM Cumple los criterios para GP y GM Cumple los criterios para GP y GC o para GP y GC - GM $Cu \geq 6$ y $1 \leq Cc \leq 3$	SW SP	Arena bien graduada Arena mal graduada
ARENAS El 50% o más de la fracción gruesa pasa la malla N° 4	ARENAS CON FINOS Mas del 12% pasa la malla N° 200	IP < 4.6 abajo de la línea "A" en la carta de plasticidad IP > 7 y arriba de la línea "A" en la carta de plasticidad 4 ≤ IP ≤ 7 y arriba de la línea "A" en la carta de plasticidad	Arena limosa Arena arcillosa	
	ARENAS LIMPIAS Y CON FINOS Entre el 5 y 12% pasa malla N° 200	Cumple los criterios para SW y SM Cumple los criterios para SP y SM	SC - SM SW - SM SW - SC SP - SM SP - SC	Arena limosa arcillosa Arena bien graduada con limo Arena bien graduada con arcilla Arena mal graduada con arcilla
SUELOS DE PARTICULAS FINAS El 50% o más pasa la malla N° 200	LIMOS Y ARCILLAS Límite Líquido menor que 50	ML CL	Limo de baja plasticidad Arcilla de baja plasticidad	
	LIMOS Y ARCILLAS Límite Líquido 50 o mayor	CL - ML OL MH CH OH	Arcilla limosa Limo orgánico Arcilla orgánica Limo de alta plasticidad Arcilla de alta plasticidad Limo orgánico Arcilla orgánica	
SUELOS ALTAMENTE ORGÁNICOS	Principalmente materia orgánica de color oscuro	Pt	Turba	

d) Clasificación de suelos SUCS

	UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL
TESIS:	ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS EN EL APV. PICOL ORCOMPUGIO MEDIANTE LA ADICIÓN DE CAL AL 10% Y PUZOLANA VOLCANICA DE LA CANTERA DE RAQCHI AL 15, 25 Y 30% PARA SUB BASE DE VÍAS PAVIMENTADAS SEGÚN EL MANUAL DE CARRETERAS SUELOS, GEOLOGÍA, GEOTECNIA Y PAVIMENTOS.

RESPONSABLES: UBICACION: CALICATA:	JHERSON MAMANI GARCIA Y MARIO RAMIREZ RONDAN APV. PICOL ORCOMPUGIO C-01 Y C-02
FECHA: PROFUNDIDAD CALICATA: PROFUNDIDAD MUESTRA:	24/04/2019 1.50m 0.40m
DATOS DE LA MUESTRA	
CLASIFICACIÓN DE SUELOS SEGÚN AASHTO M - 145	

DATOS PARA CLASIFICACIÓN		
De Granulometría	De Límites de Consistencia	Otros Datos
% que pasa el tamiz Nº 10 = 0.00%	LL = NO PRESENTA	Tipo = Inorgánico
% que pasa el tamiz Nº 40 = 0.00%	LP = NO PRESENTA	
% que pasa el tamiz Nº 200 = 0.00%	IP = NO PRESENTA	

CLASIFICACIÓN GENERAL	MATERIALES GRANULARES (35% o menos pasa el tamiz Nº 200)						MATERIALES LIMO - ARCILLOSOS (más del 35% pasa el tamiz Nº 200)							
	A-1		A-3	A-2		A-4	A-5	A-6	A-7					
GRUPOS	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7		A-4	A-5	A-6	A-7	A-7-5	A-7-6
SUB - GRUPOS														
% que pasa el tamiz: Nº 10 Nº 40 Nº 200	50 máx. 30 máx. 15 máx.		51 mín. 10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.		36 mín.	36 mín.	36 mín.	36 mín.		
Características del material que pasa el tamiz Nº 40			No Plástico	40 máx. 10 máx.	41 mín. 10 máx.	40 máx. 11 mín.	41 mín. 11 mín.		40 máx. 10 máx.	41 mín. 10 máx.	40 máx. 11 mín.	41 mín. 11 mín.		
Límite Líquido	6 máx.								8 máx.	12 máx.	16 máx.	20 máx.		
Índice de Plasticidad	0	0	0											
Tipos de Material	Fragmentos de piedra grava y arena		Arena fina	Gravas, arenas limosas y arcillosas			Suelos limosos		Suelos arcillosos					



e) Clasificación de suelos AASTHO

	UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA	ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL
ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS EN EL APV. PÍCOLO ORCOMPUJIO MEDIANTE LA ADICIÓN DE CAL AL 10% Y PUZOLANA VOLCANICA DE LA CANTERA DE RAQCHI AL 15, 25 Y 30% PARA SUB BASE DE VÍAS PAVIMENTADAS SEGÚN EL MANUAL DE CARRETERAS SUELOS, GEOLOGÍA, GEOTECNIA Y PAVIMENTOS.	
DATOS DE LA MUESTRA	
RESPONSABLES:	JHERSON MAMANI GARCIA Y MARIO RAMIREZ RONDAN
UBICACION:	APV. PÍCOLO ORCOMPUJIO
CALICATA:	C-01 YC-02
FECHA:	24/04/2019
PROFUNDIDAD CALICATA:	1.50m
PROFUNDIDAD MUESTRA:	0.40m
CLASIFICACIÓN DE SUELOS SEGÚN AASTHO M - 145	
CLASIFICACIÓN AASTHO	
El Equipo Ideal de Compactación que recomienda la AASTHO para este tipo de suelo es:	
CLASIFICACIÓN AASTHO	
El Equipo Ideal de Compactación que recomienda la AASTHO para este tipo de suelo es:	

CÁLCULO DEL ÍNDICE DE GRUPO

F = 0.00	F = Porcentaje de partículas sólidas que pasan el tamiz Nº 200
w _L = 0.00	w _L = Límite líquido
Ip = 0.00	Ip = Índice de plasticidad

IG = 0.2a + 0.005ac + 0.01bd

a = F - 35	a = -35.00	==>	a = 0.00
b = F - 15	b = -15.00	==>	b = 0.00
c = w _L - 40	c = -40.00	==>	c = 0.00
d = Ip - 10	d = -10.00	==>	d = 0.00

IG = 0



e) Límites de Atterberg

	UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
	FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
	ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL
TESIS:	ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS EN EL APV. PICOL ORCOMPUGIO MEDIANTE LA ADICIÓN DE CAL AL 10% Y PUZOLANA VOLCANICA DE LA CANTERA DE RAQCHI AL 15, 25 Y 30% PARA SUB BASE DE VÍAS PAVIMENTADAS SEGÚN EL MANUAL DE CARRETERAS SUELOS, GEOLOGÍA, GEOTECNIA Y PAVIMENTOS.

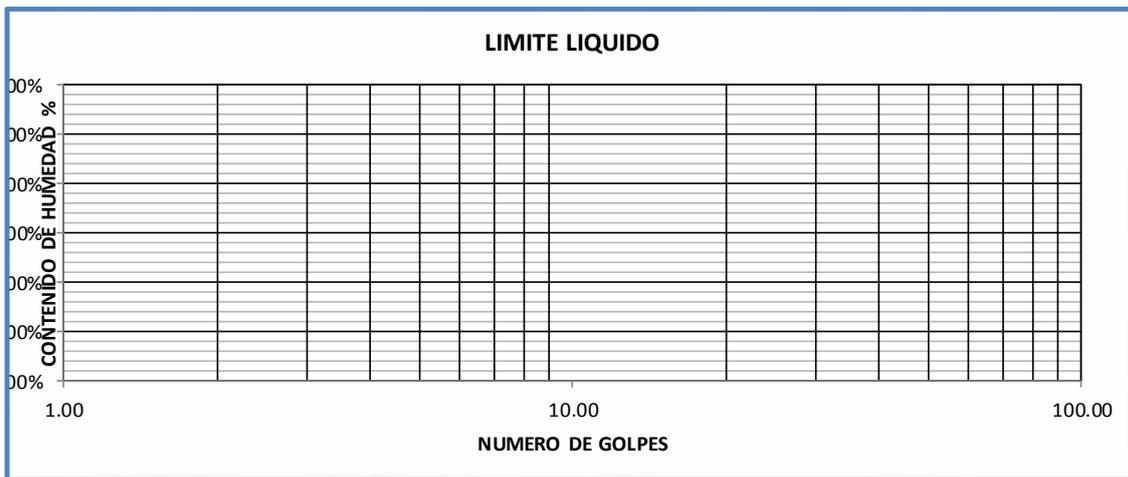
DATOS DE LA MUESTRA

RESPONSABLES:	JHERSON MAMANI GARCIA Y MARIO RAMIREZ ROND	FECHA:	26/04/2019
UBICACION:	APV. PICOL ORCOMPUGIO	PROFUNDIDAD CALICATA:	1.50m
CALICATA:	C-01 Y C-02	PROFUNDIDAD MUESTRA	0.40m

MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR EL LÍMITE LÍQUIDO, LÍMITE PLÁSTICO E ÍNDICE DE PLASTICIDAD DE SUELOS ASTM D 4318, AASHTO T 89

Determinación del límite líquido

TARA	1	2	3	4
PESO HUMEDO DE SUELO MAS TARA (gr)				
PESO SUELO SECO MAS TARA (gr)				
PESO TARA (gr)				
PESO SUELO SECO (gr)				
PESO AGUA (gr)				
CONTENIDO DE HUMEDAD %				
NUMERO DE GOLPES				



Determinación del límite plástico

TARA	5	6	7	8
PESO HUMEDO DE SUELO MAS TARA (gr)				
PESO SUELO SECO MAS TARA (gr)				
PESO TARA (gr)				
PESO SUELO SECO (gr)				
PESO AGUA (gr)				
CONTENIDO DE HUMEDAD %				



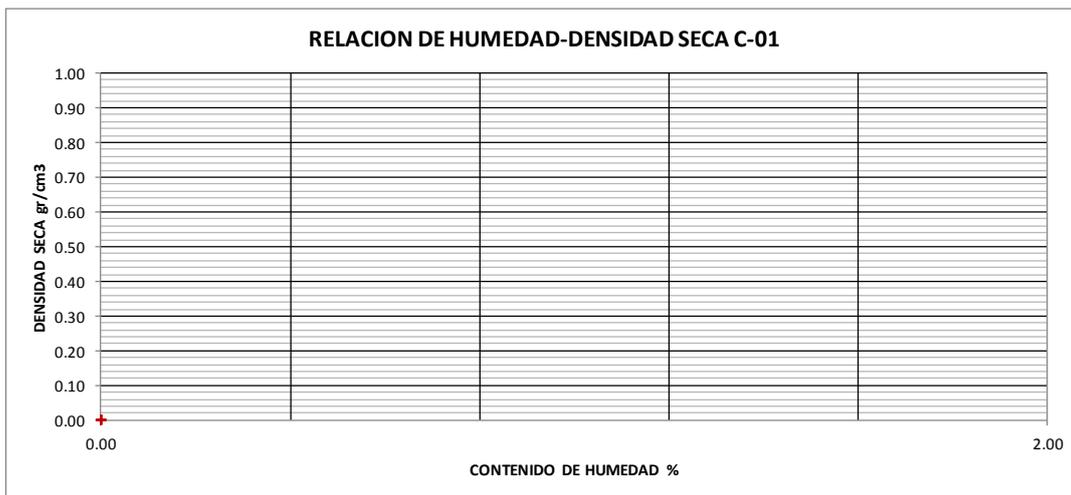
f) Ensayo de compactación de suelos de laboratorio utilizando energía modificada (Proctor Modificado)

	UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
	FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
	ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL
TESIS:	ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS EN EL APV. PICOL ORCOMPUGIO MEDIANTE LA ADICIÓN DE CAL AL 10% Y PUZOLANA VOLCANICA DE LA CANTERA DE RAQCHI AL 15, 25 Y 30% PARA SUB BASE DE VÍAS PAVIMENTADAS SEGÚN EL MANUAL DE CARRETERAS SUELOS, GEOLOGÍA, GEOTECNIA Y PAVIMENTOS.

DATOS DE LA MUESTRA			
RESPONSABLES:	JHERSON MAMANI GARCIA Y MARIO RAMIREZ RONDAN	FECHA:	26/04/2019
UBICACION:	APV. PICOL ORCOMPUGIO	PROFUNDIDAD CALICATA:	1.50m
CALICATA:	C-01 Y C-02	PROFUNDIDAD MUESTRA:	0.40m

COMPACTACIÓN DE SUELOS EN LABORATORIO UTILIZANDO ENERGIA MODIFICADA (PROCTOR MODIFICADO) MEDIANTE LAS NORMAS ASTM D 1557, AASHTO T 180

Metodo de ensayo											
Ensayo N°											
Número de Capas											
Golpes de Pisón por Capa											
N° Molde											
Peso suelo húmedo + molde	gr										
Peso molde + base	gr										
Peso suelo húmedo compactado	gr										
Volumen del molde	cm3										
Densidad humeda compactado	gr/cm3										
Peso de Tara	gr										
Peso del suelo húmedo+tara	gr										
Peso del suelo seco + tara	gr										
Peso de agua	gr										
Peso del suelo seco	gr										
Contenido de humedad	%										
Contenido de humedad promedio	%										
Densidad seca compactado	gr/cm3										



DENSIDAD MAXIMA SECA (gr/cm3)	
CONTENIDO DE HUMEDAD OPTIMO (%)	



g) Ensayo de Relación Soporte California (CBR)

	UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO										
	FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA										
	ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL										
TESIS:	ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS EN EL APV. PICOL ORCOMPUGIO MEDIANTE LA ADICIÓN DE CAL AL 10% Y PUZOLANA VOLCANICA DE LA CANTERA DE RAQCHI AL 15, 25 Y 30% PARA SUB BASE DE VÍAS PAVIMENTADAS SEGÚN EL MANUAL DE CARRETERAS SUELOS, GEOLOGÍA, GEOTECNIA Y PAVIMENTOS.										
ENSAYO RELACION DE SOPORTE CALIFORNIA (CBR)											
MTC E 132 - 2016, Basado en la norma ASTM D-1883 Y AASHTO T-193											
ENSAYO CON SUELO NATURAL											
DATOS GENERALES											
Muestra: Arcilla					Peso de Martillo: 4.54 kg						
Densidad Seca Maxima: 2.035 gr/cm3					Altura de Caída del Martillo: 45.72 cm						
Contenido Optimo de Humedad: 14.81%					Numero de Capas a Compactar: 5						
Area de Piston: 19.32 cm2					Altura de Disco Espaciador: 5.1 2cm						
DATOS DE LOS MOLDES											
			MUESTRA 1			MUESTRA 2			MUESTRA3		
Volumen Neto de Molde (cm3)											
Altura Neta de Molde (cm)											
Numero de Golpes por Capa											
Peso de Molde (gr)											
DATOS DE ENSAYO DE ABSORCION											
			MUESTRA 1			MUESTRA 2			MUESTRA 3		
Peso de Molde + Muestra Compactada antes de sumergir (gr)											
Peso de Molde + Muestra Compactada despues de sumergir (gr)											
Peso de Agua Absorbida (gr)											
Peso de Muestra Compactada antes de sumergir (gr)											
Peso de Muestra Compactada despues de sumergir (gr)											
Densidad Humeda (gr/cm3)											
CONTENIDO DE HUMEDAD											
ANTES DE SUMERGIR											
Peso Capsula (gr)											
Peso Capsula + Muestra Humeda (gr)											
Peso Capsula + Muestra Seca (gr)											
Peso de Agua (gr)											
Peso de Muestra Seca (gr)											
Contenido de Humedad											
Densidad Seca (gr/cm3)											
DESPUES DE SUMERGIR											
			ARRIBA		ABAJO		ARRIBA		ABAJO		
Peso de Capsula											
Peso Capsula + Muestra Humeda (gr)											
Peso Capsula + Muestra Seca (gr)											
Peso de Agua (gr)											
Peso de Muestra Seca (gr)											
Contenido de Humedad											
Contenido de Humedad Promedio											
Porcentaje de Humedad Absorbida											
DATOS DE ENSAYO DE EXPANCIION											
		MUESTRA 1			MUESTRA 2			MUESTRA3			
TIEMPO ACUMULADO		DIAL		EXPANCIION		DIAL		EXPANCIION		DIAL	EXPANCIION
(Hs)	(Dias)	*0.001*	(mm)	(%)	*0.001*	(mm)	(%)	*0.001*	(mm)	(%)	
24	1	126.00			133.00			257.20			
48	2	213.00			239.00			388.20			
72	3	255.00			276.00			422.20			
96	4	289.0			306.0			459.2			
DATOS ENSAYO DE PENETRACION											
		MUESTRA 1			MUESTRA 2			MUESTRA 3			
PENETRACION		Carga Unitaria Patron (kg/cm2)	Carga (KN)	Carga (kg)	Esfuerzo (kg/cm3)	CBR (%)	Carga (KN)	Carga (kg)	Esfuerzo (kg/cm3)	CBR (%)	
(mm)	(pulg)										
0.00	0.000										
0.64	0.025										
1.27	0.050										
1.91	0.075										
2.54	0.100	70.31									
3.18	0.125										
3.81	0.150										
5.08	0.200	105.46									
7.62	0.300										
10.16	0.400										
12.70	0.500										