

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE LOS MÉTODOS DE ESTABILIZACIÓN
POR SUSTITUCIÓN Y POR ADICIÓN DE CAL DE OBRA, PARA EL
MEJORAMIENTO DE UNA SUBRASANTE ARCILLOSA EN LA
CARRETERA CANTA - HUAYLLAY KM 57-59**

Tesis para obtener el título profesional de Ingeniera Civil

AUTORA:

Rosario Ccansaya Maldonado

Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Civil

AUTOR:

Alberto Jesus Tello Vargas

ASESOR:

Juan Pablo Zamora Beyk

Lima, agosto, 2022

RESUMEN

Los suelos arcillosos blandos son un problema para la industria de la construcción debido a su alta plasticidad y baja capacidad portante. Para mejorar estas condiciones existen diversas metodologías de carácter mecánico y químico. Estas últimas logran incrementar la resistencia, trabajabilidad y durabilidad del suelo empleando aditivos durante el proceso de estabilización. Para el caso del estudio escogido, carretera Canta Huayllay Km 57 – 59, el expediente técnico del proyecto propone un mejoramiento de subrasantes por el método de sustitución de suelos. Dicha alternativa pretende ser evaluada en la presente tesis comparándola con una propuesta de estabilización química con cal de obra, debido a que experiencias previas demuestran una mejora significativa en el comportamiento físico-mecánico de arcillas blandas mezcladas con cal. Por tal motivo, el objetivo de la presente tesis es estudiar el comportamiento de la mezcla suelo-cal de obra para ser empleada como subrasante de pavimento flexible, considerando la metodología de la National Lime Association (NLA). También, se analizan los cambios en los parámetros de consistencia y resistencia de la mezcla suelo-cal de obra con respecto al suelo natural. Por otro lado, se diseña un pavimento flexible empleando mejoramiento de subrasante por sustitución y por adición de cal de obra para un posterior análisis de espesores de las capas del pavimento. Se demuestra que se obtienen mejores resultados en todos los parámetros mencionados tras la adición de cal de obra a suelos arcillosos blandos en comparación de una estabilización mecánica por sustitución.

AGRADECIMIENTOS

En primera instancia, agradecer a mis padres por darme la oportunidad de estudiar en esta prestigiosa universidad y apoyarme en cada una de mis decisiones a lo largo de mi vida universitaria. Agradecer también a nuestro asesor de tesis por habernos guiado en la realización de la presenta investigación. Finalmente, a la universidad y sus autoridades por brindarme diversas oportunidades para mi crecimiento profesional como personal.

Rosario Ccansaya Maldonado

A mis padres por acompañarme en este largo camino. Ellos me han enseñado que con perseverancia y esfuerzo puedes lograr todo lo que te propones. También a los amigos que he conocido en toda mi vida universitaria, quienes han hecho amena esta etapa de mi vida. Hemos compartido varios momentos tanto en el ámbito académico como en lo personal. Para mí, son la familia que he formado en esta mi querida Alma Mater. Mi mayor gratitud para mí asesor de tesis quién siempre estuvo dispuesto a guiarnos y orientarnos en la redacción de este documento.

Alberto Jesus Tello Vargas

ÍNDICE

RESUMEN	i
AGRADECIMIENTOS	ii
ÍNDICE	iii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vi
ÍNDICE DE TABLAS	vii
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Justificación.....	1
1.3. Objetivos	2
1.4. Alcance.....	3
1.5. Hipótesis.....	3
1.6. Metodología	3
2. MARCO TEÓRICO	6
2.1. Pavimentos	6
2.1.1. Pavimento Flexible	7
2.1.2. Pavimento rígido	8
2.1.3. Diferencias entre pavimentos rígidos y flexibles.....	9
2.2. Comportamiento de subrasante conformada por suelos arcillosos	11
2.3. Estabilización de suelos arcillosos	12
2.3.1. Estabilización por sustitución de suelos	13
2.3.2. Estabilización con aditivos químicos	14
2.4. La cal en el tratamiento de suelos arcillosos	15
2.4.1. Definición y procedencia de la cal.....	15
2.4.2. Tipos de cales de construcción	16
2.4.3. El ciclo de las cales cálcicas	17
2.4.4. La química del tratamiento de la cal hidratada	19
2.4.5. Efectos de la aplicación de la cal hidratada sobre suelos arcillosos blandos parcialmente saturados	22
2.4.6. Factores que afectan la estabilización con cal hidratada	25
3. ESTADO DEL ARTE	27
3.1. Empleo de la cal a través del tiempo	27

3.2.	Avances tecnológicos en el empleo de tratamiento de suelos con cal	27
3.3.	Metodologías para el diseño de suelos arcillosos con cal	30
3.3.1.	Metodología propuesta por la National Lime Association	32
3.3.2.	CE.20 Estabilización de suelos y taludes.....	35
3.3.3.	Manual de carreteras: Suelos, geología, geotecnia y pavimentos.....	36
4.	DESCRIPCIÓN DEL LUGAR DE ESTUDIO	37
4.1.	Proyecto de carretera Canta-Huayllay.....	37
4.2.	Ubicación de la carretera.....	38
4.3.	Problemática y solución	40
4.4.	Tramo de estudio.....	40
4.5.	Estudio de mecánica de suelos.....	41
4.6.	Estudio de tráfico	43
4.7.	Estudio hidrológico	43
5.	MEJORAMIENTO DE UN SUELO ARCILLOSO TRATADO CON CAL DE OBRA.....	45
5.1.	Regulación de la cal en el Perú	45
5.2.	Determinación del porcentaje óptimo de cal de obra.....	46
5.3.	Determinación de los límites de consistencia	51
5.4.	Determinación de la variación de la resistencia del suelo.....	53
5.5.	Parámetros de diseño de pavimentos con adición de una mezcla de cal de obra.....	54
6.	DISEÑO DEL PAVIMENTO FLEXIBLE	56
6.1.	Metodología de diseño ASSHTO 1993.....	56
6.1.1.	Cálculo de variables independientes.....	58
6.1.2.	Cálculo de variables dependientes.....	60
6.2.	Diseño de pavimento flexible con mejoramiento de subrasante.....	63
6.2.1.	Mejoramiento de subrasante por sustitución.....	63
6.2.2.	Mejoramiento de subrasante por adición de cal de obra.....	65
7.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	66
7.1.	Ensayo Eades y Grim	67
7.2.	Ensayo de límites de consistencia	68
7.3.	Resistencia de suelo	69

7.3.1.	Cuantificación del aumento de resistencia con ensayos C.B.R.	70
7.3.2.	Cuantificación del aumento de resistencia con ensayos de compresión simple	71
7.4.	Comparación de las capas del pavimento	72
8.	CONCLUSIONES.....	73
8.1.	Conclusiones	73
8.2.	Comentarios	76
8.3.	Recomendaciones.....	78
9.	BIBLIOGRAFÍA.....	80

ANEXOS

1. Diseño de Pavimentos
2. Ensayos de Laboratorio
 - 2.1. Ensayos Estándar de Clasificación
 - 2.2. Ensayos Proctor Estándar
 - 2.3. Ensayos California Bearing Ratio C.B.R.
 - 2.4. Ensayos Compresión No Confinada
3. Registro fotográfico

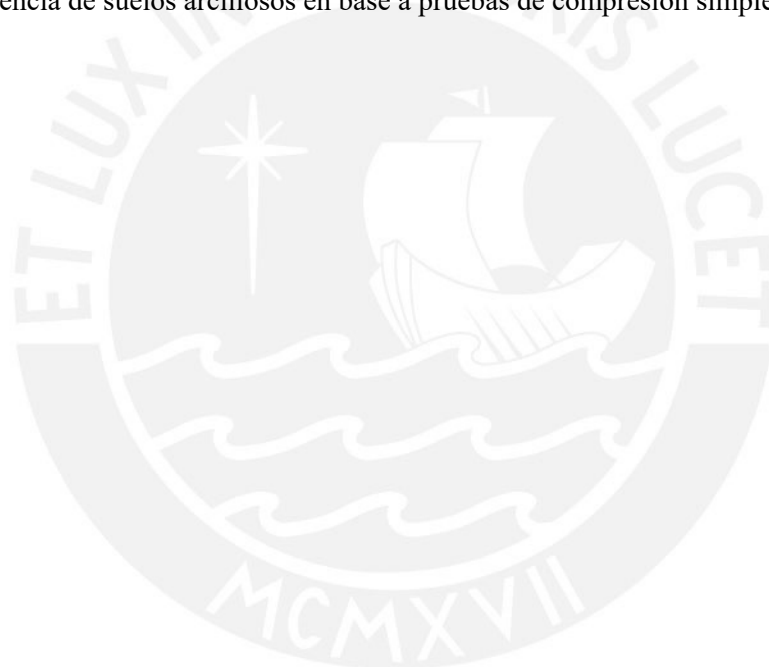
ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama de flujo metodológico	5
Figura 2: Estructura típica de un pavimento flexible	7
Figura 3: Distribución de cargas en un pavimento flexible	7
Figura 4: Estructura típica de un pavimento rígido.....	8
Figura 5: Distribución de cargas en un pavimento rígido	9
Figura 6: Proceso de selección del tipo de estabilización	13
Figura 7: Clasificación de las cales en la construcción.....	16
Figura 8: Ciclo de la cal cálcica	17
Figura 9: Proceso de reacción del ciclo de la cal cálcica.....	18
Figura 10: Arcilla con consistencia granular luego de una estabilización con cal.....	20
Figura 11: Arcilla antes y después de una estabilización con cal	23
Figura 12: Reducción del índice de plasticidad de una arcilla tratada con cal.....	23
Figura 13: Modificación de las características de compactación de un suelo tratado con cal	24
Figura 14: Tratamiento de suelos según el contenido de sulfatos.....	26
Figura 15: Intercambio iónico.....	28
Figura 16: Resistencia a la compresión simple de muestras tratadas con cal hidratada	29
Figura 17: Evaluación del límite líquido.....	32
Figura 18: Ejemplos de pruebas de pH	32
Figura 19: Fabricación de muestras para el ensayo Proctor estándar	33
Figura 20: Acondicionamiento de probetas	34
Figura 21: Ensayo de compresión simple	34
Figura 22: Laguna ubicada en la carretera Canta - Huayllay.....	37
Figura 23: Ubicación de la carretera Canta-Huayllay a nivel departamental	38
Figura 24: Ubicación de la carretera Canta-Huayllay a nivel regional y distrital.....	39
Figura 25: Tramo de la carretera con problema de deterioro por acumulación de agua.....	40
Figura 26: Tramo de estudio	41
Figura 27: Perfil del tramo analizado de la carretera	42
Figura 28: Variación del pH para diversas cantidades de cal de obra.....	48
Figura 29: Variación del pH para diversos porcentajes de cal de obra	49
Figura 30: Variación del pH para diversos porcentajes de cal hidráulica	50
Figura 31: Variación de los límites de consistencia para la mezcla suelo - cal de obra	51
Figura 32: Variación de los límites de consistencia para la mezcla suelo - cal hidráulica	52
Figura 33: Espesores en cm de capas mejoradas por sustitución y por adición de cal viva.....	72

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Diferencias entre pavimentos flexibles y rígidos.....	10
Tabla 2: Rangos de valores de C.B.R. según la categoría de subrasante.....	12
Tabla 3: Tipo de estabilizadores recomendados para suelos finos (arcillas y limos).....	14
Tabla 4: Diferencias entre la cal viva y la cal hidratada.....	19
Tabla 5: Clasificación de suelos según su índice de plasticidad.....	25
Tabla 6: Metodologías para el diseño de suelos arcillosos tratados con cal.....	31
Tabla 7: Ubicación de los tramos de la carretera Canta-Huayllay.....	39
Tabla 8: Espesor de mejoramiento según el índice de plasticidad.....	41
Tabla 9: Parámetros del suelo analizado.....	42
Tabla 10: Cálculo del número total de ejes equivalentes.....	43
Tabla 11: Características climáticas del área de estudio.....	44
Tabla 12: Regulación de la cal en el Perú.....	45
Tabla 13: Equivalencia en peso de la pureza de la cal de obra.....	47
Tabla 14: Medición de pH para diversas cantidades de cal de obra.....	47
Tabla 15: Medición de pH para diversos porcentajes de cal de obra.....	48
Tabla 16: Equivalencia en peso de la pureza de la cal hidráulica.....	50
Tabla 17: Medición de pH para diversos porcentajes de cal hidráulica.....	50
Tabla 18: Límites de consistencia para la mezcla suelo – cal de obra.....	51
Tabla 19: Límites de consistencia para la mezcla suelo – cal hidráulica.....	52
Tabla 20: Resultados de C.B.R. al 95% y 100% de la M.D.S de mezcla con cal de obra.....	53
Tabla 21: Resultados de Compresión simple de probetas de suelo mezcladas con cal de obra.....	54
Tabla 22: Resultados de Compresión simple y módulo de resiliencia de probetas de suelo mezcladas con cal de obra.....	55
Tabla 23: Temperatura máxima y mínima por estación meteorológica.....	56
Tabla 24: Recomendaciones para la duración del periodo de análisis.....	58
Tabla 25: Valores sugeridos de confiabilidad.....	59
Tabla 26: Valores de desviación estándar normal (Z_R) para diferentes valores de confiabilidad.....	59
Tabla 27: Valores sugeridos de P_t en base a valores de ADT.....	60
Tabla 28: Coeficientes estructurales para carpeta asfáltica.....	61
Tabla 29: Coeficientes estructurales para bases.....	61
Tabla 30: Coeficientes estructurales para subbases.....	62
Tabla 31: Valores recomendados del Coeficiente de Drenaje m_i para Bases y Subbases granulares no tratadas en Pavimentos Flexibles.....	62
Tabla 32: Consideraciones de diseño para pavimento flexible con mejoramiento por sustitución de subrasante.....	63
Tabla 33: Variables independientes empleadas en el diseño del pavimento.....	64

Tabla 34: Coeficientes estructurales y de drenaje empleados en el diseño del pavimento	64
Tabla 35: Espesores resultantes para el diseño del pavimento flexible por mejoramiento por sustitución de subrasante	65
Tabla 36: Variables independientes empleadas en el diseño del pavimento.....	66
Tabla 37: Espesores resultantes para el diseño del pavimento flexible por mejoramiento por adición de cal viva.....	66
Tabla 38: Resumen de máximos valores de pH	67
Tabla 39: Resumen de resultados del ensayo de límites de consistencia.....	68
Tabla 40: Resultados de Compresión Simple y C.B.R. de probetas de suelo mezcladas con cal de obra	70
Tabla 41: Evaluación de la resistencia para la subrasante mejorada por sustitución	70
Tabla 42: Rangos de valores de C.B.R. según la categoría de subrasante para el suelo analizado.....	70
Tabla 43: Consistencia de suelos arcillosos en base a pruebas de compresión simple	72



1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

En proyectos de obras civiles, como carreteras, se suelen encontrar suelos que no cumplen con los requerimientos mínimos para construir sobre ellos. Tal es el caso de las arcillas con un alto índice de plasticidad. Este tipo de suelo presenta variaciones volumétricas ocasionadas por cambios en su contenido de humedad, lo que genera reducciones en su cohesión y da como resultado una disminución en su capacidad para resistir las cargas recurrentes de tránsito.

Con el motivo de mejorar estas condiciones; en los últimos años se han investigado, normado y utilizado diversos aditivos para el mejoramiento de suelos arcillosos. Específicamente, en el contexto peruano, la norma de “Estabilización de suelos y taludes”: CE. 020, menciona que los aditivos normados en el país para el mejoramiento de estos suelos son los siguientes: “cal, cemento, escoria, cloruro de sodio, cloruro de calcio, cloruro de magnesio y productos asfálticos” (Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento [MVCS], 2012). En el presente trabajo de tesis, se optó por emplear la cal como estabilizante para el suelo arcilloso del caso de estudio. Sin embargo, el rango de porcentajes de cal a emplear indicado en la normativa peruana (CE.020, 2012) resulta ser muy amplio debido a la variabilidad del comportamiento de las arcillas.

Se han registrado diversos estudios en los países de Latinoamérica respecto a la estabilización de suelos con cal. Esto con finalidad de realizar una mayor delimitación de los porcentajes óptimos de cal a emplear. En el Perú, por ejemplo, se han realizado investigaciones respecto al tema en los departamentos de Cajamarca (Jara, 2014), Junín (Cuadros, 2017), Ayacucho (Mamani, 2017) y Lima (Chávez, 2019). Sin embargo, en estas investigaciones no se especifica el grado de pureza de la cal empleada, parámetro importante al analizar el comportamiento de la mezcla suelo-cal.

1.2. Justificación

El proyecto de carretera Canta - Huayllay tiene como objetivo conectar a los departamentos de Lima, Junín y Huánuco, a lo largo de los 95 km de su recorrido. Particularmente, el tramo de estudio situado entre los kilómetros 57 y 59 se encuentra ubicado en la región nor-oeste de Junín a 4500 m.s.n.m (Consortio CESEL - Cal y Mayor, 2018a). Esta zona está conformada,

principalmente, por suelos arcillosos de elevado porcentaje de saturación, producto del contacto con las constantes lluvias, bofedales y lagunas características de esta región. La combinación de estos factores ocasiona que el suelo pierda consistencia y se comporte de forma plástica, reduciendo sus propiedades físico-mecánicas e impidiendo su empleo como capa de subrasante del pavimento. La solución comúnmente escogida implica la remoción del suelo y sustitución por un material de mayor resistencia, alternativa que genera un elevado costo cuando la cantera de agregado es muy lejana (National Lime Association [NLA], 2005). En la propuesta de diseño de la carretera Canta – Huayllay, se contempla esta alternativa de mejoramiento, por lo que esta tesis buscó proponer otro método para estabilizar suelos arcillosos en proyectos viales del país. Experiencias previas tales como la construcción del aeropuerto internacional de la ciudad de México (NAICM) demuestran que realizar una estabilización química con cal de alto porcentaje de óxido de calcio (cal viva) o hidróxido de calcio (cal hidratada) produce una disminución en el espesor del pavimento y una mejora en la durabilidad a largo plazo de esta estructura (NLA, 2005). No obstante, en el contexto peruano, el porcentaje de cal presente en los productos comerciales está regulado por la Superintendencia Nacional de Aduanas y de Administración Tributaria (SUNAT), no debiendo exceder a 40%. Por lo tanto, en la presente tesis se optó por emplear cal de obra, producto que contiene un porcentaje en el rango de 3 – 15% de cal hidratada.

1.3. Objetivos

Objetivo general:

- Estudiar el comportamiento de la cal para ser empleada como aditivo estabilizante del suelo arcilloso seleccionado y su posterior empleo como capa de subrasante en el pavimento flexible diseñado

Objetivos específicos:

- Identificar los porcentajes de cal que permitan que el suelo arcilloso analizado cumpla con las especificaciones técnicas de una subrasante
- En base a los porcentajes de cal identificados y al tipo de suelo empleado, evaluar la mejora del módulo de resiliencia (M_r), por medio de ensayos C.B.R. y de compresión simple

- Realizar el diseño de la carretera con el Mr mejorado por sustitución y por adición de cal viva
- Comparar las propuestas de estabilización de suelos por sustitución y por adición de cal viva en el tramo ubicado entre los kilómetros 57 y 59 de la carretera analizada

1.4. Alcance

En la presente investigación, se evalúa el comportamiento del suelo arcilloso mezclado con cal de obra, proponiendo el mínimo porcentaje de cal que permita mejorar la subrasante del pavimento en el tramo ubicado entre los km 57 - 59 de la carretera Canta - Huayllay. Finalmente, se realiza una comparación entre las propuestas de diseño de un pavimento flexible mejorado por sustitución y estabilizado químicamente con cal de obra.

1.5. Hipótesis

La adición de cal mejora significativamente el comportamiento físico-mecánico de las arcillas blandas características del noroeste de la región Junín permitiendo su empleo como capa de subrasante en un pavimento flexible.

1.6. Metodología

Para la presente investigación se tuvieron que realizar las siguientes actividades:

ACT.1 Búsqueda bibliográfica

T.1 Revisión del estado del arte sobre los factores más influyentes en la preparación de la mezcla cal – arcilla y la verificación del porcentaje óptimo cal

T.2 Revisión de estudios de mecánica de suelos (EMS) de proyectos de construcción, cercanos a la zona a estudiar, para obtener antecedente de las propiedades del suelo a analizar

ACT.2 Trabajos preliminares

T.1 Búsqueda de expedientes técnicos

T.2 Elección de la carretera de estudio

T.3 Selección de un tramo de carretera con suelo que cumpla con los requerimientos para ser mejorado con cal

T.4 Visita de campo para verificar las condiciones de la vía en la zona de estudio

ACT.3 Caracterización del suelo seleccionado en base al EMS

T.1 Resumir las propiedades granulométricas, propiedades índices y plasticidad del suelo

T.2 Clasificar el suelo de acuerdo con la normativa AASHTO M 145-91 (AASHTO,2017)

T.3 En base a los resultados de ensayos de laboratorio definir el valor del índice C.B.R. del suelo natural de acuerdo con normativa ASTM D-1883 (ASTM, 2016)

T.4 Analizar e interpretar los resultados

ACT.4 Diseño de un pavimento flexible con subrasante mejorada por sustitución de suelos

T.1 Selección de los parámetros de diseño en base al EMS, estudio hidrológico y el estudio de tráfico

T.2 Diseño metodológico de un pavimento según normativa AASHTO 1993

ACT.5 Diseño de un pavimento flexible con subrasante mejorada con cal de obra

T.1 Evaluación dosificación mínima de la mezcla suelo cal de obra

T.2 Selección de los parámetros de diseño

T.3 Diseño metodológico de un pavimento mejorado con cal según normativa AASHTO 1993

ACT.6 Discusión de resultados

T.1 Evaluación del porcentaje mínimo de cal de obra para la mejora de la subrasante

T.2 Evaluación de la mejora de los límites de consistencia

T.3 Comparación del aumento de la resistencia de la mezcla suelo-cal de obra con respecto al suelo natural

T.4 Comparación entre el dimensionamiento de las capas del pavimento

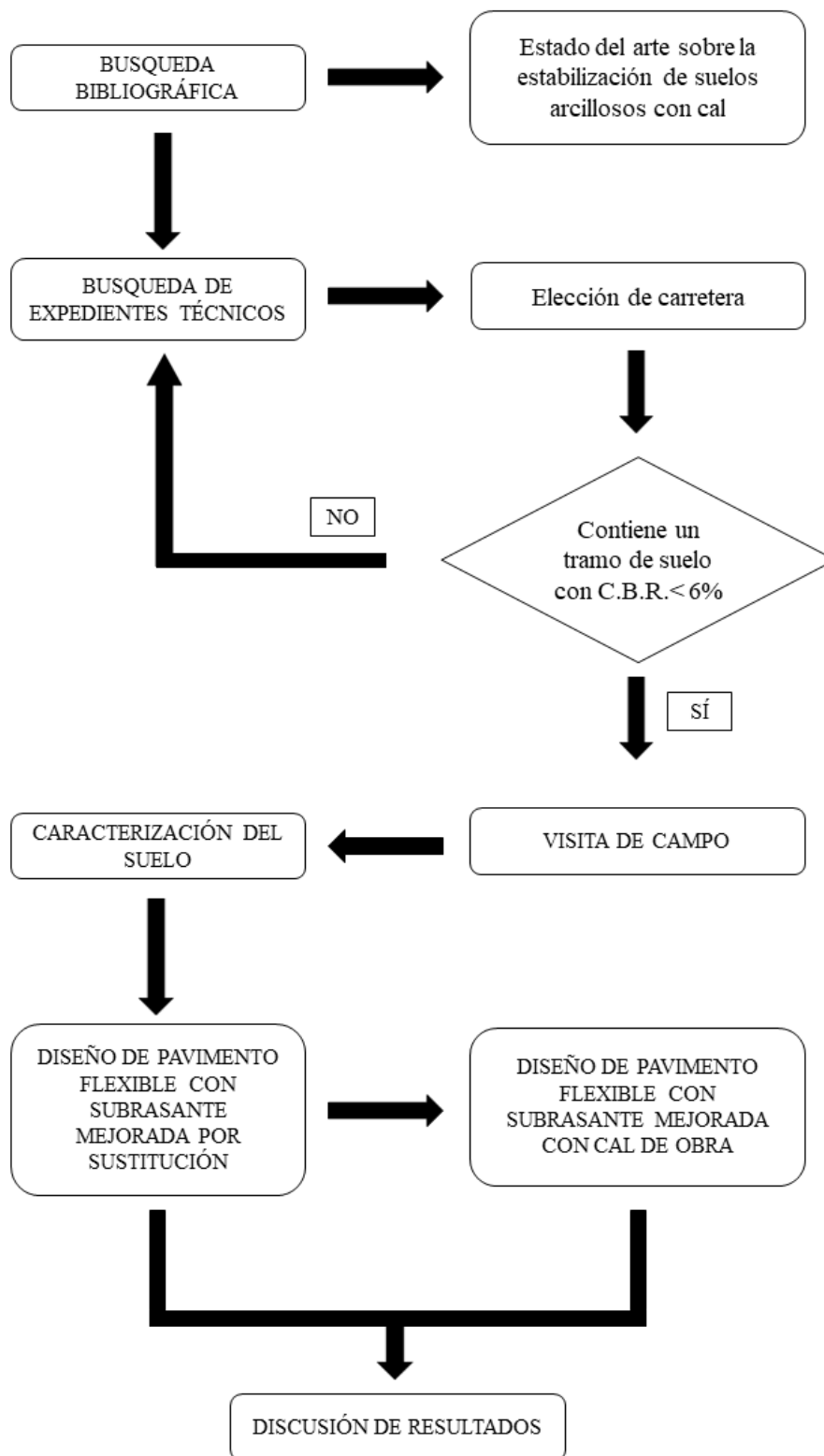


Figura 1: Diagrama de flujo metodológico

2. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se describen las características de los tipos de pavimentos y la influencia de sus capas en el comportamiento de estas estructuras. Además, se exponen las problemáticas de construir pavimentos sobre suelos arcillosos blandos, algunos tipos de tratamientos para solucionar estas dificultades y, finalmente, se presenta la propuesta de mejoramiento de suelos con cal, describiendo las mejoras y dificultades que se obtienen con el empleo de este método.

2.1. Pavimentos

Se denomina pavimento a aquella estructura formada por capas colocadas una tras otra de forma relativamente horizontal, construidas con materiales seleccionados y correctamente compactados (Montejo, 2002). Los elementos estructurales que constituyen los pavimento son: la capa de rodadura, la base, la subbase y la subrasante. El estrato superior de la estructura, denominado superficie de rodadura, recibe de forma directa las cargas repetitivas generadas por las cargas vehiculares, las cuales son transmitidas a los estratos inferiores hasta llegar a la capa de subrasante mejorada (cimiento de la estructura). En el diseño, las solicitaciones de carga y las características del suelo son las que definen las propiedades y el tipo de pavimento que se construirá de tal forma que sea funcional. Por lo tanto, esta estructura debe cumplir con los requerimientos de ser: resistente a las cargas de tránsito, segura, confortable para los usuarios y económica tanto en su construcción como en su mantenimiento (MVCS, 2012).

El “Manual de carreteras: suelos, geología, geotecnia y pavimentos del Perú” (Ministerio de Transporte y Comunicaciones [MTC], 2013), clasifica a los pavimentos en 3 tipos. Los primeros denominados pavimentos flexibles caracterizados por poseer una carpeta superficial de asfalto, luego los pavimentos rígidos conformados por una capa superficial de concreto y finalmente, los semirrígidos conformados por una capa de adoquines. Para fines prácticos, el presente trabajo sólo abordó la descripción de los dos primeros tipos de pavimentos mencionados.

2.1.1. Pavimento Flexible

Este tipo de pavimento es llamado flexible debido a que posee una capa superficial de asfalto de poca rigidez que se pandea producto de los constantes ciclos de carga vehicular (Ara, 2015). Suele presentar bajo costo de construcción, pero al requerir mantenimiento constante, el monto total de inversión de estas vías aumenta a lo largo de su vida útil (Torres, 2007). En cuanto a su estructura, este tipo de pavimento está conformado principalmente por 3 capas: carpeta, base y subbase (**Figura 2**), de las cuales se dará mayor detalle en las siguientes líneas:



Figura 2: Estructura típica de un pavimento flexible (Ortiz, 2017)

La carpeta de rodadura está conformada por un material bituminoso (asfalto) que sirve como superficie de rodamiento. Este estrato, estructuralmente, soporta las cargas horizontales y solo una fracción de las cargas verticales debido a que estas últimas son transmitidas a las capas inferiores como se muestra en la **Figura 3** (Jain, 2016).

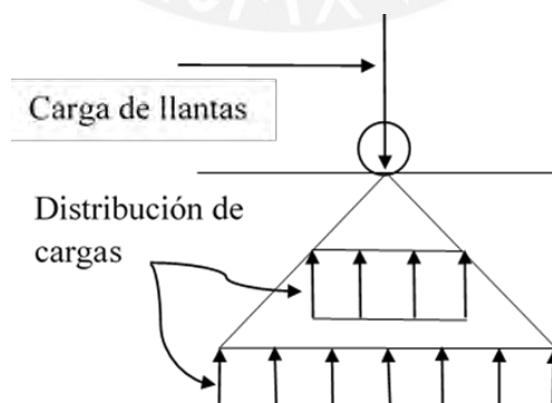


Figura 3: Distribución de cargas en un pavimento flexible (Jain, 2016)

El estrato inferior a la carpeta asfáltica, llamado base, está formado por material granular drenante con la función de “transmitir, sostener y distribuir las cargas de tránsito” (MTC, 2013). Este estrato soporta la mayor cantidad de cargas del terreno por lo que suele tener valores de C.B.R. mayores a 80 %. En los casos en los que las solicitaciones del tránsito sean muy grandes será necesario utilizar bases granulares cementadas en vez de las tradicionales. Por otro lado, la subbase cumple la función de servir como capa drenante y controlar la capilaridad del agua (MTC, 2013). Suele estar formada por materiales granulares con valores de C.B.R. mayores que 40 % y puede obviarse si el diseño del pavimento no lo requiere. Finalmente, se encuentra el estrato de subrasante; es decir, el suelo natural compactado. Este deberá ser capaz de soportar las cargas transmitidas por el tránsito, por lo que deberá presentar una propuesta de mejoramiento de requerirse el caso.

2.1.2. Pavimento rígido

El pavimento rígido se compone principalmente de dos capas superpuestas, sobre las que se coloca una losa de concreto, como se muestra en la **Figura 4**.

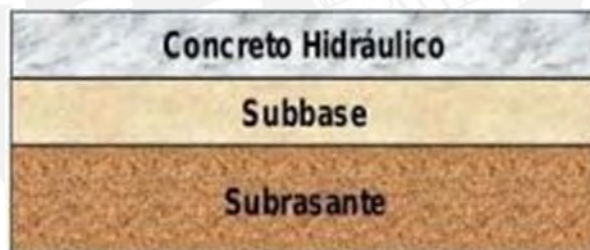


Figura 4: Estructura típica de un pavimento rígido
(Ortiz, 2017)

Debido a las características del estrato de concreto hidráulico, como lo son su elevado coeficiente de elasticidad y rigidez, las cargas de las solicitaciones del tránsito son distribuidas en una superficie amplia y de manera casi uniforme que para los cálculos es aproximado es modelado como una distribución uniforme y rectangular (Montejo, 2002) (**Figura 5**).

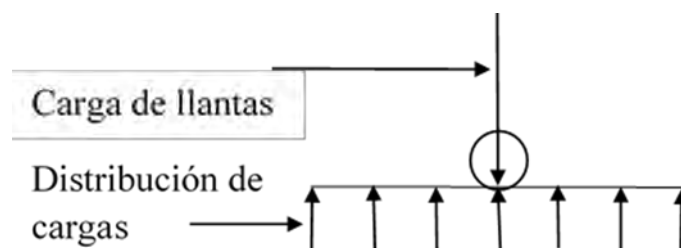


Figura 5: Distribución de cargas en un pavimento rígido
(Jain, 2016)

En este tipo de estructura, la resistencia de la losa de concreto es el principal factor que define la capacidad estructural del pavimento rígido. Por lo tanto, se puede decir, que el pavimento rígido tendrá un comportamiento adecuado cuando se presenten zonas débiles en el cimiento o subrasante.

En este caso, la base granular no influye en gran medida para determinar el espesor del pavimento ni le ofrece resistencia significativa. Sin embargo, cumple diversas funciones que ayudan al pavimento rígido en su durabilidad. Su principal función consiste en impedir que existan fugas de mezclas de material fino más agua en las grietas, juntas y extremos del pavimento.

2.1.3. Diferencias entre pavimentos rígidos y flexibles

Cuando se requiere la construcción de infraestructuras viales, surge la necesidad de evaluar el tipo de pavimento a emplear según las características del terreno, las solicitaciones de tránsito, el clima y el uso que se le dará. Para cubrir tales requerimientos será necesario conocer las diferencias entre ambos tipos de pavimentos. La **Tabla 1** resume las principales diferencias existentes entre pavimentos flexibles y rígidos, mencionando los casos en los cuales la construcción de uno u otro resulta más favorable.

Tabla 1: Diferencias entre pavimentos flexibles y rígidos

(UNIFORT, 2017)

	Pavimentos flexibles	Pavimentos rígidos
Puesta en servicio	La colocación de asfalto es inmediata	La capa de concreto requiere varios días de fraguado
Uso	Mejor funcionamiento cuando se proyecta una gran cantidad de circulación de vehículos	Mejor funcionamiento bajo tráfico medio y pesado
Durabilidad	Tiempos de vida promedio de 15 años	Tiempos de vida promedios de 30 años
Absorción de esfuerzo	Buena parte del esfuerzo se transmite al suelo	La losa de hormigón absorbe todo el esfuerzo
Resistencia	La resistencia del pavimento no aumenta con el tiempo	La resistencia de la capa de concreto aumenta con el tiempo
Reciclabilidad	Debido a su baja resistencia, el material asfáltico es fácil de remover y reutilizar	Debido a la alta resistencia que desarrolla, tiende a ser un material difícil de demoler y reciclar
Costo	Menor costo de construcción, pero mayor costo de mantenimiento en los primeros años	Mayor costo de construcción, pero menor costo de mantenimiento
Comodidad en la circulación	Mayor comodidad en la circulación debido a la continuidad de la superficie	Menor comodidad de circulación, debido a las juntas presentes en la capa de concreto
Resistencia a los ataques químicos	Baja resistencia a los ataques químicos	El concreto hidráulico proporciona una alta resistencia al deterioro por ataques químicos
Reflectividad	Debido a su color oscuro, poseen baja reflectividad, por lo que se requiere de mayor iluminación cuando es de noche	Color claro, por lo que posee una alta capacidad reflectiva, efecto que se intensifica bajo presencia de lluvias, produciendo incomodidad
Deformaciones	La capa de asfalto se deteriora con mayor facilidad, produciendo ahuellamientos en las vías	Alta resistencia a las deformaciones permanentes y deterioro de las vías
Contaminación sonora	El empleo de la capa de asfalto reduce de forma significativa el ruido dentro y fuera del vehículo	Las ranuras transversales en estos pavimentos generan efectos de amplificación de ruido

2.2. Comportamiento de subrasante conformada por suelos arcillosos

Las arcillas son suelos cohesivos conformados por silicatos de aluminio hidratado, cuyas partículas suelen tener diámetros menores a $2\mu\text{m}$ (García & Suarez, s.f.). El comportamiento de estos suelos es influenciado por el tamaño de sus partículas y el grado de perfección de los cristales que contiene, siendo este último, el factor principal que define sus características (Bennet & Hulbbert, 1986). Este por consecuente, dependerá de la formación geológica que presente el suelo arcilloso.

Entonces se puede afirmar que dos arcillas con similar granulometría tendrán comportamientos diferentes dependiendo de su formación geológica. Debido a que esta cristalización es muy variable, el comportamiento de este tipo de suelos arcillosos también lo es. Por ende, su comportamiento en contacto con diversos agentes o aditivos como el agua, sulfatos, óxidos será variable dependiendo del mineral predominante en la arcilla a evaluar.

Según Amaya, M. (2017), en el caso de que un suelo arcilloso entre en contacto con el agua se producen dos efectos significativos. Por un lado, el tamaño extremadamente pequeño de sus partículas sumado a su morfología laminar produce que este suelo aumenta su plasticidad luego de la mezcla. Por otro lado, la hidratación ocasiona que las láminas del suelo se separen de tal forma que la variación volumétrica reduzca su capacidad portante. La combinación de estos dos efectos vuelve a la arcilla blanda parcialmente saturada no apta para ser empleada en la construcción.

En el caso de que se requiera implementar un pavimento flexible sobre suelos arcillosos se deben considerar las siguientes indicaciones mostradas en el capítulo 9 del Manual de Carreteras (MTC, 2013).

- El suelo debe presentar un C.B.R. mayor o igual a 6 (**Tabla 2**).

Tabla 2: Rangos de valores de C.B.R. según la categoría de subrasante (USACE, 1984)

Categorías de sub rasante	CBR
S ₀ : Sub rasante inadecuado	CBR < 3 %
S ₁ : Sub rasante pobre	3 % < CBR < 6 %
S ₂ : Sub rasante regular	6 % < CBR < 10 %
S ₃ : Sub rasante buena	10 % < CBR < 20 %
S ₄ : Sub rasante muy buena	20 % < CBR < 30 %
S ₅ : Sub rasante excelente	CBR > 30 %

- El nivel freático deberá encontrarse como mínimo a 0.6 m de la superficie de la subrasante, caso contrario se tendrá que evaluar si es necesario la colocación de sub-drenes, capa drenante o la necesidad de elevar el nivel de rasante.
- Si el suelo está expuesto a un proceso de congelamiento (altura > 4000 m.s.n.m) se deberá evaluar la acción de las heladas en el suelo. Este proceso se correlaciona con el nivel freático por lo cual si se encuentra por debajo de los 1.2 m el congelamiento no afectará al suelo. Esta evaluación se realiza especialmente en arcillas y limos debido a que son más susceptibles al congelamiento debido a sus partículas pequeñas.

En caso no se cumplan estos requerimientos mínimos, la subrasante se considera como insuficiente o inadecuada, por lo que se deberá proponer un método de estabilización.

2.3. Estabilización de suelos arcillosos

El Manual de Carreteras (MTC, 2013) denomina estabilización de un suelo al proceso de mejora de las propiedades físicas y mecánicas de este. Para ello se emplean procesos mecánicos, se añaden aditivos químicos o se agregan materiales poliméricos que aumentan la resistencia del suelo, garantizando la permanencia de las mejoras a través del tiempo. La técnica por emplear dependerá de la clase de suelo que se desee estabilizar. Particularmente, para subrasantes arcillosas, se pueden realizar las siguientes técnicas: estabilización con geosintéticos (geomallas, geotextiles u otros), mejoramiento por sustitución de suelos o estabilización con aditivos químicos.

El Manual de Carreteras presenta en la **Figura 6** el proceso que se debe realizar para escoger un tipo de estabilización según las necesidades del proyecto (MTC, 2013).

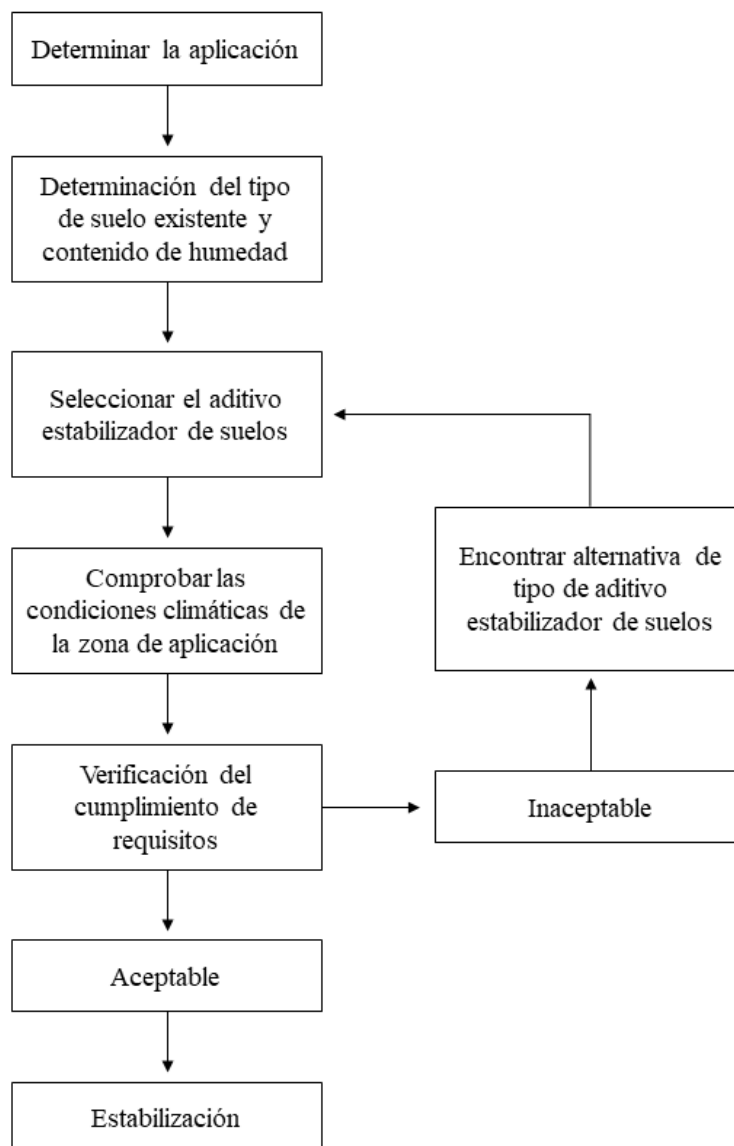


Figura 6: Proceso de selección del tipo de estabilización
(MTC, 2013)

2.3.1. Estabilización por sustitución de suelos

Este método consiste en la sustitución del suelo in situ, por un material de préstamo adecuado de mayor resistencia. La técnica se emplea sobre suelos con valores de C.B.R. entre 3 y 6 %, y se basa en sustituir el material existente por uno de mayor calidad; es decir, con un C.B.R. > 10 % y un IP < 10 (MTC, 2013). El proceso de sustitución empieza con la remoción de una

profundidad de suelo igual al espesor de reemplazo analizado previamente, compactando el material restante, previa colocación del suelo con mayor resistencia. Luego se procede a la colocación y compactación del suelo transportado de un sitio de préstamo, garantizando el cumplimiento de las exigencias de densidad y espesor. El material sustituido deberá tener la humedad apropiada para la compactación, por lo cual deberá humedecerse o airearse. En caso de existir partículas mayores de 75 mm, estas deberían ser eliminadas.

2.3.2. Estabilización con aditivos químicos

Este tipo de estabilización aumenta la resistencia de los suelos, mejora su durabilidad, controla sus cambios volumétricos, mejora su trabajabilidad, reduce los requerimientos de espesor de los pavimentos y reduce el polvo. Dentro de los aditivos más usados se encuentran la cal, el cemento y los productos asfálticos. Según el United States Army Corps of Engineers (USACE), para un suelo arcilloso los aditivos recomendados a emplear son el cemento portland y la cal (**Tabla 3**), (USACE, 1984).

Tabla 3: Tipo de estabilizadores recomendados para suelos finos (arcillas y limos)
(USACE, 1984)

Clase de suelo	Tipo de estabilizador recomendado	Restricción en LL e IP del suelo	Observación
CH o CL o MH o ML u OH u OL o ML-CL	Cemento Portland	LL menor de 40 IP menor de 20	Suelos orgánicos y fuertemente ácidos contenidos en esta área no son susceptibles a la estabilización por métodos ordinarios
	Cal	IP no menor de 12	

Nota: CH: arcilla de alta plasticidad, CL arcilla de baja plasticidad, MH: limo de alta plasticidad, ML: limo de baja plasticidad, OH: suelo orgánico de alta plasticidad, OL: suelo orgánico de baja plasticidad, ML-CL: Limo arcilloso de baja plasticidad, LL: límite líquido, LP: límite plástico. Tomado de "Soil Stabilization for Pavements Mobilization Construction", por U. S. Army Corps of Engineers, 1984

▪ Estabilización con cemento

Es la mezcla del suelo natural del terreno con una dosificación de cemento, agua y otros aditivos, seguido de una compactación y un curado de la mezcla. De esta manera el material se endurece mejorando su resistencia. Cabe destacar que las propiedades de la mezcla suelo y cemento dependen del “tipo y cantidad de suelo, cemento y agua; edad de la mezcla compactada y tipo de curado” (USACE, 1984).

El Manual de Carreteras de Perú (MTC, 2013), menciona que los suelos recomendados para estabilizar con cemento son aquellos que poseen granulometría gruesa. Especialmente los del tipo A-1, A-2 y A-3, plasticidad media o baja ($LL < 40$ e $IP < 18$).

▪ **Estabilización con cal**

Cuando se mezcla el suelo con la cal se producen reacciones químicas de floculación y de tipo puzolánica que permiten la formación de nuevos productos químicos (USACE, 1984). Este efecto permite a la cal cambiar la consistencia del suelo y mejorar su resistencia a través del tiempo. Es así como, suelos con bajo índice de plasticidad, $IP < 15$, aumentan tanto su LL como su LP; mientras, los suelos con elevado índice de plasticidad, $IP > 15$, disminuyen su IP luego de la adición de cal (MTC, 2013). Además, el Manual de Carreteras menciona que la adición de cal aumenta la humedad óptima a la cual deberá ser compactado el suelo, permitiendo que suelos con elevada humedad puedan densificarse, siendo posible trabajar o construir sobre ellos (2013). Finalmente, se menciona que los suelos recomendados para estabilizar con cal son aquellos con alto índice de plasticidad, alta humedad natural y granulometría fina.

2.4. La cal en el tratamiento de suelos arcillosos

De las alternativas de estabilización química anteriormente mencionadas se escogió el mejoramiento con cal, de tal manera que en el presente sub capítulo se expondrán conceptos básicos sobre la definición y procedencia de este material, los tipos de cales empleadas en la construcción, el ciclo de las cales cálcicas, el análisis químico del tratamiento de la cal hidratada, los efectos de su aplicación y los factores que afectan a su estabilización.

2.4.1. Definición y procedencia de la cal

Se denomina cal a aquel producto químico natural proveniente de la roca caliza, material sedimentario conformado por lodos ricos en carbonato de calcio ($CaCO_3$). Este compuesto se forma mediante una compactación de restos animales y vegetales a través de miles de años, y es conocido por ser el agregado más abundante en la naturaleza (Saavedra, 2013). Así mismo, el término cal también puede referirse al compuesto formado por una combinación de óxido de calcio y magnesio (CaO y Mg), o hidróxido de calcio e hidróxido de magnesio ($Ca(OH)_2$ y $Mg(OH)_2$) (UNE, 2002).

Como ya se mencionó anteriormente, el termino cal puede hacer referencia a más de un tipo de compuesto. Estos pueden clasificarse dependiendo del campo de aplicación requerida, siendo los principales ámbitos: la industria del hierro, la industria química, la protección medioambiental, la agricultura y, principalmente, la construcción (ANCADE, 2008).

2.4.2. Tipos de cales de construcción

El organismo de normalización española UNE presenta un esquema para mostrar los tipos de cales empleados en la construcción (UNE, 2002). La **Figura 7** muestra esta clasificación y además indica la forma de suministrar tales cales, siendo que su empleo se dé comúnmente como polvo seco, lechada de cal, terrón o pasta.

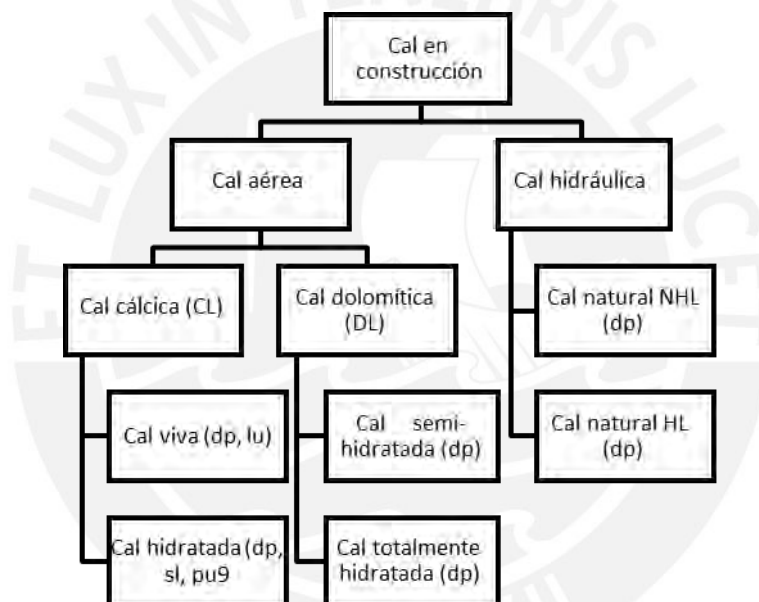


Figura 7: Clasificación de las cales en la construcción

(UNE, 2002)

Siguiendo con la clasificación, se aprecia en un primer nivel que las cales en la construcción se dividen en áreas e hidráulicas. Las primeras, endurecen debido a la interacción con el CO_2 del aire (UNE, 2002). Mientras que las segundas, fraguan en contacto con el agua (UNE, 2002). En cuanto a las cales aéreas, estas se subdividen en cales cálcicas y dolomíticas. La clasificación anterior se basa en el contenido de carbonato de magnesio (CO_3Mg) presente en estas cales, siendo que las cálcicas posean un porcentaje menor al 5 % carbonato de magnesio, en cambio, las cales dolomíticas presenten porcentajes de entre 5 y 30 % de este mismo compuesto. Llegado a este punto, y debido a que el alcance de la investigación consiste en el empleo de la cal hidratada como medio de tratamiento de suelos, se considera suficiente para

el entendimiento de la presente tesis, solo diferencias los tipos de cales cálcicas. Estas se clasifican en cal viva y cal hidratada. Se considera oportuno definir estos compuestos por medio de sus procesos de formación, los cuales serán explicados en el siguiente subcapítulo denominado el ciclo de las cales cálcicas.

2.4.3. El ciclo de las cales cálcicas

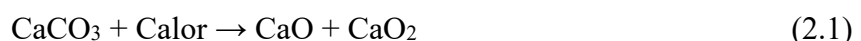
El denominado ciclo de la cal consiste en una serie de reacciones endotérmicas y exotérmicas que permiten cambiar la naturaleza química de este agregado. Como consecuencia, se producen compuestos que se caracterizan por poseer cualidades diferentes dependiendo del estado en el que se encuentren. El ciclo consta de tres etapas (**Figura 8**), en las dos primeras se producen los materiales denominados cal viva y cal hidratada, mientras que en la tercera se cierra el ciclo generándose nuevamente la roca sedimentaria.



Figura 8: Ciclo de la cal cálcica
(Castañeda, 2019)

- **Cal viva**

En la primera etapa se forma el compuesto conocido como cal viva. Este proviene de la calcinación de la piedra caliza, proceso endotérmico que transforma el carbonato de calcio (CaCO_3) en óxido de calcio (CaO) liberando dióxido de carbono (CO_2) en el proceso. Para conseguir esto se debe someter a la caliza a temperaturas altas que fluctúan entre los 700 y 900°C (Saavedra, 2013).



- **Cal hidratada**

La siguiente etapa se produce cuando se adhiere agua (H₂O) a la cal viva anteriormente generada (CaO). Este proceso tiene como resultado la formación del compuesto denominado cal hidratada (Ca(OH)₂), produciéndose de esta forma un proceso exotérmico, el cual permite liberar calor y alcanzar temperaturas de 900°C (Villarino, 2011).



- **Fraguado**

Para cerrar el ciclo se produce el fraguado de la cal, este consiste en el proceso de secado de la cal hidratada. La absorción de dióxido de carbono (CO₂) de la atmósfera, conocida como carbonatación, genera una reacción química que motiva la petrificación del compuesto. Como resultado se obtiene un material de características pétreas similares a la roca caliza, pero de menor resistencia (Villarino, 2011). Los procesos antes mencionados se muestran gráficamente en la **Figura 9**.

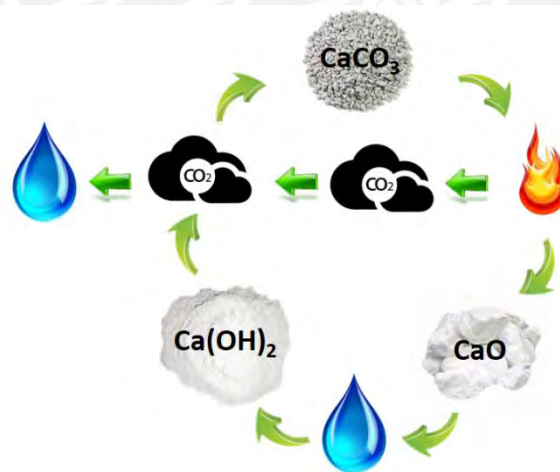


Figura 9: Proceso de reacción del ciclo de la cal cálcica
(Castañeda, 2019)

Finalmente se muestra la **Tabla 4** como cuadro resumen para mostrar las principales diferencias entre la cal viva e hidratada, siendo las principales la apariencia, la forma de manejo y el almacenamiento de estas.

Tabla 4: Diferencias entre la cal viva y la cal hidratada
(FOCCAL, 2019)

CaO - Cal viva	Ca(OH) ₂ - Cal hidratada
Apariencia	Apariencia
-Trozo (3/4"- 2 1/2") -Polvo (material pulverizado)	-Polvo (generalmente pasa la malla 100)
Características generales	Características generales
-Reacción violenta cuando se combina con agua (reacción exotérmica) -Absorbe agua del ambiente (se hidrata) -Soluciones alcalinas -Densidad 900 - 1200 kg/m ³	-No reacciona con el agua -Absorbe CO ₂ del ambiente (Carbonatación) -Soluciones alcalinas -Densidad 450 - 640 kg/m ³
Almacenamiento	Almacenamiento
-Recipiente hermético con tiempo limitado corto (semanas / días) -Saco de plástico -Lejos de fuentes de calor agua/papel o tela (por la generación de calor)	-Recipiente hermético con tiempo limitado corto -Saco de papel kraft
Manejo	Manejo
-Resequedad de la piel en contacto directo y prolongado -Nocivo en contacto con mucosas	-Resequedad de la piel en contacto directo y prolongado -Nocivo en contacto con mucosas

Definidas las características y el proceso de formación de las cales cálcicas se proceden a comentar las reacciones químicas que se producen cuando son adicionadas a suelos arcillosos blandos.

2.4.4. La química del tratamiento de la cal hidratada

Las cales cálcicas son las que comúnmente se emplean en el mejoramiento de suelos. Para el caso específico de las arcillas blandas parcialmente saturadas, el empleo de cales hidratadas conlleva una serie de reacciones químicas que permiten mejorar la trabajabilidad y resistencia del suelo. La experiencia menciona que se obtienen mayores beneficios cuando se trabaja con cales vivas, ya que estas absorben en mayor medida el agua presente en estos suelos (IECA, 2012). Sin embargo, en el Perú el producto químico denominado cal viva presenta limitaciones en su distribución por lo que en la presente tesis se emplea un producto compuesto por cal hidratada. Como alternativa, en el mercado peruano se encuentran cales comerciales tales como la cal hidráulica y la cal de obra, las cuales contienen diferentes porcentajes de cal hidratada.

En cuanto a los efectos que se producen al adicionar cal hidratada sobre suelos arcillosos, la Asociación Nacional de Cales (NLA, por sus siglas en inglés), menciona que se generan 2 tipos de reacciones químicas. Estas son la modificación a corto plazo y la estabilización a largo plazo del suelo (NLA, 2004).

- A corto plazo se origina la modificación química del compuesto. Los cationes positivos de la cal hidratada producida migran hacia la superficie desplazando iones y partículas de agua en el proceso. Debido a esto la mezcla adopta una consistencia granular mejorando la trabajabilidad y puesta en obra del compuesto. El efecto ocurre inmediatamente después de la adición de la cal al suelo y dura de un par de minutos a unas cuantas horas.



Figura 10: Arcilla con consistencia granular luego de una estabilización con cal
(Castañeda 2019)

- A largo plazo se produce la estabilización del suelo, esta se inicia en aproximadamente 72 horas después del mezclado y puede durar considerables años. Tal proceso ocurre solo si se añade la cantidad correcta de cal que permita romper las partículas de alúmina y sílice de la arcilla. Como resultado, estas partículas se unen con los cationes positivos de cal hidratada logrando generar una reacción puzolánica similar a la del concreto portland, la cual se caracteriza por la formación silicatos y aluminatos hidratados. Estos minerales permiten una mejora progresiva en la resistencia del suelo. Se debe enfatizar que tal reacción solo podrá ser producida si se consigue que la mezcla posea un pH mayor a 12.4.

A modo de resumen, es sencillo evidenciar que la mezcla de estos procesos tiene como resultado ahorros de tiempo de puesta en obra y garantía en la durabilidad de las vías pavimentadas.

Modificación a corto plazo

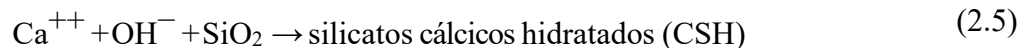
La primera reacción química que se puede producir es la denominada modificación del suelo. Los mecanismos que se generan son el intercambio iónico entre la arcilla y la cal, la floculación en las partículas de la arcilla y la pérdida de humedad.

- **Intercambio de iones entre la arcilla y la cal:** Desde el momento en el que se agrega cal hidratada al suelo, se produce un intercambio de iones entre las partículas del suelo y la cal. En consecuencia, se generan nuevas fuerzas intermoleculares denominadas Vander Waals, las cuales tratarán de unir las partículas del nuevo compuesto.
- **Floculación en las partículas de arcilla:** La unión de las partículas origina que la masa concentrada en un determinado volumen aumente. Es decir, se consigue un aumento en la densidad de las partículas y una reducción en el porcentaje de finos debido a que estas partículas se juntan formando un material de mayor tamaño (IECA, 2012). Este mecanismo se favorece con el aumento de pH, el cual se va incrementando a medida que se adiciona un mayor porcentaje de cal a la mezcla. Como consecuencia de los efectos de la modificación a corto plazo, la retención del agua que inicialmente podía poseer la arcilla se verá reducida significativamente.
- **Reducción en la humedad:** La adición de cal hidratada implica la adición de un material seco al suelo blando parcialmente saturado, lo que reduce la relación agua/peso de sólido, reduciéndose así la humedad total del compuesto (IECA, 2012). La reducción promedio de humedad es de 0.3 % por cada 1% de cal hidratada agregada.

Estabilización a largo plazo

La National Lime Association (2005), menciona que la estabilización de suelos se encuentra condicionada por las características mineralógicas del suelo y la temperatura de este. Además, resalta la necesidad de conseguir un valor de pH de la mezcla resultante de al menos 12.4. De esta forma se produce la liberación de sílice y alúmina, elementos que se combinan con los iones calcio formando finalmente silicatos cálcicos hidratados (CSH) y aluminatos cálcicos hidratados (CAH) tal como se muestra en las **Ecuaciones 2.4, 2.5 y 2.6**. Estos son los causantes del aumento de la resistencia del suelo ya que producen un efecto de cementación similar a la reacción puzolánica del cemento Portland (Terrel, 1979). Se considera importante precisar que

esta mejora es de carácter permanente, ya que los compuestos formados no se producen por un efecto de interacción intermolecular como lo que ocurría en la fase de modificación, sino que, son formados por una interacción interatómica. Las últimas son más fuertes que las primeras. En resumen, una correcta adición de cal permite generar una reacción puzolánica que aumenta considerablemente la resistencia del suelo.



Cuando se emplea la mezcla arcilla - cal como capa de subrasante en una vía afirmada, no es suficiente con que se produzca una reacción puzolánica en donde se genere minerales que aumenten la resistencia de esta mezcla. Sino que también es importante verificar que dicho aumento sea el necesario para que el suelo cumpla con los requerimientos mínimos de una subrasante regular mencionados en la **Tabla 2**. De esta forma, la evaluación de la resistencia se dará por medio de ensayos los cuales puede ser el ensayo de relación de soporte de california (C.B.R.) o el ensayo de compresión simple no confinada (UCS).

2.4.5. Efectos de la aplicación de la cal hidratada sobre suelos arcillosos blandos parcialmente saturados

Las reacciones químicas antes mencionadas generan una serie de efectos beneficiosos sobre la mezcla suelo cal hidratada. Bauza (2003) resume los principales:

- **Reducción en la humedad:** El primer efecto consiste en la reducción de la humedad total del compuesto. Aquello se produce debido a que la adición de un material seco (cal hidratada) a un material húmedo (suelo natural) genera la disminución de la relación agua/peso del sólido resultante.
- **Modificación de la granulometría:** Un segundo efecto importante es la modificación granulométrica del compuesto. Como ya se mencionó, la floculación motiva la aglomeración de las partículas reduciendo la cantidad de finos debido a que estas

partículas se juntan formando otras de mayor tamaño y por ende modificando la granulometría de la mezcla.



Figura 11: Arcilla antes y después de una estabilización con cal
(Lime Association of Texas, 2019)

- Reducción del índice de plasticidad:** La adición de cal hidratada sobre las arcillas produce un aumento en el límite plástico sin comprometer significativamente el límite líquido, reduciendo así el índice de plasticidad (IECA, 2012). De esta forma, el suelo pasa de tener una composición pegajosa a poseer un comportamiento granular. En resumen, se pasa de un estado plástico (desfavorable y pegajoso) a un estado sólido más rígido y desmenuzable.

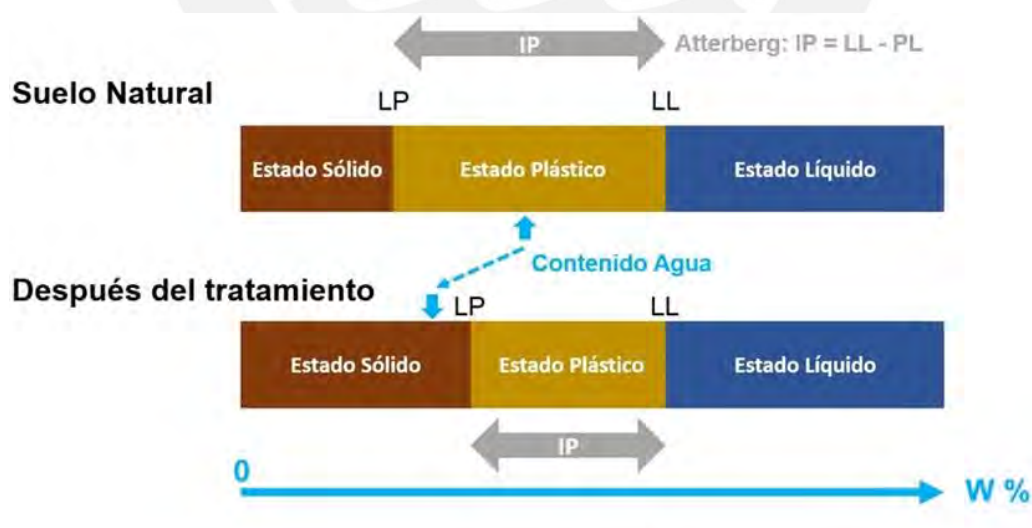


Figura 12: Reducción del índice de plasticidad de una arcilla tratada con cal
(Castañeda, 2019)

- **Mayor trabajabilidad:** Este efecto ya se mencionó numerosas veces a lo largo de la presente tesis. El paso de un material pegajoso a un estado más rígido y desmenuzable reduce los tiempos en puesta en obra, reduciendo costos anteriormente destinados para el cargado, transporte, descargue, extendido y compactación del compuesto.
- **Reducción del potencial de cambios volumétricos:** La reducción de la plasticidad produce que el suelo estabilice su composición volumétrica al punto de poder eliminar el potencial de hinchamiento característico de estos suelos. Esta reducción evita que se generen grietas sobre el pavimento construido sobre este (Garnica, Gómez & Sesna, 2002).
- **Mayor resistencia a medio y largo plazo:** Otro efecto es el aumento de su resistencia al esfuerzo cortante. El valor del pH y el aumento medido con el ensayo C.B.R. o UCS serán indicadores de este parámetro (Amaya, 2017). Tal como se explicó en el subcapítulo “2.4.4. La química del tratamiento de la cal”
- **Modificación de las características de compactación:** En términos concisos la curva de compactación tipo Proctor de la mezcla resultante tenderá desplazarse hacia abajo y a la derecha con respecto al suelo natural (NLA, 2004). En consecuencia, se reducirá el valor de la densidad seca máxima y se aumentará el valor de la humedad óptima. El efecto de necesitar densificar menos el suelo tiene como resultado una reducción en la energía para lograr una correcta compactación, lo que influye directamente en el costo de las maquinarias a emplear.

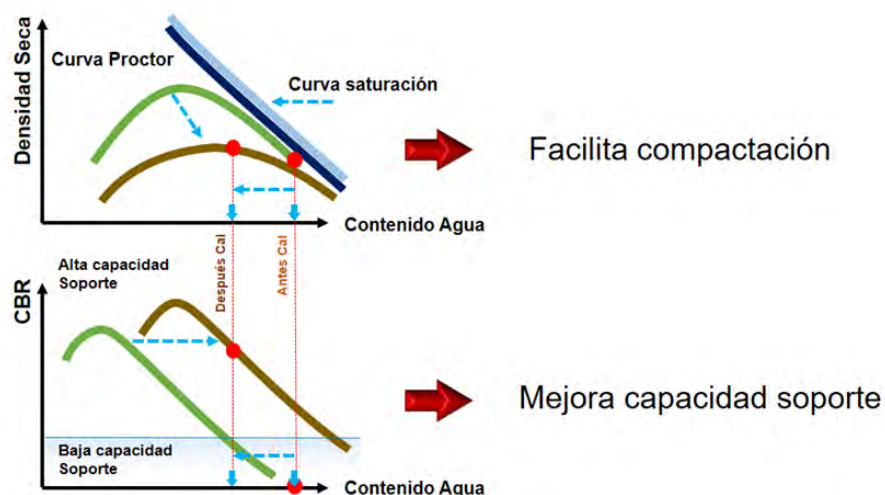


Figura 13: Modificación de las características de compactación de un suelo tratado con cal (Castañeda, 2019)

2.4.6. Factores que afectan la estabilización con cal hidratada

La mejora en las propiedades físico-mecánicas producidas por la adición de cal hidratada al suelo no se podrá concretar si es que no se tienen en cuenta los siguientes factores que hacen posible la reacción puzolánica.

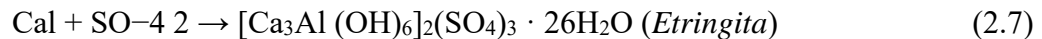
- **Contenido de arcilla:** Es necesario un contenido mínimo del 7 % de arcilla y a la vez un porcentaje de finos, que pase la malla 200, mayor al 25 % (NLA, 2004).
- **Índice de plasticidad:** Es necesario un índice mínimo de 10 para que se produzca la reacción. El índice de plasticidad puede relacionarse al contenido de arcilla que tiene un suelo (**Tabla 5**). Poseer un índice de plasticidad mayor a 10 es característico de un suelo arcilloso.

Tabla 5: Clasificación de suelos según su índice de plasticidad
(MTC, 2013)

Índice de plasticidad	Plasticidad	Característica
IP > 20	Alta	suelos muy arcillosos
7 < IP < 20	Media	suelos arcillosos
IP < 7	Baja	suelos poco arcillosos
IP = 0	No Plástico (NP)	suelos exentos de arcilla

- **Contenido de materia orgánica:** Este factor puede afectar, incluso reprimir la reacción entre la cal y la superficie de los minerales de la arcilla. Por lo cual si el contenido de materia orgánica supera al 1 % puede interferir la reacción puzolánica (Amaya, 2017).
- **Contenido de sulfatos solubles:** En la reacción puzolánica que se produce al mezclar el suelo con cal se forman los silicatos cálcicos hidratados (CSH) y los aluminatos cálcicos hidratados (CAH). Así mismo, si el suelo posee sulfatos solubles, estos reaccionaran con los compuestos hidratados ya mencionados por medio del agua. La reacción entre el CAH y los sulfatos da como resultado la formación de la etringita (trisulfoaluminato cálcico), material que resulta ser muy expansivo (Amaya. 2017). Esta reacción es muy similar a la producida cuando el concreto sufre ataques por sulfatos solubles, ya que en el proceso se forman yeso y etringita. Por este último compuesto, el concreto sufre expansiones y por ende una reducción de la resistencia mecánica por pérdida de cohesión en la pasta de cemento. Entonces, se puede concluir que en el suelo se tendría el mismo efecto a causa

de los sulfatos, puesto que al igual que el cemento cuando es mezclado con cal se produce la misma reacción puzolánica.



Según el reporte del Programa Cooperativo Nacional de Investigación de Carreteras de los Estados Unidos – NCHRP (2009), el contenido total de sulfatos se considera aceptable cuando está por debajo de 3000 ppm, ya que no se formaría una cantidad suficiente de etringita para ocasionar los problemas ya mencionados. Si el contenido es mayor a este pero menor a 8000 ppm se tendrá que realizar un tratamiento modificado, caso contrario se empleará un tratamiento alternativo (**Figura 14**)



Figura 14: Tratamiento de suelos según el contenido de sulfatos
(Castañeda, 2019)

- **Carbonatación:** Como se mencionó en el subcapítulo “2.4.3 El ciclo de las calces cálcicas”, la carbonatación genera una reacción química que motiva la petrificación del compuesto, reduciéndose la resistencia de la mezcla en el proceso. Debido a ello es necesario garantizar el control de esta reacción, la cual puede verse perjudicada con la presencia de material arcilloso no reactivo.
- **Contenido de pH:** Este es uno de los indicadores de la reactividad del suelo con cal. La reacción será posible cuando la mezcla suelo-cal tenga un valor mayor a 12.4 (NLA, 2004)

3. ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se realizó una descripción de la bibliografía existente sobre el mejoramiento de suelos con cal. Además, se mencionaron las metodologías de diseño empleadas y existentes en la actualidad.

3.1. Empleo de la cal a través del tiempo

La cal se ha caracterizado por ser uno de los materiales más empleados a lo largo de la historia de la humanidad. Si bien su empleo no se encuentra correctamente documentado, se tienen registros de su uso en el ámbito de la minería, metalurgia, química, agricultura y principalmente en la construcción (Ochoa, Gutiérrez, Cogollos & Vandecasteele, 2010). Según Greaves, los registros más antiguos del empleo de este material datan de hace más de 5000 años en las pirámides del Shersi en el Tíbet, la Muralla China y la India (Greaves, 1996). Siendo los beneficios más notables las mejoras en la resistencia, durabilidad e impermeabilidad, aquellas que se consiguen en una estructura cuando se le agrega cal (Labuschagne, Brend & Erck, 2005). Con el paso de los años, se apreciaron grandes avances en la refinación de la cal por parte de los romanos, quienes mezclaron este agregado con yeso y lo emplearon como mortero en su programa de construcción en Gran Bretaña, combinación que sería el principal acabado para edificaciones hasta el siglo XIX (Heathcote, 1995).

Con todo el conocimiento recolectado a través de los años, surge en la década de 1940 el interés por emplear la cal para el tratamiento de suelos arcillosos. En consecuencia, en la década de 1950, en países como Alemania, Australia, Estados Unidos, Francia, Guatemala, Sudáfrica, Suecia y Nueva Zelanda, se realizan investigaciones con el fin de determinar las mejoras que se obtendrían de la adición de cal a un suelo arcilloso (Huezo & Orellana, 2009). Es así como se logra determinar que entre los beneficios de esta adición se encontraban la mejora en la resistencia del suelo y la reducción de su plasticidad. Sin embargo, para estos años era aún desconocida la permanencia en el tiempo de estas mejoras.

3.2. Avances tecnológicos en el empleo de tratamiento de suelos con cal

No fue hasta la década de 1960 que la National Lime Association, organismo promotor del empleo de la cal en EE. UU., inicia un plan de investigación en la Universidad de Illinois con

la intención de evaluar las reacciones que se generaban producto de la interacción de un suelo arcilloso con cal (Eades & Grim, 1960). El fin del proyecto era determinar la durabilidad de los beneficios de la mezcla entre los suelos arcillosos y la cal, evaluar su aplicación en campo y determinar un método para optimizar el porcentaje de cal a emplear para conseguir mejoras significativas y permanentes. Es así como luego de participar en esta investigación, James L. Eades y Ralph Early Grim, dos investigadores dedicados al estudio del comportamiento de las arcillas publican 3 artículos que innovarían la forma de comprender la interacción del suelo arcilloso con la cal.

El primer artículo: “Reaction of Hydrated Lime With Pure Clay”, publicado en 1960, estudió el comportamiento de las reacciones producidas entre arcillas puras mezcladas con cal hidratada (Eades & Grim, 1960). Por aquel entonces, los ingenieros de la época conocían que la adición de cal a un suelo arcilloso mejoraba la resistencia y reducía la plasticidad de este, pero desconocían las reacciones que regían tal comportamiento. Se presumía pues, que tales beneficios se originaban debido a un intercambio iónico producido entre las partículas del suelo y los cationes de calcio liberados por la cal. Es así como, surgió la duda de si las mejoras conseguidas eran de carácter permanente o, si tan solo se debían a un intercambio temporal iónico. Argumentando que, si fuese este último el caso, un aumento en el nivel de lluvias o elevación en la napa freática podría originar que el agua desplace los iones de la mezcla y, de esta forma, eliminar las mejoras conseguidas (Eades & Grim, 1960)

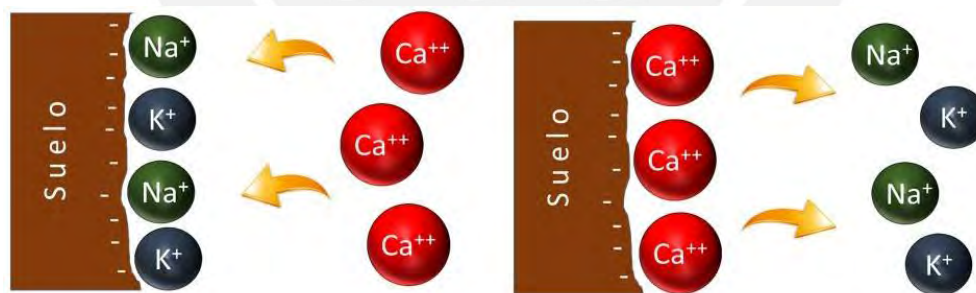


Figura 15: Intercambio iónico
(Castañeda, 2019)

El primer paso de la investigación fue determinar la forma de analizar el comportamiento de estos materiales. Para ese entonces James L. Eades y Ralph Early Grim habían realizado proyectos previos en los cuales se realizaron conclusiones que servirían para marcar el rumbo de la investigación. Por un lado, Grim en 1940 demostró mediante estudios de difracción de rayos X que el comportamiento de los suelos arcillosos era determinado en mayor medida por su composición mineral (1940). Mientras Eades, por su parte, enunció que “sería casi imposible

estudiar las reacciones entre pequeños porcentajes de cal y arcillas, debido a la complejidad de los suelos desde un punto de vista mineral” (Eades & Grim, 1960). De esta forma es como se propone estudiar el comportamiento de la adición de diversos porcentajes de cal sobre arcillas en las cuales predominara solo un tipo de mineral, pues sería más sencillo analizar una arcilla con un tipo de mineral predominante en comparación con una compuesta por diversos minerales. Para completar el análisis, se propuso: evaluar el aumento de resistencia mediante ensayos de compresión simple no confinada y la forma en como ocurrían las reacciones por medio de ensayos de difracción de rayos X.

Los ensayos de compresión simple no confinada mostraron que los diversos minerales presentaban distintos comportamientos de aumento de resistencia frente a diferentes porcentajes de adición de cal, tal y como se puede apreciar en la **Figura 16**. Mientras que los ensayos de difracción de rayos X revelaron que a largo plazo se producía la formación de nuevos minerales. Encontrando que alúmina y la sílice presente en los suelos arcillosos, se transformaban en silicatos y aluminatos, compuestos que mejoraban la resistencia del suelo y presentaban un carácter permanente en el tiempo.

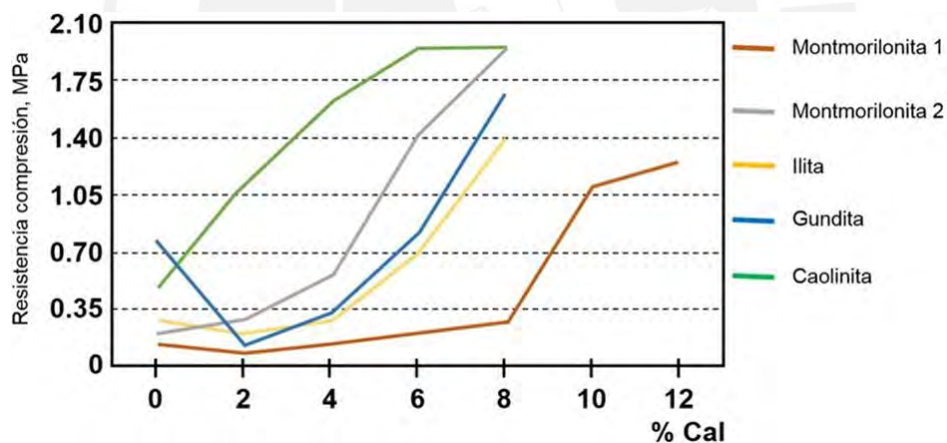


Figura 16: Resistencia a la compresión simple de muestras tratadas con cal hidratada (Eades & Grim, 1960)

El segundo artículo titulado “Formation of New Minerals with Lime Stabilization as Proven by Field Experiments in Virginia” fue publicado en 1962 (Eades & Grim, 1962). La comunidad científica del momento se cuestionaba si las mejoras a largo plazo producida por los minerales formados en el primer estudio también podrían originar en condiciones de campo, o si tan solo eran generados en condiciones de laboratorio. Fue así como se decidió estudiar 3 proyectos realizadas en Virginia, evaluando: la efectividad de mejorar la resistencia de una subrasante mediante ensayos de C.B.R. y, el contenido mineral en el suelo antes y después de la mejora con cal (Eades & Grim, 1962)

Los resultados obtenidos mostraron que, efectivamente, el suelo aumentaba su resistencia. Además, se encontró, que se producía un cambio radical en cuanto al contenido de minerales luego de la adición de cal, concluyendo que las características ingenieriles eran diferentes debido a este cambio (Eades & Grim, 1962). Motivados por tal descubrimiento, es que surge el interés por desarrollar un método que permita determinar el porcentaje de cal viva óptima a agregar sobre un suelo arcillosos para conseguir mejoras significativas en sus propiedades ingenieriles.

Es así como finalmente, se publica en 1966 el artículo denominado “A Quick Test to Determine Lime Requirements For Lime Stabilization” (Eades & Grim, 1966). En este artículo Eades y Grim proponen el ensayo que se emplea hasta la actualidad para determinar el porcentaje óptimo de cal para conseguir estabilizaciones adecuadas y permanentes. Concluyendo, en base a un conjunto de pruebas físicas, químicas y mineralógicas, que los ensayos de pH pueden ser usados para determinar el contenido de cal óptimo antes mencionado. De esta forma para lograr que se produzca una estabilización permanente, se debe conseguir un valor estable de 12.4 pH en una muestra preparada de suelo con cal 1 hora luego de su mezcla (Eades & Grim, 1962). Como advertencia se enunció que debido a que las mejoras dependen de la composición mineralógica del suelo se deberían realizar pruebas de resistencia con el fin de verificar el aumento de este parámetro.

Por último, en 1990 el Dr. Dallas Lite recopila y evalúa la información existente de la época, presentando como resultado la metodología actual propuesta por la National Lime Association (NLA, 2006). Metodología que emplea ensayos normados por la American Society of Testing Materials (ASTM) para determinar el contenido óptimo de cal que permita mejorar las propiedades físicas y mecánicas de un suelo arcilloso.

3.3. Metodologías para el diseño de suelos arcillosos con cal

En la actualidad, existen dos metodologías para la evaluación de suelos arcillosos tratados con cal. La primera, desarrollada por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (USACE, por sus siglas en ingles) y la segunda, propuesta por la National Lime Association (NLA). Ambas se describen en la **Tabla 6**.

Por otro parte, en el Perú existen dos manuales que regulan el empleo del uso de cal para el mejoramiento de suelo. Estos son la norma CE.020 (MVCS, 2012), y el Manual de Carreteras

(MTC, 2013). En los ítems 3.3.2 y 3.3.3 se comentarán aquellas indicaciones propuestas en los manuales antes mencionados.

Tabla 6: Metodologías para el diseño de suelos arcillosos tratados con cal
(Elizondo, Navas & Sibaja, 2011)

(USACE, 1994)	(NLA, 2004)
<p>Paso 1 Contenido inicial de cal, mediante la valoración del pH de varias muestras de suelo cal preparadas con diferentes dosificaciones (2, 4, 6 y 8 %). El contenido de cal más bajo con el cual se logra un pH de alrededor de 12,4 será el valor buscado</p> <p>Paso 2 Ensayos de humedad densidad para determinar la densidad máxima y el contenido de humedad óptima. ASTM D 1557 (Proctor Modificado).</p> <p>Paso 3 Preparar muestras por triplicado de la mezcla suelo cal, para los ensayos de compresión no confinada y durabilidad. Los contenidos de cal a los cuales se deben de preparar las mezclas serán: el contenido de cal determinado en el paso 2 y, al 2 y al 4 % por encima de éste. Curado de 28 días a 23 °C o curado acelerado por 48 h a 49 °C.</p> <p>Paso 4 Tres especímenes se deberán de fallar a compresión no confinada (ASTM D1633), y otros tres especímenes deberán ser sometidos al ensayo de durabilidad (ASTM D559).</p> <p>Paso 5 Se deberán de comparar los resultados obtenidos con los requerimientos solicitados de acuerdo con las especificaciones contractuales, o con las especificaciones recomendadas. El contenido de cal más bajo, el cual cumpla con los requerimientos para los resultados de compresión no confinada y demuestre la durabilidad requerida será el contenido de cal de diseño.</p>	<p>Paso 1 Evaluar las propiedades claves del suelo como un paso inicial para determinar si el suelo es adecuado para a ser estabilizado con cal.</p> <p>Paso 2 Determinación de la demanda estimada inicial de cal, el porcentaje más bajo de cal en el suelo que alcanza un pH en laboratorio de 12,4.</p> <p>Paso 3 Determinación del contenido de humedad óptimo y la máxima densidad seca del suelo tratado con cal, mediante el procedimiento ASTM D698 (Proctor Estándar).</p> <p>Paso 4 Fabricación de los especímenes para compresión no confinada (CI) ASTM D5102 procedimiento B. La muestra debe de ser almacenada en una bolsa sellada e impermeable por 1 a 24 h antes de fabricar el espécimen de ensayo.</p> <p>Paso 5 Curado y confinamiento de los especímenes de compresión no confinada (CI). Inmediatamente después de la fabricación de los especímenes, deben de ser envueltos en plástico y sellados en una bolsa impermeable para impedir la pérdida de humedad. Posteriormente deben ser sometidos a un periodo de curado por 7 días a 40 °C. Someter los especímenes por 24 h a un remojo por capilaridad mediante la eliminación de la envoltura impermeable y envolviendo el espécimen con tela húmeda y absorbente, colocando el espécimen sobre una piedra porosa y evitando el contacto directo del agua con el espécimen.</p> <p>Paso 6 Determinación de la compresión no confinada (CI) de los especímenes curados y condicionados en humedad. ASTM D5102 B para determinar la CI de los especímenes curados y condicionados en humedad. La CI es el promedio de al menos dos especímenes.</p>

3.3.1. Metodología propuesta por la National Lime Association

Esta propuesta surge en 1990 gracias al trabajo realizado por el Dr. Dallas Lite, el cual evaluó diversos procesos de estabilización de suelos con cal (NLA, 2006). Como resultado propuso un procedimiento que podría ser repetido por ingenieros y técnicos de laboratorio con el fin de lograr una dosificación óptima de muestra y determinar ensayos que validen los resultados. La estabilización consiste en siete pasos descritos en la publicación “Mixture Design and Testing Procedures for Lime Stabilized Soil” (NLA, 2006).

- Paso 1. Evaluación inicial del suelo:** En este paso se determina si el suelo estudiado es competente para realizar una estabilización con cal. Para ello se evalúa la granulometría del compuesto empleando la normativa ASTM 136 y el índice de plasticidad con la normativa ASTM D 4318. De esta forma, se logrará una correcta estabilización si se trabaja con suelos con al menos 25 % de material que pase la malla #200, $IP > 10$ y contenido de materia orgánica menor a 1 % (NLA,2006).



Figura 17: Evaluación del límite líquido

- Paso 2. Determinar la demanda aproximada de cal:** Posteriormente se determina el porcentaje óptimo de cal necesario para conseguir la estabilización del suelo. Este será el mínimo porcentaje que permita obtener pH de 12.4 siguiendo la normativa ASTM D 6276 (Prueba de Eades & Grim) (NLA, 2006)



Figura 18: Ejemplos de pruebas de pH

- **Paso 3. Determinar la humedad óptima y la densidad seca máxima:** En este paso se determinan la humedad óptima y la densidad seca máxima del suelo con y sin adición de cal. Para ello se emplea el ensayo Proctor estándar ASTM D 698. Se deben preparar los especímenes de ensayo con porcentajes de cal + 2 -3 % obtenido en el paso 2 (prueba de Eades y Grim). El compuesto deberá ser sellado con bolsas herméticas a prueba de humedad por aproximadamente 24 horas, posteriormente se deberá efectuar la prueba de Proctor estándar para determinar los requerimientos antes mencionados (NLA, 2006).



Figura 19: Fabricación de muestras para el ensayo Proctor estándar

- **Paso 4. Fabricar muestras para ensayos de compresión simple no confinada:** Elaborar por lo menos 2 muestras según el procedimiento B indicado en la norma ASTM D 5102 para ensayos de resistencia a la compresión simple no confinada. Los especímenes serán elaborados con la humedad óptima ± 1 % determinada en el paso 3. En algunos casos puede que el porcentaje de cal empleado sea mayor al obtenido en el paso 2 (NLA, 2006).
- **Paso 5. Curar y acondicionar las muestras de resistencia a la compresión no confinada:** El propósito de este paso será simular el proceso de curado en campo, para ello se colocarán muestras dentro de bolsas herméticas curándolas por 28 días a una temperatura ambiente de 22°C.



Figura 20: Acondicionamiento de probetas

- **Paso 6. Determinar la resistencia a la compresión no confinada de las muestras:** Se buscará determinar la resistencia a la compresión no confinada con la finalidad de asegurar un correcto rendimiento frente ciclos de hielo y deshielo, así como su durabilidad frente a un ambiente de remojo extendido. Esto se realizará siguiendo los lineamientos del procedimiento B de la norma ASTM D 5102. La resistencia a la compresión no confinada será determinada como el promedio de al menos 2 especímenes ensayados.



Figura 21: Ensayo de compresión simple

- **Paso 7. Determinar el cambio en las características de expansión:** Este procedimiento se realiza solo si el suelo evaluado presenta potencial de expansión. Para evaluar la expansibilidad de las arcillas tratadas se tomarán las medidas de los especímenes elaborados en el paso 5, comparándolas con las nuevas medidas que se tienen luego del ensayo de compresión simple no confinada. Se debe verificar que no se presenten cambios volumétricos mayores a 2%.

3.3.2. CE.20 Estabilización de suelos y taludes

La norma indica que la dosificación depende del tipo de arcilla con la cual se está trabajando, recomendando un empleo de entre 2 y 8 % en peso de cal. Recalcando que no se debe emplear porcentajes mayores a este rango porque si bien las propiedades del suelo mejoran, también se aumenta el índice de plasticidad (MVCS, 2012). Además, se indica que el porcentaje óptimo de cal debe determinarse en el laboratorio:

- **Paso 1. Estimar el porcentaje de cal en función del pH:** Si bien la norma resalta la importancia de establecer un valor mínimo de pH para lograr una estabilización, esta no indica el valor de este parámetro. Contrario de otras normativas como la propuesta por la NLA, la cual indica que se debe de conseguir un valor mínimo de 12.4 de pH.
- **Paso 2. Elaboración de especímenes para ensayos de compresión simple no confinada:** La norma indica que se deben elaborar especímenes para ensayos de compresión simple no confinada en base a los parámetros de humedad óptima y densidad seca máxima, mas no indica si estos deben realizarse con el procedimiento estándar o modificado.
- **Paso 3. Determinar el aumento de resistencia del suelo estabilizado con cal:** Se menciona que se deben registrar los valores obtenidos del ensayo para futuros análisis.
- **Paso 4. Determinar el porcentaje de cal para el cual no se generan grandes aumentos en la resistencia:** En este punto se resalta que la norma no define el término “grandes aumentos en resistencia”. En base a esto se puede concluir que el criterio del encargado de diseño de la mezcla influye en la determinación del porcentaje de cal a emplear.

- **Paso 5. Elaborar una curva de resistencia vs porcentaje de cal:** En el manual no menciona más detalle sobre la forma en cómo elaborar el gráfico, ni el uso que se le daría a este.
- **Paso 6. Reportar resultados de soporte C.B.R.:** Se debe verificar que los valores de C.B.R. deben cumplir con los requerimientos del proyecto. De no ser el caso el tratamiento de suelos no será aceptado.

Además, el manual menciona una serie de observaciones que se deben tener en cuenta para lograr una correcta estabilización.

- Por ningún motivo se debe agregar más de 8 % de cal debido a que el suelo aumenta su resistencia, pero también su plasticidad
- El suelo no debe tener más de 3% en peso de materia orgánica
- El suelo que pasa la malla N° 40 debe poseer un índice de plasticidad entre 10 y 50

3.3.3. Manual de carreteras: Suelos, geología, geotecnia y pavimentos

Este manual no proporciona una metodología para determinar el porcentaje óptimo de cal a agregar en un suelo arcilloso. No obstante, citando lo enunciado por la National Lime Association, resalta las mejoras que se producen en el suelo tratado. Además, menciona, en base a experiencia americana, que se obtienen excelentes resultados en suelos arcillosos con un porcentaje en peso de cal entre 1 y 3% para el caso de subrasantes.

Finalmente, a modo de resumen se puede comentar que las normativas peruanas no presentan en estricto una forma para determinar el porcentaje óptimo de cal para la estabilización de suelos arcillosos. En medida de esto, la presente tesis optó por emplear la metodología recomendada por la National Lime Association para dicho fin ya que como se ha visto, tiene amplia difusión y una metodología capaz de reproducirse.

4. DESCRIPCIÓN DEL LUGAR DE ESTUDIO

En esta sección se mencionan las características de la carretera estudiada, se exponen las problemáticas presentes en la vía, se delimita el tramo de estudio y, finalmente, se mencionan los valores obtenidos de los estudios de mecánica de suelos y tráfico e impacto vial, los cuales serán empleados en el diseño de un pavimento con subrasante mejorada.

4.1. Proyecto de carretera Canta-Huayllay

El proyecto de rehabilitación y mejoramiento de la carretera Canta – Huayllay tiene como objetivo conectar la ciudad de Lima con las provincias de Canta (Lima) y Huayllay (Pasco) mediante una vía constituida por un pavimento flexible. Tal proyecto ofrecería una ruta de acceso desde Lima hacia la sierra y selva central del país, lo que permitiría reducir el flujo de transporte concentrado, comúnmente, en la carretera Central. De esta manera, se generarían más oportunidades de trabajo, se potenciarían las actividades agropecuarias y se facilitaría el acceso a los atractivos turísticos de la región, entre los que resaltan las múltiples lagunas naturales presentes a lo largo de la carretera (**Figura 22**) y el bosque de piedras ubicado en el distrito de Huayllay.



Figura 22: Laguna ubicada en la carretera Canta - Huayllay

Entre los trabajos proyectados a realizar sobre la carretera, se encuentran la pavimentación de 95,2 km de carpeta asfáltica, el mejoramiento del sistema de drenaje, la estabilización de taludes y la mejora de subrasantes con baja capacidad portante ($C.B.R. < 6 \%$) (Consortio CESEL - Cal y Mayor, 2018a). La presente tesis se enfocará en esta última labor, proponiendo un tratamiento de suelos empleando cal viva sobre las capas de arcillas blandas parcialmente saturadas. Con esta mejora se podrá aumentar la resistencia del suelo de la subrasante y reducir su plasticidad.

4.2. Ubicación de la carretera

La carretera Canta - Huayllay se encuentra ubicada en la región central del país, entre los departamentos de Lima, Junín y Pasco, uniendo las provincias de Canta y Pasco, tal como se aprecia en la **Figura 23** y la **Figura 24**. Dicha carretera corresponde a la ruta N° 018 de la Red Vial Nacional y se extiende entre 2800 m.s.n.m y 4680 m.s.n.m, atravesando una gran cantidad de lagunas a lo largo de todo su recorrido (Consortio CESEL - Cal y Mayor, 2018a). A su vez, la **Tabla 7**, muestra los departamentos, provincias y distritos que atraviesa la carretera, así como las progresivas correspondientes.

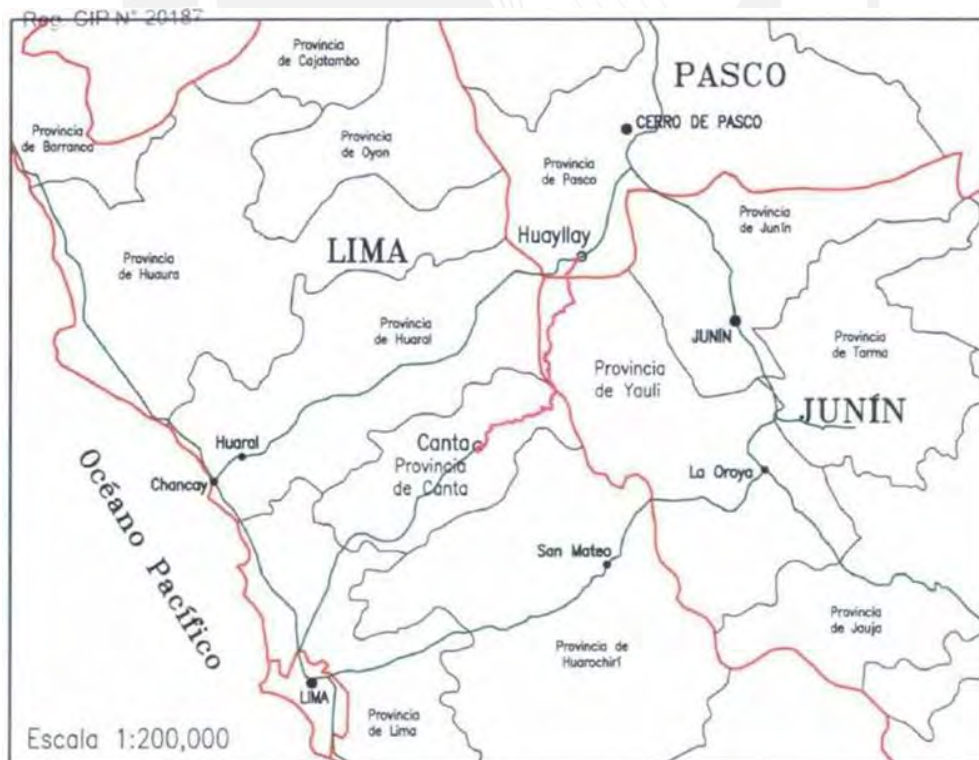


Figura 23: Ubicación de la carretera Canta-Huayllay a nivel departamental (Ceses & Cal y Mayor, 2018d)



Figura 24: Ubicación de la carretera Canta-Huayllay a nivel regional y distrital
(Consorcio CESEL - Cal y Mayor, 2018d)

Tabla 7: Ubicación de los tramos de la carretera Canta-Huayllay
(Consorcio CESEL - Cal y Mayor, 2018a)

DEPARTAMENTO	PROVINCIA	DISTRITO	DESCRIPCIÓN
Lima	Canta	Canta	0+000
		Huaros	Inicia en la progresiva 18+700
Junín	Yauli	Marcapomacocha	Inicia en la progresiva 41+370
		Santa Barbara de Carhuacayán	Inicia en la progresiva 44+520
Pasco	Pasco	Carhuacayán	Inicia en la progresiva 85+740

4.3. Problemática y solución

A lo largo de la carretera se pueden encontrar suelos arcillosos con alta plasticidad y sometidos a cambios de humedad producto de las constantes lluvias y el nivel freático elevado, evidenciado por las múltiples lagunas presentes a lo largo de todo el recorrido. Lo cual produce que en la vía se presenten hendiduras, acumulaciones de agua y, en consecuencia, problemas periódicos de deterioro. Aquellos problemas dañan a los vehículos de transporte, lo que ocasiona que resulte complicado transportarse de una localidad a otra. Se muestra la **Figura 25**, para evidenciar el problema de acumulación de agua en la vía estudiada.



Figura 25: Tramo de la carretera con problema de deterioro por acumulación de agua

Como alternativa de solución se propone implementar un mejoramiento de suelo arcilloso con cal de obra, frente a la propuesta por sustitución de suelos presente en el expediente técnico. Para esto se eligió un tramo de estudio representativo de 1.5 km, con problemas de infiltración de agua y, suelo arcillo con alto índice de plasticidad y bajo valor de C.B.R.

4.4. Tramo de estudio

Los criterios para la elección del tramo de estudio fueron: un tramo con problemas de infiltración, una subrasante de baja capacidad portante (C.B.R. < 6%) y un suelo con alto índice de plasticidad. Es así como la determinación del espesor de mejoramiento empleado en el siguiente proyecto siguió la recomendación de la Federal Highway Administration (FHWA), la cual se muestra en la **Tabla 8** (Consortio CESEL - Cal y Mayor, 2018).

Tabla 8: Espesor de mejoramiento según el índice de plasticidad
(FHWA, 1975)

Índice de plasticidad	Espesor de tratamiento (m)
10 - 20	0.60
20 - 30	0.90
> 30	1.20

Finalmente, el tramo elegido fue el ubicado entre los kilómetros 57+500 y 59+00. La **Figura 26**, muestra una proyección del tramo analizado.

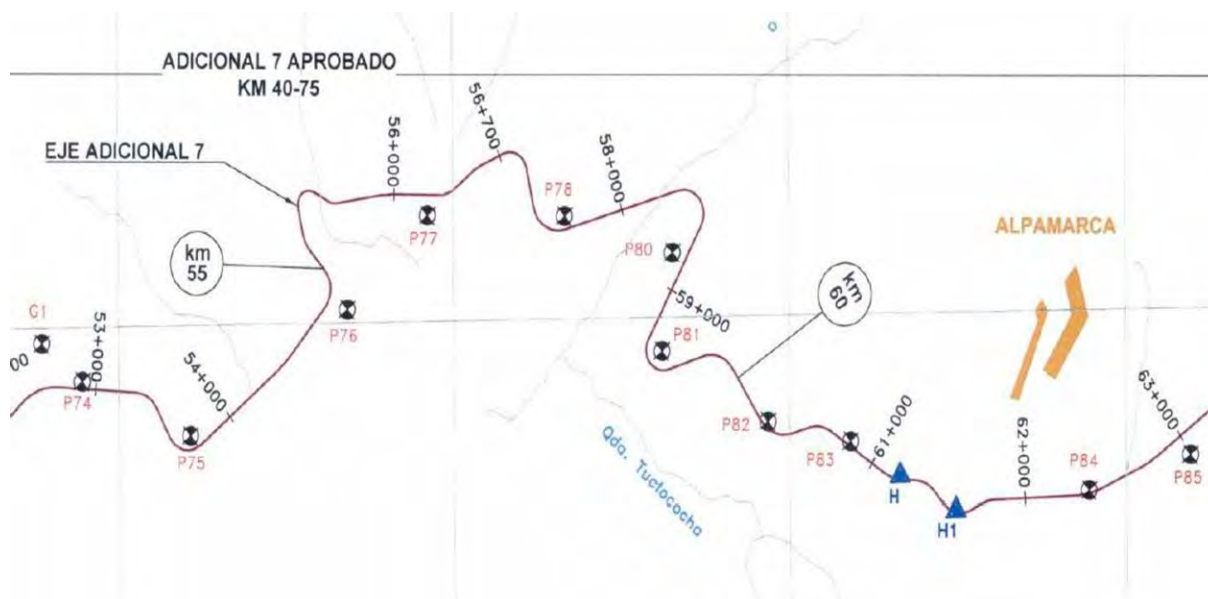


Figura 26: Tramo de estudio
(Consortio CESEL - Cal y Mayor, 2018d)

4.5. Estudio de mecánica de suelos

La elaboración del estudio de mecánica de suelos estuvo a cargo del Consorcio CESEL - Cal y Mayor, el cual elaboró el perfil mostrado en la **Figura 27** (2018c). De este tramo, será necesario conocer parámetros del suelo tales como: la granulometría, la clasificación, la humedad natural, el índice de plasticidad y el valor de C.B.R. al 95 % de la máxima densidad seca (M.D.S.), los cuales son resumidos en la **Tabla 9**.

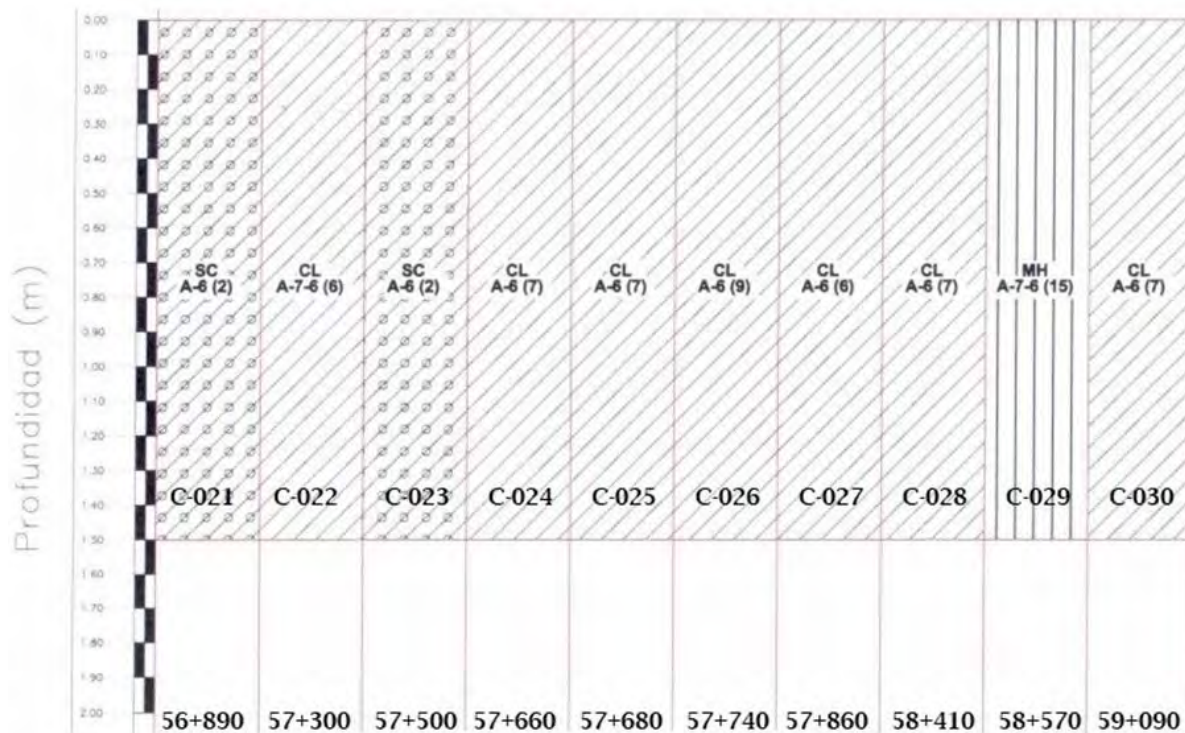


Figura 27: Perfil del tramo analizado de la carretera
(Consortio CESEL - Cal y Mayor, 2018c)

Tabla 9: Parámetros del suelo analizado
(Consortio CESEL - Cal y Mayor, 2018c)

CALICATA N	C-024	C-025	C-026	C-027	C-028	C-029	C-030
PROGRESIVA DE HITO LADO	57+660	57+680	57+740	57+860	58+410	58+570	59+090
PROFUNDIDAD CALICATA (m)	Izq. 1.50	Der. 1.50	Izq. 1.50	Izq. 1.50	Der. 1.50	Der. 1.50	Izq. 1.50
PROFUNDIDAD (m)	0.00-1.50	0.00-1.50	0.00-1.50	0.00-1.50	0.00-1.50	0.00-1.50	0.00-1.50
HUMEDAD NATURAL (%)	23	23.8	20.9	20.8	25.6	23.6	12.9
L.L. (%)	40	38	38	39	39	51	39
L.P. (%)	20	20	19	20	21	30	21
I.P. (%)	20	18	19	18	18	21	18
% PASA MALLA N200	53.6	55.8	57.4	50.9	53.1	72.7	54.1
CLASIFICACIÓN AASHTO	A-6 (7)	A-6 (7)	A-6 (9)	A-6 (6)	A-6 (7)	A-7-6(15)	A-6 (7)
CLASIFICACIÓN SUCS	CL	CL	CL	CL	CL	MH	CL
MAXIMADENSIDADSECA (gr/cc)	1.561	1.629	1.677	1.607	1.675	1.407	1.632
HUMEDAD ÓPTIMA (%)	17	19.7	18.7	15.7	16.3	25	15.3
CBR (0.1") al 95 % MDS	4.5	4.7	4.6	4.7	4.8	4.8	5
CBR (0.1") al 10 % MDS	6.8	4.5	4.7	4.6	4.7	4.8	4.8

Los valores recolectados servirán para el diseño de la carretera con pavimento flexible. Dichos cálculos y consideraciones son mostrados en el capítulo 6.

4.6. Estudio de tráfico

El estudio de tráfico sirve para determinar la intensidad y composición del tráfico proyectado para la carretera Canta-Huayllay. Para el caso de la presente tesis se emplearán los resultados del número de ejes equivalentes, parámetro que sirvió para el diseño del pavimento y evaluación económica de este. Los resultados propuestos por el Consorcio CESEL - Cal y Mayor, se muestra en la **Tabla 10** (2018b).

Tabla 10: Cálculo del número total de ejes equivalentes
(Consorcio CESEL - Cal y Mayor, 2018b)

AUTOS	IMDA 2011	FACTOR DIRECCIONAL	ESAL	FA	G(10 AÑOS)	EE(10 AÑOS)	G(10 AÑOS)	E(10 AÑOS)
AUTO	202	0.5	0.001	1	12.118	446	30.404	1118
PICK UP	69	0.5	0.001	1	12.118	152	30.404	382
CAMIONETA	24	0.5	0.001	1	12.118	54	30.404	136
RURAL MICRO	16	0.5	0.001	1	12.118	72	30.404	90
BUS 2 EJES	36	0.5	4.651	1.9	12.118	705277	30.404	1769512
BUS 3 EJES	65	0.5	2.811	1.9	12.118	767632	30.404	1925956
CAMIÓN EJES	86	0.5	2.802	1.9	12.118	1015652	30.404	2548229
CAMIÓN 3 EJES	44	0.5	3.615	1.9	12.118	668405	30.404	1677000
CAMIÓN 4 EJES	12	0.5	5.455	1.9	12.118	275074	30.404	690148
T2S2 0	0	0.5	5.252	1.9	12.118 0	0	30.404	0
T2S3 41	41	0.5	8.095	1.9	12.118	1394583	30.404	3498950
T3S2 8	8	0.5	4.448	1.9	12.118	149510	30.404	375115
T3S3 93	93	0.5	7.655	1.9	12.118	2991327	30.404	7505113
C2T2 0	0	0.5	4.158	1.9	12.118	0	30.404	0
C2T3 0	0	0.5	0	1.9	12.118	0	30.404	0
C3T2 6	6	0.5	6.678	1.9	12.118	168353	30.404	422391
C3T3 7	7	0.5	5.648	1.9	12.118	166141	30.404	416841
TOTAL 709					8.303.E+06			2.083.E+07

4.7. Estudio hidrológico

Las precipitaciones de la zona son variables debido a que la carretera se encuentra en un rango de altitud entre 2800 y 4800 m.s.n.m. La **Tabla 11**, muestra las características climáticas y valores de precipitación con respecto a la altura a la cual se encuentra la carretera.

Tabla 11: Características climáticas del área de estudio
(Consortio CESEL - Cal y Mayor, 2018a)

Clima	Altitud (msnm)	Precipitación (mm)	Temperatura (°)
Clima seco y semiárido	2500 - 3000	300 - 450	12 - 15
Clima semi-seco y semi-frío	3000 - 3200	450 - 500	11 - 12
Clima semi-húmedo y semi-frío	3200 - 3600	500 - 600	9 - 11
Clima ligeramente húmedo y semifrío	3600 - 3900	600 - 700	7 - 9
Clima moderadamente húmedo y frío	3900 - 4300	700 - 900	5 - 7
Clima húmedo y frío	4300 - 4800	900 - 1000	3 - 5



5. MEJORAMIENTO DE UN SUELO ARCILLOSO TRATADO CON CAL DE OBRA

En la presente tesis se evalúa la dosificación de cal de forma experimental empleando la metodología de la National Lime Association (2004) para la obtención del porcentaje óptimo de cal y la evaluación de los valores de resistencia que serán utilizados para el posterior diseño del pavimento en estudio. Sin embargo, en esta investigación se presenta una serie de modificaciones debido a las restricciones que existen en el Perú para el uso de químicos como la cal hidratada.

5.1. Regulación de la cal en el Perú

En el Perú, la cal hidratada y la cal viva están reguladas por la Superintendencia Nacional de Aduanas y Administración Tributaria (SUNAT) por el DECRETO SUPREMO N° 268-2019-EF, en el cual se menciona que “Las mezclas de óxido de calcio (cal viva) e hidróxido de calcio (cal hidratada) que contengan una concentración superior al 40% estarán sujetas al registro, control y fiscalización en el territorio nacional para el control de Bienes Fiscalizados”. Por tal motivo, los productos que se encuentran en el mercado están por debajo de este porcentaje y solo se encuentra mezclas con cal hidratada. Finalmente, para diferenciar los dos principales productos del mercado se elaboró la **Tabla 12**.

Tabla 12: Regulación de la cal en el Perú

CARACTERÍSTICAS	CAL DE OBRA	CAL HIDRÁULICA
COMPONENTES	Trazas de carbonato de calcio, hidróxido de calcio o una mezcla de carbonato de calcio y partículas de rocas disgregadas	Mezcla de partículas disgregadas de calizas con carbonato de calcio
	Ca(OH) ₂	3 - 15 %
		21 - 39 %
PARA	Albañilería y revestimientos Estabilización de suelos Complementación de mortero	Proporciona durabilidad, plasticidad y compactabilidad Construcciones
APLICACIONES	Mejorar suelos ácidos y suelos sódicos En construcción y marcado de campos	En preparación de morteros para albañilería Para asentado de ladrillos, tarrajeo, etc

Además de estas cales, en el Perú, existen empresas que comercializan cal viva y cal hidratada con un mayor porcentaje de pureza como las empresas CALQUIPA, MYCAL, MOLICAL, INTICAL, etc. Sin embargo, para adquirir este tipo de producto es necesario realizar un trámite solicitando los permisos indicados por la SUNAT para el registro, control y fiscalización continua del producto declarando todas las instalaciones donde se hará uso de este. Debido a la situación que atraviesa el país (pandemia ocasionada por el virus SARS-CoV-2) los trámites demoran de uno a dos meses para solicitados y evaluados. Si en caso se solicitará como investigación, se reduciría los trámites a una inscripción declarando las instalaciones donde se hará uso; sin embargo, la cantidad de cal que brindan las empresas para este tipo de investigaciones es de dos kilos, los cuales son insuficientes para este trabajo que está proyectado para realizar ensayos C.B.R. y ensayos de compresión simple.

Debido a esta regulación de la cal en el Perú, se optó por la cal de obra mencionada anteriormente para realizar la presente tesis. Como se puede observar en la **Tabla 12**, la cal de obra (cal cálcica) y cal hidráulica presentan diferentes porcentajes de cal hidratada; sin embargo, la aplicación de esta última difiere del concepto de mejoramiento de suelo con cal puesto que la ficha técnica menciona que proporciona plasticidad, efecto contrario que se espera de un tratamiento con cal hidratada. Por tal motivo, se decidió emplear la cal de obra para analizar el comportamiento de la mezcla. No obstante, con esta mezcla, se realizaron los ensayos de Eades y Grim, y los ensayos de límites de consistencia para ambas cales con la finalidad de comparar las diferentes reacciones y comportamientos.

5.2. Determinación del porcentaje óptimo de cal de obra

El primer paso para determinar el porcentaje óptimo de cal experimentalmente consta de realizar ensayos de Eades & Grim añadiendo un rango de porcentajes de este material desde el 2% (0.5 gr) al 8% (2 gr) en 25 gramos de suelo. Sin embargo, la metodología de este ensayo está planteada para usar productos con purezas altas de cal hidratada, contrario al que se empleó en esta investigación. Por esta razón, se elaboró la **Tabla 13** de equivalencias que indica el porcentaje de producto que se añadirá a los 25 gramos de suelo y el porcentaje real de cal hidratada ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) que se está adicionando, el cual dependerá de la concentración de este último. Se asumió la concentración de cal hidratada más crítica y se realizó el ensayo hasta llegar a un porcentaje real aproximado de 8%.

Tabla 13: Equivalencia en peso de la pureza de la cal de obra

CAL DE OBRA		Ca(OH) ₂ (3%)	
%	gr	gr	%
2	0.50	0.03	0.10
4	1.00	0.05	0.20
6	1.50	0.08	0.30
8	2.00	0.10	0.40
10	2.50	0.13	0.50
15	3.75	0.19	0.75
20	5.00	0.25	1.00
25	6.25	0.31	1.25
30	7.50	0.38	1.50
35	8.75	0.44	1.75
40	10.00	0.50	2.00
60	15.00	0.75	3.00
80	20.00	1.00	4.00
100	25.00	1.25	5.00
150	37.50	1.88	7.50
200	50.00	2.50	10.00

Como paso previo al ensayo de Eades & Green, se decidió evaluar el pH de una muestra de 25 gramos de suelo que resultó 8.56. También, se evaluó el pH de la cal de obra, puesto que la teoría menciona que una cal hidratada debería ser alcalina y tener un pH aproximado de 12.4. Como nuestro material a emplear no tiene un alto contenido de cal hidratada se evaluó el pH para diferentes cantidades de cal de obra. Para realizar el análisis, se diluyó en agua destilada. En la **Tabla 14** y la **Figura 28** se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 14: Medición de pH para diversas cantidades de cal de obra

Cal (gr)	pH
2	10.79
10	11.39
15	11.56
20	11.62
25	11.7
30	11.7
35	11.74
40	11.8

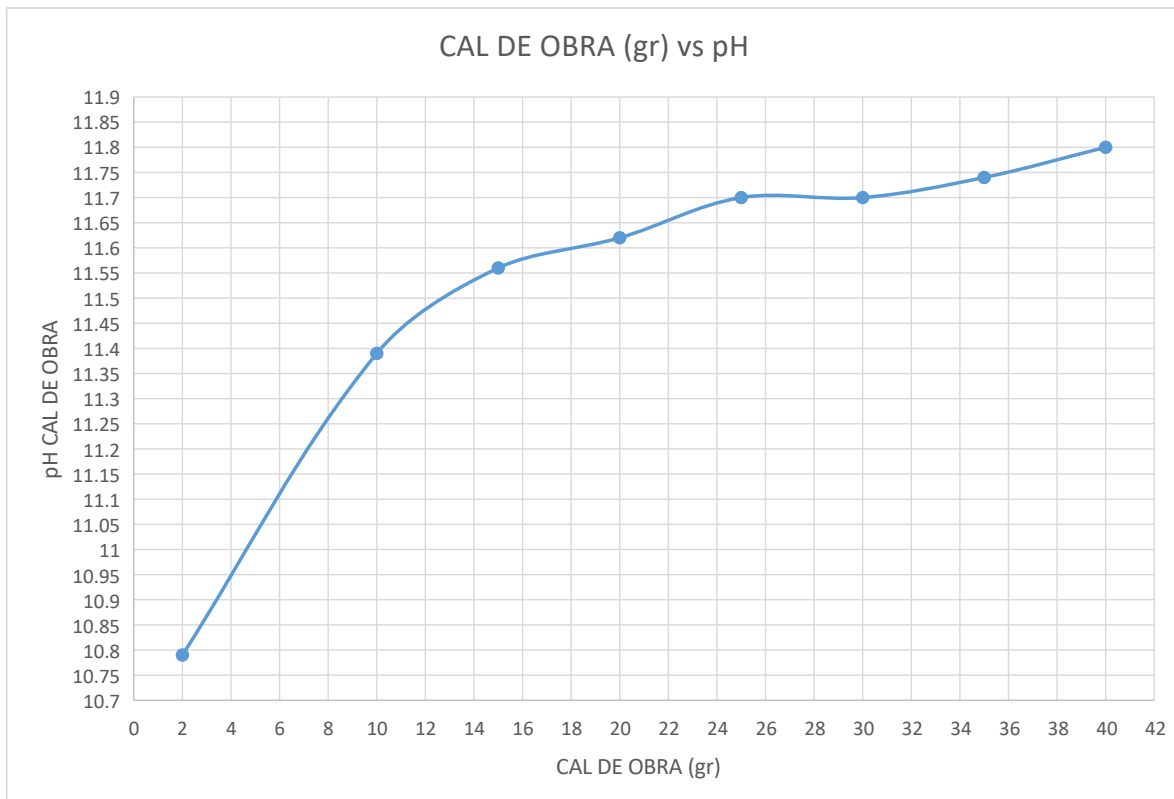


Figura 28: Variación del pH para diversas cantidades de cal de obra

Se observó que a pesar de agregar grandes cantidades de cal de obra no se llegó al pH esperado de 12.4. Por tal motivo, se realizó el ensayo Eades y Grim para porcentajes netos de hasta 200% (50 gr de cal). Los resultados obtenidos se muestran en la **Tabla 15** y la **Figura 29**.

Tabla 15: Medición de pH para diversos porcentajes de cal de obra

Tiempo (hr)	% CAL DE OBRA EN MEZCLA														
	2	4	6	8	10	15	20	25	30	35	40	60	80	100	200
1	7.87	7.78	7.78	7.83	7.87	8.00	8.13	8.26	8.43	8.56	8.76	9.26	9.70	10.08	11.16
6	7.87	7.80	7.78	7.83	7.86	8.00	8.16	8.27	8.43	8.62	8.77	9.30	9.76	10.15	11.15
24	7.78	7.77	7.77	7.80	7.84	7.96	8.06	8.23	8.37	8.50	8.64	9.19	9.63	10.09	11.08

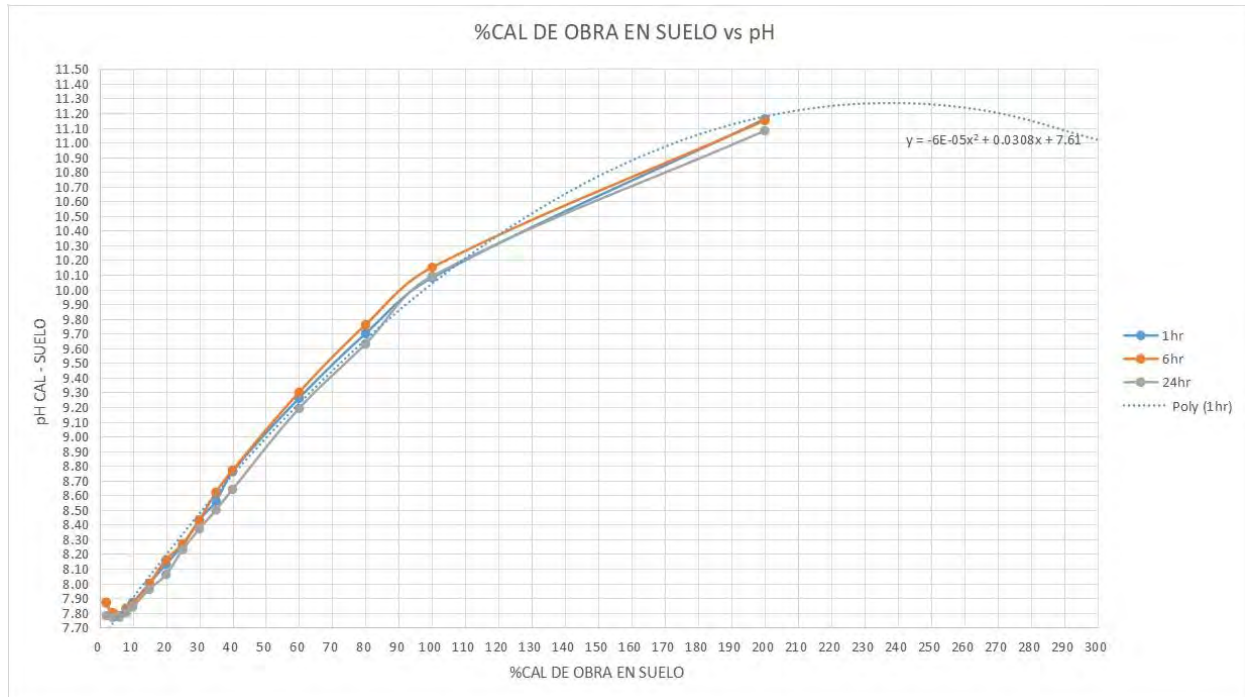


Figura 29: Variación del pH para diversos porcentajes de cal de obra

La metodología del ensayo Eades & Green indica que se debe escoger el porcentaje de cal en la mezcla que resulte con un pH de 12.4 aproximadamente; sin embargo, en este caso, el índice de pH tuvo un máximo valor de 11.08. Por lo tanto, para el posterior análisis de límites de consistencia se decidió ensayar mezclas con rangos más amplios de tal forma que se pueda observar su comportamiento.

Adicionalmente, se decidió ensayar otro tipo de cal comercial denominado cal hidráulica con motivo de evaluar los efectos que tendría este tipo de material sobre un suelo arcilloso. Es preciso mencionar, que la teoría menciona dos tipos de cales en la construcción que son aéreas e hidráulicas. La primera se clasifica en cales ya conocidas como la cal hidratada y cal viva empleadas para estabilización de suelos. Con respecto a la segunda, esta posee porcentajes regulares de cal hidratada; sin embargo, su uso es opuesto a las primeras mencionadas como se puede observar en la **Tabla 12**. Por tal motivo, se ensayó la cal hidráulica con el mismo proceso anterior para poder observar la variación del pH y posteriormente los cambios en la consistencia del suelo. En primer lugar, se realizó la conversión de porcentajes correspondientes que se presentan en la **Tabla 16**.

Tabla 16: Equivalencia en peso de la pureza de la cal hidráulica

CAL HIDRÁULICA		Ca(OH) ₂ (21%)	
%	gr	gr	%
2	0.50	0.105	0.42
4	1.00	0.210	0.84
6	1.50	0.315	1.26
8	2.00	0.420	1.68
10	2.50	0.525	2.10
15	3.75	0.788	3.15
20	5.00	1.050	4.20
25	6.25	1.313	5.25
30	7.50	1.575	6.30
35	8.75	1.838	7.35
40	10.00	2.100	8.40

Para el caso de la cal hidráulica se analizó un rango de 2 - 40% y se realizó para diferentes horas de tal forma que se observe el cambio en el pH de la mezcla. Para este caso, se empleó una cantidad de 10 gr de este producto para evaluar su pH. Se presenta la **Tabla 17** con los resultados obtenidos y la gráfica correspondiente.

Tabla 17: Medición de pH para diversos porcentajes de cal hidráulica

Tiempo (hr)	% CAL HIDRÁULICA EN SUELO											10 gr Cal
	2%	4%	6%	8%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%	
1	8.35	8.30	8.25	8.23	8.24	8.20	8.15	8.10	8.07	8.02	8.02	8.53
6	8.30	8.25	8.21	8.18	8.16	8.10	8.08	8.00	7.98	7.93	7.98	8.45
24	8.41	8.39	8.35	8.34	8.27	8.19	8.17	8.10	8.07	8.04	8.02	8.40

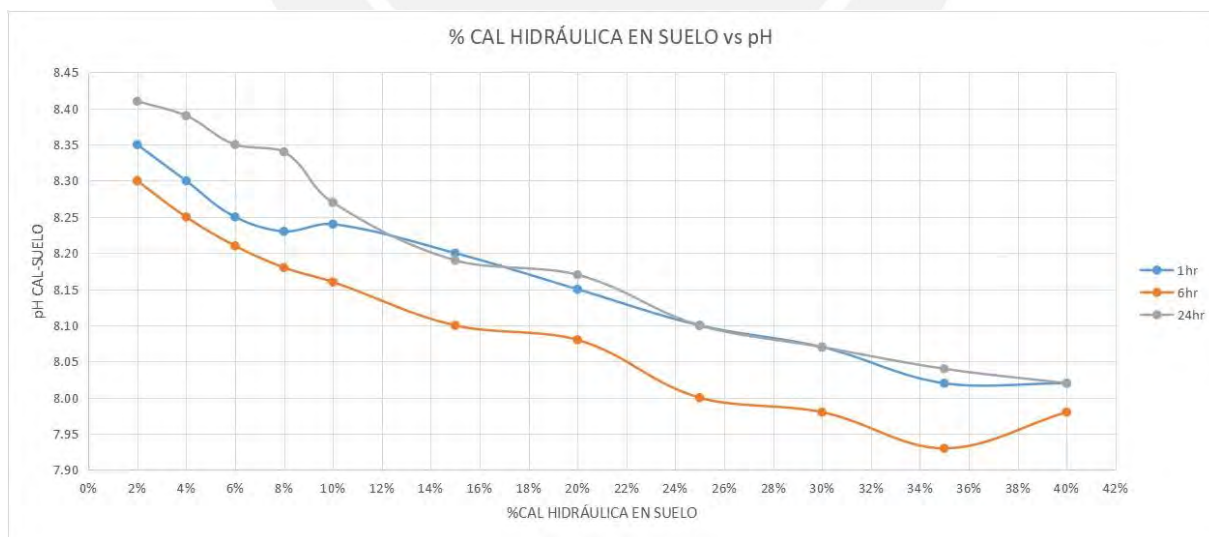


Figura 30: Variación del pH para diversos porcentajes de cal hidráulica

Los resultados demuestran un comportamiento contrario al de una cal hidratada, disminuyendo el pH a medida que se aumenta el porcentaje de cal hidráulica.

5.3. Determinación de los límites de consistencia

En este subcapítulo, se realizó ensayos de límites de consistencia para mezclas suelo - cal para observar la reacción que surge en cada caso. Para los ensayos realizados con cal de obra se obtienen los resultados mostrados en la **Tabla 18** y la **Figura 31**.

Tabla 18: Límites de consistencia para la mezcla suelo – cal de obra

% CAL DE OBRA	pH	LP	LL	IP
0	8.56	22.22	39.91	17.69
5	7.77	20.57	40.35	19.78
10	7.84	20.92	39.35	18.44
20	8.06	18.57	36.42	17.85
40	8.64	18.59	35.43	16.84
60	9.19	17.93	34.34	16.41
80	9.63	18.55	33.82	15.27
100	10.09	18.57	33.75	15.18
150	10.60	18.79	32.00	13.21
200	11.08	19.78	30.98	11.2

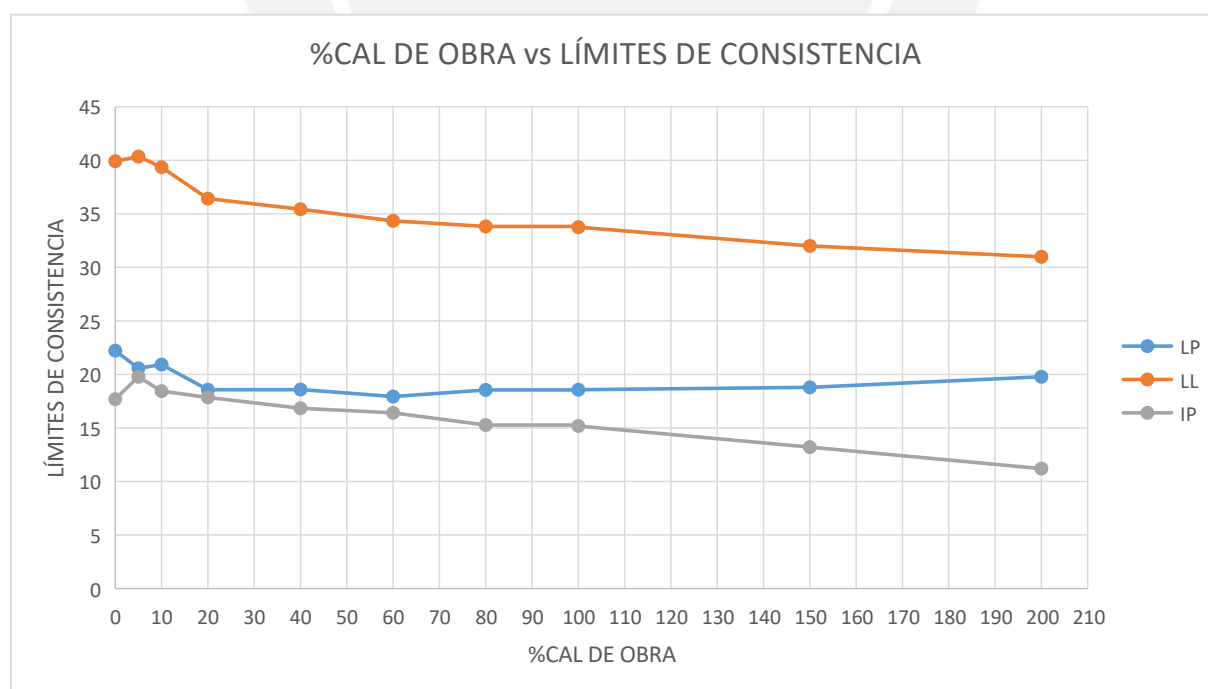


Figura 31: Variación de los límites de consistencia para la mezcla suelo - cal de obra

En el caso de la cal hidráulica, los resultados se muestran en la **Tabla 19** y la **Figura 32**.

Tabla 19: Límites de consistencia para la mezcla suelo – cal hidráulica

% CAL HIDRÁULICA	pH	LP	LL	IP
0	8.56	22.22	39.91	17.69
5	8.37	20.11	40.56	20.45
10	8.27	19.07	42.71	23.63
20	8.17	20.75	44.85	24.09
30	8.07	23.51	49.02	25.51
40	8.02	22.27	52.12	29.85

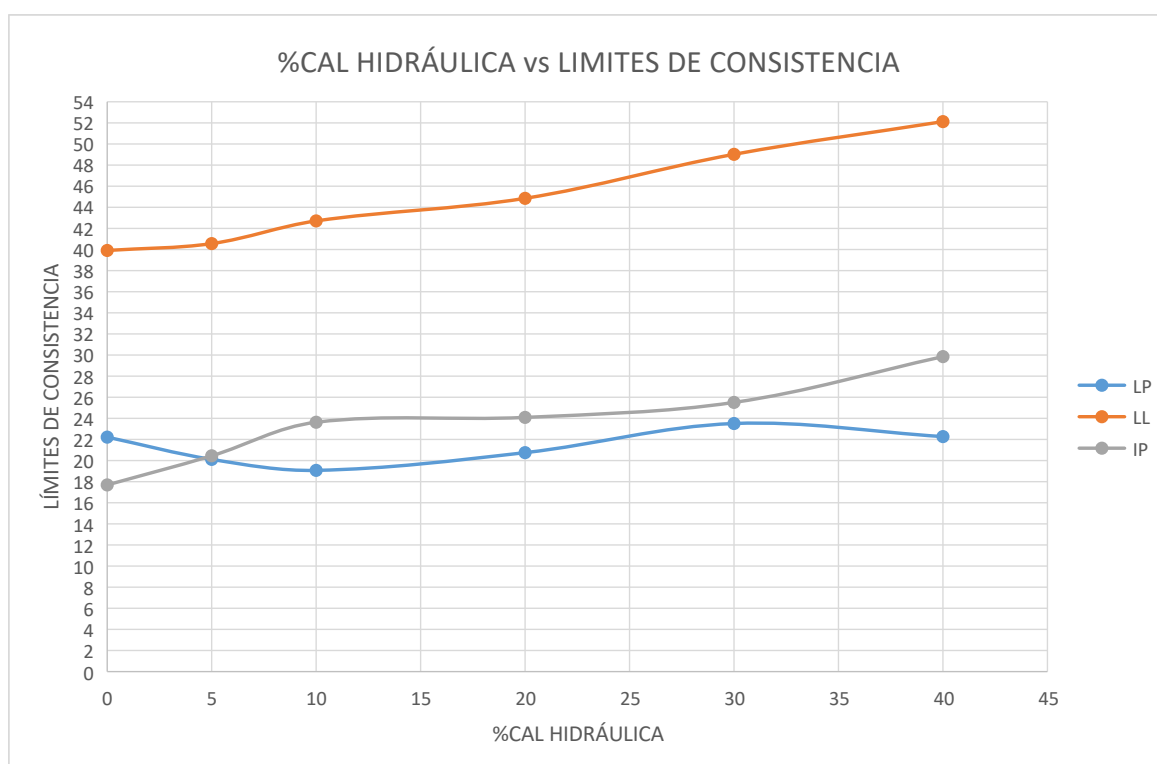


Figura 32: Variación de los límites de consistencia para la mezcla suelo - cal hidráulica

La cal de obra presentó resultados coherentes con respecto a la teoría; sin embargo, la cal hidráulica tuvo un efecto contrario. Aquello pudo deberse a que la cal hidráulica no es una cal de tipo aérea. Finalmente, si bien la teoría menciona que se debe encontrar un porcentaje óptimo de cal para evaluar la resistencia, aquello no pudo obtenerse ya que la cal de obra posee un bajo contenido de cal hidratada. En consecuencia, para la determinación de la resistencia se emplearon probetas de suelo-cal de obra con porcentajes de 80, 100, 150 y 200 % de cal debido a que en este rango de valores se obtuvo un aumento considerable en el pH con respecto a la del suelo natural y una disminución considerable en el IP.

5.4. Determinación de la variación de la resistencia del suelo

El aumento de resistencia del suelo depende de la interacción de diversos factores entre los que resaltan: el tipo de suelo, el tipo de cal empleada (viva o hidratada), el porcentaje de cal y las condiciones y temperatura de curado. Controlando estos factores en el laboratorio, se pueden reproducir las mejoras en la resistencia del suelo, las cuales aumentan a largo plazo en el campo.

La evaluación del aumento de la resistencia de un suelo puede realizarse por medio del ensayo de relación de soporte de california (C.B.R.) o el ensayo de compresión simple no confinada (U.C.S.). Debido a ello, en la presente tesis se realizaron estos ensayos con diferentes dosificaciones de cal de obra con la finalidad de evaluar el aumento de la resistencia de los suelos tratados con mezclas de cal hidratada.

La **Tabla 20**, muestra los resultados de los ensayos C.B.R. sometidos a 4 días de curado. En ellos se evidencia un aumento en la resistencia del suelo. De esta forma se pasa de tener una subrasante de clasificación pobre a tener una subrasante con clasificación buena.

Tabla 20: Resultados de C.B.R al 95% y 100% de la M.D.S de mezcla con cal de obra

% Cal de obra	C.B.R.	
	95%	100%
0	3.5	4.6
80	12.1	23.3
100	15.1	30.5
150	15.6	22.7
200	12.2	17.8

Nota:

Especímenes curados por 96 horas a 22 °C

Así mismo, en la **Tabla 21** se presentan los resultados de las pruebas de compresión simple con probetas elaboradas según las recomendaciones de la National Lime Association. Los resultados obtenidos son típicos de suelos con consistencia dura.

Tabla 21: Resultados de Compresión simple de probetas de suelo mezcladas con cal de obra

% Cal de obra	q ₁ (kg/cm ²)	q ₂ (kg/cm ²)	q _a (kg/cm ²)
0*	0.33	0.41	0.37
80	8.9	9.3	9.1
100	7.5	7.4	7.4
150	12.0	11.5	11.8
200	13.3	13.9	13.6

Donde:

q₁: Resistencia a la compresión simple de la probeta N°1

q₂: Resistencia a la compresión simple de la probeta N°2

q_a: Resistencia a la compresión simple promedio

Nota:

Especímenes curados por 28 días a 22 °C

(*) Condición natural

5.5. Parámetros de diseño de pavimentos con adición de una mezcla de cal de obra

Para diseñar un suelo tratado con cal es necesario determinar el módulo de resiliencia mejorado producido luego de la estabilización del suelo analizado. Para ello, la presente tesis empleó la recomendación de la National Lime Association (2004), que indica que el Mr de un suelo estabilizado con cal debe estimarse por medio de ensayos de compresión simple no confinada (q_u) de probetas curadas a 28 días. La forma de relacionar estos parámetros se muestra en la **Ecuación 5.1**.

$$M_r = 0.124 (q_u) + 9.98 \quad (5.1)$$

Donde:

M_r = Módulo de resiliencia en ksi

q_u = Compresión simple no confinada, psi a 28 días

Los resultados de la resistencia a la compresión simple y módulo de resiliencia para las probetas de suelo con la mezcla de cal hidratada, para los distintos porcentajes de cal analizados, se muestran en la **Tabla 22**.

Tabla 22: Resultados de Compresión simple y módulo de resiliencia de probetas de suelo mezcladas con cal de obra

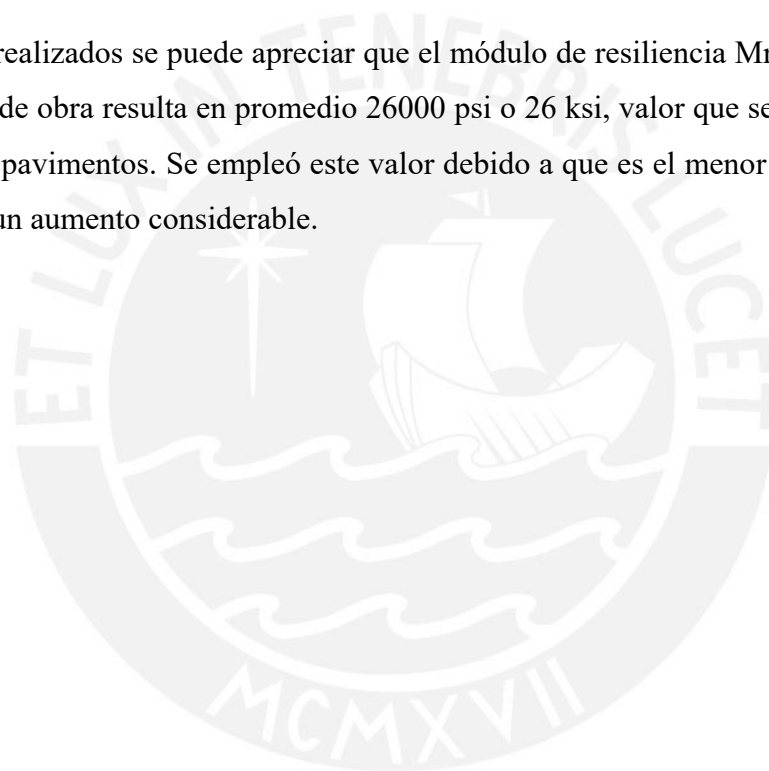
% Cal de obra	q_u (kg/cm ²)	Mr (psi)
80	9.1	26003
100	7.4	23067
150	11.8	30765
200	13.6	33949

Donde:

q_u : Resistencia a la compresión simple

Mr: Módulo de resiliencia

De los ensayos realizados se puede apreciar que el módulo de resiliencia Mr del suelo tratado con 80% de cal de obra resulta en promedio 26000 psi o 26 ksi, valor que será empleado para el diseño de los pavimentos. Se empleó este valor debido a que es el menor porcentaje con el cual se obtiene un aumento considerable.



6. DISEÑO DEL PAVIMENTO FLEXIBLE

Para la carretera Canta – Huayllay, km 57 - 59, se optó por el diseño de un pavimento flexible debido a las condiciones climáticas de la zona y a su bajo costo frente a un pavimento rígido. En primera instancia, se pudo elegir un pavimento rígido por su buen comportamiento frente a subrasantes pobres. Sin embargo, la zona estudiada presenta variaciones considerables de temperatura como se muestra en la **Tabla 23**, lo que ocasionaría problemas en el concreto hidráulico utilizado en este tipo de pavimentos. Una práctica común, para solucionar este problema, sería el empleo de aditivos especiales; no obstante, el precio del cemento con adición de estos químicos resultaría inviable para el proyecto debido al elevado costo que esta alternativa representa.

Tabla 23: Temperatura máxima y mínima por estación meteorológica
(Consortio CESEL - Cal y Mayor, 2018a)

Parámetros	Canta SENAMHI 2974 msnm		Yantac LTPP 4690 msnm		Huayllay LTPP 4301 msnm	
	Temp. mínima (°C)	Temp. máxima (°C)	Temp. mínima (°C)	Temp. máxima (°C)	Temp. mínima (°C)	Temp. máxima (°C)
Promedio (°C)	4.0	20.0	-4.3	17.5	-5.8	16.3
Desv. estándar (°C)	0.77	0.62	0.44	0.51	0.48	0.55
Temp. media anual (°C)	12.6		8.6		7.4	

Es así como, para el tramo estudiado perteneciente a las progresivas de la región de Yantac se empleará un pavimento de cemento asfáltico. Este será del tipo pen 85 – 100 más fibras sintéticas del tipo poliolefina, esta alternativa servirá para mitigar deformaciones producto de la fatiga por efectos de carga y del clima de la zona (Consortio CESEL - Cal y Mayor, 2018). Por otro lado, para el diseño de pavimentos flexibles se disponen del método de diseño de estructuras pavimentos AASHTO y de la metodología alternativa del Instituto del Asfalto. Eligiendo, en la presente investigación, la metodología AASHTO para el diseño del pavimento flexible, por considerarse la metodología más completa.

6.1. Metodología de diseño ASSHTO 1993

La metodología AASHTO tuvo su primera edición en el año 1961, sirviendo de base para las metodologías siguientes. La segunda edición fue publicada en el año 1972 y se mantuvo en

vigencia hasta el año 1983. Tres años después, se realizó la publicación del nuevo “Manual de diseño de estructuras AASHTO-86” y posteriormente la revisión de este manual, la guía AASHTO-93. En años posteriores se publicó la metodología AASHTO 2008, la cual incluye un procedimiento que empieza usar métodos basados en modelos mecánicos y propiedades fundamentales de los materiales. Este método puede recopilar los datos del tráfico actualizados y del clima de los últimos años, para un mejor análisis de los pavimentos a través del tiempo. En el Perú, todavía no se emplea esta metodología debido a que la recolección de los datos aún tomará algunos años en ser recolectada y poder, así adaptar esta guía en el caso peruano. Por lo tanto, en la presente investigación se utilizará, como base para el diseño del pavimento, la metodología AASHTO-93 ya que resulta ser el método más reciente que se puede utilizar a la realidad peruana y en el que se basó el Manual de Carreteras del Perú (MTC, 2013).

El método de la AASHTO menciona procedimientos y recomendaciones para el diseño y rehabilitación de estructuras de pavimentos ya sea de tipo flexible, rígido o afirmados. De esta forma, mediante estos procedimientos se determina el espesor total del pavimento y el cada una de sus componentes estructurales. En el caso del método AASHTO-93, se toma como ecuación de diseño a la siguiente fórmula que estará compuesto por variables independientes y dependientes.

$$\text{Log}_{10}(\text{Wt}_{18}) = Z_R * S_0 + 9,36 * \text{Log}_{10}(\text{SN} + 1) - 0,20 + \frac{\text{Log}_{10} \left[\frac{\Delta \text{PSI}}{4,2-1,5} \right]}{0,4 + \frac{1094}{(\text{SN}+1)^{5,19}}} + 2,32 * \text{Mr} - 8,07 \quad (6.1)$$

De la ecuación se debe calcular las variables independientes; tales como, el número de carga equivalente de 80 kN (Wt_{18}), el valor de la desviación estándar normal (Z_R), la desviación estándar del sistema en función del tráfico y comportamiento del pavimento (S_0), la pérdida de servicialidad (OPSI) y, el Módulo Resiliente de la subrasante, capa de base y capa de subbase granular (Mr). Con todos estos valores y la **Ecuación 6.1** se calcula la variable dependiente que, en este caso, sería el número estructural o capacidad de la estructura (SN). Con este valor, se determinan los espesores de las capas del pavimento. Por lo tanto, para diseñar un pavimento flexible, según el método AASHTO-93, se deben identificar y determinar los valores de las siguientes variables y parámetros.

6.1.1. Cálculo de variables independientes

Número de carga equivalente (W_{t18})

Esta metodología se basa en la determinación de las “Cargas Equivalentes Acumuladas en el Período de análisis para un nivel de servicio (W_{t18})”, calculadas de acuerdo con el procedimiento establecido para el Método AASHTO-72. En esta metodología, el tráfico se evalúa como la suma de las cargas equivalentes del eje estándar para el carril del diseño, tal como se muestra en la **Ecuación 6.2**.

$$ESAL = (ADT)^o(T)(Tf)(G)(D)(L)(365)(Y) = W_{t18} \quad (6.2)$$

Donde la intensidad media del tráfico (ADT) se obtiene del estudio de tráfico del proyecto correspondiente y el periodo de análisis (Y) se determina según la metodología empleada. El método AASHTO 93 recomienda usar periodos de comportamiento mayores a los empleados métodos pasados, en los cuales se solía diseñar solo con periodos de 20 años. Esto con la finalidad de mejorar los análisis a largo plazo entre el costo y el tiempo de vida del pavimento. Los periodos de análisis recomendados para determinadas condiciones de vías (**Tabla 24**):

Tabla 24: Recomendaciones para la duración del periodo de análisis
(AASHTO. 1993)

Clasificación de la vía	Periodo de análisis (años)
Urbana de alto volumen de tráfico	30-50
Rural de alto volumen de tráfico	20-50
Pavimentada de bajo volumen de tráfico	15-25
No pavimentada de bajo volumen de tráfico	10-20

Desviación estándar normal (Z_R)

El nivel de calidad de diseño del pavimento depende de la confiabilidad (R), la variabilidad de las condiciones locales y las variaciones de los parámetros (S_0), y el coeficiente de desviación estándar normal (Z_R), valores de medida de la variabilidad de los datos de entrada. Para el cálculo de este último, se deberá determinar, primero la confiabilidad (R), que según la **Tabla 25**.

Tabla 25: Valores sugeridos de confiabilidad
(AASHTO, 1993)

Tipo de camino	Zona urbana	Zona rural
Rutas interestatales y autopistas	85-99.9	85-99.9
Principales	80-99	75-95
Colectoras	80-95	75-95
Locales	50-80	50-80

Con el valor de la confiabilidad escogido, se procede a determinar la desviación estándar según la **Tabla 26**.

Tabla 26: Valores de desviación estándar normal (Z_R) para diferentes valores de confiabilidad
(AASHTO, 1993)

Confiabilidad, R (%)	Desviación Estándar Normal (Z_R)
50	-0.000
60	-0.253
70	-0.524
75	-0.674
80	-0.841
85	-1.037
90	-1.282
91	-1.340
92	-1.405
93	-1.476
94	-1.555
95	-1.645
96	-1.751
97	-1.881
98	-2.054
99	-2.327
99.9	-3.090
99.99	-3.750

Desviación estándar del sistema (S_0)

La guía AASHTO recomienda para pavimentos flexibles un valor de 0.49 si no se tienen en cuenta variaciones en la evaluación del tráfico, es decir, si este valor es estimado y 0.44 si se el tráfico es calculado.

Perdida de servicialidad (Δ PSI)

Para definir esta variable se deben determinar primero, el valor inicial y final del nivel de servicio correspondiente. La metodología AASTHO 93 considera un valor inicial de índice de servicio (P_0) igual a 4.2 para el diseño de pavimentos flexibles y como valor final (P_t) los mostrados en la **Tabla 27**, que dependen del ADT del proyecto.

Tabla 27: Valores sugeridos de P_t en base a valores de ADT
(AASHTO, 1993)

ADT	P_t
> 10,000	3.0 - 3.5
3,000 - 10,000	2.5 - 3.0
< 3,000	2.0 - 2.5

Módulo Resiliente (M_r)

Finalmente se necesita determinar un Módulo de Resiliencia de la subrasante. Este se obtiene mediante investigación de campo y ensayos de laboratorio como el del C.B.R. Para el cálculo de esta variable se empleó la fórmula propuesta por la guía AASHTO 2008 (**Ecuación 6.3**), debido a que contiene una amplia gama de valores para distintos tipos de suelos en comparación a las fórmulas predecesoras que contienen mayores limitaciones en sus cálculos.

$$M_r = 2555 \times \text{C.B.R.}^{(0.64)} \quad (6.3)$$

6.1.2. Cálculo de variables dependientes

Con los valores calculados y la **Ecuación 6.1** se determina el número estructural (SN), que expresa la resistencia estructural requerida por el pavimento considerado. Para el cálculo de los espesores de las capas estructurales se utilizó la **Ecuación 6.4**:

$$SN = a_1 \times D_1 + a_2 \times D_2 \times m_2 + a_3 \times D_3 \times m_3 \quad (6.4)$$

Donde el subíndice 1 representa a las variables relacionadas con la carpeta asfáltica, el subíndice 2 aquellas relacionadas a la base y el subíndice 3 las relacionadas a la subbase. Las variables independientes de esta ecuación están representadas por los coeficientes estructurales

($a_{1,2,3}$) y los coeficientes de drenaje ($m_{2,3}$), mientras que las variables dependientes son los valores de espesor del pavimento ($D_{1,2,3}$).

Coeficientes estructurales

Estas variables son determinados mediante las **Ecuaciones 6.5 y 6.6**, en las cuales $E_{2,3}$ están en función del estado de tensión y de la humedad de la base o subbase respectivamente.

$$a_2 = 0,249(\log E_2) - 0,977 \quad (6.5)$$

$$a_3 = 0,227(\log E_3) - 0,839 \quad (6.6)$$

El coeficiente estructural para la carpeta asfáltica (a_1) toma los valores recomendados en la **Tabla 28**, dependiendo del tipo de concreto asfáltico utilizado.

Tabla 28: Coeficientes estructurales para carpeta asfáltica
(AASHTO, 1993)

Pavimento asfáltico	a_1
Mezcla caliente	0.40 - 0.44
Mezcla fría	0.30 - 0.40
Mezcla caliente solo con arena	0.30 - 0.40

De igual manera, la AASHTO recomienda valores para los coeficientes estructurales para la base y subbase del pavimento, los cuales son mostrados en las **Tabla 29** y **Tabla 30** respectivamente.

Tabla 29: Coeficientes estructurales para bases
(AASHTO, 1993)

Material de base	a_2
Grava arenosa	0.07
Piedra chancada	0.14
<i>Trata con cemento a los 7 días</i>	
s > 650 psi	0.23
650 psi > s > 400 psi	0.20
s < 400 psi	0.15
<i>Tratada con asfalto</i>	
Con agregado grueso	0.34
con arena	0.30
<i>Tratada con cal</i>	0.15 - 0.30

Tabla 30: Coeficientes estructurales para subbases
(AASHTO, 1993)

Material de subbase	a_3
Arena	0.05
Arena arcillosa	0.10
Arena gravosa	0.11

Coeficientes de drenaje

Los coeficientes de drenaje de la base y subbase se pueden asumir con valores iguales a la unidad de forma conservadora; sin embargo, la **Tabla 31** muestra valores recomendados para los casos en los que se deseen realizar cálculos más exactos.

Tabla 31: Valores recomendados del Coeficiente de Drenaje m_i para Bases y Subbases granulares no tratadas en Pavimentos Flexibles

(AASHTO, 1993)

Calidad de Drenaje	Porcentaje del tiempo en el que el pavimento está expuestos a niveles de humedad cercanos a la saturación			
	Menor a 1 %	1 % - 5 %	5 % - 25 %	Mayor que 25 %
Excelente	1.40 - 1.35	1.35 - 1.30	1.30 - 1.20	1.2
Bueno	1.35 - 1.25	1.25 - 1.15	1.15 - 1.00	1
Regular	1.25 - 1.15	1.15 - 1.05	1.05 - 0.80	0.8
Pobre	1.15 - 1.05	1.05 - 0.80	0.80 - 0.60	0.6
Muy pobre	1.05 - 0.95	0.95 - 0.75	0.75 - 0.40	0.4

Espesores de las capas estructurales

Con las variables independientes calculadas, se procede a determinar y escoger los espesores de las capas estructurales con los siguientes criterios:

$$D_1 \geq SN_1/a_1 \quad (6.7)$$

$$D_2 \geq (SN_2 - a_1 \times D_1)/(a_2 \times m_2) \quad (6.8)$$

$$D_3 \geq (SN_3 - a_1 \times D_1 - a_2 \times D_2 \times m_2)/(a_3 \times m_3) \quad (6.9)$$

6.2. Diseño de pavimento flexible con mejoramiento de subrasante

En el presente subcapítulo, se muestran los diseños realizados para el pavimento flexible considerando mejoramientos por sustitución y de cal de obra.

6.2.1. Mejoramiento de subrasante por sustitución

El tramo de estudio situado entre los kilómetros 57 y 59 de la carretera Canta – Huayllay se diseñó empleando el método AASHTO 93 para pavimentos flexibles, tomando en cuenta las consideraciones de diseño presentadas en la **Tabla 32**:

Tabla 32: Consideraciones de diseño para pavimento flexible con mejoramiento por sustitución de subrasante

	Tipo de vía	Carretera principal en zona rural
	Ciudad	Junín
Capa de rodadura	Tipo de pavimento	Pavimento de cemento asfáltico pen 85/100 más fibra sintética de tipo poliolefina construido con concreto asfáltico en caliente
	Control de Calidad	Alto
Base	Cantera	N 6 Ampliación - km 67 + 300
	Material	A-1-a (0)
	Tratamiento	Voladura, trituración, zarandeo y mezclado
	C.B.R. requerido	Para carretera principal >100 %
	C.B.R.	103 %
Subbase	Cantera	N 6 Ampliación - km 107 + 210
	Material	A-2-4
	Tratamiento	Voladura, trituración, zarandeo y mezclado
	C.B.R. requerido	Para carretera principal >40 %
	C.B.R.	61%
Subrasante mejorada	Material	A-6 (7)
	C.B.R.	17.5 %
Subrasante existente	Material	A-6 (18)
	C.B.R.	3.5 %

Con las consideraciones mencionadas y la metodología planteada en el acápite 6.1 del presente capítulo, se identifican las variables de entrada o independientes para el cálculo del número estructural del pavimento. Para ello se considera un periodo de análisis de 20 años y del estudio de tráfico mostrado en el capítulo 4, se recopila el valor del W_{t18} presentado en la **Tabla 10**. Para la confiabilidad se considera el mayor valor mostrado en **Tabla 25** para una vía principal

de tipo rural y con este se identificó el valor del Z_R . El valor de la desviación estándar del sistema (S_0) fue de 0.44 debido a que se calculó el valor del tráfico. De la misma forma se calcula el valor del ΔPSI utilizando la **Tabla 27**. Finalmente calculamos el valor de M_r empleado la **Ecuación 6.3**. Todo lo mencionado anteriormente, se resume en la **Tabla 33**.

Tabla 33: Variables independientes empleadas en el diseño del pavimento

Variable	Valor
Y(años)	20
W_{t18}	20830000
R(%)	95
Z_R	-1.645
S_0	0.44
P_0	4.2
P_t	3
ΔPSI	1.2
M_r	15956.41

Con las variables independientes se calculó el valor del número estructural del pavimento (SN) empleando la **Ecuación 6.1**. Como resultado se obtuvo un valor de SN igual a 4.97. Para el cálculo de los espesores se consideraron los coeficientes resumidos en la **Tabla 34**, según las tablas mencionadas en el acápite anterior. Cabe mencionar, que se asumirá un valor de coeficiente para drenaje igual a la unidad debido a que no se tiene información respecto a este, tomando en cuenta que este es un valor conservador.

Tabla 34: Coeficientes estructurales y de drenaje empleados en el diseño del pavimento

	a_i (/pulg)	a_i (/cm)	m_i
Pavimento	0.44	0.173	-
Base	0.14	0.055	1
Subbase	0.10	0.039	1

Finalmente, según el cuadro 12.17 del Manual de Carreteras, los valores recomendados de espesores de la capa de rodadura y de la base granular, son 15 y 30 cm respectivamente. Considerando estos valores, se calcula el espesor de la subbase empleando la **Ecuación 6.9**. Dando como resultado un valor de 17 cm. Es así que como resultado final se propuso una combinación estructural de 15 cm de carpeta asfáltica, 30 cm de base y 20 cm de subbase. Esta combinación brinda un SN igual a 5.11, el cual es mayor al requerido.

Ya calculados los espesores estructurales, se procedió a determinar el espesor de la subrasante por sustitución, debido a que el material no es el adecuado para el diseño. Según el cuadro 9.3 del Manual de carreteras del Perú, el espesor recomendado para estabilización por sustitución de suelos es de 75 cm debido a que el proyecto presenta un ESAL de 20 830 000 (MTC, 2013). Por último, con todos los valores anteriormente identificados, calculados y mencionados se obtuvo la configuración mostrada en la **Tabla 35**.

Tabla 35: Espesores resultantes para el diseño del pavimento flexible por mejoramiento por sustitución de subrasante

Capa	Espesor (cm)	Descripción
Carpeta asfáltica	15	Carpeta de rodadura de concreto asfáltico en caliente
Base	30	Base con C.B.R. de 103 % y compactación al 100 % de la densidad seca máxima obtenida de un ensayo Proctor Modificado tipo C
Subbase	20	Subbase con C.B.R. de 61 % y compactación al 100 % de la densidad seca máxima obtenida de un ensayo Proctor Modificado tipo C
Subrasante	75	Subrasante mejorada por sustitución con compactación al 95 % del valor de la densidad seca obtenida de un ensayo Proctor Modificado

6.2.2. Mejoramiento de subrasante por adición de cal de obra

Para el diseño del tramo de estudio situado entre los kilómetros 57 y 59 de la carretera Canta – Huayllay se emplearon las mismas condiciones de diseño que en el subcapítulo anterior especificadas en la **Tabla 32** a diferencia de las características de la subrasante mejorada que en este caso de mejoramiento con una mezcla de suelo-cal de obra el Módulo resiliente empleado será de 26 ksi. Por lo tanto, las variables de entrada que se tomarán en cuenta para resolver la ecuación serán las presentadas en la **Tabla 36** y se obtuvieron de la misma forma que en el subcapítulo anterior.

Tabla 36: Variables independientes empleadas en el diseño del pavimento

Variable	Valor
Y(años)	20
Wt ₁₈	20830000
R(%)	95
Z _R	-1.645
S ₀	0.44
P ₀	4.2
P _t	3
ΔPSI	1.2
Mr	26000.00

Con las variables de entrada se determinó el valor del número estructural del pavimento (SN) empleando la **Ecuación 6.1**. Como resultado se obtuvo un valor de SN igual a 4.11. Para el cálculo de los espesores se consideraron los coeficientes resumidos en la **Tabla 34**, los cuales serán los mismos que en el acápite anterior debido a que las características del pavimento, base y subbase permanecen constantes.

De igual manera, según el cuadro 12.17 del Manual de Carreteras, los valores recomendados de espesores de la capa de rodadura y de la base granular, son 15 y 30 cm respectivamente. Tomando en consideración estos valores, se calcula el espesor de la subbase empleando la **Ecuación 5.9**. Dando como resultado que no se necesitará de una capa de subbase para cumplir el valor del Número estructural (SN) del pavimento. Es así que como resultado final se propuso una combinación estructural de 15 cm de carpeta asfáltica y 30 cm de base. Esta combinación brinda un SN igual a 4.25, el cual es mayor al requerido. Para el espesor de la subrasante se asumirá un valor de 30 cm

Tabla 37: Espesores resultantes para el diseño del pavimento flexible por mejoramiento por adición de cal viva

Capa	Espesor (cm)	Descripción
Carpeta asfáltica	15	Carpeta de rodadura de concreto asfáltico en caliente
Base	30	Base con C.B.R. de 103 % y compactación al 100 % de la máxima densidad seca obtenida de un ensayo Proctor Modificado tipo C
Subrasante	30	Subrasante tratada con cal de obra con compactación al 95 % del valor de la máxima densidad seca obtenida de un ensayo Proctor Estándar

7. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo se analizaron los resultados obtenidos de los ensayos de laboratorio, tales como, el ensayo Eades & Grim, los ensayos de límites de consistencia, ensayos de resistencia del suelo C.B.R. y UCS, y la comparación entre las capas de pavimentos evaluados con diferentes métodos de estabilización de suelos.

7.1. Ensayo Eades y Grim

En el subcapítulo 5.2. Determinación del porcentaje óptimo de cal de obra, se realizaron mediciones de pH y los ensayos de Eades & Grim correspondientes para la cal de obra y la cal hidráulica con la finalidad de evaluar su comportamiento al ser mezcladas con el suelo arcilloso.

En primer lugar, se analizó las variaciones de pH en cada caso. La teoría menciona que la cal ya sea hidratada o viva tiene un pH de 12.4 y se debe llegar a un pH de mezcla suelo-cal igual o mayor a este valor para que se mejoren las propiedades del suelo arcilloso. Con respecto a los ensayos realizados, se obtuvieron los siguientes valores máximos de pH:

Tabla 38: Resumen de máximos valores de pH

	Suelo natural	Cal Hidráulica	Cal de obra	Suelo-Cal Hidráulica	Suelo-Cal de obra
pH	8.56	8.45	11.8	8.02	11.08

De los resultados obtenidos se observó que la mezcla suelo-cal de obra tiene un pH menor a 11.8 pero mayor al del suelo (8.56), existiendo un incremento del pH y un aumento en la alcalinidad del suelo. Sin embargo, en el caso de la cal hidráulica se observó que su pH es muy similar al de la arcilla por lo cual al realizar la mezcla el valor de pH disminuyó.

Del ensayo con cal de obra, se puede decir que se comporta como una cal cálcica puesto que sigue la tendencia de mejora para los suelos arcillosos. Por el contrario, la cal hidráulica posee un comportamiento similar a una arcilla plástica lo que genera una disminución de la alcalinidad del suelo arcilloso. Entonces es importante tener en cuenta los componentes de cada cal comercial puesto que ambos mencionan que poseen cal hidratada; sin embargo, tienen comportamientos diferentes. Esto se debe a que la cal hidráulica se comporta de manera similar a una cal natural NHL, el cual es obtenido a partir de la cocción de calcáreos arcillosos.

Teniendo en consideración este componente, los resultados concuerdan con su comportamiento volviendo al suelo arcillo más plástico.

La poca información sobre su contenido hace posible confundir estas dos cales y su repercusión en las propiedades del suelo mezclado ya que las dos indican un contenido de Ca(OH)_2 ; sin embargo, tienen efectos contrarios. El capítulo 9.5. Suelos estabilizados con cal del Manual de Carreteras del Perú, no hace referencia a estos diferentes efectos que pueden ocasionar los diferentes cales que se encuentran en el mercado.

7.2. Ensayo de límites de consistencia

Con respecto a los ensayos de límites de consistencia, se realizaron para rangos de porcentaje de cal similares a los Ensayos de Eades & Green para evaluar los cambios en el IP con respecto del pH y porcentaje de cal. Los resultados demuestran tendencias similares al ensayo de Eades & Grim realizado. A continuación, se muestra un resumen de los resultados obtenidos en estos ensayos para ambas cales.

Tabla 39: Resumen de resultados del ensayo de límites de consistencia

TIPO DE CAL	% CAL	pH	LP	LL	IP
HIDRÁULICA	0	8.56	22.22	39.91	17.69
	5	8.37	20.11	40.56	20.45
	10	8.27	19.07	42.71	23.63
	20	8.17	20.75	44.85	24.09
	30	8.07	23.51	49.02	25.51
	40	8.02	22.27	52.12	29.85
OBRA	5	7.77	20.57	40.35	19.78
	10	7.84	20.92	39.35	18.44
	20	8.06	18.57	36.42	17.85
	40	8.64	18.59	35.43	16.84
	60	9.19	17.93	34.34	16.41
	80	9.63	18.55	33.82	15.27
	100	10.09	18.57	33.75	15.18
	150	10.60	18.79	32.00	13.21
	200	11.08	19.78	30.98	11.2

Em ambos casos, se podría inferir que el pH tendría una relación inversa al índice de plasticidad (IP). En este sentido, a medida que aumenta o disminuye el pH el IP tiende a un comportamiento contrario del parámetro inicial. Por lo tanto, se puede decir que una primera referencia para conocer si el suelo va a mejorar y volverse menos plástico sería conocer el índice de pH.

Para la cal de obra se observa una disminución en los valores del límite líquido y el índice de plasticidad conforme se le agrega un mayor contenido de esta cal. El índice de plasticidad varía desde un valor de 17.69 a un valor de 11.2 y el límite líquido de 39.91 a 30.98. De los valores, se infiere que la disminución del IP se debe mayormente a la disminución del LL ya que los valores del límite plástico (LP) siguen una tendencia casi constante con pocas variaciones. Cabe resaltar, que disminuir el límite líquido significaría que la arcilla está tendiendo a ser menos expansiva, puesto que según la teoría estudiada las arcillas expansivas tienen una morfología tal que presentan valores de LL elevados. Por lo tanto, se podría inferir que la disminución del límite líquido está siendo provocada por un cambio iónico, como se mencionó en el marco teórico de la presente investigación, y que este proceso está modificando químicamente la morfología de la arcilla.

Referente a los resultados de los ensayos de consistencia para la cal hidráulica, se obtiene un comportamiento contrario; es decir, el índice de plasticidad (IP) y el límite líquido (LL) aumentan conforme al incremento de porcentaje de esta cal. Lo anterior mencionado produce que la mezcla tenga una mayor plasticidad en comparación con el suelo natural, por lo que se estaría comportando como un suelo arcilloso más plástico. El resultado obtenido concuerda con las especificaciones con respecto al uso del producto, pero no con su contenido de cal hidratada.

7.3. Resistencia de suelo

La ecuación de diseño de pavimentos propuesta por la AASHTO emplea el módulo de resiliencia para evaluar la repercusión de la resistencia de la subrasante en el diseño de carreteras. Si bien, existen ensayos para determinar el Módulo Resiliente (M_r) de un suelo, estos no se suelen realizar en el contexto peruano, sino que se correlacionan los valores del M_r en base pruebas C.B.R. o de compresión simple (UCS). Debido a ello en la presente investigación se evaluó cómo la adición de cal modifica los resultados obtenidos de las pruebas de C.B.R. y compresión simple (UCS), las mismas que se presentan en la **Tabla 40**.

Tabla 40: Resultados de Compresión Simple y C.B.R. de probetas de suelo mezcladas con cal de obra

% Cal de obra	C.B.R.		q_u (kg/cm ²)	Mr (psi)
	95%	100%		
80	12.1	23.3	9.1	26003
100	15.1	30.5	7.4	23067
150	15.6	22.7	11.8	30765
200	12.2	17.8	13.6	33949

Por otro lado, la resistencia de la subrasante mejorada por sustitución fue medida por medio del ensayo C.B.R., empleando la **Ecuación 6.3**. Los resultados se muestran en la **Tabla 43**.

Tabla 41: Evaluación de la resistencia para la subrasante mejorada por sustitución

Material	C.B.R. (%)	Mr (psi)
Suelo natural	3.5	5696.32
Subrasante mejorada	17.5	15956.41

7.3.1. Cuantificación del aumento de resistencia con ensayos C.B.R.

La adición de cal de obra modifica la clasificación de subrasante del suelo estudiado. De esta forma, la subrasante inicialmente clasificada como pobre (S_1) con un C.B.R. de 3.5%, mejora su resistencia al punto de clasificarse como buena (S_3) con un C.B.R. de entre 12% y 15%. La misma clasificación se obtiene para el C.B.R. de 17.5% obtenido del mejoramiento de la subrasante por sustitución. Las clasificaciones antes mencionadas se muestran en la **Tabla 42**.

Tabla 42: Rangos de valores de C.B.R. según la categoría de subrasante para el suelo analizado (USACE, 1984)

Categorías de sub rasante	CBR	
S_0 : Sub rasante inadecuado	CBR < 3 %	
S_1 : Sub rasante pobre	3 % < CBR < 6 %	→ Condición inicial
S_2 : Sub rasante regular	6 % < CBR < 10 %	
S_3 : Sub rasante buena	10 % < CBR < 20 %	← Condición estabilizada
S_4 : Sub rasante muy buena	20 % < CBR < 30 %	
S_5 : Sub rasante excelente	CBR > 30 %	

Es preciso comentar que el C.B.R. del material estudiado presentó un aumento de 342% con respecto al C.B.R. inicial cuando se adicional 80 % de cal de obra al suelo estudiado. Este valor fue aumentando a medida que se añadió cal de obra. Sin embargo, se aprecia una reducción en el valor del C.B.R. cuando se adicionó 200 % de cal de obra. Aquello pudo deberse al proceso de colmatación mencionado en el capítulo 2.4, el cual menciona que se pueden obtener resultados contrarios a los esperados pasado un porcentaje de adición de cal hidratada. Por otro lado, el mejoramiento por sustitución permite mejorar el C.B.R. del material en 500%.

7.3.2. Cuantificación del aumento de resistencia con ensayos de compresión simple

La mejora del suelo A – 6 (18), ubicado entre los kilómetros 57 y 59 de la carretera Canta Huayllay, presenta un aumento de 280 % del Mr cuando se evalúa la mejora por sustitución de suelos. Así mismo, la mejora por adición de cal de obra aumenta el valor de Mr en 491 %. Estos resultados consideran que el módulo de resiliencia fue medido en base al C.B.R. para el caso por sustitución y medido en base a los resultados de compresión simple para el caso de estabilización con cal. Esta consideración se realizó debido a que el Manual de Carreteras sugiere evaluar el Mr, en base al C.B.R, mientras que la N.L.A., emplea el valor de los ensayos de compresión simple para determinar el Mr. Si bien, puede surgir la duda de porqué el Mr del suelo mejorado con cal de obra es mayor al tratado por sustitución, dado el hecho de que su C.B.R. es menor, esta puede verse aclarada por medio del proceso de curado empleado. En suelos tratados con cal, la resistencia en campo aumenta a través del tiempo, aquello es mejor reflejado con el curado de las probetas de compresión simple, debido a que presentan un tiempo de 28 días, el cual es mayor a los 4 días a los que son sometidas las probetas de C.B.R.

Por otro lado, al evaluar la consistencia del material de las probetas tratadas con cal en base a los resultados de compresión simple, se puede clasificar el material como duro, debido a que el q_u del material es mayor 4 kg/cm^2 , tal como se muestra en la **Tabla 43**.

Tabla 43: Consistencia de suelos arcillosos en base a pruebas de compresión simple

Descripción	q_u (kg/cm ²)
Muy blando	0.00-0.25
Blando	0.25-0.50
Medianamente Compacto	0.50-1.00
Compacto	1.00-2.00
Muy Compacto	2.00-4.00
Duro	>4.00

→ Consistencia del suelo estabilizado

7.4. Comparación de las capas del pavimento

Luego de realizar los diseños correspondientes, se obtuvieron los espesores de pavimentos mostrados en la **Figura 33**.

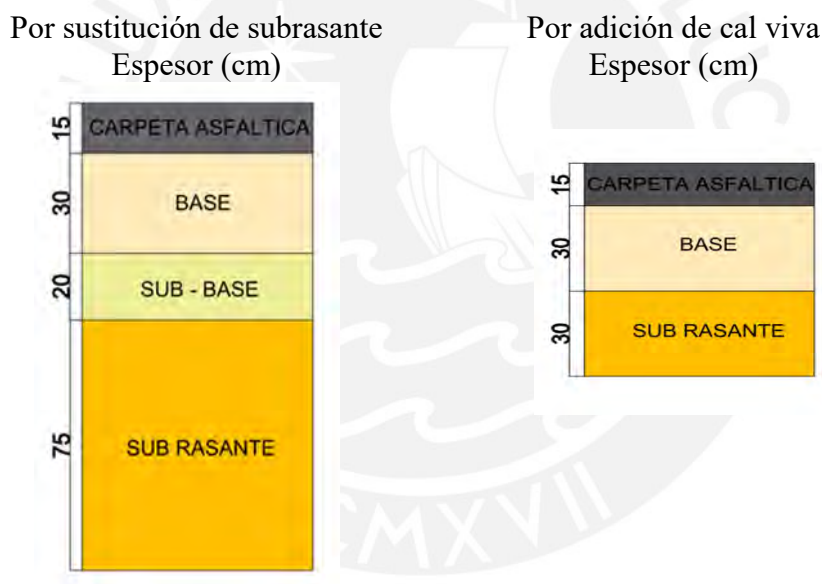


Figura 33: Espesores en cm de capas mejoradas por sustitución y por adición de cal viva

De la **Figura 33**, se aprecia que la mejora por sustitución implica el tratamiento de una capa de subrasante de 75 cm, mientras que la estabilización con cal implica solo una estabilización de 30 cm de subrasante. Por otro lado, la estabilización con cal de obra evitó la necesidad de emplear una capa de subbase. Finalmente, las capas de base y carpeta asfáltica fueron las mismas.

8. CONCLUSIONES

8.1. Conclusiones

Como resultado de la investigación realizada se concluyó lo siguiente:

- El material empleado para la investigación fue una arcilla de mediana plasticidad con clasificación SUCS, CL y AASHTO A – 6 (18) con índice de plasticidad de 17, límite líquido de 40, porcentaje de finos mayor a 94% y C.B.R. igual a 3.5%. Cumpliendo, de esta forma con los requisitos establecidos por el Manual de Carreteras del Perú, para poder ser estabilizada con cal.
- El presente trabajo se realizó empleando un material denominado cal de obra que contiene un porcentaje de 3 – 15 % de cal hidratada. No se pudo emplear cales de una concentración mayor debido a que no se encuentran en el mercado ya que este producto es regulado por la SUNAT permitiendo un porcentaje máximo del 40%.
- En la presente investigación no se logró determinar un porcentaje óptimo de cal de obra a emplear en el mejoramiento debido a que en ninguna de las muestras se obtuvo valores de pH cercanos a 12.4. Por lo cual, se utilizó rangos de porcentajes de cal para evaluar la modificación de sus características y su resistencia.
- En los ensayos realizados de medición de pH y Eades & Green, no se obtuvieron valores de pH cercanos a 12.4 debido a que el material empleado no contiene suficiente cal hidratada para llegar a este valor. Teniendo en consideración que es la cal hidratada la que brinda alcalinidad al producto. Por ello, se puede concluir que si se requiere obtener una mejora en el suelo con cantidades pequeñas del producto se necesita que este posea un alto grado de pureza.
- De los ensayos de Eades & Green realizados en la cal de obra, se puede concluir que este material se comporta como una cal cálcica debido a que el aumento del pH con respecto al incremento de la cantidad de cal concuerda con la tendencia de las cales hidratadas ya estudiadas. Teniendo en su gráfica una pendiente elevada al inicio y luego una disminución de esta hasta llegar a un valor máximo de pH que desciende al final. Aquello evidencia una mejora en el suelo arcilloso estudiado.
- De los ensayos de Eades & Green realizados en la cal hidráulica, se puede concluir que este material disminuye la alcalinidad del suelo, lo cual es un efecto contrario a la teoría de estabilización con cal.

- De los ensayos de límites de consistencia realizados en la cal de obra, se puede concluir que a partir del 40% de esta cal en la mezcla, se observa una disminución en el IP. Con respecto al límite plástico, se puede decir que este se mantiene constante para las diferentes cantidades de cal. Sobre el límite líquido, se observó que este disminuye a medida que se añadió la cal de obra. Por lo tanto, se puede concluir que se está produciendo por un intercambio iónico, el cual modifica químicamente la morfología de la arcilla.
- De los ensayos de límites de consistencia realizados en la cal de hidráulica, se puede concluir que este material se comporta como una arcilla plástica y no cumple con el objetivo de mejoramiento de un suelo arcilloso puesto que le brinda una mayor plasticidad.
- El efecto que tenga una cal sobre un suelo arcilloso dependerá de los componentes de cada producto. Cabe mencionar, que no todas las cales que contengan cal hidratada brindaran una mejora y un uso en la estabilización de suelos.
- De las variaciones de pH observadas en los ensayos con la cal hidráulica y la cal de obra, se puede inferir que la disminución o aumento de este índice influirá en las características de plasticidad. Es decir, si el pH disminuye el índice de plasticidad aumentará y viceversa.
- El porcentaje mínimo de cal de obra que permite estabilizar el suelo A-6 (18), encontrado entre los Km 57 y 59 de la carretera Canta – Huayllay es 80% en porcentaje de suelo seco. Este valor no cumple con la recomendación dada en la norma de estabilización de suelos y taludes CE.020, la cual indica que el porcentaje de cal empleado para estabilizar suelos debe estar comprendido entre 2% y 8%. Aquello se debe a que no se emplearon cales con alto grado de pureza, sino que se empleó un material con porcentajes de cal hidratada de entre 3 y 15%.
- La ecuación de diseño de pavimentos propuesta por la AASHTO emplea el módulo de resiliencia para evaluar la repercusión de la resistencia de la subrasante en el diseño de carreteras. Estos valores fueron medidos por medio del ensayo C.B.R. para el caso por sustitución y por medio del ensayo de compresión simple (U.C.S.) para el caso del suelo mezclado con cal. Aquello siguiendo las recomendaciones del Manual de Carreteras del Perú y la National Lime Association respectivamente.

- La adición de cal de obra modificó la clasificación de la subrasante del suelo estudiado, convirtiendo esta capa inicialmente clasificada como pobre (S_1 , C.B.R de 3.5%) en una buena (S_3 , C.B.R entre 12% y 15%). La misma clasificación se obtiene para el C.B.R. de 17.5% obtenido del mejoramiento de la subrasante por sustitución.
- El material estudiado presentó un aumento de 342% de C.B.R. cuando se mezcló con 80 % de cal de obra. Dicho valor aumentó a medida que se añadió una mayor cantidad de cal de obra, apreciándose una reducción cuando se adicionó 200 % del compuesto. Se considera que aquello se debió al proceso de colmatación mencionado en el capítulo 2.4. Este menciona que se pueden obtener pérdidas de resistencia si es que se adicionan excesivos porcentajes de cal hidratada.
- El mejoramiento por sustitución permite mejorar el C.B.R. del material en 500%. El material empleado para tal fin fue de tipo A-6 (7) con 17.5 % de C.B.R.
- El módulo de resiliencia fue medido en base al valor de C.B.R. para el caso por sustitución y medido en base a los resultados de compresión simple para el caso de estabilización con cal de obra. Esta consideración se realizó siguiendo los lineamientos propuestos por el Manual de Carreteras del Perú y la National Lime Association respectivamente.
- En los suelos tratados con cal, la resistencia en campo aumenta a través del tiempo, aquello es reflejado en el laboratorio por medio del curado. Debido a ello la N.L.A. sugiere trabajar con probetas de compresión simple curada a 28 días respecto a ensayos C.B.R. los cuales son curados a 4 días.
- El material estudiado presenta un aumento de 280 % del M_r cuando se evalúa la mejora por sustitución de suelos. Así mismo, la mejora por adición de cal de obra aumenta el valor de M_r en 491 %.
- El módulo de resiliencia (M_r) empleado en el diseño de la carretera mejorada con cal fue 26 ksi. Este valor se calculó en base a la metodología propuesta por la National Lime Association (NLA), la cual recomienda determinar el módulo de resiliencia en base a ensayos de compresión simple curados a 28 días.
- De la estabilización por sustitución de suelo se obtuvieron espesores de capas de 15 cm de carpeta asfáltica, 30 cm de base, 20 cm de subbase. En cuanto al diseño por estabilización con adición de cal de obra, se obtuvieron espesores de 15 cm de carpeta asfáltica, 30 cm de base. Finalmente, se resalta que emplear cal de obra como elemento estabilizante evita el empleo de una capa de subbase.

- En el mercado, los productos más comerciales que contienen cal hidratada son la cal hidráulica y cal de obra. La cal hidráulica contiene un mayor porcentaje de cal hidratada por lo que debería tener un mayor efecto estabilizante que la cal de obra; sin embargo, produce un efecto contrario. La poca información sobre la composición de ambos productos hace posible confundir estas dos cales y su efecto en las propiedades del suelo mezclado.
- Los trabajos realizados corresponden solo al material arcilloso con las características mencionadas anteriormente

8.2. Comentarios

Tipo de pavimento

- Los pavimentos rígidos distribuyen mejor la carga sobre un terreno que los pavimentos flexibles, por lo que presentan un buen comportamiento cuando se emplean sobre subrasantes pobres. Sin embargo, las fluctuaciones climáticas de la zona estudiada, aquellas que rondan temperaturas entre -4.3°C y 17.5°C , ocasionan problemas en el concreto hidráulico empleado en este tipo de pavimentos, impidiendo su empleo sin un aditivo especializado. Por tal motivo se decidió realizar los diseños con un pavimento flexible, ya que este representa una alternativa económicamente más rentable comparada a la anterior.

Suelos arcillosos

- A pesar de que dos arcillas presenten similar granulometría, tendrán comportamientos diferentes dependiendo de su formación geológica. Dicho comportamiento se evidenciará mejor cuando se agreguen aditivos como sulfatos u óxidos.

El ciclo de la cal:

- Las cales más empleadas en la construcción son las cales cálcicas. Estas sufren un proceso de transformación, partiendo de la piedra caliza, pasando por cal viva por medio de un proceso de calcinación, convirtiéndose luego en cal hidratada luego de la adición de agua y finalmente volviendo a pasar a una piedra caliza de menor resistencia por medio de un proceso de secado.

Reacciones que se generan

- Al agregar cal hidratada a un suelo arcilloso blando parcialmente saturado se producen 2 reacciones. A corto plazo y en un lapso de minutos se produce un intercambio iónico y floculación de la muestra. Lo que produce un aumento de resistencia y cambio de consistencia del suelo, pasando de un estado plástico y fino a una contextura granular. Finalmente, a largo plazo se produce la estabilización de la mezcla, la cual produce una reacción similar al del cemento portland, formando silicatos y aluminatos cálcicos hidratados los cuales se mantienen permanentemente.

Efectos que se producen

- Entre los efectos que se producen se encuentran: la reducción de la humedad, modificación de la granulometría, reducción del índice de plasticidad, aumento de la trabajabilidad, reducción del potencial de cambio volumétrico, aumento de la resistencia a mediano y corto plazo, y la modificación de las características de compactación.

Consideraciones para estabilizar un suelo con cal

- Para que un suelo pueda ser mejorado con cal, este debe poseer un C.B.R. $< 6\%$, $IP > 10$ para que se produzca una reacción positiva, particularmente suelos con $IP > 15$ ven reducido su índice de plasticidad.
- Entre los principales factores que afectan la estabilización de un suelo con cal se encuentran: poseer un contenido de arcilla mayor 7% , un porcentaje que pasa la malla 200 mayor a 25% , un índice de plasticidad mayor a 10 , poseer un contenido de materia orgánica menor a 1% , garantizar un contenido de sulfatos menor a 3000 ppm (de lo contrario se debe emplear un tratamiento) y generar un pH mínimo de 12.4 .
- Para que las mejoras que se obtienen de estabilizar un suelo con cal sean de carácter permanente, se debe garantizar que el pH resultante de adicionar cal viva a un suelo debe ser como mínimo 12.4 pH .

Cómo evaluar la resistencia

- Debido a que las técnicas de mejora se aplican sobre la subrasante, en primera instancia se propuso evaluar el C.B.R. del suelo. Sin embargo, la literatura sugiere emplear pruebas de compresión simple no confinada, para evaluar el aumento de resistencia en el suelo considerando efectos de curado a 28 días. De esta forma se permite que se genere una reacción puzolánica en el suelo, produciendo una cementación similar a la que se

produciría en campo. Este efecto no suele ser evaluado cuando se realizan pruebas de C.B.R., debido a que el ensayo no está diseñado para evaluar suelos con tiempos prolongados de curado.

Regulación de cal en el Perú

- La alternativa de estabilización con cal ha demostrado ser buena en el mejoramiento de suelos arcillosos por lo que se debería facilitar su obtención para proyectos de obras civiles. En la actualidad en el Perú, solo es empleada en proyectos mineros que poseen la facilidad de realizar el trámite y su posterior fiscalización del producto.

Productos en el mercado peruano

- Existen diferentes tipos de cales comerciales en el Perú; sin embargo, las especificaciones técnicas de estas no son detalladas al público y podrían generar confusiones al momento de su uso. Por lo cual, sería importante que estos productos fueran más detallados en su composición la cual determina sus usos.

Normativa peruana

- Las normativas peruanas no presentan un procedimiento riguroso para determinar el porcentaje óptimo de cal para la estabilización de suelos arcillosos. Por el contrario, referencia las recomendaciones dadas por la National Lime Association.
- En la normativa peruana, no se hace referencia a los grados de pureza que debería tener la cal empleada en la estabilización. Tampoco se mencionan los diferentes tipos de cal encontrados en el mercado y los diferentes efectos que pueden ocasionar.

8.3. Recomendaciones

Con la finalidad profundizar el estudio del comportamiento de suelos arcillosos tratados con cal viva se recomienda:

- Realizar pruebas de C.B.R. en campo, para contrastar el aumento de resistencia obtenido en el laboratorio y en el campo
- Evaluar por medio de ensayos de difracción de rayos X, los minerales que se forman luego de estabilizar las mezclas con cal de obra

- Analizar aspectos físicos y mecánicos de la mezcla suelo cal de obra no contemplados en esta tesis, tales como, succión, porcentaje de expansión y colapsabilidad
- Evaluar el cambio químico que está sucediendo al mezclar suelo arcilloso con cal de obra para determinar el motivo de la variación del límite líquido.
- Evaluar el impacto económico que representaría emplear la cal de obra como tratamiento de suelo frente a la sustitución de material.



9. BIBLIOGRAFÍA

- Amaya, M. E. (2017). Estabilización de suelos superficiales del NAICM con óxido de calcio (CaO) (tesis de maestría). Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México. Recuperado de <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/handle/132.248.52.100/13690?show=full>
- Amaya, M. E. (2019). Estabilización de suelos con cal. Simposio llevado a cabo en el XVI Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica, Cancún, México.
- Amaya, M. E., Botero, E. J., & Ovando, E. S. (2019). Lime stabilisation of highly compressible surface from soils in ex-Lake Texcoco, México. *Environmental Geotechnics*. Recuperado de <https://doi.org/10.1680/jenge.18.00139>
- Ara, R. M. (2015). Comparación del diseño de mezcla asfáltica en caliente, utilizando filler procesado o agregado mineral (polvo de roca) y el filler natural (limo no plástico), aplicando el método marshall para capa de rodadura de 3/4" (tesis de licenciatura). Ciudad de Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala. Recuperado de <http://www.repositorio.usac.edu.gt/3206/1/Ra%C3%B9l%20Naaman%20Ara%20Donis.pdf>
- Asociación Nacional de Fabricantes de Cales y Derivados de España (2008). El sector. Recuperado de http://www.ancade.es/El-Sector-_es_26.html
- ASTM International. (2016). ASTM D-1883. Standard test method for California Bearing Ratio (CBR) of Laboratory - Compacted Soils. Recuperado de <https://www.astm.org/Standards/D1883>
- ASSHTO. (1993). Guide for Design of Pavements Structure. Washintong, D. C.
- ASSHTO. (2017). ASHHTO M 145-91. Standar Specification for Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes. Washintong, D. C.
- Bauza, J. D. (2003). Estabilización de suelos con cal. Mezclas con cemento en las infraestructuras de transporte. Conferencia llevada a cabo en Madrid, España. Recuperado de <https://www.elabora.es/index.php/divulgacion/item/56-estabilizacion-de-suelos-con-cal>

- Bennett, R. H. & Hulbert, M. H. (1986). Clay Microstructure. Boston, Estados Unidos: Reidel Publishing Company.
- Castañeda, J (2019). Lime Stabilization. Simposio llevado a cabo en el XVI Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica, Cancún, México.
- Celauro, B., Bevilacqua, A., Lo Bosco, D. & Celauro, C. (2012). Design Procedures for Soil - Lime Stabilization for Road and Railway Embankments. Part 2 - Experimental Validation. 5th International Congress - Sustainability of Road Infrastructures. Recuperado de <https://doi: 10.1016/j.sbspro.2012.09.925>
- Consorcio CESEL - Cal y Mayor. (2018a). Estudio Definitivo de Saldo de Obra: Rehabilitación y Mejoramiento de la Carretera Lima - Canta - La Viuda - Unish. Tramo Canta - Huayllay. Volumen N°1: Resumen ejecutivo [Estudio]. Recuperado de <http://gis.proviasnac.gob.pe/expedientes/2019/Canta-Huallay/Expediente%20T%C3%A9cnico/>
- Consorcio CESEL - Cal y Mayor. (2018b). Estudio Definitivo de Saldo de Obra: Rehabilitación y Mejoramiento de la Carretera Lima - Canta - La Viuda - Unish. Tramo Canta - Huayllay. Volumen N°2: Estudio de ingeniería – Estudio de tráfico [Estudio]. Recuperado de <http://gis.proviasnac.gob.pe/expedientes/2019/CantaHuallay/Expediente%20T%C3%A9cnico/>
- Consorcio CESEL - Cal y Mayor. (2018c). Estudio Definitivo de Saldo de Obra: Rehabilitación y Mejoramiento de la Carretera Lima - Canta - La Viuda - Unish. Tramo Canta - Huaylla. Volumen N°2: Estudios de ingeniería – Estudio de suelos, canteras, fuentes de agua y pavimentos [Estudio]. Recuperado de <http://gis.proviasnac.gob.pe/expedientes/2019/Canta-Huayllay/Expediente%20T%C3%A9cnico/>
- Consorcio CESEL - Cal y Mayor. (2018d). Estudio Definitivo de Saldo de Obra: Rehabilitación y Mejoramiento de la Carretera Lima - Canta - La Viuda - Unish. Tramo Canta - Huaylla. Volumen N°2: Estudios de ingeniería - Planos Tomo I [Estudio]. Recuperado de <http://gis.proviasnac.gob.pe/expedientes/2019/Canta-Huallay/Expediente%20T%C3%A9cnico/>
- Chávez, D. M. & Odar, G. (2019). Propuesta de estabilización con cal para subrasantes con presencia de suelos arcillosos en bofedales y su influencia en el pavimento rígido bajo la metodología de diseño AASHTO 93 aplicado al tramo 1 de la carretera Oyón-Ambo. (tesis de licenciatura). Lima: Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas. Recuperado de <https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/625903?locale-attribute=es>

- Cuadros, C. A. (2017). Mejoramiento de las propiedades físico-mecánicas de la subrasante en una vía afirmada de la red vial departamental de la región Junín mediante la estabilización química con óxido de calcio (tesis de licenciatura). Junín: Universidad Peruana Los Andes. Recuperado de <http://repositorio.upla.edu.pe/handle/UPLA/297>
- Da Silva, M. (2016). Estudo de estabilização com cal de um solo laterítico e um solo não laterítico (tesis de maestría). São Paulo: Universidad de São Paulo. Recuperado de <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18143/tde-01092016-102359/publico/DissertacaoSilvaMF.pdf>
- De Oliveira, E. (2010). Emprego da cal na estabilização de solos finos de baixa resistência e alta expansão: Estudo de caso no Município de Ribeirão Das Neves/Mg (tesis de maestría). Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catalina. Recuperado de <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/93651>
- Decreto Supremo N.º 268-2019-EF. (21 de agosto de 2019). Decreto Legislativo, N° 1126. Diario Oficial El Peruano, 21 de agosto de 2019.
- Eades, J. L. & Grim, R. E. (1960). Reaction of Hydrated Lime With Pure Clay Minerals in Soil Stabilization. University of Illinois.
- Eades, J. L. & Grim, R. E. (1964). Formation of New Minerals with Lime Stabilization as Proven by Field Experiments in Virginia. Stabilization. University of Illinois.
- Eades, J. L. & Grim, R. E. (1966). A Quick Test to Determine Lime Requirements For Lime Stabilization. University of Illinois.
- Elizondo, F., Navas, A., Sibaja, D. (2011). Efectos de la cal en la estabilización de subrasantes. Ingeniería. 20 (1 y 2), 3-7. doi: 10.15517/RING.V2011.2.7268
- Elizondo, F., Navas, A. & Sibaja, D. (2011). Efectos de la cal en la estabilización de subrasantes. Ingeniería. 20 (1 y 2), 3-7. doi: 10.15517/RING.V2011.2.7268
- Federal Highway Administration. (1975). A Review of Engineering Experiences with Expansive Soils in Highway Subgrades: Interim Report. United States.
- FOCCAL. (2019, noviembre 02). Diferencias entre cal viva y cal hidratada [Tabla]. Recuperado de <http://foccal.org/infoccal.html>

- Garnica, P., Gómez, J. & Sesma J. (2002). Mecánica de materiales para pavimentos. Secretaría de comunicaciones y transportes Instituto Mexicano del Transporte. Recuperado de <https://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt197.pdf>
- García, E. & Suárez, M. (s.f). Las arcillas propiedades y usos. Recuperado de <https://bvhumanidades.usac.edu.gt/items/show/1752>
- Greaves, H. M. (1996). An introduction to lime stabilization. Simposio llevado a cabo en la conferencia Lime stabilization. Proceedings of the seminar held at Loughborough University, civil and building engineering. London, Reino Unido.
- Grim, R. E. (1940). The clay minerals in soils and their significance. University of Purdue, pp 216-223
- Heathcote, K. A. (1995). Durability of earthwall buildings. Construction and building materials 9, 185–189
- Huezo, H. M. & Orellana, A. C. (2009). Guía básica para estabilización de suelos con cal en caminos de baja intensidad vehicular en el salvador (tesis de licenciatura). Santa Ana: Universidad Católica del Salvador. Recuperado de <http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/2138>
- Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones. (2012). Manual de estabilización de suelos con cal y cemento. Madrid: España. Recuperado de <http://www.anter.es/pdf/MANUAL-SUELOS.pdf>
- Jain, R. (2016). Presentation on rigid pavement. [Figura]. Recuperado de <https://www.slideshare.net/pjainrahul/rigid-pavement-68226826>
- Jara, R. (2014). Efecto de la cal como estabilizante de una subrasante de suelo arcilloso. (tesis de licenciatura). Cajamarca: Universidad Nacional de Cajamarca. Recuperado de <http://repositorio.unc.edu.pe/handle/UNC/686>
- Labuschagne, C., Brent, A. C. & Erck, R. P. (2005). Assessing the sustainability performances of industries. Journal of Cleaner Production 13, 373
- Lime Association of Texas. (1995). Handbook for Stabilization of Pavements Subgrades and Bases Courses with Lime. Texas, U.S.A.: Library of Congress
- Lime Association of Texas. (2019). How to Lime Stabilizes Soil [Figure]. Recuperado <https://limetexas.org/soil-stabilization/>

- Mamani, L. E. & Quispe, A. J. (2017). Estabilización de suelos arcillosos aplicando ceniza de madera de fondo, producto de ladrilleras artesanales en el departamento de Ayacucho (tesis de licenciatura). Ayacucho: Universidad San Martín de Porres. Recuperado de <http://www.repositorioacademico.usmp.edu.pe/handle/usmp/3635>
- Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento. (2012). CE.020 – Estabilización de Suelos y Taludes [Norma Técnica]. Lima.
- Ministerio de Transporte Comunicaciones. (2013). Manual de suelos, geología, geotecnia y pavimentos [Manual]. Lima.
- Montejo, A. (2002). Ingeniería de Pavimentos para Carreteras. Bogotá, Colombia: Universidad Católica de Colombia Ediciones y Publicaciones.
- National Lime Association. (1995). Stabilization of Pavement Subgrades & Base Courses with Lime. Recuperado de <https://www.lime.org/publications/free-downloads/>
- National Lime Association. (2004). Manual de Estabilización de Suelos tratados con Cal [Manual]. Recuperado de <https://www.lime.org/publications/free-downloads/>
- National Lime Association. (2005). Lime Trated Soil Save Time & Money [Folleto]. Recuperado de <https://www.lime.org/publications/free-downloads/>
- National Lime Association. (2006). Mixture Design and testing Procedures for lime Stabilized Soil [Folleto]. Recuperado de <https://www.lime.org/publications/free-downloads/>
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2009). Recommended Practicefor Stabilization of Sulfate-Rich Subgrade Soils. Washinton D.C., Estados Unidos: The National Academies Press. Recuperado de <https://doi.org/10.17226/22997>
- Ochoa, P. A., Gutiérrez, A. S., Cogollos, J. B. & Vandecasteele, C. (2010). Cleaner production in a small lime factory by means of process control. *Journal of Cleaner Production* 18, 1171-1176
- Ortiz, A. L. (2017). Instructivo del proceso constructivo de una vía en pavimento flexible. [Figura]. Recuperado de <http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/6833/2/OrtizManceraAngieLorenaAnexo-1.pdf>

- Patrone, J. & Enrique J. (s.f.). La acción de suelos expansivos sobre cimentaciones. [Figura]. Recuperado de http://www.um.edu.uy/_upload/_descarga/web_descarga_204_Accinde_suelosexpansivos..Nmero4.pdf
- Saavedra, V. J. (2013). Tecnología de los materiales. Recuperado de http://biblioteca.uns.edu.pe/saladocentes/archivoz/curzoz/semana_5_la_cal_2013.pdf
- Secretaría de Comunicaciones y Transporte de México (2002). Características de los materiales. Materiales para pavimentos: Cal para la estabilización. [Norma]. <https://normas.imt.mx/normativa/N-CMT-4-03-001-02.pdf>
- Torres, R. A. (2007). Análisis comparativo de costos entre el pavimento flexible y el pavimento rígido (tesis de licenciatura). Ciudad de Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala. Recuperado de http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_2802_C.pdf
- UNE (2002). UNE-EN 459-1. Cales para la construcción. Parte 1: Definiciones consideraciones y criterios de conformidad [norma]. Recuperado de <https://www.aenor.com/normas-y-libros/buscador-de-normas/une/?c=N0056852>
- UNIFORT. (2017). Pavimentos flexibles y pavimentos rígidos. Recuperado de <https://www.unifort.es/pavimentos-industriales/pavimentos-flexibles-pavimentos-rigidos/>
- U. S. Army Corps of Engineers. (1984). Soil Stabilization for Pavements Mobilization Construction. Recuperado de <https://www.publications.usace.army.mil/USACE-Publications/Engineer-Manuals/u43544q/73746162/>
- Villarino, A. (2011). Ciencia y tecnología de los materiales, tema 2: La cal. Recuperado de <http://ocw.usal.es/eduCommons/enseanzas-tecnicas/ciencia-y-tecnologia-de-losmateriales/con-tenido/PORTADA.pdf>





ANEXO 1: DISEÑO DE PAVIMENTOS

Diseño del pavimento con subrasante mejorada por sustitución

K1	K2	K3	K1-K2
16.312489	9.750809634	-0.352183	6.5616796

J1	J2	J1 + J2	SN	(K1-K2)=(J1+J2)
7.2620142	-0.700333569	6.5616806	4.968	-9.77651E-07

ESTRUCTURA		H (cm)	SN Parcial	SN diseño
Carpeta de Rodadura	D ₁	15	2.60	4.97
Capa Base	D ₂	30	1.65	
Sub base	D ₃	20	0.78	
		SN Total	5.03	

Diseño del pavimento con subrasante mejorada con cal de obra

K1	K2	K3	K1-K2
16.312489	10.24285442	-0.352183	6.0696349

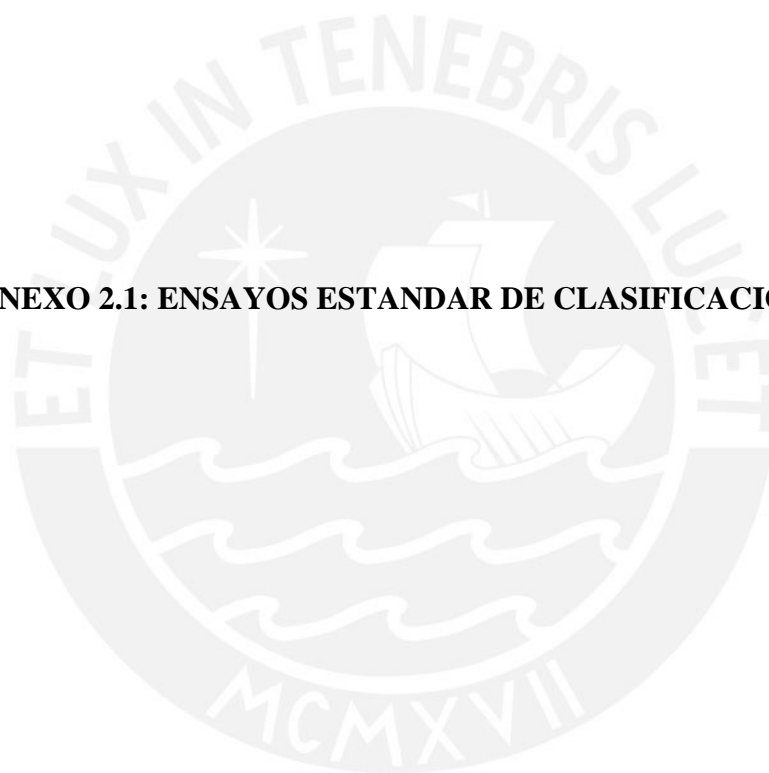
J1	J2	J1 + J2	SN	(K1-K2)=(J1+J2)
6.6308196	-0.558744906	6.0720747	4.110	-0.002439867

ESTRUCTURA		H (cm)	SN Parcial	SN diseño
Carpeta de Rodadura	D ₁	15	2.60	4.11
Capa Base	D ₂	30	1.65	
Sub base	D ₃	0	0.00	
		SN Total	4.25	



ANEXO 2: ENSAYOS DE LABORATORIO

ANEXO 2.1: ENSAYOS ESTANDAR DE CLASIFICACIÓN





PROYECTO:	CARRETERA CANTA HAYLLAY, KM 57 - 59			
UBICACIÓN:	CANTA - LIMA	ELAB. POR:	D.P.G	03-mar-21
CLIENTE:	TESIS - PUCP	REV. POR:	G.D.R	
N° ESTUDIO:	ES-0103	CUADRO:	0103-GM-01	
SONDEO / ZONA :	C-01	FORMATO:	FORM-LB-01	

**ENSAYOS ESTANDAR DE CLASIFICACIÓN
(ASTM D422 - D4318- D2487 - D3282)**

SONDEO	C-1				CLASIFICACIÓN	
Profundidad (m)	1.5				SUCS	DESCRIPCION
Tipo de Muestra	M-01					
Tamiz	Abertura (mm)	Porcentaje acumulado que pasa (%)				C-1 : 1.5
3"	76.20	100.00				CL
2"	50.80	100.00				Arcilla de baja plasticidad
1½"	38.10	100.00				
1"	25.40	100.00				
¾"	19.05	100.00				
½"	12.70	100.00				
3/8"	9.53	100.00				
N°004	4.75	100.00				
N°010	2.00	99.90				
N°020	0.85	99.25				
N°040	0.43	98.48				
N°060	0.25	97.82				
N°140	0.11	94.26				
N°200	0.08	94.25				

Distribución Granulométrica	
D ₁₀	—
D ₃₀	—
D ₆₀	—
Coefficiente de Uniformidad: Cu	—
Coefficiente de Curvatura: Cc	—
% GRAVAS	0.00
% ARENAS	5.76
% FINOS	94.25

VERIFICACIÓN



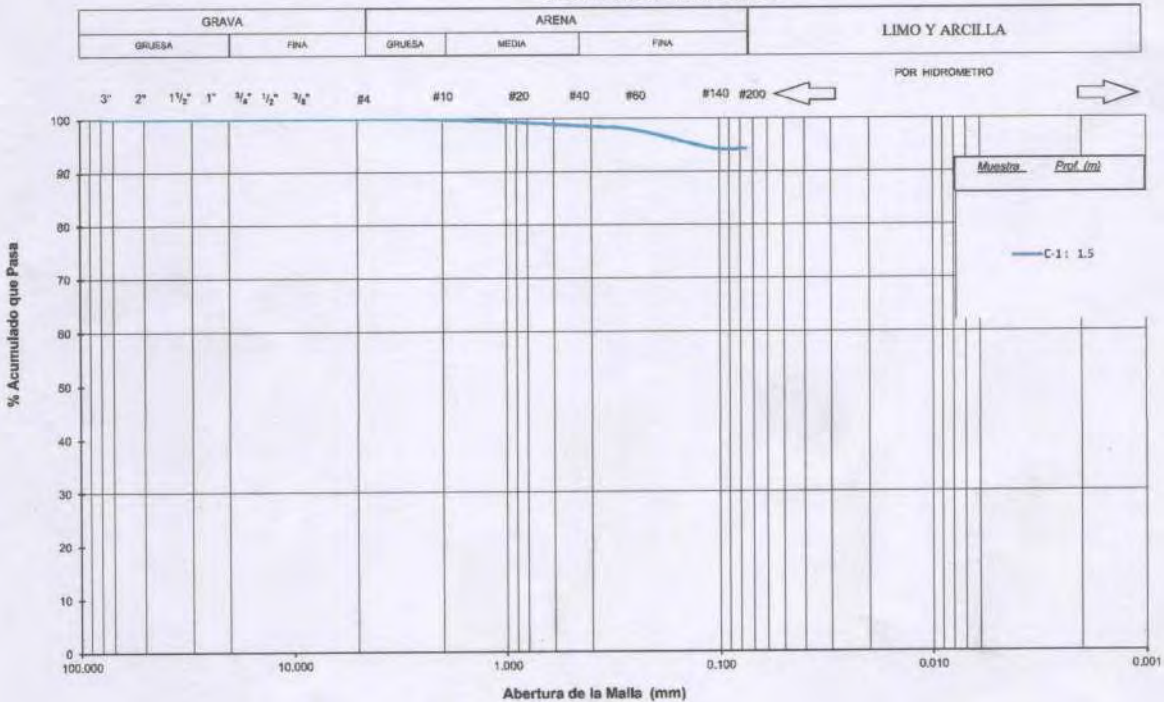
Ing. Gary Durán Ramírez
CIP: 164471

Jefatura de Laboratorio

Límites de Consistencia	
Límite Líquido (LL) (%)	39.91
Límite Plástico (LP) (%)	22.22
Índice Plástico (IP) (%)	17.69
Límite de Contracción (LC) (%)	—
Contenido de Humedad (%)	—

Clasificación	
SUCS	CL
AASHTO	A-6 (18)

CURVA GRANULOMÉTRICA



OBSERVACIONES:



PROYECTO:	CARRETERA CANTA HAYLLAY, KM 57 - 59			
UBICACIÓN:	CANTA - LIMA			
CLIENTE:	TESIS - PUCP			
N° ESTUDIO:	ES-0103	EJEC. POR:	D.P.G	06-mar-21
SONDEO:	NATURAL	REV. POR:	G.D.R	
PROFUNDIDAD:	1.50 m	CUADRO:	0103-LL-01	
TIPO DE MUESTRA:	ALTERADA	FORMATO:	FORM-LB-03	

ENSAYO DE LÍMITES DE CONSISTENCIA

(ASTM D - 4318 / NTP 339.129)

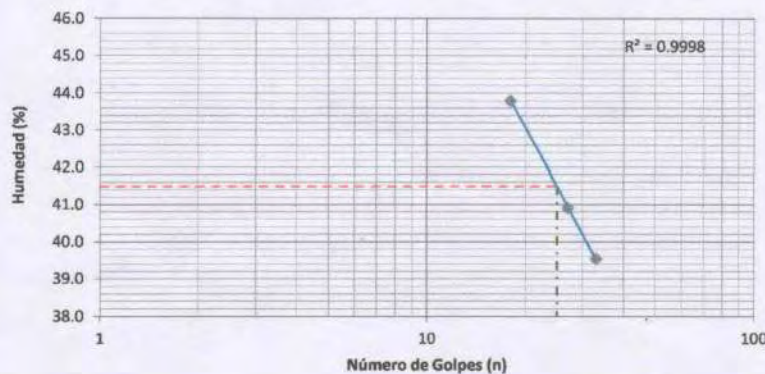
LÍMITE PLÁSTICO

Prueba N°	1	2		
Tara N°	49	2		
1	Peso de tara + suelo húmedo (g)	29.52	29.25	
2	Peso de tara + suelo seco (g)	29.02	28.71	
3	Peso de tara (g)	26.68	26.13	
4	Peso del agua (g) (1)-(2)	0.50	0.54	
5	Peso del suelo seco (g) (2)-(3)	2.34	2.58	
6	Contenido de humedad (%) (4)/(5)*100	21.37	20.93	
7	Límite Plástico Promedio (LP)			21

LÍMITE LÍQUIDO

Prueba N°	1	2	3	
Tara N°	46	52	40	
N° de golpes (n)	18	27	33	
1	Peso de tara + suelo húmedo (g)	35.46	36.54	34.48
2	Peso de tara + suelo seco (g)	32.28	33.28	31.51
3	Peso de tara (g)	25.02	25.31	24
4	Peso del agua (g) (1)-(2)	3.18	3.26	2.97
5	Peso del suelo seco (g) (2)-(3)	7.26	7.97	7.51
6	Contenido de humedad (%) (4)/(5)*100	43.8	40.9	39.5


Curva de Fluidez



LP:	21.15
LL:	41.48
IP:	20.33

Observaciones:

VERIFICACIONES


 Ing. Gary Durán Ramírez
 CIP: 164471
 Jefatura de Laboratorio

NORMA ASTM	D 4318
NORMA TÉCNICA PERUANA	339.129

	PROYECTO:	CARRETERA CANTA HAYLLAY, KM 57 - 59			
	UBICACIÓN:	CANTA - LIMA			
	CLIENTE:	TESIS - PUCP			
	N° ESTUDIO:	ES-0103	EJEC. POR:	D.P.G	06-mar-21
	SONDEO:	NATURAL + 5% CAL	REV. POR:	G.D.R	
	PROFUNDIDAD:	1.50 m	CUADRO:	0103-LL-02	
	TIPO DE MUESTRA:	ALTERADA	FORMATO:	FORM-LB-03	

ENSAYO DE LÍMITES DE CONSISTENCIA

(ASTM D 4318 / NTP 339.129)

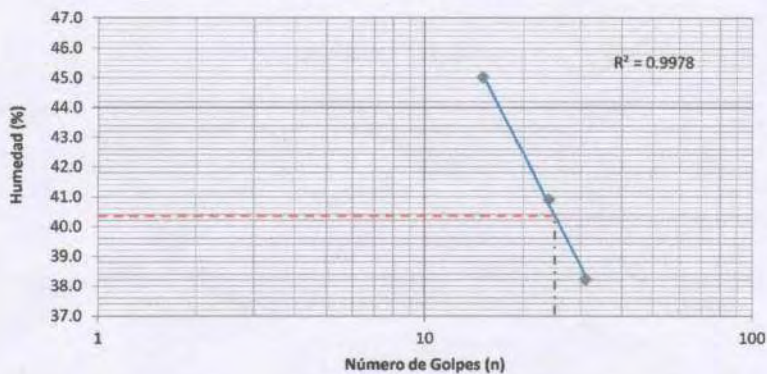
LÍMITE PLÁSTICO

Prueba N°	1	2			
Tara N°	66	32			
1	Peso de tara + suelo húmedo (g)	25.28	29.40		
2	Peso de tara + suelo seco (g)	24.81	28.88		
3	Peso de tara (g)	22.48	26.40		
4	Peso del agua (g) (1)-(2)	0.47	0.52		
5	Peso del suelo seco (g) (2)-(3)	2.33	2.48		
6	Contenido de humedad (%) (4)/(5)*100	20.17	20.97		
7	Limite Plástico Promedio (LP)	21			

LÍMITE LÍQUIDO

Prueba N°	1	2	3		
Tara N°	51	4	12		
N° de golpes (n)	15	24	31		
1	Peso de tara + suelo húmedo (g)	36.93	33.57	34.00	
2	Peso de tara + suelo seco (g)	32.9	30.96	31.27	
3	Peso de tara (g)	23.95	24.58	24.13	
4	Peso del agua (g) (1)-(2)	4.03	2.61	2.73	
5	Peso del suelo seco (g) (2)-(3)	8.95	6.38	7.14	
6	Contenido de humedad (%) (4)/(5)*100	45.0	40.9	38.2	

Curva de Fluidiez



LP:	20.57
LL:	40.35
IP:	19.78

Observaciones: _____

VERIFICACIONES

Ing. Gary Durán Ramírez
 CIP: 164471
 Jefatura de Laboratorio

NORMA ASTM	D 4318
NORMA TECNICA PERUANA	339.129

Ensayo de Límites de Consistencia de Atterberg; NATURAL + 5% CAL

Cuadro N°: 0103-LL-02

Hoja 1 de 1

	PROYECTO:	CARRETERA CANTA HAYLLAY, KM 57 - 59			
	UBICACIÓN:	CANTA - LIMA			
	CLIENTE:	TESIS - PUCP			
	Nº ESTUDIO:	ES-0103	EJEC. POR:	D.P.G	06-mar-21
	SONDEO:	NATURAL + 10% CAL	REV. POR:	G.D.R	
	PROFUNDIDAD:	1.50 m	CUADRO:	0103-LL-03	
	TIPO DE MUESTRA:	ALTERADA	FORMATO:	FORM-LB-03	

ENSAYO DE LÍMITES DE CONSISTENCIA

(ASTM D - 4318 / NTP 339.129)

LÍMITE PLÁSTICO

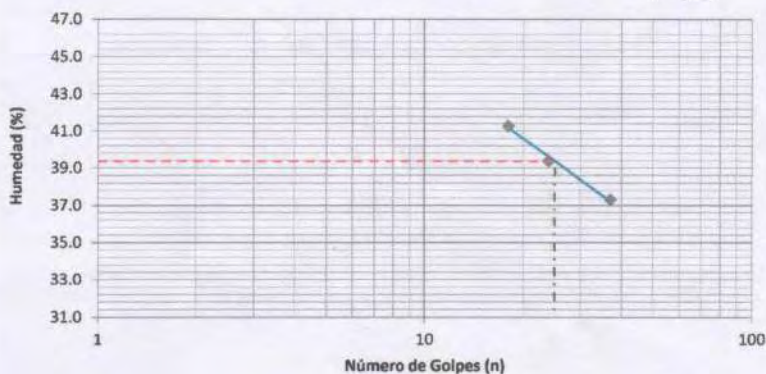
Prueba N°	1	2			
Tara N°	80	35			
1	Peso de tara + suelo húmedo (g)	25.07	24.45		
2	Peso de tara + suelo seco (g)	24.55	23.93		
3	Peso de tara (g)	21.96	21.54		
4	Peso del agua (g) (1)-(2)	0.52	0.52		
5	Peso del suelo seco (g) (2)-(3)	2.59	2.39		
6	Contenido de humedad (%) (4)/(5)*100	20.08	21.76		
7	Límite Plástico Promedio (LP)				21

LÍMITE LÍQUIDO

Prueba N°	1	2	3		
Tara N°	81	5	13		
N° de golpes (n)	18	24	37		
1	Peso de tara + suelo húmedo (g)	35.29	33.64	32.62	
2	Peso de tara + suelo seco (g)	32.62	31.01	29.89	
3	Peso de tara (g)	26.15	24.33	22.57	
4	Peso del agua (g) (1)-(2)	2.67	2.63	2.73	
5	Peso del suelo seco (g) (2)-(3)	6.47	6.68	7.32	
6	Contenido de humedad (%) (4)/(5)*100	41.3	39.4	37.3	

Curva de Fluidez

R² = 0.992



LP:	20.92
LL:	39.35
IP:	18.44

Observaciones:

VERIFICACIONES


Ing. Gary Durán Ramírez
 CIP: 164471
 Jefatura de Laboratorio

NORMA ASTM	D 4318
NORMA TECNICA PERUANA	339.129

Ensayo de Límites de Consistencia de Atterberg; NATURAL + 10% CAL

Cuadro N°: 0103-LL-03

Hoja 1 de 1

	PROYECTO:	CARRETERA CANTA HAYLLAY, KM 57 - 59		
	UBICACIÓN:	CANTA - LIMA		
	CLIENTE:	TESIS - PUCP		
	Nº ESTUDIO:	ES-0103	EJEC. POR:	D.P.G 06-mar-21
	SONDEO:	NATURAL + 20% CAL	REV. POR:	G.D.R
	PROFUNDIDAD:	1.50 m	CUADRO:	0103-LL-04
	TIPO DE MUESTRA:	ALTERADA	FORMATO:	FORM-LB-03

ENSAYO DE LÍMITES DE CONSISTENCIA

(ASTM D 4318 / NTP 339.129)

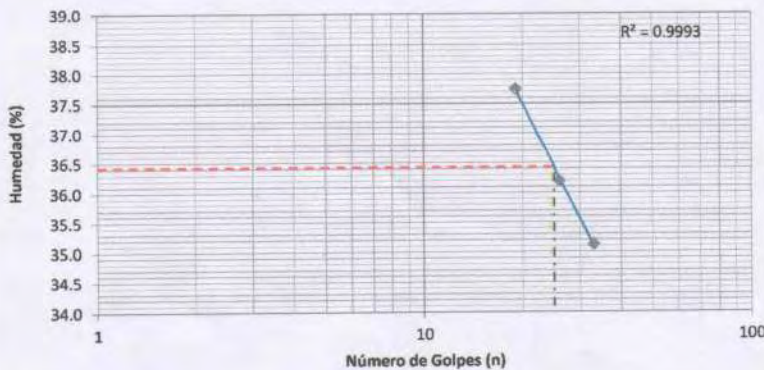
LÍMITE PLÁSTICO

Prueba N°		1	2		
Tara N°		10	54		
1	Peso de tara + suelo húmedo (g)	25.55	28.92		
2	Peso de tara + suelo seco (g)	25.04	28.40		
3	Peso de tara (g)	22.22	25.67		
4	Peso del agua (g) (1)-(2)	0.51	0.52		
5	Peso del suelo seco (g) (2)-(3)	2.82	2.73		
6	Contenido de humedad (%) (4)/(5)*100	18.09	19.05		
7	Límite Plástico Promedio (LP)			19	

LÍMITE LÍQUIDO

Prueba N°		1	2	3	
Tara N°		72	20	64	
N° de golpes (n)		19	26	33	
1	Peso de tara + suelo húmedo (g)	32.97	32.39	33.26	
2	Peso de tara + suelo seco (g)	30.03	29.69	31.1	
3	Peso de tara (g)	22.24	22.23	24.95	
4	Peso del agua (g) (1)-(2)	2.94	2.70	2.16	
5	Peso del suelo seco (g) (2)-(3)	7.79	7.46	6.15	
6	Contenido de humedad (%) (4)/(5)*100	37.7	36.2	35.1	


Curva de Fluidez




LP:	18.57
LL:	36.42
IP:	17.85

Observaciones: _____

VERIFICACIONES


Ing. Gary Durán Ramírez
 CIP: 164471
 Jefatura de Laboratorio

NORMA ASTM	D 4318
NORMA TECNICA PERUANA	339.129

	PROYECTO:	CARRETERA CANTA HAYLLAY, KM 57 - 59			
	UBICACIÓN:	CANTA - LIMA			
	CLIENTE:	TESIS - PUCP			
	Nº ESTUDIO:	ES-0103	EJEC. POR:	D.P.G	06-mar-21
	SONDEO:	NATURAL + 40% CAL	REV. POR:	G.D.R	
	PROFUNDIDAD:	1.50 m	CUADRO:	0103-LL-05	
	TIPO DE MUESTRA:	ALTERADA	FORMATO:	FORM-LB-03	

ENSAYO DE LÍMITES DE CONSISTENCIA

(ASTM D 4318 / NTP 339.129)

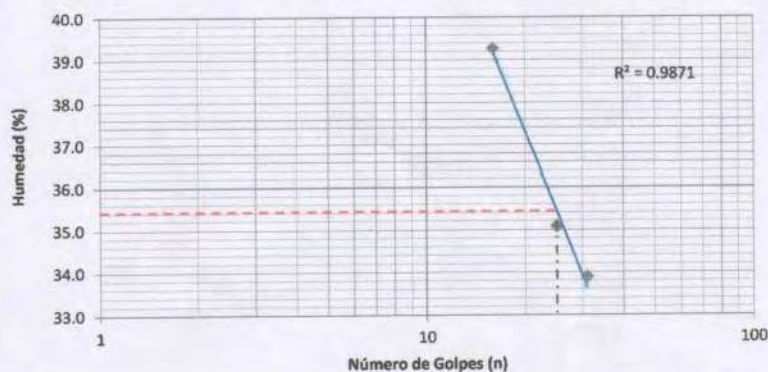
LÍMITE PLÁSTICO

Prueba N°	1	2			
Tara N°	7	39			
1	Peso de tara + suelo húmedo (g)	27.85	25.02		
2	Peso de tara + suelo seco (g)	27.39	24.59		
3	Peso de tara (g)	24.89	22.30		
4	Peso del agua (g) (1)-(2)	0.46	0.43		
5	Peso del suelo seco (g) (2)-(3)	2.50	2.29		
6	Contenido de humedad (%) (4)/(5)*100	18.40	18.78		
7	Límite Plástico Promedio (LP)				19

LÍMITE LÍQUIDO

Prueba N°	1	2	3		
Tara N°	71	11	43		
N° de golpes (n)	16	25	31		
1	Peso de tara + suelo húmedo (g)	33.75	33.05	32.40	
2	Peso de tara + suelo seco (g)	31.15	30.7	30.38	
3	Peso de tara (g)	24.53	24	24.42	
4	Peso del agua (g) (1)-(2)	2.60	2.35	2.02	
5	Peso del suelo seco (g) (2)-(3)	6.62	6.70	5.96	
6	Contenido de humedad (%) (4)/(5)*100	39.3	35.1	33.9	


Curva de Fluidiez



LP:	18.59
LL:	35.43
IP:	16.84


Observaciones:

VERIFICACIONES


 Ing. Gary Durán Ramírez
 CIP: 164471

Jefatura de Laboratorio

NORMA ASTM	D 4318
NORMA TECNICA PERUANA	339.129

	PROYECTO:	CARRETERA CANTA HAYLLAY, KM 57 - 59		
	UBICACIÓN:	CANTA - LIMA		
	CLIENTE:	TESIS - PUCP		
	N° ESTUDIO:	ES-0103	EJEC. POR:	D.P.G 06-mar-21
	SONDEO:	NATURAL + 60% CAL	REV. POR:	G.D.R
	PROFUNDIDAD:	1.50 m	CUADRO:	0103-LL-06
	TIPO DE MUESTRA:	ALTERADA	FORMATO:	FORM-LB-03

ENSAYO DE LÍMITES DE CONSISTENCIA

(ASTM D - 4318 / NTP 339.129)

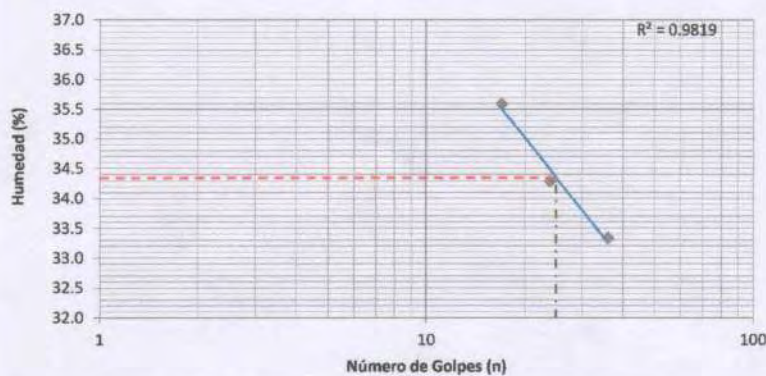
LÍMITE PLÁSTICO

Prueba N°	1	2		
Tara N°	47	73		
1	Peso de tara + suelo húmedo (g)	26.94	29.27	
2	Peso de tara + suelo seco (g)	26.54	28.75	
3	Peso de tara (g)	24.27	25.90	
4	Peso del agua (g) (1)-(2)	0.40	0.52	
5	Peso del suelo seco (g) (2)-(3)	2.27	2.85	
6	Contenido de humedad (%) (4)/(5)*100	17.62	18.25	
7	Límite Plástico Promedio (LP)			18

LÍMITE LÍQUIDO

Prueba N°	1	2	3	
Tara N°	57	61	59	
N° de golpes (n)	17	24	36	
1	Peso de tara + suelo húmedo (g)	34.27	34.6	32.27
2	Peso de tara + suelo seco (g)	31.96	32.21	29.72
3	Peso de tara (g)	25.47	25.24	22.07
4	Peso del agua (g) (1)-(2)	2.31	2.39	2.55
5	Peso del suelo seco (g) (2)-(3)	6.49	6.97	7.65
6	Contenido de humedad (%) (4)/(5)*100	35.6	34.3	33.3

Curva de Fluidéz



LP:	17.93
LL:	34.34
IP:	16.41

Observaciones:

VERIFICACIONES

Ing. Gary Durán Ramírez
CIP: 164471

Jefatura de Laboratorio

NORMA ASTM	D 4318
NORMA TECNICA PERUANA	339.129

Ensayo de Límites de Consistencia de Atterberg; NATURAL + 60% CAL

Cuadro N°: 0103-LL-06

Hoja 1 de 1

	PROYECTO:	CARRETERA CANTA HAYLLAY, KM 57 - 59			
	UBICACIÓN:	CANTA - LIMA			
	CLIENTE:	TESIS - PUJCP			
	Nº ESTUDIO:	ES-0103	EJEC. POR:	D.P.G	06-mar-21
	SONDEO:	NATURAL + 80% CAL	REV. POR:	G.D.R	
	PROFUNDIDAD:	1.50 m	CUADRO:	0103-LL-07	
	TIPO DE MUESTRA:	ALTERADA	FORMATO:	FORM-LB-03	

ENSAYO DE LÍMITES DE CONSISTENCIA

(ASTM D 4318 / NTP 339.129)

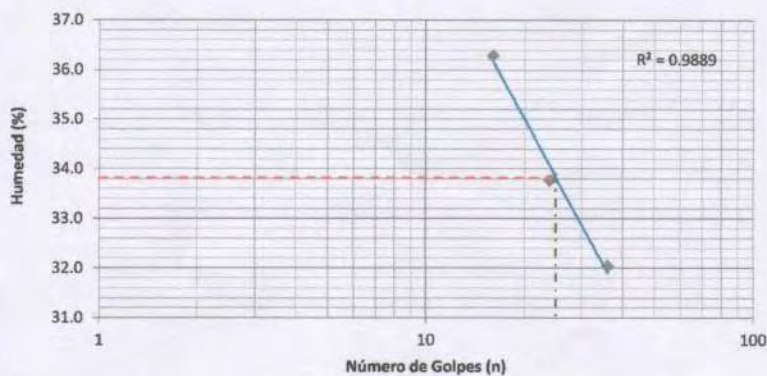
LÍMITE PLÁSTICO

Prueba N°	1	2			
Tara N°	34	27			
1	Peso de tara + suelo húmedo (g)	27.24	24.10		
2	Peso de tara + suelo seco (g)	26.81	23.72		
3	Peso de tara (g)	24.47	21.69		
4	Peso del agua (g) (1)-(2)	0.43	0.38		
5	Peso del suelo seco (g) (2)-(3)	2.34	2.03		
6	Contenido de humedad (%) (4)/(5)*100	18.38	18.72		
7	Límite Plástico Promedio (LP)				19

LÍMITE LÍQUIDO

Prueba N°	1	2	3		
Tara N°	63	67	28		
N° de golpes (n)	16	24	36		
1	Peso de tara + suelo húmedo (g)	40.3	32.71	31.90	
2	Peso de tara + suelo seco (g)	36.61	30.66	29.67	
3	Peso de tara (g)	26.44	24.59	22.71	
4	Peso del agua (g) (1)-(2)	3.69	2.05	2.23	
5	Peso del suelo seco (g) (2)-(3)	10.17	6.07	6.96	
6	Contenido de humedad (%) (4)/(5)*100	36.3	33.8	32.0	

Curva de Fluidez



LP:	18.55
LL:	33.82
IP:	15.27

Observaciones: _____


VERIFICACIONES

Ing. Gary Durán Ramírez
 CIP: 164471

Jefatura de Laboratorio

NORMA ASTM	D 4318
NORMA TECNICA PERUANA	339.129

Ensayo de Límites de Consistencia de Atterberg; NATURAL + 80% CAL
Cuadro N°: 0103-LL-07

	PROYECTO:	CARRETERA CANTA HAYLLAY, KM 57 - 59			
	UBICACIÓN:	CANTA - LIMA			
	CLIENTE:	TESIS - PUCP			
	Nº ESTUDIO:	ES-0103	EJEC. POR:	D.P.G	06-mar-21
	SONDEO:	NATURAL + 100% CAL	REV. POR:	G.D.R	
	PROFUNDIDAD:	1.50 m	CUADRO:	0103-LL-08	
	TIPO DE MUESTRA:	ALTERADA	FORMATO:	FORM-LB-03	

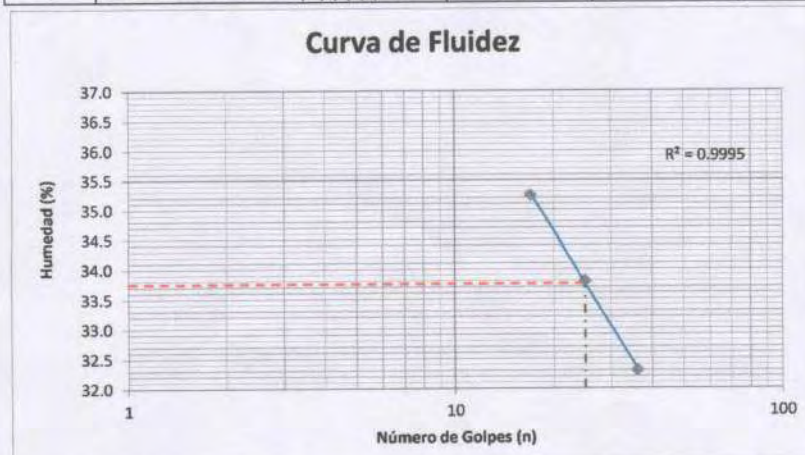
ENSAYO DE LÍMITES DE CONSISTENCIA
(ASTM D 4318 / NTP 339.129)

LÍMITE PLÁSTICO

Prueba N°	1	2		
Tara N°	35	29		
1	Peso de tara + suelo húmedo (g)	28.03	29.04	
2	Peso de tara + suelo seco (g)	27.40	28.57	
3	Peso de tara (g)	23.95	26.08	
4	Peso del agua (g) (1)-(2)	0.63	0.47	
5	Peso del suelo seco (g) (2)-(3)	3.45	2.49	
6	Contenido de humedad (%) (4)/(5)*100	18.26	18.88	
7	Límite Plástico Promedio (LP)			19

LÍMITE LÍQUIDO


Prueba N°	1	2	3	
Tara N°	16	38	42	
N° de golpes (n)	17	25	36	
1	Peso de tara + suelo húmedo (g)	33.95	31.47	37.30
2	Peso de tara + suelo seco (g)	31.18	29	34.47
3	Peso de tara (g)	23.32	21.69	25.71
4	Peso del agua (g) (1)-(2)	2.77	2.47	2.83
5	Peso del suelo seco (g) (2)-(3)	7.86	7.31	8.76
6	Contenido de humedad (%) (4)/(5)*100	35.2	33.8	32.3




LP:	18.57
LL:	33.75
IP:	15.18

Observaciones: _____

VERIFICACIONES


 Ing. Gary Durán Ramírez
 CIP: 164471
 Jefatura de Laboratorio

NORMA ASTM	D 4318
NORMA TECNICA PERUANA	339.129

	PROYECTO:	CARRETERA CANTA HAYLLAY, KM 57 - 59			
	UBICACIÓN:	CANTA - LIMA			
	CLIENTE:	TESIS - PUCP			
	Nº ESTUDIO:	ES-0103	EJEC. POR:	D.P.G	06-mar-21
	SONDEO:	NATURAL + 150% CAL	REV. POR:	G.D.R	
	PROFUNDIDAD:	1.50 m	CUADRO:	0103-LL-09	
	TIPO DE MUESTRA:	ALTERADA	FORMATO:	FORM-LB-03	

ENSAYO DE LÍMITES DE CONSISTENCIA

(ASTM D 4318 / NTP 339.129)

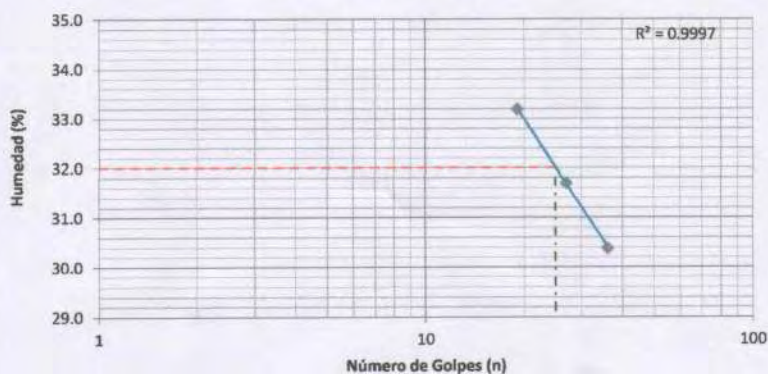
LÍMITE PLÁSTICO

Prueba N°		1	2		
Tara N°		77	18		
1	Peso de tara + suelo húmedo (g)	30.70	26.28		
2	Peso de tara + suelo seco (g)	30.14	25.65		
3	Peso de tara (g)	27.20	22.25		
4	Peso del agua (g) (1)-(2)	0.56	0.63		
5	Peso del suelo seco (g) (2)-(3)	2.94	3.40		
6	Contenido de humedad (%) (4)/(5)*100	19.05	18.53		
7	Límite Plástico Promedio (LP)			19	

LÍMITE LÍQUIDO

Prueba N°		1	2	3	
Tara N°		37	1	53	
N° de golpes (n)		19	27	36	
1	Peso de tara + suelo húmedo (g)	33.57	35.47	36.24	
2	Peso de tara + suelo seco (g)	31.21	33.03	33.8	
3	Peso de tara (g)	24.1	25.33	25.77	
4	Peso del agua (g) (1)-(2)	2.36	2.44	2.44	
5	Peso del suelo seco (g) (2)-(3)	7.11	7.70	8.03	
6	Contenido de humedad (%) (4)/(5)*100	33.2	31.7	30.4	

Curva de Fluidez



LP:	18.79
LL:	32.00
IP:	13.21

Observaciones:

VERIFICACIONES


 Ing. Gary Durán Ramírez
 CIP: 164471
 Jefatura de Laboratorio

NORMA ASTM	D 4318
NORMA TECNICA PERUANA	339.129

Ensayo de Límites de Consistencia de Atterberg; NATURAL + 150% CAL
 Cuadro N°: 0103-LL-09
 Hoja 1 de 1

 GIAS <small>GESTIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL Y SOSTENIBILIDAD</small> <small>LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS</small>	PROYECTO:	CARRETERA CANTA HAYLLAY, KM 57 - 59			
	UBICACIÓN:	CANTA - LIMA			
	CLIENTE:	TESIS - PUCP			
	N° ESTUDIO:	ES-0103	EJEC. POR:	D.P.G	06-mar-21
	SONDEO:	NATURAL + 200% CAL	REV. POR:	G.D.R	
	PROFUNDIDAD:	1.50 m	CUADRO:	0103-LL-10	
	TIPO DE MUESTRA:	ALTERADA	FORMATO:	FORM-LB-03	

ENSAYO DE LÍMITES DE CONSISTENCIA
(ASTM D - 4318 / NTE 339.129)

LÍMITE PLÁSTICO

Prueba N°	1	2			
Tara N°	65	31			
1	Peso de tara + suelo húmedo (g)	26.73	26.52		
2	Peso de tara + suelo seco (g)	26.05	25.80		
3	Peso de tara (g)	22.65	22.12		
4	Peso del agua (g) (1)-(2)	0.68	0.72		
5	Peso del suelo seco (g) (2)-(3)	3.40	3.68		
6	Contenido de humedad (%) (4)/(5)*100	20.00	19.57		
7	Límite Plástico Promedio (LP)			20	

LÍMITE LÍQUIDO

Prueba N°	1	2	3		
Tara N°	22	60	41		
N° de golpes (n)	17	24	36		
1	Peso de tara + suelo húmedo (g)	37.07	30.34	34.19	
2	Peso de tara + suelo seco (g)	34.01	28.38	31.8	
3	Peso de tara (g)	24.74	22.15	23.51	
4	Peso del agua (g) (1)-(2)	3.06	1.96	2.39	
5	Peso del suelo seco (g) (2)-(3)	9.27	6.23	8.29	
6	Contenido de humedad (%) (4)/(5)*100	33.0	31.5	28.8	



LP:	19.78
LL:	30.98
IP:	11.20

Observaciones:

VERIFICACIONES


Ing. Gary Durán Ramírez
CIP: 164471
 Jefatura de Laboratorio

NORMA ASTM	D 4318
NORMA TECNICA PERUANA	339.129

ANEXO 2.2: ENSAYOS PROCTOR ESTÁNDAR



ENSAYO PROCTOR ESTANDAR
 (ASTM D-698 / NTP 339.144)

PROYECTO:	CARRETERA CANTA HUAYLLAY, KM 57 - 59	ESTUDIO:	ES-0103
CLIENTE:	TESIS - PUCP	CUADRO:	0103-PROC-01
UBICACIÓN:	CANTA - LIMA	SONDAJE:	NATURAL
MUESTRA:	PR-1	PROF:	1.50 m
REALIZADO:	D.P.G	REVISADO:	G.D.R
		FECHA:	10-mar-21

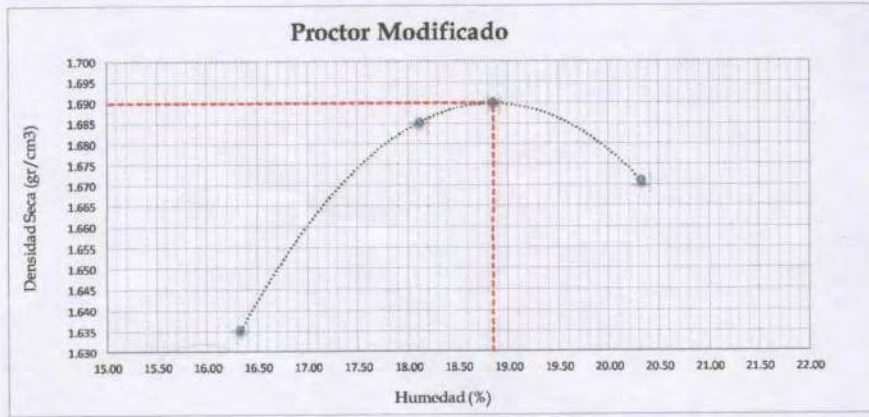
COMPACTACIÓN

Prueba N°		1	2	3
1	Peso del molde + suelo compacto (gr.)	5660	5743	5762
2	Peso del molde (gr.)	3868	3868	3868
3	Volúmen del molde (cm³)	942	942	942
4	Peso del suelo compacto (gr.) (1)-(2)	1792	1875	1894
5	Densidad húmeda (gr/cm³) (4)/(3)	1.90	1.99	2.01
6	Contenido de humedad (%)	16.33	18.11	20.32
7	Densidad seca (gr/cm³) (5)/(1+β)	1.635	1.685	1.671

CONTENIDO DE HUMEDAD
 (ASTM D-2216 / NTP339.127)


Cápsula N°		40	39	34
1	Peso de tara + suelo húmedo (gr.)	608	542	602
2	Peso de tara + suelo seco (gr.)	543	481	526
3	Peso del agua (gr.) (1)-(2)	65.00	60.50	76.00
4	Peso de tara (gr.)	145.00	147.00	152.00
5	Peso del suelo seco (gr.) (2)-(4)	398.00	334.00	374.00
6	Contenido de humedad (%) (3)/(5)*100	16.33	18.11	20.32

Máxima Densidad Seca (MDS):	1.69 gr/cm ³
Óptimo Contenido de Humedad (OCH):	18.85%



Observaciones: _____

VERIFICACIONES


Ing. Gary Durán Ramírez
 CIP: 164471
 Jefatura de Laboratorio

NORMA ASTM	D 1557
NORMA TECNICA PERUANA	339.141

ENSAYO PROCTOR ESTANDAR (ASTM D-698 / NIP 339.144)			
PROYECTO:	CARRETERA CANTA HUAYLLAY, KM 57 - 59	ESTUDIO:	ES-0103
CLIENTE:	TESIS - PUCP	CUADRO:	0103-PROC-02
UBICACIÓN:	CANTA - LIMA	SONDAJE:	NATURAL + 80% CAL
MUESTRA:	PR-2	PROF:	1.50 m
REALIZADO:	D.P.C	REVISADO:	C.D.R
		FECHA:	10-mar-21

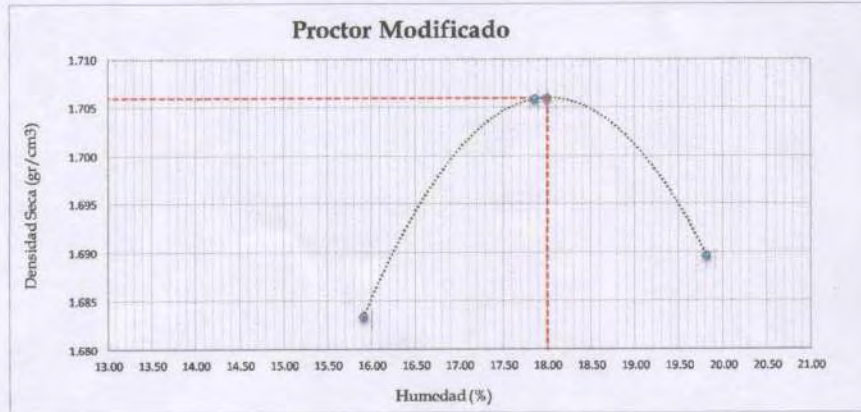
COMPACTACIÓN

Prueba N°		1	2	3
1	Peso del molde + suelo compacto (gr.)	5706	5762	5775
2	Peso del molde (gr.)	3868	3868	3868
3	Volumen del molde (cm³)	942	942	942
4	Peso del suelo compacto (gr.) (1)-(2)	1838	1894	1907
5	Densidad húmeda (gr/cm³) (4)/(3)	1.95	2.01	2.02
6	Contenido de humedad (%)	15.91	17.86	19.81
7	Densidad seca (gr/cm³) (5)/(1+(3))	1.683	1.706	1.690

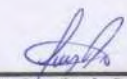
CONTENIDO DE HUMEDAD
(ASTM D-2216 / NTP339.127)

Cápsula N°		4	46	22
1	Peso de tara + suelo húmedo (gr.)	604	520	589
2	Peso de tara + suelo seco (gr.)	541	464	519
3	Peso del agua (gr.) (1)-(2)	63.00	56.00	70.50
4	Peso de tara (gr.)	145.00	150.50	162.70
5	Peso del suelo seco (gr.) (2)-(4)	396.00	313.50	355.80
6	Contenido de humedad (%) (3)/(5)*100	15.91	17.86	19.81

Máxima Densidad Seca (MDS):	1.71 gr/cm³
Óptimo Contenido de Humedad (OCH):	18.00%



Observaciones: _____

VERIFICACIONES
<div style="text-align: right;">  Ing. Gary Durán Ramírez CIP: 164471 Jefatura de Laboratorio </div>

NORMA ASTM	D 1557
NORMA TECNICA PERUANA	339.141

ENSAYO PROCTOR ESTANDAR (ASTM D-698 / NTP 339.144)			
PROYECTO:	CARRETERA CANTA HUAYLLAY, KM 57 - 59	ESTUDIO:	ES-0103
CLIENTE:	TESIS - PUCP	CUADRO:	0103-PROC-03
UBICACIÓN:	CANTA - LIMA	SONDAJE:	NATURAL + 100% CAL
MUESTRA:	PR-3	PROF:	1.50 m
REALIZADO:	D.P.G	REVISADO:	G.D.R
		FORMATO:	PROC-LB-10
		FECHA:	10-mar-21

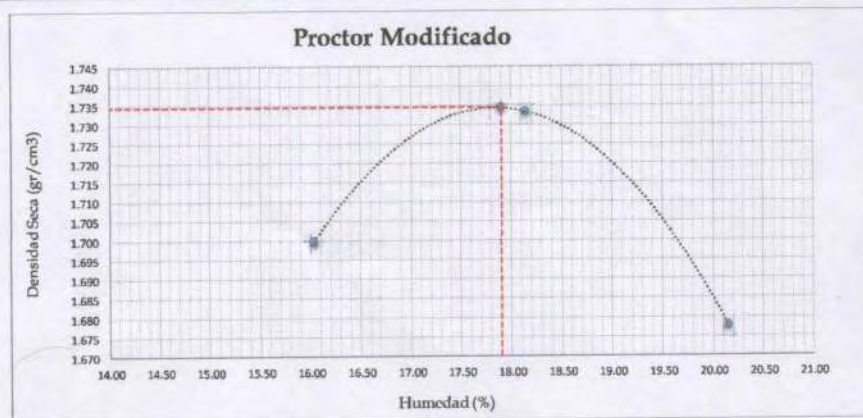
COMPACTACIÓN

Prueba N°		1	2	3
1	Peso del molde + suelo compacto (gr.)	5726	5797	5767
2	Peso del molde (gr.)	3868	3868	3868
3	Volumen del molde (cm ³)	942	942	942
4	Peso del suelo compacto (gr.) (1)-(2)	1858	1929	1899
5	Densidad húmeda (gr/cm ³) (4)/(3)	1.97	2.05	2.02
6	Contenido de humedad (%)	16.04	18.14	20.15
7	Densidad seca (gr/cm ³) (5)/(1+(3))	1.700	1.733	1.678

CONTENIDO DE HUMEDAD
(ASTM D-2216 / NTP339.127)


Cápsula N°		50	5	10
1	Peso de tara + suelo húmedo (gr.)	599	582	668
2	Peso de tara + suelo seco (gr.)	537	518	584
3	Peso del agua (gr.) (1)-(2)	61.50	64.00	84.50
4	Peso de tara (gr.)	153.50	165.20	164.10
5	Peso del suelo seco (gr.) (2)-(4)	383.50	352.80	419.40
6	Contenido de humedad (%) (3)/(5)*100	16.04	18.14	20.15

Máxima Densidad Seca (MDS):	1.74 gr/cm ³
Óptimo Contenido de Humedad (OCH):	17.90%



Observaciones: _____

VERIFICACIONES


Ing. Gary Durán Ramirez
 CIP: 164471
 Jefatura de Laboratorio

NORMA ASTM	D 1557
NORMA TECNICA PERUANA	339.141

ENSAYO PROCTOR ESTANDAR (ASTM D-698 / NTP 339.144)			
PROYECTO:	CARRETERA CANTA HUAYLLAY, KM 57 - 59	ESTUDIO:	ES-0103
CLIENTE:	TESIS - PUCP	CUADRO:	0103-PROC-04
UBICACIÓN:	CANTA - LIMA	SONDAJE:	NATURAL + 150% CAL
MUESTRA:	PR-4	PROF:	1.50 m
REALIZADO:	D.P.G	REVISADO:	G.D.R
		FORMATO:	PROC-LB-10
		FECHA:	10-mar-21

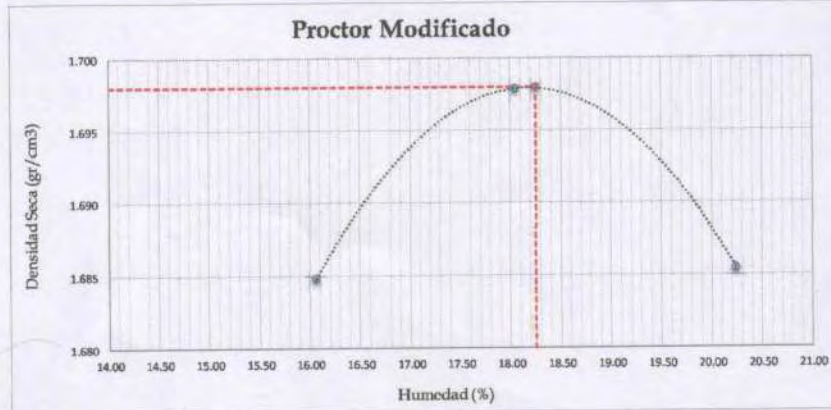
COMPACTACIÓN

Prueba N°		1	2	3
1	Peso del molde + suelo compacto (gr.)	5710	5756	5777
2	Peso del molde (gr.)	3868	3868	3868
3	Volumen del molde (cm³)	942	942	942
4	Peso del suelo compacto (gr.) (1)-(2)	1842	1888	1909
5	Densidad húmeda (gr/cm³) (4)/(3)	1.96	2.00	2.03
6	Contenido de humedad (%)	16.06	18.04	20.24
7	Densidad seca (gr/cm³) (5)/(1+(3))	1.685	1.698	1.685

CONTENIDO DE HUMEDAD
(ASTM D-2216 / NTP339.127)


Cápsula N°		13	30	25
1	Peso de tara + suelo húmedo (gr.)	702	617	627
2	Peso de tara + suelo seco (gr.)	628	546	548
3	Peso del agua (gr.) (1)-(2)	74.00	71.00	79.00
4	Peso de tara (gr.)	167.30	152.50	157.60
5	Peso del suelo seco (gr.) (2)-(4)	460.70	393.50	390.40
6	Contenido de humedad (%) (3)/(5)*100	16.06	18.04	20.24

Máxima Densidad Seca (MDS):	1.70 gr/cm3
Óptimo Contenido de Humedad (OCH):	18.25%



Observaciones: _____

VERIFICACIONES


Ing. Gary Durán Ramírez
 CIP: 164471
 Jefatura de Laboratorio

ENSAYO PROCTOR ESTANDAR (ASTM D-698 / NTP 339.144)			
PROYECTO:	CARRETERA CANTA HUAYLLAY, KM 57 - 59	ESTUDIO:	ES-0103
CLIENTE:	TESIS - PUCP	CUADRO:	0103-PROC-05
UBICACIÓN:	CANTA - LIMA	SONDAJE:	NATURAL + 200% CAL
MUESTRA:	PR-5	PROF:	1.50 m
REALIZADO:	D.P.G	REVISADO:	G.D.R
		FORMATO:	PROC-LB-10
		FECHA:	10-mar-21

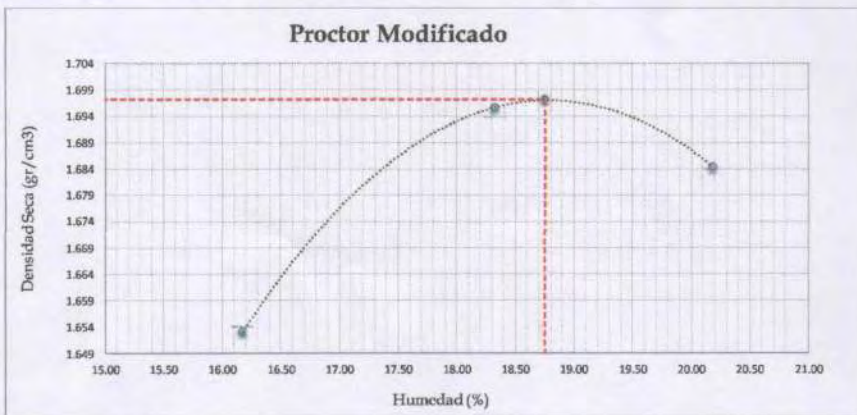
COMPACTACIÓN

Prueba N°		1	2	3
1	Peso del molde + suelo compacto (gr.)	5677	5758	5775
2	Peso del molde (gr.)	3868	3868	3868
3	Volúmen del molde (cm³)	942	942	942
4	Peso del suelo compacto (gr.) (1)-(2)	1809	1890	1907
5	Densidad húmeda (gr/cm³) (4)/(3)	1.92	2.01	2.02
6	Contenido de humedad (%)	16.17	18.32	20.19
7	Densidad seca (gr/cm³) (5)/(1+(3))	1.653	1.696	1.684

CONTENIDO DE HUMEDAD
(ASTM D-2216 / NTP339.127)

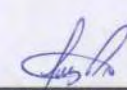
Cápsula N°		35	49	37
1	Peso de tara + suelo húmedo (gr.)	678	714	605
2	Peso de tara + suelo seco (gr.)	605	627	530
3	Peso del agua (gr.) (1)-(2)	73.50	87.50	75.50
4	Peso de tara (gr.)	150.00	149.00	155.50
5	Peso del suelo seco (gr.) (2)-(4)	454.50	477.50	374.00
6	Contenido de humedad (%) (3)/(5)*100	16.17	18.32	20.19

Máxima Densidad Seca (MDS):	1.70 gr/cm ³
Óptimo Contenido de Humedad (OCH):	18.75%



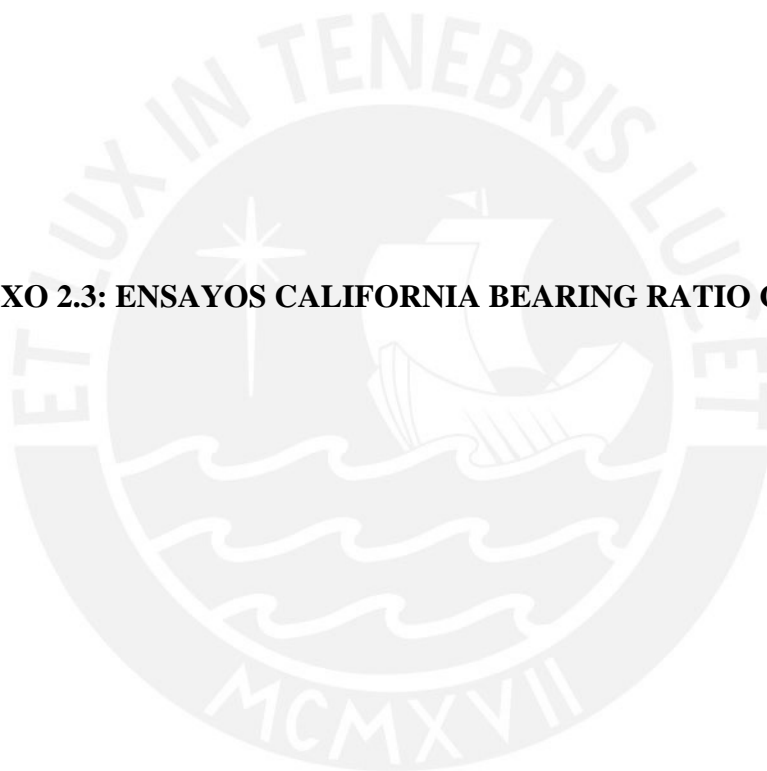
Observaciones: _____

VERIFICACIONES


Ing. Gary Durán Ramírez
 CIP: 164471
 Jefatura de Laboratorio

NORMA ASTM	D 1557
NORMA TÉCNICA PERUANA	339.141

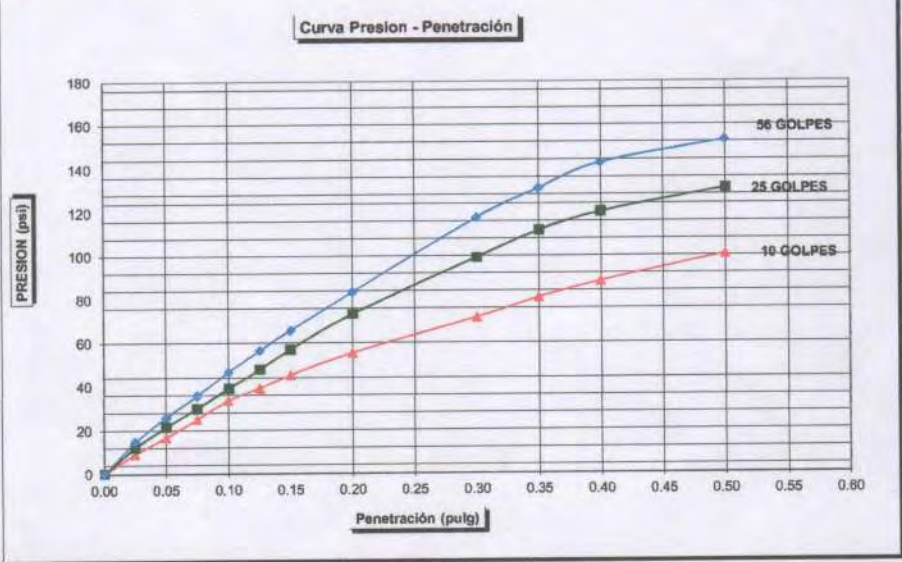
ANEXO 2.3: ENSAYOS CALIFORNIA BEARING RATIO C.B.R.





PROYECTO:	CARRETERA CANTA HUAYLLAY, KM 57 - 59			
UBICACIÓN:	CANTA-HUAYLLAY			
CLIENTE:	TESIS-PUCP			
N° ESTUDIO:	ES-0103	EJEC. POR:	D.P.G	15-mar-21
SONDEO:	NATURAL	REV. POR:	G.D.R	
PROFUNDIDAD:	1.50 m	CUADRO:	0103-CBR-01	
TIPO DE MUESTRA:	ALTERADA	FORMATO:	FORM-LB-11	

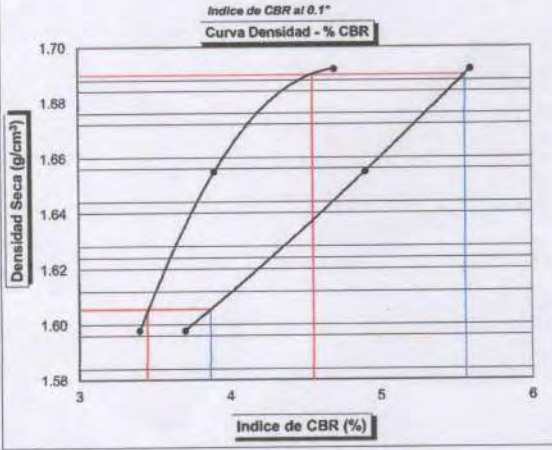
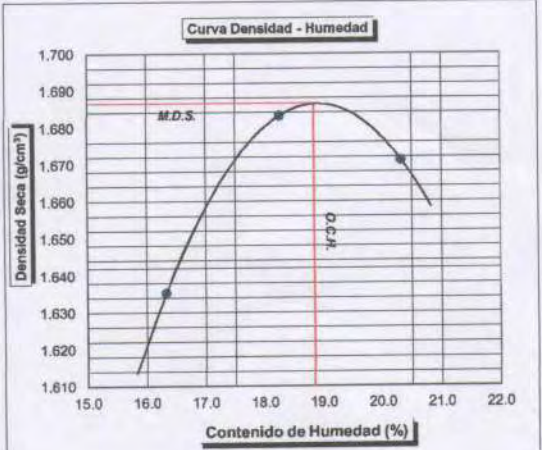
**ENSAYO CALIFORNIA BEARING RATIO - CBR
ASTM - D1883 / NTP 339.145**




RESUMEN

MAXIMA DENSIDAD SECA (g/cm^3):	1.69	
HUMEDAD OPTIMA:	18.9%	
PENETRACIÓN (Pulg.):	0,1"	0,2"
CBR al 95% de la MDS:	3.5	3.9
CBR al 100% de la MDS:	4.6	5.6
CONDICION DE LA MUESTRA	4 Dias de Saturacion	
SOBRECARGA	10 Libras (4.55 kg)	

	MOLDE 1	MOLDE 2	MOLDE 3
DENSIDAD SECA (g/cm^3)	1.69	1.65	1.60
CBR (0.1" de Penetración)	4.7	3.9	3.4
CBR (0.2" de Penetración)	5.6	4.9	3.7
GOLPES	56	25	10
% DE EXPANSION	0.44	0.99	1.38



VERIFICACIÓN


Ing. Gary Durán Ramírez
 CIP: 164471
 Jefatura de Laboratorio

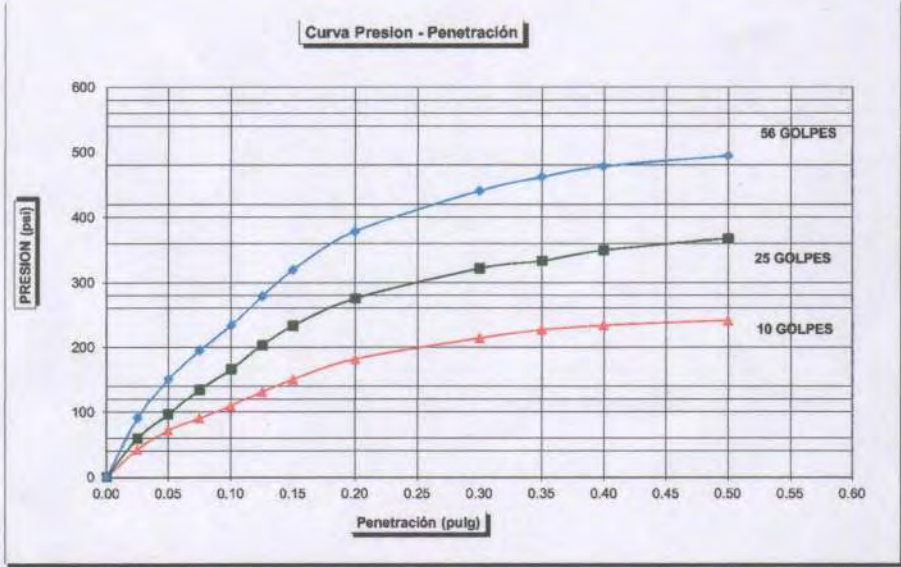
NORMA ASTM	D 1883
NORMA TECNICA PERUANA	339.145



LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS

PROYECTO:	CARRETERA CANTA HUAYLLAY, KM 57 - 59			
UBICACIÓN:	CANTA-HUAYLLAY			
CLIENTE:	TESIS-PUCP			
Nº ESTUDIO:	ES-0103	EJEC. POR:	D.P.G	15-mar-21
SONDEO:	NATURAL + 80% CAL	REV. POR:	G.D.R	
PROFUNDIDAD:	1.50 m	CUADRO:	0103-CBR-02	
TIPO DE MUESTRA:	ALTERADA	FORMATO:	FORM-LB-11	

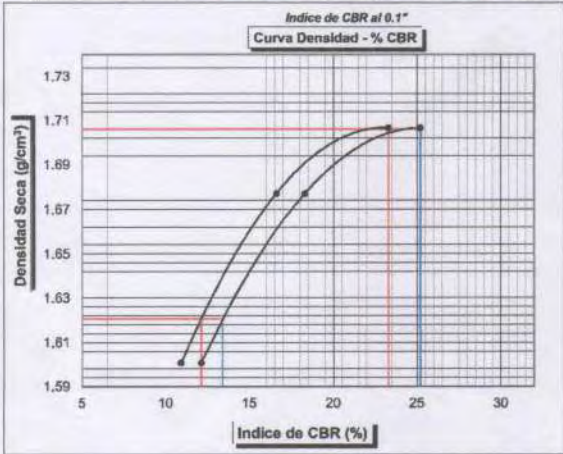
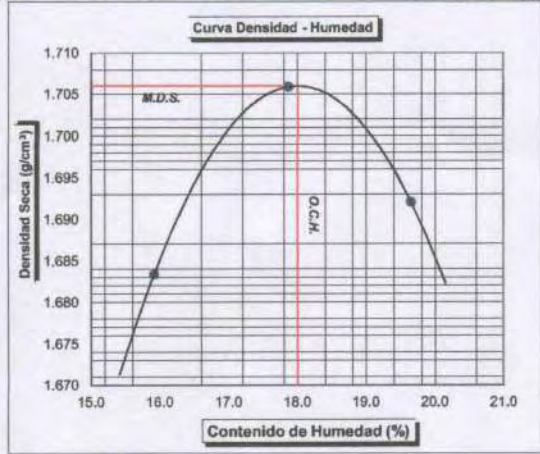
**ENSAYO CALIFORNIA BEARING RATIO - CBR
ASTM - D1883 / NTP 339.145**



RESUMEN

MAXIMA DENSIDAD SECA (g/cm^3) :	1.71
HUMEDAD OPTIMA:	18%
PENETRACIÓN (Pulg.)	0,1" 0,2"
CBR al 95% de la MDS:	12.1 13.4
CBR al 100% de la MDS:	23.3 25.2
CONDICION DE LA MUESTRA	4 Dias de Saturacion
SOBRECARGA	10 Libras (4.55 kg)

	MOLDE 1	MOLDE 2	MOLDE 3
DENSIDAD SECA (g/cm^3)	1.71	1.68	1.60
CBR (0.1" de Penetración)	23.3	16.6	10.9
CBR (0.2" de Penetración)	25.2	18.3	12.1
GOLPES	56	25	10
% DE EXPANSION	0.50	0.61	0.88



VERIFICACIÓN

Ing. Gary Durán Ramírez
CIP: 164471

Jefatura de Laboratorio

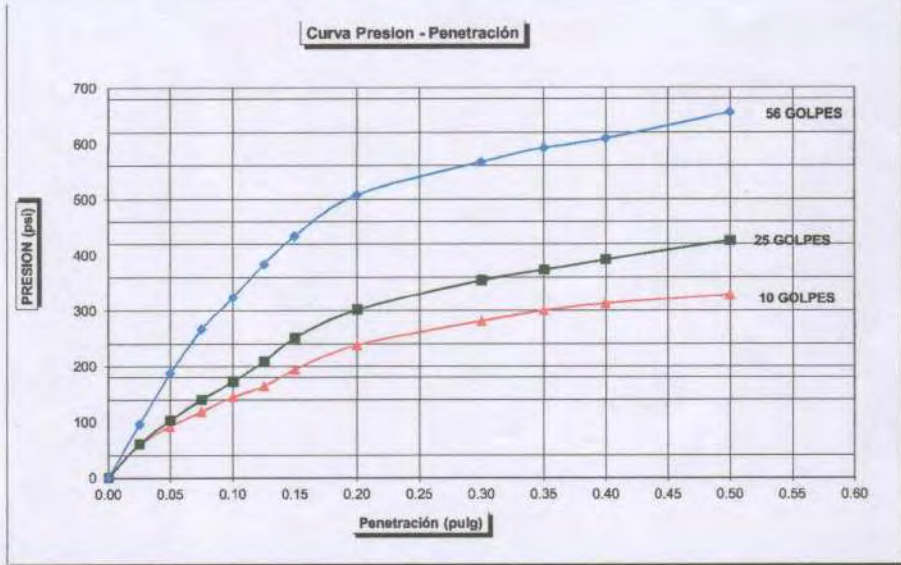
NORMA ASTM	D 1883
NORMA TECNICA PERUANA	339.145

Ensayo de CBR: NATURAL + 80% CAL
Cuadro Nº: 0103-CBR-02
Hoja 1 de 1



PROYECTO:	CARRETERA CANTA HUAYLLAY, KM 57 - 59		
UBICACIÓN:	CANTA-HUAYLLAY		
CLIENTE:	TESIS-PUCP		
Nº ESTUDIO:	ES-0103	EJEC. POR:	D.P.G 15-mar-21
SONDEO:	NATURAL + 100% CAL	REV. POR:	G.D.R
PROFUNDIDAD:	1.50 m	CUADRO:	0103-CBR-03
TIPO DE MUESTRA:	ALTERADA	FORMATO:	FORM-LB-11

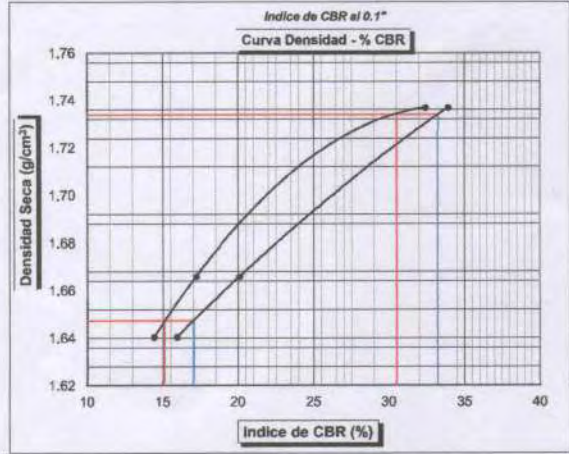
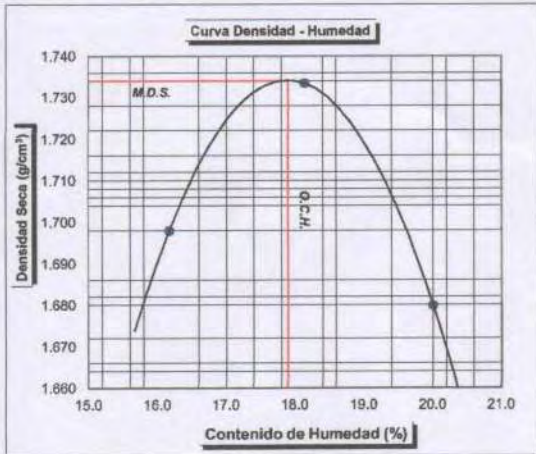
**ENSAYO CALIFORNIA BEARING RATIO - CBR
ASTM - D1883 / NTP 339.145**



RESUMEN

MAXIMA DENSIDAD SECA (g/cm^3):	1.73
HUMEDAD OPTIMA:	17.9%
PENETRACIÓN (Pulg.)	0,1" 0,2"
CBR al 95% de la MDS:	15.1 17.0
CBR al 100% de la MDS:	30.5 33.2
CONDICION DE LA MUESTRA	4 Días de Saturacion
SOBRECARGA	10 Libras (4.55 kg)

	MOLDE 1	MOLDE 2	MOLDE 3
DENSIDAD SECA (g/cm^3)	1.74	1.67	1.64
CBR (0.1" de Penetración)	32.4	17.2	14.4
CBR (0.2" de Penetración)	33.2	20.1	15.9
GOLPES	56	25	10
% DE EXPANSION	0.66	0.88	1.23



VERIFICACIÓN


Ing. Gary Durán Ramirez
CIP: 164471
 Jefatura de Laboratorio

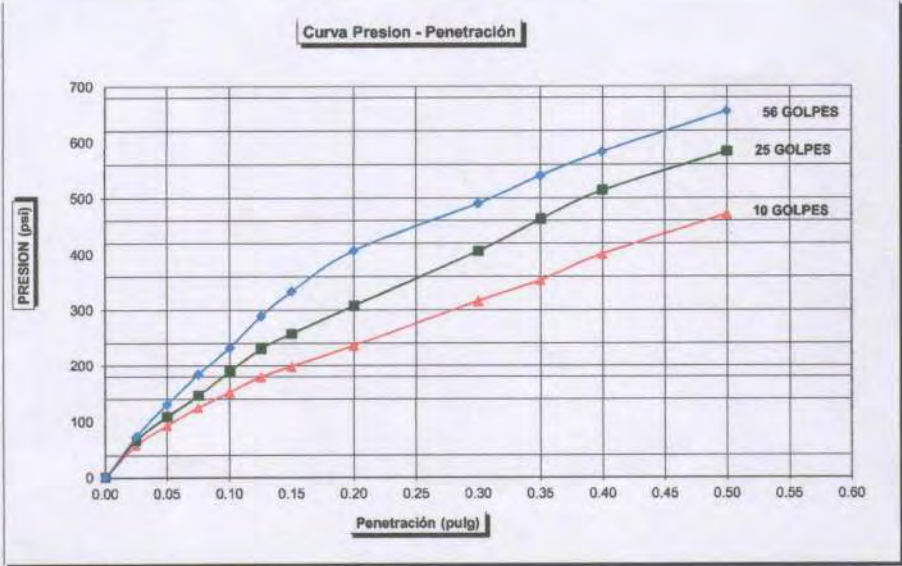
NORMA ASTM D 1883

Ensayo de CBR; NATURAL + 100% CAL



PROYECTO:	CARRETERA CANTA HUAYLLAY, KM 57 - 59			
UBICACIÓN:	CANTA-HUAYLLAY			
CLIENTE:	TESIS-PUCP			
N° ESTUDIO:	ES-0103	EJEC. POR:	D.P.G	15-mar-21
SONDEO:	NATURAL + 150% CAL	REV. POR:	G.D.R	
PROFUNDIDAD:	1.50 m	CUADRO:	0103-CBR-04	
TIPO DE MUESTRA:	ALTERADA	FORMATO:	FORM-LB-11	

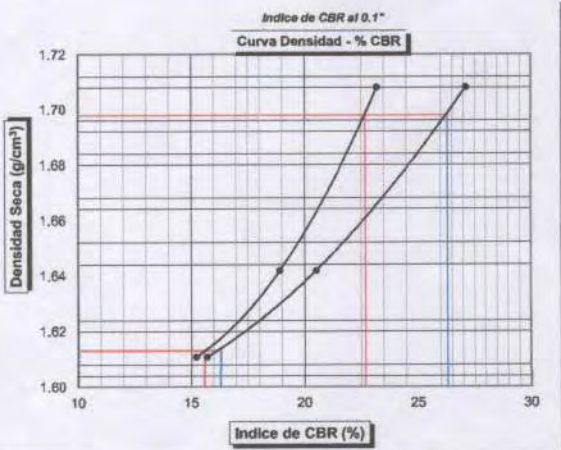
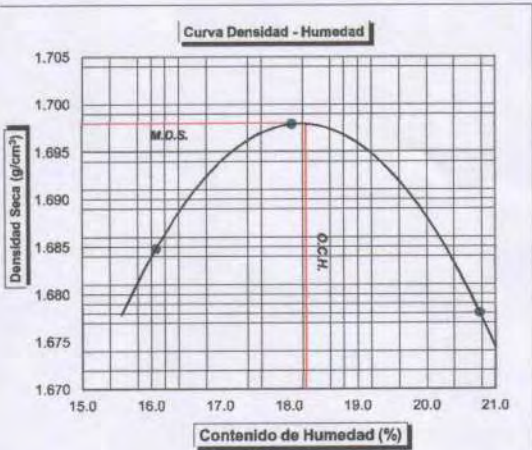
**ENSAYO CALIFORNIA BEARING RATIO - CBR
ASTM - D1883 / NTP 339.145**



RESUMEN

MAXIMA DENSIDAD SECA (g/cm^3):	1.70	
HUMEDAD OPTIMA:	18.3%	
PENETRACIÓN (Pulg.)	0,1"	0,2"
CBR al 95% de la MDS:	15.6	16.3
CBR al 100% de la MDS:	22.7	26.3
CONDICION DE LA MUESTRA	4 Dias de Saturación	
SOBRECARGA	10 Libras (4.55 kg)	

	MOLDE 1	MOLDE 2	MOLDE 3
DENSIDAD SECA (g/cm^3)	1.71	1.64	1.61
CBR (0.1" de Penetración)	23.2	18.9	15.2
CBR (0.2" de Penetración)	26.3	20.5	15.7
GOLPES	56	25	10
% DE EXPANSION	0.57	0.79	1.31



VERIFICACIÓN

Ing. Gary Durán Ramírez
 CIP: 164471

Jefatura de Laboratorio

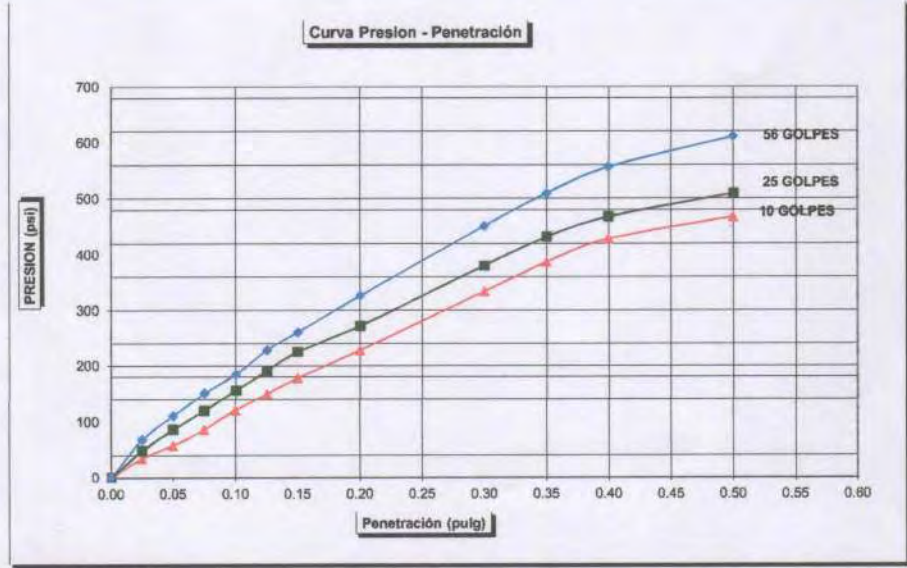
NORMA ASTM	D 1883
NORMA TECNICA PERUANA	339.145

Ensayo de CBR; NATURAL + 150% CAL
 Cuadro N°: 0103-CBR-04
 Hoja 1 de 1



PROYECTO:	CARRETERA CANTA HUAYLLAY, KM 57 - 59			
UBICACIÓN:	CANTA-HUAYLLAY			
CLIENTE:	TESIS-PUCP			
Nº ESTUDIO:	ES-0103	EJEC. POR:	D.P.G	15-mar-21
SONDEO:	NATURAL + 200% CAL	REV. POR:	G.D.R	
PROFUNDIDAD:	1.50 m	CUADRO:	0103-CBR-05	
TIPO DE MUESTRA:	ALTERADA	FORMATO:	FORM-LB-11	

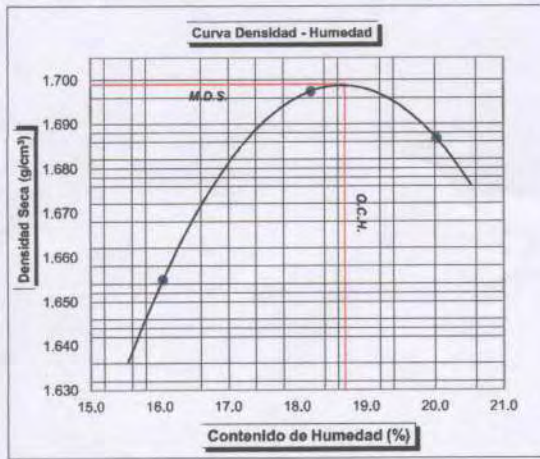
**ENSAYO CALIFORNIA BEARING RATIO - CBR
ASTM - D1883 / NTP 339.145**



RESUMEN

MAXIMA DENSIDAD SECA (g/cm^3):	1.70	
HUMEDAD OPTIMA:	18.7%	
PENETRACIÓN (Pulg.)	0,1"	0,2"
CBR al 95% de la MDS:	12.2	15.3
CBR al 100% de la MDS:	17.8	20.3
CONDICION DE LA MUESTRA	4 Dias de Saturacion	
SOBRECARGA	10 Libras (4.55 kg)	

	MOLDE 1	MOLDE 2	MOLDE 3
DENSIDAD SECA (g/cm^3)	1.70	1.67	1.61
CBR (0.1" de Penetración)	18.5	15.8	12.1
CBR (0.2" de Penetración)	20.3	18.1	15.2
GOLPES	56	25	10
% DE EXPANSION	0.53	1.82	2.17



VERIFICACIÓN


Ing. Gary Durán Ramírez
 CIP: 164471
 Jefatura de Laboratorio

NORMA ASTM	D 1883
NORMA TECNICA PERUANA	339.145

ANEXO 2.4: ENSAYOS COMPRESIÓN NO CONFINADA



 GIAS <small>INSTITUTO DE IMPACTO AMBIENTAL Y SOSTENIBILIDAD</small> <small>LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS</small>	PROYECTO:	CARRETERA CANTA HUAYLLAY, KM 57 - 59			
	UBICACIÓN:	CANTE - LIMA			
	CLIENTE:	TESIS - PUCP			
	N° ESTUDIO:	ES-0103	EJEC. POR:	D.P.G	10-abr-21
	SONDEO:	NATURAL (1)	REV. POR:	G.D.R	
	PROFUNDIDAD (m):	1.00 m	CUADRO:	0103-CS-01	
	ZONA:	INALTERADA	FORMATO:	FORM-LB12	

ENSAYO DE COMPRESIÓN NO CONFINADA (ASTM D-2166 / NTP 339.167)

Estado de la muestra: Intalterada Remoldeada

Anillo:	CONSTANTES DEL ANILLO			Rango Vel:
	100 Kg	A= -7.00E-06	B= 8.00E-02	S= 1.31E-01

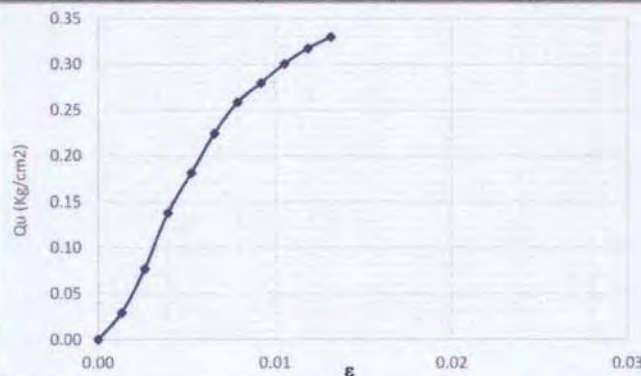
Especimen N°:	1			Gs:	2.71 g/cm3
Diámetro:	4.82 cm	Área:	18.25 cm2	Altura:	9.64 cm
W.Mues. I:	307.90 g	W.Mues. F:	307.90 g	W. Mues. S:	234.18 g
Pu Hum:	1.75 g/cm3	% Humed. In.:	31.48%	Pu Seco:	1.33 g/cm3
				Volúmen:	175.90 cm3
				Agua:	73.72 g
				Velocidad:	178 mic/min

1	2	3	4	5	6	7	8
DIAL	P	DIAL	ΔL	$\epsilon = \Delta L/L_0$	1- ϵ	A'=A/(1- ϵ)	P'=P/A'
CARGA	(Kg.)	DEFORM.	(cm)			(cm2)	(Kg/cm2)
0	0.00	0	0.00	0.0000	1.0000	18.25	0.00
5	0.53	5	0.01	0.0013	0.9987	18.27	0.03
16	1.41	10	0.03	0.0026	0.9974	18.29	0.08
30	2.52	15	0.04	0.0040	0.9960	18.32	0.14
40	3.32	20	0.05	0.0053	0.9947	18.34	0.18
50	4.11	25	0.06	0.0066	0.9934	18.37	0.22
58	4.75	30	0.08	0.0079	0.9921	18.39	0.26
63	5.14	35	0.09	0.0092	0.9908	18.42	0.28
68	5.54	40	0.10	0.0105	0.9895	18.44	0.30
72	5.85	45	0.11	0.0119	0.9881	18.47	0.32
75	6.09	50	0.13	0.0132	0.9868	18.49	0.33

TENSIÓN MÁXIMA (Q_u) =	0.33 Kg/cm2
RADIO (q)=	0.16 Kg/cm2
CENTRO (p)=	0.16 Kg/cm2

Característica del Especimen

HUMEDAD INICIAL (%)	31.48%
SATURACIÓN INICIAL (%)	82.38%
RELACIÓN DE VACÍOS (e)	1.04
POROSIDAD (n)	0.51
DENSIDAD TOTAL	1.75 g/cm3
DENSIDAD SECA	1.33 g/cm3
DENSIDAD SATURADA	1.84 g/cm3
DENSIDAD EFECTIVA	0.84 g/cm3




Observaciones:

VERIFICACIONES


Ing. Gary Durán Ramirez
 CIP: 164471
 Jefatura de Laboratorio

NORMA ASTM	D 2166
NORMA TECNICA PERUANA	339.167

Ensayo de Compresión No Confinada / NATURAL (1)
 Cuadro N°: 0103-CS-01
 Hoja 1 de 1

 <small>INSTITUTO DE INVESTIGACIONES AMBIENTALES Y SOSTENIBILIDAD</small> <small>LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS</small>	PROYECTO:	CARRETERA CANTA HUAYLLAY, KM 57 - 59		
	UBICACIÓN:	CANTE - LIMA		
	CLIENTE:	TESIS - PUCP		
	Nº ESTUDIO:	ES-0103	EJEC. POR:	D.P.G 10-abr-21
	SONDEO:	NATURAL (2)	REV. POR:	G.D.R
	PROFUNDIDAD (m):	1.00 m	CUADRO:	0103-CS-01
	ZONA:	INALTERADA	FORMATO:	FORM-LB12

ENSAYO DE COMPRESIÓN NO CONFINADA (ASTM D-2166 / NTP 339.167)

Estado de la muestra: Inalterada Remoldeada

Anillo:	CONSTANTES DEL ANILLO			Rango Vel:
100 Kg	A= -7.00E-06	B= 8.00E-02	S= 1.31E-01	10

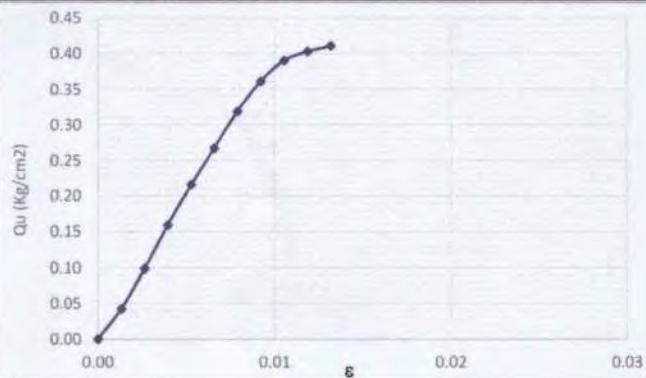
Especimen Nº:	1	Gs:	2.71 g/cm3
Diámetro:	4.82 cm	Área:	18.25 cm2
W.Mues. I:	309.80 g	W.Mues. F:	309.80 g
Pu Hum:	1.76 g/cm3	% Humed. In.:	31.12%
		W. Mues. S:	236.28 g
		Pu Seco:	1.34 g/cm3
		Volúmen:	175.90 cm3
		Agua:	73.52 g
		Velocidad:	178 mic/min

1	2	3	4	5	6	7	8
DIAL CARGA	P (Kg.)	DIAL DEFORM.	ΔL (cm)	$\epsilon = \Delta L / L_0$	1- ϵ	A'=A/(1- ϵ) (cm2)	P'=P/A' (Kg/cm2)
0	0.00	0	0.00	0.0000	1.0000	18.25	0.00
8	0.77	5	0.01	0.0013	0.9987	18.27	0.04
21	1.81	10	0.03	0.0026	0.9974	18.29	0.10
35	2.92	15	0.04	0.0040	0.9960	18.32	0.16
48	3.95	20	0.05	0.0053	0.9947	18.34	0.22
60	4.91	25	0.06	0.0066	0.9934	18.37	0.27
72	5.85	30	0.08	0.0079	0.9921	18.39	0.32
82	6.64	35	0.09	0.0092	0.9908	18.42	0.36
89	7.20	40	0.10	0.0105	0.9895	18.44	0.39
92	7.43	45	0.11	0.0119	0.9881	18.47	0.40
94	7.59	50	0.13	0.0132	0.9868	18.49	0.41

TENSIÓN MÁXIMA (Qu) =	0.41 Kg/cm2
RADIO (q) =	0.21 Kg/cm2
CENTRO (p) =	0.21 Kg/cm2

Característica del Especimen

HUMEDAD INICIAL (%)	31.12%
SATURACIÓN INICIAL (%)	82.88%
RELACIÓN DE VACÍOS (e)	1.02
POROSIDAD (n)	0.50
DENSIDAD TOTAL	1.76 g/cm3
DENSIDAD SECA	1.34 g/cm3
DENSIDAD SATURADA	1.85 g/cm3
DENSIDAD EFECTIVA	0.85 g/cm3




Observaciones:

VERIFICACIONES


Ing. Gary Durán Ramirez
CIP: 164471
 Jefatura de Laboratorio

NORMA ASTM	D 2166
NORMA TECNICA PERUANA	339.167

Ensayo de Compresión No Confinada / NATURAL (2)
 Cuadro Nº: 0103-CS-01
 Hoja 1 de 1

 GIAS <small>GESTIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL Y SOSTENIBILIDAD</small> <small>LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS</small>	PROYECTO:	CARRETERA CANTA HAYLLAY, KM 57 - 59			
	UBICACIÓN:	CANTA - LIMA			
	CLIENTE:	TESIS - PUCP			
	Nº ESTUDIO:	ES-0103	EJEC. POR:	D.P.G	10-abr-21
	SONDEO:	NATURAL + 80% CAL (1)	REV. POR:	G.D.R	
	PROFUNDIDAD:	1.50 m	CUADRO:	0103-CS-03	
	TIPO DE MUESTRA:	ALTERADA	FORMATO:	FORM-LB-12	

ENSAYO DE COMPRESIÓN NO CONFINADA (ASTM D-2166 / NTP 339.167)

Estado de la muestra: Intactada Remoldada

Anillo:	CONSTANTES DEL ANILLO			Rango Vel.:
2000 Kg	A= -4.00E-05	B= 1.19E+00	S= 1.21E+01	10

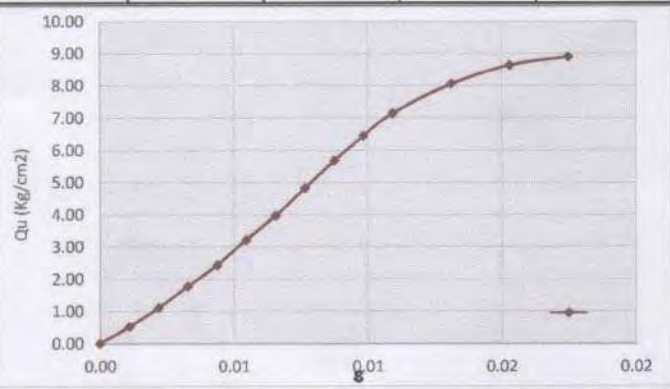
Espécimen Nº:					Gs:	2.74 g/cm3	
Diámetro:	10.16 cm	Área:	81.07 cm2	Altura:	11.62 cm	Volúmen:	942.07 cm3
W.Mues. I:	1583.11 g	W.Mues. F:	1583.11 g	W. Mues. S:	1522.14 g	Agua:	60.97 g
Pu Hum:	1.68 g/cm3	% Humed. In.:	4.01%	Pu Seco:	1.62 g/cm3	Velocidad:	178 mic/min

1	2	3	4	5	6	7	8
DIAL CARGA	P (Kg.)	DIAL DEFORM.	ΔL (cm)	ε = ΔL/L0	1-ε	A'=A/(1-ε) (cm2)	P'=P/A' (Kg/cm2)
0	0.00	0	0.00	0.0000	1.0000	81.07	0.00
25	41.77	5	0.01	0.0011	0.9989	81.16	0.51
65	89.19	10	0.03	0.0022	0.9978	81.25	1.10
112	144.75	15	0.04	0.0033	0.9967	81.34	1.78
158	198.95	20	0.05	0.0044	0.9956	81.43	2.44
212	262.36	25	0.06	0.0055	0.9945	81.52	3.22
265	324.37	30	0.08	0.0066	0.9934	81.61	3.97
325	394.30	35	0.09	0.0077	0.9923	81.70	4.83
385	463.94	40	0.10	0.0087	0.9913	81.79	5.67
440	527.53	45	0.11	0.0098	0.9902	81.88	6.44
490	585.12	50	0.13	0.0109	0.9891	81.97	7.14
557	661.99	60	0.15	0.0131	0.9869	82.15	8.06
600	711.13	70	0.18	0.0153	0.9847	82.33	8.64
620	733.94	80	0.20	0.0175	0.9825	82.52	8.89

TENSIÓN MÁXIMA (Qu) =	8.89 Kg/cm2
RADIO (q) =	4.45 Kg/cm2
CENTRO (p) =	4.45 Kg/cm2


Característica del Especimen

HUMEDAD INICIAL (%)	4.01%
SATURACIÓN INICIAL (%)	15.77%
RELACIÓN DE VACÍOS (e)	0.70
POROSIDAD (n)	0.41
DENSIDAD TOTAL	1.68 g/cm3
DENSIDAD SECA	1.62 g/cm3
DENSIDAD SATURADA	2.03 g/cm3
DENSIDAD EFECTIVA	1.03 g/cm3



Observaciones:

VERIFICACIÓN


Ing. Gary Durand Ramirez
CIP: 164471
 Jefatura de Laboratorio

NORMA ASTM	D 2166
NORMA TECNICA PERUANA	339.167

 GIAS <small>GESTIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL Y SOSTENIBILIDAD</small> <small>LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS</small>	PROYECTO:	CARRETERA CANTA HAYLLAY, KM 57 - 59			
	UBICACIÓN:	CANTA - LIMA			
	CLIENTE:	TESIS - PUCP			
	Nº ESTUDIO:	ES-0103	EJEC. POR:	D.P.G	10-abr-21
	SONDEO:	NATURAL + 80% CAL (2)	REV. POR:	G.D.R	
	PROFUNDIDAD:	1.50 m	CUADRO:	0103-CS-04	
	TIPO DE MUESTRA:	ALTERADA	FORMATO:	FORM-LB-12	

ENSAYO DE COMPRESIÓN NO CONFINADA (ASTM D-2166 / NTP 339.167)				
Estado de la muestra: <input type="checkbox"/> Inalterada <input checked="" type="checkbox"/> Remoldeada				
Anillo:	CONSTANTES DEL ANILLO			Rango Vel.: 10
2000 Kg	A= -4.00E-05	B= 1.19E+00	S= 1.21E+01	

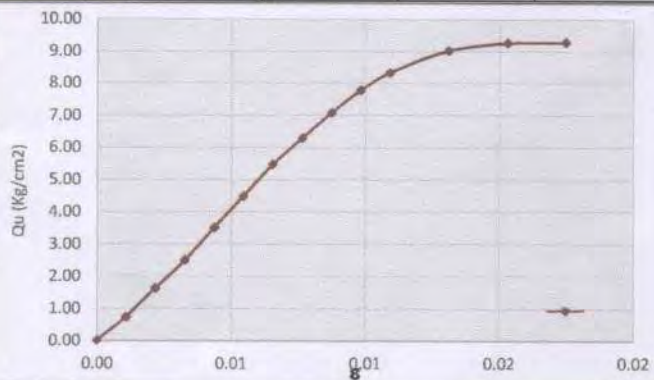
Espécimen N°:	Diámetro: 10.16 cm	Área: 81.07 cm ²	Altura: 11.62 cm	Gs: 2.74 g/cm ³
W.Mues. I:	1580.21 g	W.Mues. F: 1580.21 g	W. Mues. S: 1517.24 g	Volúmen: 942.07 cm ³
Pu Hum:	1.68 g/cm ³	% Humed. In.: 4.15%	Pu Seco: 1.61 g/cm ³	Agua: 62.97 g
				Velocidad: 178 mic/min

1	2	3	4	5	6	7	8
DIAL CARGA	P (Kg.)	DIAL DEFORM.	ΔL (cm)	ε = ΔL/Lo	1-ε	A'=A/(1-ε) (cm ²)	P'=P/A' (Kg/cm ²)
0	0.00	0	0.00	0.0000	1.0000	81.07	0.00
40	59.57	5	0.01	0.0011	0.9989	81.16	0.73
101	131.76	10	0.03	0.0022	0.9978	81.25	1.62
162	203.65	15	0.04	0.0033	0.9967	81.34	2.50
232	285.79	20	0.05	0.0044	0.9956	81.43	3.51
300	365.20	25	0.06	0.0055	0.9945	81.52	4.48
370	446.56	30	0.08	0.0066	0.9934	81.61	5.47
428	513.68	35	0.09	0.0077	0.9923	81.70	6.29
485	579.37	40	0.10	0.0087	0.9913	81.79	7.08
535	636.79	45	0.11	0.0098	0.9902	81.88	7.78
575	682.58	50	0.13	0.0109	0.9891	81.97	8.33
626	740.77	60	0.15	0.0131	0.9869	82.15	9.02
645	762.40	70	0.18	0.0153	0.9847	82.33	9.26
648	765.81	80	0.20	0.0175	0.9825	82.52	9.28

TENSIÓN MÁXIMA (Qu) =	9.28 Kg/cm ²
RADIO (q)=	4.64 Kg/cm ²
CENTRO (p)=	4.64 Kg/cm ²

Característica del Especimen

HUMEDAD INICIAL (%)	4.15%
SATURACIÓN INICIAL (%)	16.22%
RELACIÓN DE VACÍOS (e)	0.70
POROSIDAD (n)	0.41
DENSIDAD TOTAL	1.68 g/cm ³
DENSIDAD SECA	1.61 g/cm ³
DENSIDAD SATURADA	2.02 g/cm ³
DENSIDAD EFECTIVA	1.02 g/cm ³



Observaciones:

.....

.....

.....

.....

.....

VERIFICACIÓN


.....

.....


.....

.....

.....


Ing. Gary Durán Ramírez
 CIP: 164471
 Jefatura de Laboratorio

NORMA ASTM	D 2166
NORMA TECNICA PERUANA	339.167

 <small>GESTIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL Y SOSTENIBILIDAD</small> <small>LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS</small>	PROYECTO:	CARRETERA CANTA HAYLLAY, KM 57 - 59			
	UBICACIÓN:	CANTA - LIMA			
	CLIENTE:	TESIS - PUCP			
	Nº ESTUDIO:	ES-0103	EJEC. POR:	D.P.G	10-abr-21
	SONDEO:	NATURAL + 100% CAL (1)	REV. POR:	G.D.R	
	PROFUNDIDAD:	1.50 m	CUADRO:	0103-CS-05	
	TIPO DE MUESTRA:	ALTERADA	FORMATO:	FORM-LB-12	

ENSAYO DE COMPRESIÓN NO CONFINADA (ASTM D-2166 / NTP 339.167)				
Estado de la muestra: <input type="checkbox"/> Inalterada <input checked="" type="checkbox"/> Remoldada				
Anillo:	CONSTANTES DEL ANILLO			Rango Vel.:
2000 Kg	A= -4.00E-05	B= 1.19E+00	S= 1.21E+01	10

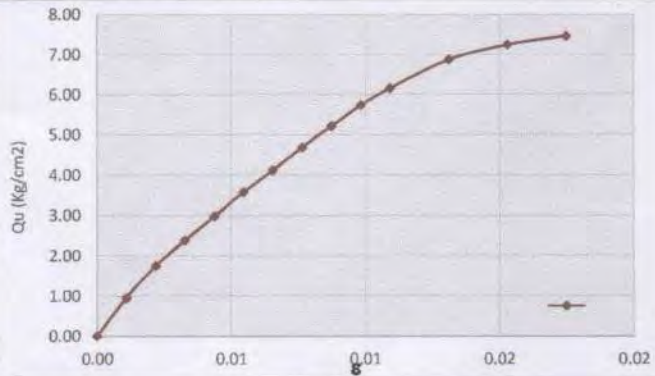
Especimen N°:	Diámetro: 10.16 cm	Área: 81.07 cm ²	Altura: 11.62 cm	Gs: 2.76 g/cm ³
W.Mues. I:	1662.77 g	W.Mues. F: 1662.77 g	W. Mues. S: 1604.58 g	Volúmen: 942.07 cm ³
Pu Hum:	1.77 g/cm ³	% Humed. In.: 3.63%	Pu Seco: 1.70 g/cm ³	Agua: 58.19 g
			Velocidad: 178 mic/min	

1	2	3	4	5	6	7	8
DIAL CARGA	P (Kg.)	DIAL DEFORM.	ΔL (cm)	ε = ΔL/Lo	1-ε	A'=A/(1-ε) (cm ²)	P'=P/A' (Kg/cm ²)
0	0.00	0	0.00	0.0000	1.0000	81.07	0.00
55	77.35	5	0.01	0.0011	0.9989	81.16	0.95
110	142.39	10	0.03	0.0022	0.9978	81.25	1.75
154	194.24	15	0.04	0.0033	0.9967	81.34	2.39
195	242.42	20	0.05	0.0044	0.9956	81.43	2.98
237	291.64	25	0.06	0.0055	0.9945	81.52	3.58
275	336.05	30	0.08	0.0066	0.9934	81.61	4.12
315	382.67	35	0.09	0.0077	0.9923	81.70	4.68
353	426.84	40	0.10	0.0087	0.9913	81.79	5.22
390	469.73	45	0.11	0.0098	0.9902	81.88	5.74
420	504.44	50	0.13	0.0109	0.9891	81.97	6.15
472	564.41	60	0.15	0.0131	0.9869	82.15	6.87
500	596.62	70	0.18	0.0153	0.9847	82.33	7.25
517	616.14	80	0.20	0.0175	0.9825	82.52	7.47

TENSIÓN MÁXIMA (Qu) = 7.47 Kg/cm ²
RADIO (q) = 3.73 Kg/cm ²
CENTRO (p) = 3.73 Kg/cm ²

Característica del Especimen

HUMEDAD INICIAL (%)	3.63%
SATURACIÓN INICIAL (%)	16.13%
RELACIÓN DE VACÍOS (e)	0.62
POROSIDAD (n)	0.38
DENSIDAD TOTAL	1.77 g/cm ³
DENSIDAD SECA	1.70 g/cm ³
DENSIDAD SATURADA	2.09 g/cm ³
DENSIDAD EFECTIVA	1.09 g/cm ³



Observaciones:

.....

.....

.....

.....

.....

VERIFICACIÓN

.....

.....


.....

.....

.....


Ing. Gary Durán Ramirez
CIP: 164471
 Jefatura de Laboratorio

NORMA ASTM	D 2166
NORMA TECNICA PERUANA	339.167

 GIAS <small>GESTIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL Y SOSTENIBILIDAD</small> <small>LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS</small>	PROYECTO:	CARRETERA CANTA HAYLLAY, KM 57 - 59		
	UBICACIÓN:	CANTA - LIMA		
	CLIENTE:	TESIS - PUCP		
	Nº ESTUDIO:	ES-0103	EJEC. POR:	D.P.G
	SONDEO:	NATURAL + 100% CAL (2)	REV. POR:	G.D.R
	PROFUNDIDAD:	1.50 m	CUADRO:	0103-CS-06
TIPO DE MUESTRA:	ALTERADA	FORMATO:	FORM-LB-12	

ENSAYO DE COMPRESIÓN NO CONFINADA (ASTM D-2166 / NTP 339.167)

Estado de la muestra: Intacta Remoldeada

Anillo:	CONSTANTES DEL ANILLO			Rango Vel.:
2000 Kg	A= -4.00E-05	B= 1.19E+00	S= 1.21E+01	10

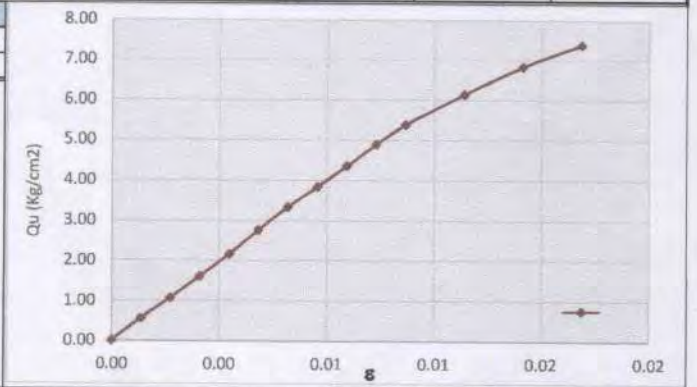
Especimen Nº:							Gs:	2.76 g/cm ³
Diámetro:	10.16 cm	Área:	81.07 cm ²	Altura:	11.62 cm	Volúmen:	942.07 cm ³	
W. Mues. I:	1663.12 g	W. Mues. F:	1663.12 g	W. Mues. S:	1598.74 g	Agua:	64.38 g	
Pu Hum:	1.77 g/cm ³	% Humed. In.:	4.03%	Pu Seco:	1.70 g/cm ³	Velocidad:	178 mic/min	

1	2	3	4	5	6	7	8
DIAL CARGA	P (Kg.)	DIAL DEFORM.	ΔL (cm)	ε = ΔL/L ₀	1-ε	A'=A/(1-ε) (cm ²)	P'=P/A' (Kg/cm ²)
0	0.00	0	0.00	0.0000	1.0000	81.07	0.00
28	45.33	5	0.01	0.0011	0.9989	81.16	0.56
63	86.82	10	0.03	0.0022	0.9978	81.25	1.07
100	130.58	15	0.04	0.0033	0.9967	81.34	1.61
138	175.40	20	0.05	0.0044	0.9956	81.43	2.15
180	224.81	25	0.06	0.0055	0.9945	81.52	2.76
220	271.74	30	0.08	0.0066	0.9934	81.61	3.33
255	312.69	35	0.09	0.0077	0.9923	81.70	3.83
292	355.88	40	0.10	0.0087	0.9913	81.79	4.35
330	400.12	45	0.11	0.0098	0.9902	81.88	4.89
365	440.76	50	0.13	0.0109	0.9891	81.97	5.38
420	504.44	60	0.15	0.0131	0.9869	82.15	6.14
470	562.11	70	0.18	0.0153	0.9847	82.33	6.83
510	608.11	80	0.20	0.0175	0.9825	82.52	7.37

TENSIÓN MÁXIMA (Qu) = 7.37 Kg/cm²
RADIO (q)= 3.68 Kg/cm ²
CENTRO (p)= 3.68 Kg/cm ²

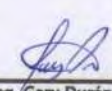
Característica del Especimen

HUMEDAD INICIAL (%)	4.03%
SATURACIÓN INICIAL (%)	17.74%
RELACIÓN DE VACÍOS (e)	0.63
POROSIDAD (n)	0.39
DENSIDAD TOTAL	1.77 g/cm ³
DENSIDAD SECA	1.70 g/cm ³
DENSIDAD SATURADA	2.08 g/cm ³
DENSIDAD EFECTIVA	1.08 g/cm ³




Observaciones:

VERIFICACIÓN


Ing. Gary Durán Ramírez
CIP: 164471
 Jefatura de Laboratorio

NORMA ASTM	D 2166
NORMA TECNICA PERUANA	339.167

 <small>GESTIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL Y SOSTENIBILIDAD</small> <small>LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS</small>	PROYECTO:	CARRETERA CANTA HAYLLAY, KM 57 - 59		
	UBICACIÓN:	CANTA - LIMA		
	CLIENTE:	TESIS - PUCP		
	Nº ESTUDIO:	ES-0103	EJEC. POR:	D.P.G
	SONDEO:	NATURAL + 150% CAL (1)	REV. POR:	G.D.R
	PROFUNDIDAD:	1.50 m	CUADRO:	0103-CS-07
	TIPO DE MUESTRA:	ALTERADA	FORMATO:	FORM-LB-12

ENSAYO DE COMPRESIÓN NO CONFINADA (ASTM D-2166 / NTP 339.167)

Estado de la muestra: Inalterada Remoldada

Anillo:	CONSTANTES DEL ANILLO			Rango Vel.:
2000 Kg	A= -4.00E-05	B= 1.19E+00	S= 1.21E+01	10

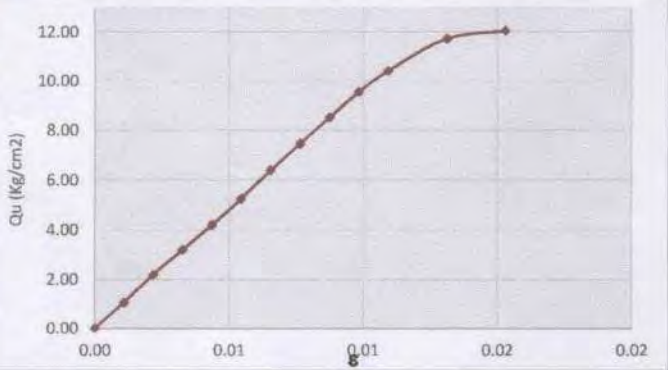
Especimen Nº:					Gs:	2.77 g/cm3	
Diámetro:	10.16 cm	Área:	81.07 cm2	Altura:	11.62 cm	Volúmen:	942.07 cm3
W. Mues. I:	1560.20 g	W. Mues. F:	1560.20 g	W. Mues. S:	1473.13 g	Agua:	87.07 g
Pu Hum:	1.66 g/cm3	% Humed. In.:	5.91%	Pu Seco:	1.56 g/cm3	Velocidad:	178 mic/min

1	2	3	4	5	6	7	8
DIAL CARGA	P (Kg.)	DIAL DEFORM.	ΔL (cm)	ε = ΔL/L0	1-ε	A'=A/(1-ε) (cm2)	P'=P/A' (Kg/cm2)
0	0.00	0	0.00	0.0000	1.0000	81.07	0.00
62	85.64	5	0.01	0.0011	0.9989	81.16	1.06
140	177.76	10	0.03	0.0022	0.9978	81.25	2.19
210	260.02	15	0.04	0.0033	0.9967	81.34	3.20
280	341.88	20	0.05	0.0044	0.9956	81.43	4.20
354	428.00	25	0.06	0.0055	0.9945	81.52	5.25
435	521.76	30	0.08	0.0066	0.9934	81.61	6.39
511	609.25	35	0.09	0.0077	0.9923	81.70	7.46
587	696.29	40	0.10	0.0087	0.9913	81.79	8.51
662	781.72	45	0.11	0.0098	0.9902	81.88	9.55
725	853.14	50	0.13	0.0109	0.9891	81.97	10.41
822	962.48	60	0.15	0.0131	0.9869	82.15	11.72
848	991.66	70	0.18	0.0153	0.9847	82.33	12.04

TENSIÓN MÁXIMA (Qu) =	12.04 Kg/cm2
RADIO (q)=	6.02 Kg/cm2
CENTRO (p)=	6.02 Kg/cm2


Característica del Especimen

HUMEDAD INICIAL (%)	5.91%
SATURACIÓN INICIAL (%)	21.22%
RELACIÓN DE VACÍOS (e)	0.77
POROSIDAD (n)	0.44
DENSIDAD TOTAL	1.66 g/cm3
DENSIDAD SECA	1.56 g/cm3
DENSIDAD SATURADA	2.00 g/cm3
DENSIDAD EFECTIVA	1.00 g/cm3



Observaciones:


VERIFICACIÓN



Ing. Gary Durán Ramírez
CIP: 164471

Jefatura de Laboratorio

NORMA ASTM	D 2166
NORMA TÉCNICA PERUANA	339.167

 <small>GESTIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL Y SOSTENIBILIDAD</small> <small>LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS</small>	PROYECTO:	CARRETERA CANTA HAYLLAY, KM 57 - 59		
	UBICACIÓN:	CANTA - LIMA		
	CLIENTE:	TESIS - PUCP		
	Nº ESTUDIO:	ES-0103	EJEC. POR:	D.P.G 10-abr-21
	SONDEO:	NATURAL + 150% CAL (2)	REV. POR:	G.D.R
	PROFUNDIDAD:	1.50 m	CUADRO:	0103-CS-08
	TIPO DE MUESTRA:	ALTERADA	FORMATO:	FORM-LB-12

ENSAYO DE COMPRESIÓN NO CONFINADA (ASTM D-2166 / NTP 339.167)

Estado de la muestra: Inalterada Remoldeada

Anillo:	CONSTANTES DEL ANILLO			Rango Vel.:
2000 Kg	A= -4.00E-05	B= 1.19E+00	S= 1.21E+01	10

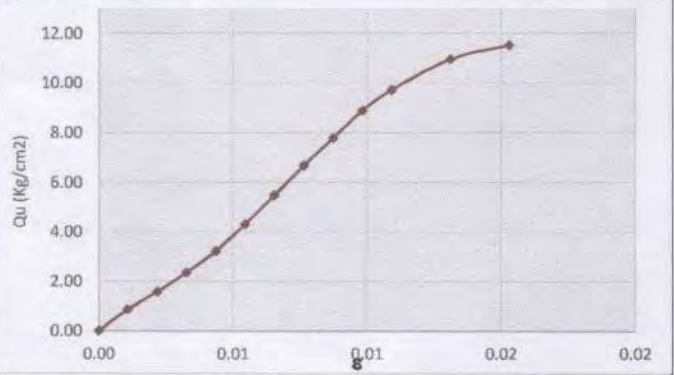
Especimen Nº:							Gs:	2.77 g/cm3
Diámetro:	10.16 cm	Área:	81.07 cm2	Altura:	11.62 cm	Volúmen:	942.07 cm3	
W. Mues. I:	1561.00 g	W. Mues. F:	1561.00 g	W. Mues. S:	1480.32 g	Agua:	80.68 g	
Pu Hum:	1.66 g/cm3	% Humed. In.:	5.45%	Pu Seco:	1.57 g/cm3	Velocidad:	178 mic/min	

1	2	3	4	5	6	7	8
DIAL CARGA	P (Kg.)	DIAL DEFORM.	ΔL (cm)	ε = ΔL/Lo	1-ε	A'=A/(1-ε) (cm2)	P'=P/A' (Kg/cm2)
0	0.00	0	0.00	0.0000	1.0000	81.07	0.00
48	69.05	5	0.01	0.0011	0.9989	81.16	0.85
97	127.04	10	0.03	0.0022	0.9978	81.25	1.56
151	190.71	15	0.04	0.0033	0.9967	81.34	2.34
212	262.36	20	0.05	0.0044	0.9956	81.43	3.22
288	351.21	25	0.06	0.0055	0.9945	81.52	4.31
370	446.56	30	0.08	0.0066	0.9934	81.61	5.47
455	544.83	35	0.09	0.0077	0.9923	81.70	6.67
535	636.79	40	0.10	0.0087	0.9913	81.79	7.79
615	728.24	45	0.11	0.0098	0.9902	81.88	8.89
675	796.49	50	0.13	0.0109	0.9891	81.97	9.72
768	901.70	60	0.15	0.0131	0.9869	82.15	10.98
810	949.00	70	0.18	0.0153	0.9847	82.33	11.53

TENSIÓN MÁXIMA (Qu) =	11.53 Kg/cm2
RADIO (q) =	5.76 Kg/cm2
CENTRO (p) =	5.76 Kg/cm2

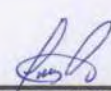
Característica del Especimen

HUMEDAD INICIAL (%)	5.45%
SATURACIÓN INICIAL (%)	19.79%
RELACIÓN DE VACÍOS (e)	0.76
POROSIDAD (n)	0.43
DENSIDAD TOTAL	1.66 g/cm3
DENSIDAD SECA	1.57 g/cm3
DENSIDAD SATURADA	2.00 g/cm3
DENSIDAD EFECTIVA	1.00 g/cm3



Observaciones:

VERIFICACIÓN


Ing. Gary Durand Ramirez
 CIP: 164471
 Jefatura de Laboratorio

NORMA ASTM	D 2166
NORMA TÉCNICA PERUANA	339.167

	PROYECTO:	CARRETERA CANTA HAYLLAY, KM 57 - 59			
	UBICACIÓN:	CANTA - LIMA			
	CLIENTE:	TESIS - PUCP			
	Nº ESTUDIO:	ES-0103	EJEC. POR:	D.P.G	10-abr-21
	SONDEO:	NATURAL + 200% CAL (1)	REV. POR:	G.D.R	
	PROFUNDIDAD:	1.50 m	CUADRO:	0103-CS-09	
	TIPO DE MUESTRA:	ALTERADA	FORMATO:	FORM-LB-12	

ENSAYO DE COMPRESIÓN NO CONFINADA (ASTM D-2166 / NTP 339.167)

Estado de la muestra: Inalterada Remoldeada

Anillo:	CONSTANTES DEL ANILLO			Rango Vel.:
2000 Kg	A= -4.00E-05	B= 1.19E+00	S= 1.21E+01	10

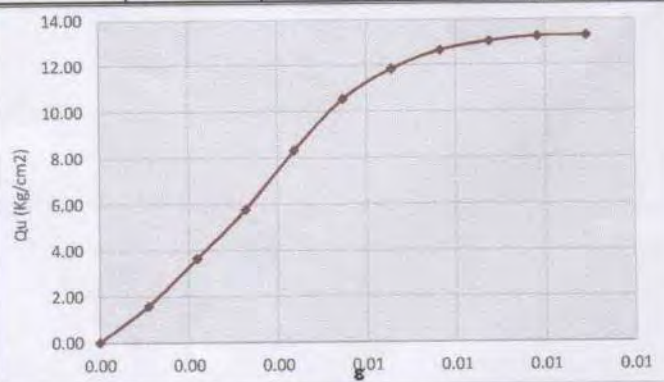
Especimen Nº:					Gs:	2.77 g/cm ³	
Diámetro:	10.16 cm	Área:	81.07 cm ²	Altura:	11.62 cm	Volúmen:	942.07 cm ³
W.Mues. I:	1565.72 g	W.Mues. F:	1575.62 g	W. Mues. S:	1480.22 g	Agua:	95.40 g
Pu Hum:	1.67 g/cm ³	% Humed. In.:	6.44%	Pu Seco:	1.57 g/cm ³	Velocidad:	178 mic/min

1	2	3	4	5	6	7	8
DIAL CARGA	P (Kg.)	DIAL DEFORM.	ΔL (cm)	ε = ΔL/L ₀	1-ε	A'=A/(1-ε) (cm ²)	P'=P/A' (Kg/cm ²)
0	0.00	0	0.00	0.0000	1.0000	81.07	0.00
98	128.22	5	0.01	0.0011	0.9989	81.16	1.58
241	296.32	10	0.03	0.0022	0.9978	81.25	3.65
389	468.58	15	0.04	0.0033	0.9967	81.34	5.76
570	676.86	20	0.05	0.0044	0.9956	81.43	8.31
730	858.80	25	0.06	0.0055	0.9945	81.52	10.53
825	965.85	30	0.08	0.0066	0.9934	81.61	11.84
885	1033.09	35	0.09	0.0077	0.9923	81.70	12.65
915	1066.61	40	0.10	0.0087	0.9913	81.79	13.04
932	1085.57	45	0.11	0.0098	0.9902	81.88	13.26
935	1088.91	50	0.13	0.0109	0.9891	81.97	13.28

TENSIÓN MÁXIMA (Qu) =	13.28 Kg/cm ²
RADIO (q) =	6.64 Kg/cm ²
CENTRO (p) =	6.64 Kg/cm ²

Característica del Especimen

HUMEDAD INICIAL (%)	6.44%
SATURACIÓN INICIAL (%)	23.40%
RELACIÓN DE VACÍOS (e)	0.76
POROSIDAD (n)	0.43
DENSIDAD TOTAL	1.67 g/cm ³
DENSIDAD SECA	1.57 g/cm ³
DENSIDAD SATURADA	2.00 g/cm ³
DENSIDAD EFECTIVA	1.00 g/cm ³



Observaciones:

VERIFICACIÓN


Ing. Gary Durán Ramírez
 CIP: 164471
 Jefatura de Laboratorio

NORMA ASTM	D 2166
NORMA TECNICA PERUANA	339.167

 <small>GESTIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL Y SOSTENIBILIDAD</small> <small>LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS</small>	PROYECTO:	CARRETERA CANTA HAYLLAY, KM 57 - 59		
	UBICACIÓN:	CANTA - LIMA		
	CLIENTE:	TESIS - PUCP		
	N° ESTUDIO:	ES-0103	EJEC. POR:	D.P.G
	SONDEO:	NATURAL + 200% CAL (2)	REV. POR:	G.D.R
	PROFUNDIDAD:	1.50 m	CUADRO:	0103-CS-10
	TIPO DE MUESTRA:	ALTERADA	FORMATO:	FORM-LB-12

ENSAYO DE COMPRESIÓN NO CONFINADA (ASTM D-2166 / NTP 339.167)

Estado de la muestra: Inicializado Remplazada

Anillo:	CONSTANTES DEL ANILLO			Rango Vel.:
2000 Kg	A = -4.00E-05	B = 1.19E+00	S = 1.21E+01	10

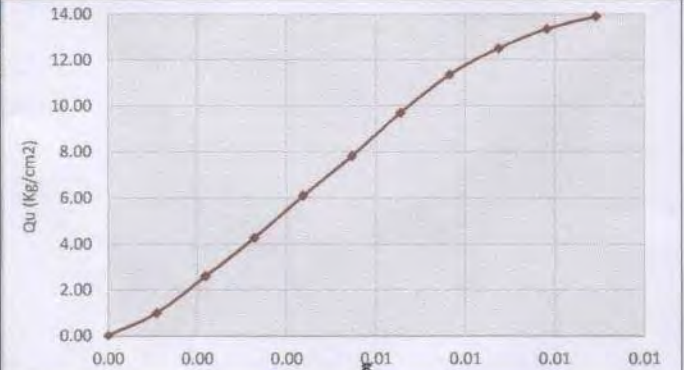
Especimen N°:					Gs:	2.77 g/cm3	
Diámetro:	10.16 cm	Área:	81.07 cm2	Altura:	11.62 cm	Volúmen:	942.07 cm3
W.Mues. I:	159.89 g	W.Mues. F:	1569.89 g	W. Mues. S:	1475.33 g	Agua:	94.56 g
Pu Hum:	1.67 g/cm3	% Humed. In.:	6.41%	Pu Seco:	1.57 g/cm3	Velocidad:	178 mic/min

1	2	3	4	5	6	7	8
DIAL	P	DIAL	ΔL	$\epsilon = \Delta L / L_0$	$1 - \epsilon$	$A' = A / (1 - \epsilon)$	$P' = P / A'$
CARGA	(Kg.)	DEFORM.	(cm)			(cm2)	(Kg/cm2)
0	0.00	0	0.00	0.0000	1.0000	81.07	0.00
58	80.90	5	0.01	0.0011	0.9989	81.16	1.00
168	210.71	10	0.03	0.0022	0.9978	81.25	2.59
285	347.71	15	0.04	0.0033	0.9967	81.34	4.27
412	495.19	20	0.05	0.0044	0.9956	81.43	6.08
535	636.79	25	0.06	0.0055	0.9945	81.52	7.81
670	790.81	30	0.08	0.0066	0.9934	81.61	9.69
790	926.49	35	0.09	0.0077	0.9923	81.70	11.34
875	1021.91	40	0.10	0.0087	0.9913	81.79	12.49
939	1093.37	45	0.11	0.0098	0.9902	81.88	13.35
980	1138.97	50	0.13	0.0109	0.9891	81.97	13.90

TENSIÓN MÁXIMA (Qu) = 13.90 Kg/cm2
RADIO (q) = 6.95 Kg/cm2
CENTRO (p) = 6.95 Kg/cm2

Característica del Especimen

HUMEDAD INICIAL (%)	6.41%
SATURACIÓN INICIAL (%)	23.09%
RELACIÓN DE VACÍOS (e)	0.77
POROSIDAD (n)	0.43
DENSIDAD TOTAL	1.67 g/cm3
DENSIDAD SECA	1.57 g/cm3
DENSIDAD SATURADA	2.00 g/cm3
DENSIDAD EFECTIVA	1.00 g/cm3



Observaciones:

VERIFICACIÓN


Ing. Gary Durán Ramírez
 CIP: 164471
 Jefatura de Laboratorio

NORMA ASTM	D 2166
NORMA TECNICA PERUANA	339.167



ANEXO 3: REGISTRO FOTOGRÁFICO



Imagen 1: Terreno contiguo a la carretera de estudio



Imagen 2: Zona de saturación formada alrededor de la zona de estudio



Imagen 3: Vista 1 de la Carretera Canta Huayllay km 48



Imagen 4: Vista 2 de la carretera canta Huayllay km 48

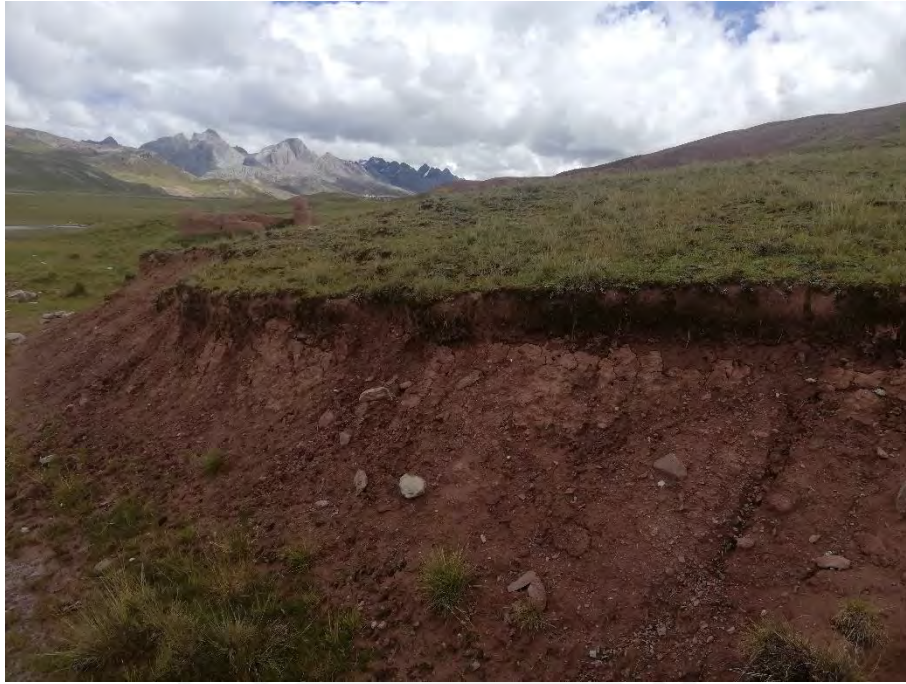


Imagen 5: Presencia de material arcilloso cercano a la zona de estudio

