

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL**



**ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON CAL
APLICACIÓN A LA CARRETERA TINGO MARÍA-
PUCALLPA SECTOR III: NESHUYA-PUCALLPA**

INFORME DE SUFICIENCIA

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO CIVIL

JUAN MIGUEL GARCÍA HUARANCCA

Lima- Perú

2015

DEDICATORIA

A Dios, por haberme dado la fortaleza y luz en el camino para ser una persona profesional.

A mis padres, Amado y Nelly; y a mis hermanos, Alexsander y Jacqueline, quienes han estado siempre conmigo durante toda mi vida y por su gran apoyo incondicional para lograr mis metas

AGRADECIMIENTO

Deseo expresar mis agradecimientos a:

A mis padres, Amado y Nelly; y a mis hermanos, Alexander y Jacqueline, por su constante motivación y enseñanzas para afrontar los retos que se presentaron durante mi vida.

A la señora Zulema Antezana y al señor Luigi Gargiulo, por su continua ayuda incondicional para lograr un buen desarrollo personal.

Al Ing. Manuel Francisco Correa Morocho por sus valiosas enseñanzas durante el desarrollo de la investigación.

A PROVIAS NACIONAL, por ofrecerme su apoyo durante el proceso de mi investigación.

A todas las personas que me apoyaron en las distintas fases del desarrollo de la investigación de manera desinteresada.

	Pag.
RESUMEN	3
LISTA DE TABLAS	5
LISTA DE FIGURAS	7
LISTA DE SIMBOLOS Y SIGLAS	8
INTRODUCCION	9
CAPÍTULO I : GENERALIDADES	
1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO	11
1.2 ESTATIGRAFIA Y FORMACIONES SEDIMENTARIAS	14
1.3 IDENTIFICACIÓN DE ARCILLAS EXPANSIVAS	
1.3.1 Métodos indirectos	15
1.3.2 Métodos directos	17
1.4 LA CAL	18
1.4.1 Fabricación de la cal	19
1.4.2 Requerimientos de la cal para la estabilización de suelos	20
1.4.3 Reacciones a corto plazo entre el suelo arcilloso y la cal	21
1.4.4 Reacciones a largo plazo entre el suelo arcilloso y la cal	22
CAPÍTULO II : ESTABILIZACIÓN DE SUELOS EN PAVIMENTOS	
2.1 PROCESO EN LA DETERMINACIÓN DEL AGENTE ESTABILIZADOR	
2.1.1 Exploración en campo	24
2.1.2 Sectorización del tramo	26
2.1.3 Elección del agente estabilizador	28
2.1.4 Verificación de las condiciones climáticas de la zona	29
2.1.5 Comparación de costos del agente estabilizador	34
2.2 EFECTOS DE LA CAL EN LOS SUELOS ARCILLOSOS	34
2.3 FACTORES A CONSIDERAR EN LA ESTABILIZACIÓN SUELO-CAL	42

CAPÍTULO III: DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE REQUERIDO DE CAL

3.1	MÉTODOS PARA EL DISEÑO SUELO-CAL	
3.1.1	Método de Eades and Grim	45
3.1.2	Método del Departamento de Texas	46
3.2	CÁLCULO DEL PORCENTAJE ÓPTIMO DE CAL	47

CAPÍTULO IV: ESTABILIZACIÓN DE SUELO-CAL EN LA CARRETERA TINGO MARÍA-PUCALLPA. SECTOR III

4.1	PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO EN LA ESTABILIZACIÓN SUELO-CAL	54
4.2	CONTROL DE CALIDAD EN EL SUELO-CAL	58
4.2.1	Calidad de la cal viva	59
4.2.2	Resultados de ensayos del suelo-cal	60

CAPITULO V : CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1	CONCLUSIONES	65
5.2	RECOMENDACIONES	67

BIBLIOGRAFÍA	68
---------------------	----

ANEXOS	69
---------------	----

RESUMEN

El proyecto denominado “Rehabilitación y Mejoramiento de la Carretera Tingo María-Pucallpa - sector III: Neshuya-Pucallpa”, se encuentra en la región de Ucayali, que consiste en la ejecución de 58.769 Km. de carretera asfaltada, con el fin de unir las ciudades de la costa y sierra central con la selva baja, formando una red nacional.

El estudio de suelos en la vía existente que se requiere rehabilitar y mejorar, indica por sectores la presencia de afirmado y asfalto como capa rodadura con graves daños, debido a la fatiga del pavimento. Asimismo, a través de la ejecución de calicatas, se calculó un 53.3% de material limo arcilloso y 46.7% de material granular a nivel de subrasante del proyecto.

La vida útil de la carretera es de 10 años con alta densidad de tránsito, requiriéndose para su ejecución, materiales de buena calidad en su aspecto físico y mecánico, sin embargo, en el lugar del ámbito del proyecto, los materiales que predominan son suelos limo arcillosos, cuyas propiedades fundamentales son de poseer elevado índice de plasticidad y baja capacidad de soporte ante los esfuerzos que se generan por el paso de los vehículos.

La estabilización química del suelo arcilloso con cal, logra mejorar sus propiedades físicas y mecánicas a corto y largo plazo, cuyos efectos en sus propiedades se interpretan en los resultados de los ensayos de laboratorio de la mezcla suelo-cal, establecidos en las normas ASTM, AASHTO, MTC y CE-020.

En este tipo de estabilización se determina el óptimo contenido de cal capaz de mejorar las propiedades físicas y mecánicas del suelo, con resultados de acuerdo a las especificaciones técnicas del proyecto.

En el capítulo I, se detalla la ubicación del proyecto y las condiciones del pavimento existente, las propiedades de los suelos y los mecanismos de interacción en la mezcla suelo-cal. En el capítulo II, se dará a conocer los efectos de la cal en el suelo arcilloso justificado con los resultados de los ensayos de laboratorio del suelo-cal y los factores a tener en cuenta en el suelo a tratar, para

lograr la eficacia de la estabilización del suelo arcilloso. En el capítulo III, se utiliza diferentes métodos para calcular el óptimo contenido de cal en cada muestra del terreno de la subrasante, a través de los ensayos de laboratorio del suelo-cal, hasta lograr el cumplimiento de las especificaciones técnicas del proyecto. En el capítulo IV, se dará a conocer el procedimiento constructivo referenciado a la obra y las consideraciones a tener en cuenta para lograr una buena calidad en la construcción. Finalmente en el capítulo V, se indicara las conclusiones y recomendaciones de la investigación.

LISTA DE TABLAS

	Pag.
Tabla N°1.1 : Tipos de suelos a nivel subrasante	12
Tabla N°1.2 : Estratigrafía de las formaciones geológicas	14
Tabla N°1.3 : Grado del potencial expansivo según Holtz y Gibbs	16
Tabla N°1.4 : Grado de potencial expansivo según Seed, Woodward y Lundgred	16
Tabla N°1.5 : Grado de expansión correlacionado con el LL y el IP	17
Tabla N°1.6 : Requerimientos químicos y físicos de la cal	20
Tabla N°1.7 : Resistencia mínima de la compresión no confinada a los 28 días	22
Tabla N°2.1 : Numero de ejes equivalentes acumulados en el período de diseño	26
Tabla N°2.2 : Clasificación de suelos a nivel subrasante	27
Tabla N°2.3 : Secciones homogéneas en base al CBR de diseño	27
Tabla N°2.4 : Requerimientos de suelos para estabilizar con cal	28
Tabla N°2.5 : Granulometría de las canteras para estabilización con cal	29
Tabla N°2.6 : Registro de temperaturas media mensuales	30
Tabla N°2.7 : Precipitaciones mensuales de la estación pluviométrica Aguaytia	32
Tabla N°2.8 : Precipitaciones mensuales de la estación pluviométrica Pucallpa	33
Tabla N°2.9 : Índice de plasticidad de las muestras del suelo-cal	36
Tabla N°2.10: Porcentaje de expansión de las muestras suelo cal	38
Tabla N°2.11: Resultados de la MDS y OCH del suelo-cal	39
Tabla N°2.12: Resultados del CBR del suelo-cal	41
Tabla N°3.1 : Porcentaje de cal por el método del Dpto de Texas	47
Tabla N°3.2 : Diseño de suelo-cal para el suelo A-4 (2)	48
Tabla N°3.3 : Diseño de suelo-cal para el suelo A-6 (5)	48
Tabla N°3.4 : Diseño de suelo-cal para el suelo A-6 (7)	49
Tabla N°3.5 : Diseño de suelo-cal para el suelo A-6 (9)	49
Tabla N°3.6 : Diseño de suelo-cal para el suelo A-6 (13)	50
Tabla N°3.7 : Diseño de suelo-cal para el suelo A-7-6 (17)	50
Tabla N°3.8 : Diseño de suelo-cal para la cantera Km.2+600	51
Tabla N°3.9 : Diseño de suelo-cal para la cantera Km.20+100	51

Tabla N°3.10: Diseño de suelo-cal para la cantera Km.38+470	52
Tabla N°3.11: Comparación entre resultados de métodos de diseño suelo-cal	52
Tabla N°3.12: Resumen del porcentaje optimo de cal para cada suelo	53
Tabla N°3.13: Variacion del CBR en el tiempo de saturacion	53
Tabla N°4.1 : Resumen de las especificaciones técnicas del proyecto	59
Tabla N°4.2 : Resultados de ensayos de la cal viva	60
Tabla N°4.3 : Resultados de ensayos de la primera capa de la subrasante	60
Tabla N°4.4 : Resultados de ensayos de la segunda capa de la subrasante	62
Tabla N°5.1 : Resultados de los ensayos de las muestras de suelo-cal	65
Tabla N°5.2 : Resultados del CBR en el tiempo de saturación	66

LISTA DE FIGURAS

	Pag.
Figura N°1.1: Ubicación geográfica de la carretera Tingo María-Pucallpa	11
Figura N°1.2: Reactividad de la cal viva en el agua	21
Figura N°2.1: Panel fotográfico de la estratigrafía del terreno	25
Figura N°2.2: Histograma de la precipitación media mensual de la estación Aguaytia	31
Figura N°2.3: Histograma de la precipitación media mensual de la estación Pucallpa	31
Figura N°2.4: Variación del IP en la mezcla suelo-cal	36
Figura N°2.5: Distribución estadística de los valores del LL e IP	37
Figura N°2.6: Variación de la MDS del suelo-cal	39
Figura N°2.7: Variación del OCH del suelo-cal	40
Figura N°2.8: Variación del CBR del suelo-cal	41
Figura N°3.1: Diseño del suelo-cal por el método de Eades and Grim	45
Figura N°3.2: Diseño del suelo-cal por el método del Dpto. de Texas	46
Figura N°4.1: Escarificación y pulverización de la subrasante	55
Figura N°4.2: Conformación y compactación a nivel de subrasante	55
Figura N°4.3: Extendido de la cal viva sobre la subrasante	56
Figura N°4.4: Proceso de mezclado del material natural y cal	57
Figura N°4.5: Compactación de la mezcla suelo-cal	58
Figura N°4.6: Curado húmedo de la mezcla suelo-cal	58
Figura N°4.7: Control de reactividad de la cal viva	60

LISTA DE SIMBOLOS Y SIGLAS

- ASTM** : American Society for Testing and Materials
- AASHTO**: American Association of State Highway and Transportation Officials
- IP** : Índice de plasticidad
- LL** : Limite liquido
- LP** : Limite plástico
- MDS** : Máxima densidad seca
- N** : Numero de ejes equivalentes acumulados en el periodo de diseño.
- OCH** : Optimo contenido de humedad
- PH** : Potencial de hidrogeno

INTRODUCCIÓN

Los suelos que predominan en la selva del país son de granulometría fina, presentándose las arcillas, limos y arenas con malas calidades ingenieriles para la construcción de pavimentos que forman parte de la red nacional. Para la ejecución, es común la búsqueda de materiales de préstamo en las canteras, cuya ubicación está en los cauces de los ríos donde se ha depositado el material sedimentario durante varios años. Las limitaciones más comunes que se encuentran en estos tipos de depósitos, es encontrar poco material de buena calidad para poder abastecerse a lo largo del proyecto, o en algunos casos, suficiente material adecuado, pero muy lejano del proyecto, elevando los costos de transporte del material. Estas limitaciones son resueltas con la aplicación de estabilizadores químicos que permiten mejorar las propiedades físicas y mecánicas del suelo natural por donde cruza el eje de la carretera, basándose con el uso de las normas ASTM, AASHTO, MTC y CE-020.

En esta investigación se desarrolla la aplicación de la estabilización de suelos con cal en el proyecto denominado: "Rehabilitación y Mejoramiento de la Carretera Tingo María-Pucallpa - sector III: Neshuya-Pucallpa", la cual forma parte de la red nacional para unir diversas regiones del país con la selva baja peruana. El objetivo principal de la investigación es determinar el porcentaje óptimo de cal para estabilizar los suelos de la subrasante del pavimento, para ello la metodología a emplear es realizar trabajos de campo y gabinete, donde se interpretara los resultados de los ensayos de laboratorio de cada muestra que se ha extraído del lugar del proyecto, basándose con ello la elaboración de la estratigrafía del eje de la carretera, los tipos de suelos y sus propiedades físicas y mecánicas. Con la información obtenida se dará a conocer a través de varias dosificaciones de cal en cada tipo de suelo, el porcentaje óptimo de cal, hasta lograr las especificaciones técnicas del proyecto.

En el capítulo I, se detalla la ubicación del proyecto y las condiciones del pavimento existente, las propiedades de los suelos por considerar en la estabilización y los mecanismos de interacción entre los suelos arcillosos y la cal. En el capítulo II, se dará a conocer los efectos de la cal en el suelo arcilloso justificado con los resultados de los ensayos de laboratorio del suelo-cal y los factores a tener en cuenta en el suelo a tratar, para lograr la eficacia de la estabilización del suelo arcilloso. En el capítulo III, se utiliza los diferentes métodos para calcular el óptimo contenido de cal en cada muestra del terreno de la subrasante, utilizando los resultados de los ensayos de laboratorio del suelo-cal, logrando de esta manera las especificaciones técnicas del proyecto. En el capítulo IV, se dará a conocer el procedimiento constructivo referenciado a la obra y las consideraciones a tener en cuenta para lograr una buena calidad en la construcción. Finalmente en el capítulo V, se indicara las conclusiones y recomendaciones de la investigación.

CAPÍTULO I GENERALIDADES

1.1 Descripción del proyecto

El lugar donde se desarrolla la carretera Tingo María-Pucallpa - Sector III: Neshuya-Pucallpa, se ubica en el departamento de Ucayali, provincia de Coronel Portillo, desde el puente Neshuya (Km.0+000) hasta la ciudad de Pucallpa (ovalo de entrada) en el Km.58+769.

El eje de la carretera forma parte del proyecto IIRSA Centro-tramo 3, siendo la principal ruta de acceso a la selva baja donde atraviesa cinco regiones del país: Lima, Junín, Pasco, Huánuco, Tingo María y Pucallpa y es posible conectarse a la ciudad de Iquitos por vía fluvial, beneficiando al país desde el punto de vista económico y social.

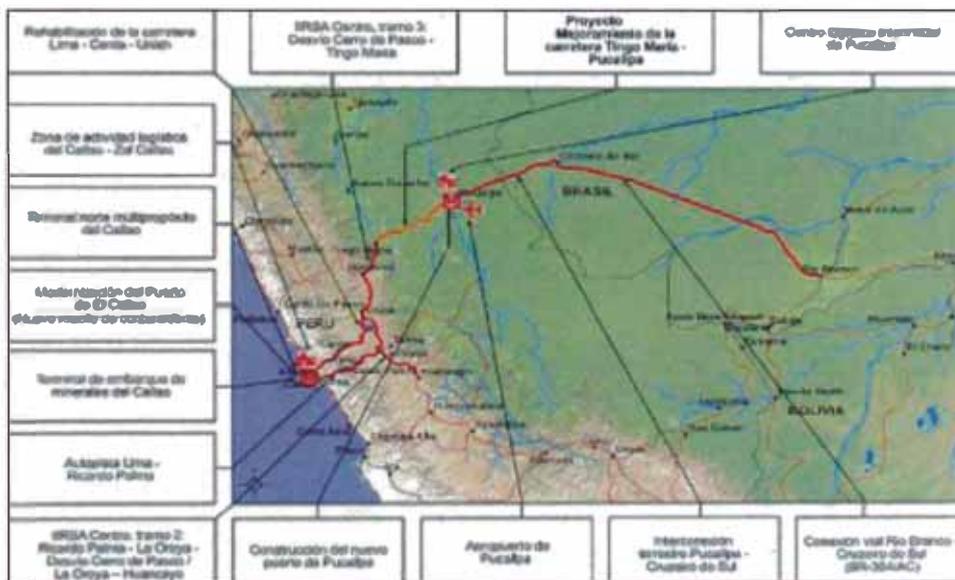


Figura N°1.1.- Ubicación geográfica de la carretera Tingo María-Pucallpa

La estructura del pavimento en el año 2005 presentaba en su carpeta de rodadura, baches y fisuras en bloques y piel de cocodrilo a consecuencia por la fatiga del pavimento. Los materiales y espesores de la carpeta de rodadura se muestran según el estado siguiente:

- Km.0+000 - Km.16+040: Capa de rodadura en afirmado de espesor y ancho variable.
- Km.16+040 - Km.40+200: Calzada asfaltada con tratamiento bicapa (ancho 6.60m) y bermas con fuerte erosión.
- Km.40+200 - Km.55+000: Calzada asfaltada de 0.10m de espesor y 6.60m de ancho, bermas de 0.05 de espesor y 1.0m de ancho.
- Km.55+000 – Km.58+769: Zona urbana de Pucallpa con calzada asfaltada de 0.10m de espesor y 8.50m de ancho.

Los resultados del estudio de suelos para la elaboración del proyecto de rehabilitación y mejoramiento de la carretera existente indicaron lo siguiente:

- Los suelos naturales a nivel de subrasante del proyecto son muy heterogéneos, donde predominan los suelos finos, siendo los porcentajes de abundancia indicado en la tabla N°1.1:

Tabla N°1.1.-Tipos de suelos a nivel subrasante

Tipo de suelo (SUCS)	Tipo de suelo (AASHTO)	Índice de Grupo	Porcentaje de Abundancia
Grava limosa (GM)	A1-b	IG=0	22.5%
Arena limosa (SC - SM)	A2-4	IG=0	24.2%
Arcilla limosa (CL-ML)	A-4	IG<5	40.1%
Arcilla limosa (CL-OL)	A-6	IG<14	11.6%
Arcillas (CL-OL)	A-7-6	IG<27	1.6%

Fuente: Elaboración propia

- El material a nivel de subrasante del Km.0+000 al Km.20+000, es de naturaleza limosa arcillosa de alto índice de plasticidad ($IP > 10\%$) con contenido de humedad por encima de la humedad óptima y porcentajes de expansión mayor a 2%.
- El material de subrasante del Km.36+150 al Km.40+150, presenta una estratigrafía de espesores variados de material granular y material arcilloso con $IP < 10\%$ y porcentaje de expansión mayor a 2%.
- A nivel subrasante del Km.20+000 al Km.36+150 y del Km.40+150 al Km.58+769, se presentaban suelos granulares de tipo A2-4 (0) y A1-b (0) en buenas condiciones estructurales para subrasante, realizando algunos

sectores el reemplazo de material con material de transición y sin aplicar la estabilización del suelo natural.

- El material de base a lo largo del tramo de la carretera existente es de tipo A1-b(0), además, en el sector de calzada asfaltada (Km.16+040 al Km.58+769) se encontraba en buenas condiciones para ser utilizado como material de subbase.
- Las canteras para el material de relleno granular se encontraban muy alejadas del proyecto, lo cual incrementaría los costos de transporte de material.

De acuerdo a los inconvenientes indicados, se estableció para la conformación del nuevo pavimento del Km.0+000 al Km.20+000 y del Km.36+150 al Km.40+150, lo siguiente:

Estabilizar con cal, el material natural y material de relleno a nivel de subrasante del proyecto, para disminuir los cambios volumétricos hasta 0.5% y minimizar el índice de plasticidad del suelo limoso arcilloso, con el fin de evitar futuros hinchamientos y ofrecer mayor trabajabilidad durante la etapa constructiva.

Elevar el CBR hasta 60% a nivel de subrasante de la mezcla suelo-cal, con el fin de minimizar los espesor de la base y subbase, ya que las canteras se encontraban muy alejadas y el tráfico de diseño a los 10 años es elevado, alcanzando $5.29 \cdot 10^6$ ejes equivalentes de 8.2Ton.

Los estudios del suelo del Km.20+000 al Km.36+150 y del Km.40+150 al Km.58+769, muestran que la subrasante es de material granular de tipo A2-4(0) y A1-b(0), que será diseñada al 87.5% de percentil, y la base existente en este sector, sería reciclado para su uso como material de subbase. Asimismo, se evaluó que el tráfico es elevado con $13 \cdot 10^6$ ejes equivalentes de 8.2Ton.

La subrasante del Km.36+150 al Km.40+150 es granular, la cual se recicla y se utilizó como material de transición para otros sectores como material de subrasante.

1.2 Estratigrafía y formaciones sedimentarias

Las unidades lito estratigráficas expuestas en la ruta Neshuya – Pucallpa, tienen edades que van del Neógeno al Cuaternario, siendo los dos últimos sistemas de la era Cenozoica. Las formaciones geológicas que se encuentran a lo largo del tramo son: formación Ipururo, formación Ucayali y depósitos cuaternarios. La estratigrafía de estas formaciones geológicas se muestra en la tabla N°1.2:

Tabla N°1.2.- Estratigrafía de las formaciones geológicas

Era	Sistema	Serie	Unidades Lito-estratigráficas
Cenozoico	Cuaternario	Holoceno	Depósitos aluviales
		Pleistoceno	Formación Ucayali
	Neoceno	Plioceno	Formación Ipururo

Fuente: Estudio geológico del proyecto

a) Formación Ipururo

Estas rocas ocurren al inicio del tramo, desde el Km.0+000 hasta el Km.7+000. Esta capa característica, destaca en los cortes de la carretera existente, donde se pueden identificar por su coloración y por estar subyacentes a la formación Ucayali o al Cuaternario no consolidado. Se encuentran las arenas con arcillas, areniscas de grano medio, en estado muy alterado y disgregado. En circunstancias las areniscas están intercaladas con lutita y con limolita de color variado.

b) Formación Ucayali

Está localizado del Km.12+000 al Km.31+000, esta formación geológica se expone como una secuencia de arcillas arenosas, gravas con cantos rodados pequeños, y con estratificación también caótica. En algunos sectores se presencia como capas de conglomerados en forma de estratos horizontales diferenciándose con las otras unidades sobre las cuales descansan.

La coloración de los estratos varía de un lugar a otro, desde gris a marrón, inclusive marrón amarillento. También se presencia rasgos de color oscuro probablemente de materia orgánica.

c) Depósitos Cuaternarios

Los depósitos no consolidados están constituidos por los materiales de origen aluvial y fluvial, que ocurren en diferentes áreas del proyecto como consecuencia del transporte efectuado por los ríos principales y secundarios, y a la actividad de la flora y fauna. Los principales son los depósitos aluviales, ubicados en la planicie del río Ucayali, donde se extienden del Km.31+000 al Km.58+769. Esta formación ocurre con suelos limo arcilloso, que contienen diferentes porcentajes de arenas. En los cortes y en las calicatas efectuadas se encuentra como capa semiconsolidada; en la superficie, como suelos de naturaleza limo arcilloso de variada plasticidad y contenido de humedad. Estos materiales han sido transportados en suspensión y se han depositado hasta ocupar casi todas las depresiones.

1.3 Identificación de arcillas expansivas

Las arcillas expansivas se identifican aplicando métodos indirectos y directos para determinar su potencial de hinchamiento ante los cambios de humedad. En los métodos indirectos, se emplean para predecir de manera cualitativa el grado de potencial expansivo, desarrollados por diversos investigadores, quienes lo correlacionan con los límites de Atterberg, en cambio, en los métodos directos, se emplean ensayos de laboratorio, para medir el hinchamiento del suelo y la presión de expansión libre.

1.3.1 Métodos indirectos

a) Análisis mineralógico

Se determina la propiedad expansiva de las arcillas, conociendo los minerales que presenta su estructura a través de ensayos de laboratorio: difracción de rayos X, análisis térmico diferencial, análisis de absorción de colorantes, análisis químicos y análisis por microscopio electrónico. Los minerales arcillosos se clasifican en tres grupos: illita, caolinita y montmorillonita, siendo este último, el mineral altamente expansivo, esta denotada por la fórmula química: $(\text{Na}, \text{Ca})_{0.3} (\text{Al}, \text{Mg})_2 \text{Si}_4 \text{O}_{10} (\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$

b) Método de Holtz y Gibbs

Holtz y Gibbs demostraron que el grado de expansión de las arcillas se correlaciona con el límite de contracción y el índice plástico, como se indica en la tabla N°1.3:

Tabla N°1.3.- Grado del potencial expansivo según Holtz y Gibbs

Grado de Expansión	Índice Plástico		Límite de Contracción
	Regiones Áridas	Regiones Húmedas	
Bajo	0-15	0-30	>12
Moderado	15-30	30-50	10-12
Alto	>30	>50	<10

Fuente: Norma: I.N.V. E-132

c) Método de Seed, Woodward y Lundgred

Estos investigadores establecieron que el índice de plasticidad de los suelos puede utilizarse para identificar el grado de expansión de las arcillas, cuyas relaciones se muestran en la tabla N°1.4, asimismo, determinaron el potencial de hinchamiento según la fórmula:

$$S = 60 * K * IP^{2.44}$$

Donde:

- S=Potencial de hinchamiento
- IP=Índice de plasticidad
- $K=3.6 * 10^{-5}$

Tabla N°1.4.-Grado de potencial expansivo según Seed, Woodward y Lundgred

Grado de Expansión	Índice Plástico
Bajo	0-15
Medio	10-35
Alto	20-55
Muy alto	>35

Fuente: Seed, Woodward y Lundgred

La norma I.N.V. E-132 (determinación de suelos expansivos), establece por medio de las normas AASHTO, el grado de compactación correlacionado con el límite líquido y el índice de plasticidad, de acuerdo a la tabla N°1.5

Tabla N°1.5.- Grado de expansión correlacionado con el LL y el IP

Grado de Expansión	Límite Líquido	Índice Plasticidad
Elevado	>60	>35
Marginal	50-60	25-35
Débil	<50	<25

Fuente: Norma INV E-132

1.3.2 Métodos directos

a) Ensayo de expansión libre

Este ensayo está basado en la norma ASTM D-4596 donde se determina la expansión del suelo sin aplicar sobrecarga axial. El procedimiento consiste en colocar la muestra de humedad natural conocida, en el anillo del consolidómetro, agregando agua por lapsos de tiempo con el fin de no reducir la humedad.

Se verifica el valor del deformímetro por lapsos de tiempo, registrando la expansión que sufre la muestra. La prueba culmina cuando ya no hay variación del deformímetro, hasta cumplir un tiempo de 24 horas, finalmente se calcula el porcentaje de expansión volumétrica.

b) Ensayo de presión de expansión

Este ensayo está basado en la norma ASTM D-4596 donde se determina la presión de expansión del suelo al aplicar carga variable.

El procedimiento consiste en colocar la muestra en el anillo del consolidómetro con una sobrecarga determinada, luego se somete a saturación y se aplica una carga variable, de tal manera, de mantener el volumen constante. Cuando ya no se registre cambios en la lectura dial, esta carga define la presión de expansión.

1.4 La Cal

La cal se obtiene de la descomposición de las rocas calizas por el calor. Las rocas calizas se encuentran en forma de terrones conteniendo impurezas de arcilla, sílice, dolomita, etc. Las cales se distinguen por la cantidad de carbonatos de calcio y magnesio en su estructura interior. Las cales que se utilizan para los procesos de estabilización de suelos se denominan cales aéreas, que reaccionan lentamente con el dióxido de carbono de la atmósfera. Entre ellas están la cal dolomítica y la cal cálcica.

a) Cal dolomítica

Son minerales compuestos de carbonato de calcio y magnesio que se utilizan en la fabricación de materiales refractarios, industria metalúrgica y fabricación de pinturas.

Se distingue por la presencia mayor de 5% de óxido de magnesio, permitiendo una reacción muy lenta con los suelos.

b) Cal cálcica

Es una roca sedimentaria compuesta por carbonato de calcio y magnesio, Se utilizan en la industria farmacéutica, en los cultivos para aumentar el valor de PH, en las plantas de tratamiento de agua para consumo humano y la más utilizada en el tratamiento de suelos.

Se distingue por la presencia menor de 5% de óxido de magnesio. En ellas se distinguen la cal viva y la cal hidratada.

- **Cal Viva:** Se origina de la transformación del carbonato de calcio en presencia de calor para obtener el óxido de calcio.
- **Cal Hidratada:** Proviene de la hidratación controlada de la cal viva, formando hidróxido de calcio, y que al reaccionar con los suelos arcillosos otorga una matriz cementante a la estructura formada.

1.4.1 Fabricación de la cal

En el Perú, la cal es utilizada en el sector minero y en las industrias de fabricación de plásticos y pintura. El consumo principal de la cal se da en el sector minero, como neutralizador de residuos ácidos con el objetivo de mantener ambientes alcalinos en los procesos metalúrgicos; en el sector siderúrgico, como material para hacer reaccionar con las impurezas del hierro; en el sector del tratamiento de efluentes para la neutralización y potabilización del agua.

Los procesos en la fabricación de la cal consisten en una serie de etapas tecnológicas que se detalla a continuación:

La cal en su estado natural es almacenada en tolvas para ser trasladado hacia una trituradora de mandíbulas cuya función es reducir el tamaño de la roca caliza que proviene de las canteras.

Luego de la trituración se traslada por medio de fajas a las tolvas cuya función es clasificar el material según el tamaño obtenido de la trituradora. Después identificado la granulometría del material, se dirige hacia los hornos correspondientes que se encuentran a temperaturas mayores de 1000 °C, para genera la calcinación de la roca calcita y dolomita, perdiendo de esta forma el dióxido de carbono hasta obtener la cal viva. Luego esta cal viva es trasladada hacia una tolva que permite separar y clasificar el material según su tamaño.

Finalmente el material clasificado es almacenado en diferentes silos según la granulometría de la cal viva para su posterior transporte hacia los usuarios.

El otro proceso de obtener la cal hidratada, es llevar la cal viva a un hidratador, que permita regular la suficiente cantidad de agua para hidratar el óxido de calcio en libertad, obteniendo gran cantidad de calor formándose el hidróxido de calcio en polvo. Al final se realiza un proceso granulométrico para separar las impurezas y obtener así una buena calidad de cal hidratada.

Las principales empresas que explotan los grandes yacimientos de caliza en el Perú son: Cementos Pacasmayo S.A.A (Cajamarca), UNACEM S.A (Lima y Junín) y Yura S.A (Arequipa y Puno). Existen otras empresas proveedoras de cal en el Perú, entre ellas tenemos:

- Cal de los Andes SA(Lima)
- Compañía Minera Bunyac S.A.C(Junín)
- Calcáreos del Sur(Puno)
- Molinos Calcáreos Alpamayo E.I.R.L

En la ejecución de la estabilización del suelo-cal, el proveedor de la cal viva es la empresa MINERA MANCOS S.A.C, cuya planta de procesamiento se encuentra en Lima. El transporte hacia el lugar del proyecto es por medio de camiones que transportan la cal viva en bolsas de 50Kg de capacidad.

1.4.2 Requerimientos de la cal para la estabilización de suelos

El tipo de cal empleada a la estabilización de los suelos arcillosos debe de cumplir con los requisitos que se estipulan en la normas AASTHO M-216 y ASTM C-977. Los requerimientos químicos y físicos que establecen estas normas se indican en la tabla N°1.6.

Tabla N°1.6.-Requerimientos químicos y físicos de la cal

Propiedades Químicas	Contenido total de óxido (CaO+MgO)	Mínimo 90%
	Dióxido de carbono	Máximo 5%
	Porcentaje de humedad libre	Máximo 5%
Propiedades Físicas	% Retenido en el tamiz N°30	Máximo 3%
	% Retenido en el tamiz N°200	Máximo 14%

Fuente: Norma ASTM C-977

El uso de la cal viva dentro de sus propiedades se requiere del conocimiento de la reactividad en el agua, es decir, la velocidad de la reacción de hidratación, para ello, se evalúa midiendo el tiempo hasta lograr alcanzar una temperatura de 60°C al agitar una mezcla de cal viva con agua (figura N°1.2), detallando que el tiempo debe ser como máximo 25 minutos. Mientras menor es el tiempo para alcanzar la temperatura indicada, mayor es la reactividad de la cal, por lo tanto,

los cambios de las propiedades del suelo será más rápido ante una cal hidratada o apagada.

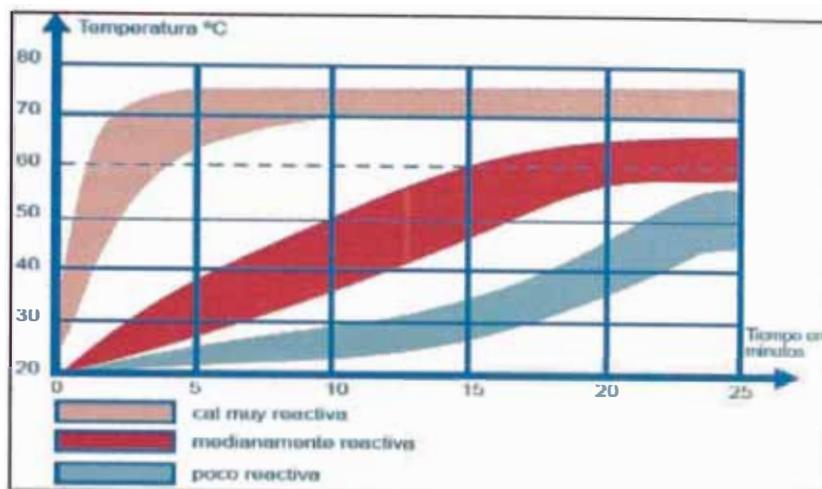


Figura N°1.2.- Reactividad de la cal viva en el agua

1.4.3 Reacciones a corto plazo entre el suelo arcilloso y la cal

Permiten inmediatamente el cambio de las propiedades físicas del suelo arcilloso, ocurriendo en todos los tipos de materiales arcillosos, sin tomar en cuenta su mineralogía. En esta etapa aparecen los siguientes procesos:

a) Intercambio Catiónico

La arcilla tiene una estructura laminar con superficies cargadas negativas que atraen a los cationes libres y dipolos de agua. La arcilla al interactuar con los dipolos del agua y los cationes libres se genera una membrana entre las capas laminares de la arcilla denominada capa doble, permitiendo que las partículas de la arcilla se separen e influyendo su inestabilidad ante los continuos aumentos de humedad, con ello se basa la expansión de las arcillas.

La cal al interactuar con la arcilla en el medio acuoso, los cationes de calcio (Ca^{+2}) proveniente de la cal, por poseer mayor carga sustituyen a los cationes de menor carga (Na^{+1} , K^{+1} , Mg^{+1} , etc.) que formaban la capa doble, a este proceso se denomina intercambio catiónico, generando la reducción de la capa doble, siendo así más estable a los cambios de humedad.

b) Modificación de la textura y consistencia

Al realizarse el intercambio catiónico se genera un desorden de las partículas de las arcillas con la presencia de la cal, que estaban ordenadas inicialmente en la capa doble, que hasta finalmente se ordenan con mayores fuerzas de atracción eléctrica reduciendo la capa doble, ocasionando que las partículas del material plástico se aglomeran formando otras de mayor tamaño, modificando de esta manera la textura y consistencia de la arcilla.

1.4.4 Reacciones a largo plazo entre el suelo arcilloso y la cal

Permite de manera lenta la magnitud del cambio de las propiedades mecánicas del suelo arcilloso, y va a depender en la estructura de la arcilla la cantidad de minerales de sílice, alúmina, etc, para reaccionar con la cal.

a) Reacción Puzolánica

Las arcillas presentan en su estructura cantidades de sílice y alúmina, que le da la posibilidad de ser un material puzolánico en presencia de valores altos de PH, donde la norma ASTM C-977 establece un valor 12.4 de PH en el cual se genera la solubilidad de los materiales cementantes en el suelo arcilloso.

La cal como aditivo de incrementar los valores de PH, al reaccionar con la sílice y la alúmina de las arcillas generan silicatos y aluminatos, los cuales son materiales cementantes en aportar resistencia a la compresión del suelo, para ello, se realiza el ensayo de compresión no confinada, donde se debe de cumplir con los requisitos de la tabla N°1.7.

Tabla N°1.7: Resistencia mínima de la compresión no confinada a los 28 días

Capa de suelo estabilizada	Pavimento Flexible (psi)	Pavimento Rígido (psi)
Base	750	500
Sub base	250	200

Fuente: Soil Stabilization for Roads and Airfields FM 5-410. Department of the Army, the Navy and the Air Force. Army TM 5-822-14.

Cabe indicar que estas reacciones tienen un proceso lento, requiriendo que se mantenga las condiciones adecuadas de humedad y temperatura, es decir, de una etapa de curado.

No todas las arcillas tienen el mismo efecto, ya que depende de la cantidad de minerales que poseen en su estructura para dar una disolución completa con la cal para aumentar su resistencia, es decir, el aumento de la resistencia depende de la mineralogía de las arcillas.

b) Carbonatación de la Cal

Este proceso puede ser de medio a largo plazo y no está asociado a la interacción del suelo con la cal, más bien, con la presencia del dióxido de carbono de la atmósfera reacciona con la cal, reduciendo la reactividad de la arcilla, reducción de la resistencia y poca disminución del índice de plasticidad alterando los valores que se había alcanzado en el diseño de su dosificación, dado a ello el proceso de mezclado no debe de ser lento con el fin de evitar la producción de carbonatos.

CAPÍTULO II

ESTABILIZACIÓN DE SUELOS EN PAVIMENTOS

2.1 Proceso en la determinación del agente estabilizador

Se establece una serie de actividades de gabinete y campo para dar a conocer la situación del terreno que se requiere mejorar con la aplicación del estabilizador químico, de tal manera que sea el más eficiente para el tipo de suelo a tratar, teniendo en cuenta la influencia del costo del proyecto. Entre las actividades que se siguen son:

2.1.1 Exploración en campo

Consiste en realizar el recorrido a lo largo de la vía del proyecto donde se realiza una serie de etapas tecnológicas para el estudio del proyecto como se indica a continuación:

- a) Estudio de gabinete, con el fin de realizar la recopilación de información del lugar como: mapas, ubicación de viviendas cercanas al proyecto, situación ambiental de la zona.
- b) Reconocimiento del lugar por geólogos, topógrafos, ingenieros de geotecnia e hidrólogos.
- c) Exploración detallada del sitio y muestro, donde se realiza la investigación de la geología en detalle y la estratigrafía del suelo a través de calicatas, ensayos de penetración, ensayos no destructivos, entre otros.
- d) Pruebas de laboratorio y reporte de los resultados de las muestras obtenidas durante la exploración en campo.

A lo largo del eje de la carretera se realizaron calicatas cada 500m de 1.50m de profundidad para conocer la estratigrafía del lugar y las propiedades físicas y mecánicas del suelo de cada estrato. Se observó la presencia de estratos de diferentes materiales que conforman el pavimento existente, predominado los suelos de tipo limoso arcilloso a lo largo del tramo, elaborándose el registro fotográfico por sectores en la figura N°2.1.

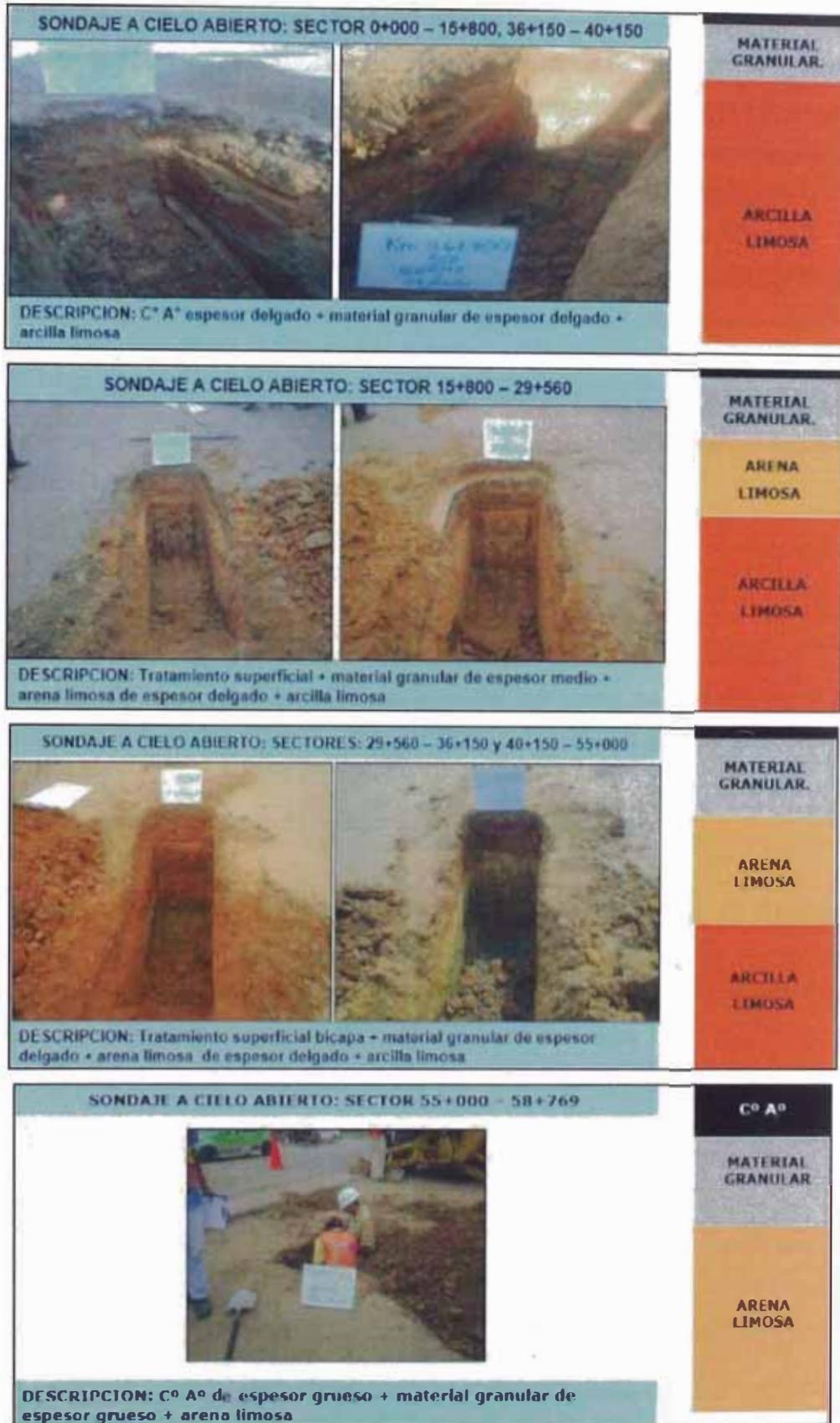


Figura N°2.1.-Panel fotografico de los estatigrafia del terreno

La capa de rodadura existente del Km.0+000 al Km.16+040 es material afirmado, encontrándose deteriorado, por la fatiga estructural y alta permeabilidad, ocasionando la disminución de la capacidad de soporte de los suelos limosos arcillosos que se encuentran a nivel subrasante durante la etapa de lluvias. El sistema de drenaje superficial es inadecuado a las condiciones climáticas.

La capa de rodadura existente del Km.16+040 al Km.40+200 está construida con un tratamiento bicapa; y del Km.40+200 al Km.58+769 es una carpeta asfáltica, cuyos espesores varían entre 0.05 y 0.10cm, encontrándose deteriorado por la fatiga estructural del pavimento, presentando fisuras, huecos y piel de cocodrilo, además el sistema de drenaje superficial es inadecuado a las condiciones climáticas del lugar.

2.1.2 Sectorización del tramo

La sectorización del tramo se realiza en base al tráfico de diseño y a la capacidad de soporte a nivel subrasante del proyecto, con el fin de poder establecer los materiales y espesores de las capas estructurales del pavimento.

a) Sectorización en base al tráfico de diseño

La sectorización en función al volumen de tráfico en el periodo de diseño es necesario, ya que en algunos sectores del tramo se cruzan con otras redes nacionales permitiendo el incremento del volumen de tráfico, en consecuencia, la variación del espesor de las capas superiores del pavimento.

En la tabla N°2.1, muestra las secciones homogéneas en base al número de ejes equivalentes acumulados de 8.2Ton en el periodo de diseño de 10 años, detallando que en el sector poblado de Pucallpa (Km.55+000 al Km.58+769) presenta el volumen de tráfico más elevado.

Tabla N°2.1.-Numero de ejes equivalentes acumulados en e periodo de diseño

Sector	"N" para 10 años
Km.0+000 al Km.18+000	$3.67 \cdot 10^6$
Km.18+000 al Km.55+000	$5.29 \cdot 10^6$
Km.55+000 al Km.58+769	$1.3 \cdot 10^7$

Fuente: Estudio de suelos y pavimentos del proyecto

b) Sectorización en base al CBR de la subrasante

El suelo de la subrasante no es homogéneo presentando suelos de diferentes granulometrías indicado en la tabla N°2.2: arena limosa, arcilla limosa con limos inorgánicos, arcilla limosa con limos orgánicos y grava limosa.

Tabla N°2.2.-Clasificación de suelos a nivel subrasante

Prog.	1 ½"	1"	¾"	3/8"	#4	#10	#40	#200	LL	LP	IP	AASHTO
0+200	100	100	100	100	100	96.6	92.4	61.0	25.3	19	6.3	A4 (2)
1+160	100	100	100	100	99.3	99.1	97.0	54.8	29.9	15.2	14.7	A6 (5)
5+900	100	100	100	100	100	98.3	85.5	38.3	21.2	16.3	4.9	A4 (0)
7+400	100	100	100	100	100	99.8	99.6	67.0	34.2	21.2	13.0	A6 (7)
12+200	100	100	100	100	100	99.4	97.7	78.8	49.8	24.9	24.9	A-7-6 (20)
12+680	100	100	100	100	100	98.2	93.9	84.0	32.3	21.3	11.0	A6 (9)
15+200	100	100	100	100	100	99.9	98.8	81.4	42.7	21.5	21.2	A-7-6 (17)
21+400	100	100	100	100	100	99.6	92.0	59.5	23.2	12.4	10.8	A6 (3)
24+710	100	100	100	100	100	99.4	89.9	31.0	21.0	13.9	7.1	A-2-4 (0)
28+200	100	100	100	100	100	99.7	91.2	45.6	30.3	15.7	14.6	A6 (13)
38+600	100	100	100	100	100	100	99.3	75.0	26.5	14.6	11.9	A6 (6)
58+370	92.8	79.9	66.8	53.2	45.9	36.9	15.0	3.0	14.9	11.5	3.4	A-1-b (0)

Fuente: Ensayos de laboratorio de suelos

La determinación de las secciones homogéneas del terreno natural a nivel subrasante, se realiza en base al CBR de diseño al 87.5% de percentil ($N > 10^6$) y del perfil estratigráfico de la carretera (anexo "A"), considerando su coeficiente de correlación entre los valores de CBR para cada sección homogénea (tabla N°2.3).

Tabla N°2.3.-Secciones homogéneas en base al CBR de diseño

Sección Homogénea	Promedio	Desviación estándar	Coficiente de correlación	CBR de diseño percentil 87.5%
Km.0+000 al Km.18+000	12.29	4.73	38.52	7.2%
Km.18+000 al Km.20+000	20.00	7.00	35.00	20.0%
Km.20+000 al Km.27+005	16.00	2.55	15.93	13.7%
Km.27+005 al Km.36+150	45.8	19.28	42.09	24.2%
Km.36+150 al Km.40+150	9.8	1.91	19.47	8.5%
Km.40+150 al Km.55+000	46.15	10.82	23.44	36.2%
Km.55+000 al Km.58+769	31.36	11.36	36.24	23.0%

Fuente: Elaboración propia

Como se había indicado anteriormente en el capítulo 1, el CBR de diseño de la mezcla suelo cal es 60% para los suelos estabilizados, el cual se aplica para los sectores del Km.0+000 al Km.20+000 y del Km.36+150 al Km.40+150.

Cabe indicar que en el sector Km.18+000 al Km.20+000, la subrasante es adecuada, pero cuenta con materiales expansivos mayor a 0.5% (ver anexo A), siendo el máximo porcentaje de expansión especificado en las especificaciones de proyecto. Por lo tanto, el material será reemplazado por material de cantera estabilizada.

Las demás secciones homogéneas se diseñan de acuerdo a los resultados obtenidos al 87.5% percentil, donde presenta subrasante buena por la presencia de materiales granulares. También las secciones presentan coeficientes de correlación adecuada, lo que permite una homogenización razonable en cada sección.

2.1.3 Elección del agente estabilizador

La norma AASHTO, MTC y CE-020, establece los requerimientos que deben cumplir los suelos para ser estabilizados con cal (tabla N°2.4), que generalmente corresponden a aquellos que tienen valores altos de índice de plasticidad y baja capacidad de soporte como son las arcillas limosas y arcillas arenosas.

Tabla N°2.4.-Requerimientos de suelos para estabilizar con cal

%pasa el tamiz de 3" (75mm)	100%
%pasa el tamiz N°200 (75um)	Min. 30%
Índice de plasticidad	Min. 10%
Materia orgánica	Max 3% en peso
Contenido de sulfatos	Max. 0.2%

Fuente: Norma AASHTO, MTC y CE-020

El uso de la estabilización del suelo depende de las exigencias de las especificaciones técnicas del proyecto, donde el ingeniero geotécnico por medio del reporte de los ensayos de suelos y la disponibilidad del material en las canteras, va a tomar la decisión de usar la estabilización química, sustitución con material de préstamo o combinación de materiales de las canteras, para lograr

las especificaciones de los materiales de capa del pavimento a un costo razonable.

La distribución granulométrica de los materiales a nivel subrasante indicados en la tabla N°2.2, muestra que todos los suelos de granulometría fina cumplen con los requerimientos mínimos de la tabla N°2.4, a excepción del suelo gravoso arenoso, debido a que su granulometría es gruesa, por lo tanto, la elección del estabilizador es la cal.

En el sector del Km.0+000 al Km.20+000 y del Km.36+150 al Km.40+150 (ver anexo A) existen suelos de tipo A2-4(0) y A1-b(0) con espesores variados a nivel de subrasante, los cuales no son adecuados para ser estabilizados, dado a ello, se reciclo estos materiales y se reemplazó con material de préstamo.

El proyecto contemplo tres canteras para la explotación de material para subrasante (tabla N°2.5), donde cumplen los requerimientos de la tabla N°2.4.

Tabla N°2.5.- Granulometría de las canteras para estabilización con cal

CANTERA	ANALISIS GRANULOMETRICO				LIMITES DE ATTEMBERG			TIPO DE SUELO	
	N° 04	N° 10	N° 40	N° 200	L.L.	L.P.	I.P.	SUCS	AASHTO
Km.2+600	100	94.0	99.7	78.0	41.8	27.5	14.3	CL	A-7-6 (12)
Km.20+100	100	100.0	98.7	63.0	41.9	21.2	20.7	CL	A-7-6 (11)
Km.38+470	100	99.8	90.1	50	44.6	23.4	21.2	CL	A-7-6 (7)

Fuente: Ensayos de laboratorio de suelos

2.1.4 Verificación de las condiciones climáticas de la zona

El conocimiento de las condiciones climáticas del lugar del proyecto es necesario para determinar su influencia en el corto y largo plazo de las propiedades mejoradas del suelo estabilizado con el agente estabilizador preliminar seleccionado, en cada una de las capas del pavimento que se está diseñando.

Es en esta etapa donde se decide si el agente estabilizador es uno de los adecuados para lograr la vida útil del pavimento, con el fin de evitar la presencia de fisuras prematuras que permite el aumento de los costos de mantenimiento vial.

a) Temperatura en el lugar del proyecto

La estabilización con cal es recomendable en una temperatura ambiente a la sombra entre 35°C y 5°C. En altas temperaturas, los granos de la cal se pueden convertir en grumos, mientras en bajas temperaturas, existe la presencia de heladas que dificulta la reactividad de la cal, en consecuencia, baja variación de las propiedades físicas y mecánicas del suelo.

De acuerdo, a los resultados de las estaciones de Aguaytia, San Alejandro y Pucallpa indicado en la tabla N°2.6, resulta que durante el año, la temperatura media es casi uniforme entre 25°C y 26°C, sin embargo, los valores máximos y mínimos diarios pueden alcanzar los 35°C y los 16°C respectivamente, por lo tanto, la cal se puede utilizar en el lugar del proyecto, además, la humedad relativa promedio es del orden de 84%.

Tabla N°2.6.-Registro de temperaturas media mensuales

Fuente: SENAMHI

b) Precipitaciones en el lugar del proyecto

Las precipitaciones son importantes en toda la zona del recorrido, ya que varían anualmente entre los 4000mm en Aguaytia y de 1600mm en Pucallpa. El registro de las precipitaciones mensuales de las estaciones Aguaytia y Pucallpa (tabla N°2.7 y N°2.8) y los histogramas de ambas estaciones (figuras N°2.2 y N°2.3), indican que en Aguaytia, los meses de mayor precipitación es de noviembre a marzo, alcanzando el valor más alto en enero (587.1mm); en Pucallpa, los meses de mayor precipitación es de octubre a abril, alcanzando el valor más alto en marzo (228.1 mm). Los resultados de las precipitaciones indican que siempre hay precipitaciones en todos los meses del año, incluso en el mes de julio a agosto la precipitación es moderada, por lo que no habrá problemas por contracción en los suelos arcillosos.

c) Drenaje de las aguas subterráneas

El drenaje de las aguas subterráneas afecta en pequeños sectores de la carretera con eventuales infiltraciones o escurrimientos de aguas en el subsuelo, dado a ello, se construye subdrenes, ubicados al pie de talud y a 1.0m de las cunetas, con el fin de no deteriorar la calzada cuando se requiera realizar mantenimientos y mantener constante la humedad sin generar efectos a la capa estabilizada.

d) Drenaje de la calzada

El drenaje superficial es realizado por medio de cunetas revestidas de concreto y de alcantarillas a lo largo del proyecto, para captar las aguas de las lluvias que provienen de la calzada que presenta 3.0% de bombeo.

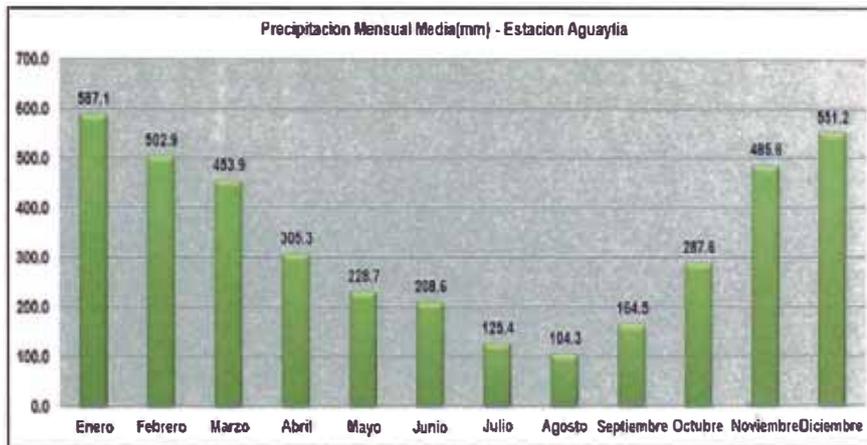


Figura N°2.2: Histograma de la precipitación media mensual de la estación Aguaytía

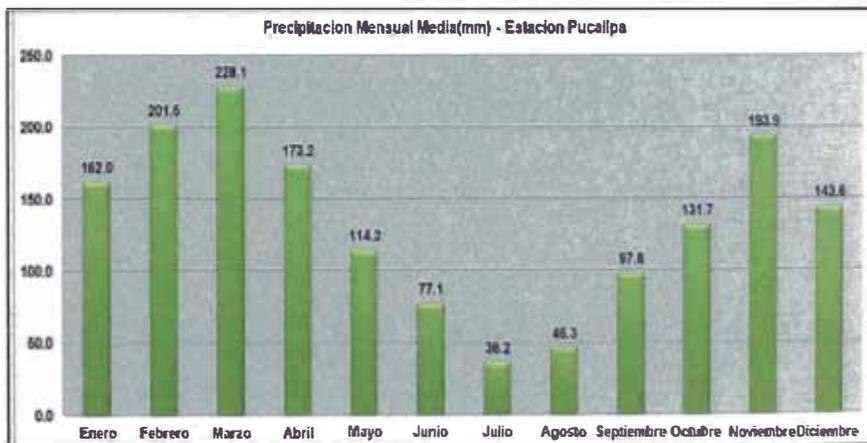


Figura N°2.3: Histograma de la precipitación media mensual de la estación Pucallpa

Tabla N°2.7.- Precipitaciones mensuales de la estación pluviométrica Aguaytia

Año	MESES - INTENSIDAD DE PRECIPITACION EN MM												TOTAL ANUAL
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	
1978	273.0	87.0	288.4	82.0	269.0	156.0	215.0	123.4	35.0	67.8	127.3	215.9	1939.8
1983	877.6	308.0	622.5	170.0	259.5	127.1	260.3	94.2	111.8	203.7	134.8	281.2	3450.7
1984	793.8	665.4	391.0	596.5	222.4	489.4	150.7	104.3	133.7	171.1	555.0	770.5	5043.8
1985	806.6	491.8	430.9	439.3	247.2	157.0	99.7	140.5	160.3	484.1	524.5	731.7	4713.6
1986	363.1	712.6	397.6	459.1	218.6	120.0	139.6	139.3	353.3	340.1	631.2	420.4	4294.9
1987	926.4	375.6	234.9	262.6	216.3	59.2	46.5	10.4	92.6	124.9	282.3	252.3	2884.0
1988	182.8	46.4	255.7	26.7	30.7	77.5	32.3	13.9	30.7	108.0	262.6	602.5	1669.8
1989	204.4	160.9	164.3	127.3	181.0	74.4	62.4	78.4	51.8	511.4	527.2	497.0	2640.5
1990	523.2	524.0	388.1	288.6	50.9	50.4	18.3	62.2	15.9	517.7	556.5	740.8	3736.6
1991	602.3	541.0	326.4	299.1	109.8	91.3	195.2	107.0	232.0	273.1	248.7	490.5	3516.4
1992	554.9	672.8	562.8	650.2	323.0	243.6	128.6	18.1	173.1	225.4	747.1	952.0	5251.6
1993	361.1	597.4	446.0	60.8	108.5	312.5	56.9	230.7	244.7	450.8	519.8	597.6	3986.8
1994	559.2	486.6	373.5	349.1	210.6	252.7	180.0	1.1	358.8	288.0	729.4	724.6	4513.6
1995	623.4	802.7	542.9	358.6	337.7	261.0	109.6	127.3	163.8	293.0	425.6	288.6	4334.2
1996	960.1	764.4	626.5	441.9	386.1	212.8	44.6	144.5	178.6	310.6	428.5	963.0	5461.6
1997	602.1	803.9	636.9	572.4	175.8	310.2	107.5	169.6	213.5	370.1	503.0	535.8	5000.8
1998	619.8	667.0	554.5	329.6	326.1	80.2	34.0	205.9	217.0	176.5	1079.8	645.4	4935.8
1999	781.6	351.8	750.3	203.5	428.0	418.6	158.5	38.3	227.6	253.8	477.9	456.2	4546.1
2000	539.3	495.3	631.0	84.1	243.9	470.0	342.3	172.2	131.7	293.4	465.4	307.6	4176.2
TOTAL	11154.7	9554.6	8624.2	5801.4	4345.1	3963.9	2382.0	1981.3	3125.9	5463.5	9226.6	10473.6	76096.8
MEDIA	587.1	502.9	453.9	305.3	228.7	208.6	125.4	104.3	164.5	287.6	485.6	551.2	4005.1

Fuente: SENAMHI

Tabla N°2.8.- Precipitaciones mensuales de la estación pluviométrica Pucallpa

Año	MESES - INTENSIDAD DE PRECIPITACION EN MM												TOTAL ANUAL
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	
1981	235.3	152.3	157.6	226.3	295.1	64.0	22.3	26.5	45.6	191.4	103.9	219.0	1739.3
1982	243.8	228.9	311.9	214.2	55.5	193.4	7.0	89.7	189.5	117.4	204.0	293.0	2148.3
1983	76.3	59.0	219.6	125.0	191.7	103.8	18.0	51.0	85.7	68.1	326.0	162.2	1486.4
1984	327.3	301.0	134.5	95.0	54.2	96.5	45.0	46.0	87.5	198.7	390.5	128.0	1904.2
1985	123.0	230.0	52.3	62.3	46.0	31.0	64.0	18.0	111.7	215.0	215.6	170.0	1338.9
1986	152.6	327.5	405.2	135.0	158.0	23.0	4.5	47.6	39.0	232.7	320.0	81.5	1926.6
1987	114.3	133.0	82.9	382.8	60.0	138.4	70.8	58.2	79.6	141.7	165.0	56.6	1483.3
1988	56.1	129.5	184.0	96.3	101.1	75.4	19.0	28.4	41.7	111.9	146.0	153.5	1142.9
1989	139.7	217.0	164.5	11.0	116.0	215.8	59.2	48.6	25.9	118.0	106.3	79.0	1301.0
1990	122.1	110.7	246.7	172.0	63.0	65.0	41.3	53.0	179.6	52.0	0.0	0.0	1105.4
1991	23.1	140.4	236.2	96.3	97.8	0.0	0.0	0.0	0.0	46.5	172.5	102.0	914.8
1992	112.0	143.6	173.5	56.0	48.2	35.0	27.0	67.0	187.0	124.0	230.0	113.0	1316.3
1993	242.0	177.0	253.0	199.0	30.0	64.0	112.0	56.5	73.0	140.0	254.0	110.0	1710.5
1994	228.4	63.6	273.8	196.8	85.6	89.6	9.7	0.0	48.8	254.6	180.6	229.3	1660.8
1995	40.0	119.2	230.6	190.8	66.4	104.4	42.7	54.1	62.6	183.4	126.7	179.5	1400.4
1996	299.7	502.0	303.2	144.6	104.4	59.8	37.2	104.1	124.2	128.5	208.1	156.0	2171.8
1997	167.1	238.2	438.5	185.9	105.5	0.0	0.0	50.7	90.2	0.0	136.8	60.5	1473.4
1998	28.2	120.1	222.0	285.9	162.5	44.6	19.3	34.1	199.1	140.8	209.8	178.6	1645.0
1999	409.0	302.0	253.1	251.2	346.9	45.2	31.7	45.2	216.3	68.9	196.6	240.3	2406.4
2000	99.7	334.2	219.2	337.5	95.5	92.6	92.4	46.7	69.0	100.4	185.2	160.7	1833.1
TOTAL	3239.7	4029.2	4562.3	3463.9	2283.4	1541.5	723.1	925.4	1956.0	2634.0	3877.6	2872.7	32108.8
MEDIA	162.0	201.5	228.1	173.2	114.2	77.1	36.2	46.3	97.8	131.7	193.9	143.6	1605.4

Fuente: SENAMHI

2.1.5 Comparación de costos del agente estabilizador

El suelo natural puede ser estabilizado con diversos agentes estabilizadores, que depende del tipo del suelo existente y ser capaz de soportar las condiciones atmosféricas de su entorno.

Luego de tomar las alternativas de los tipos de agentes estabilizadores, se busca si existe la disponibilidad del equipo y del personal adecuado para cada tipo de estabilizador durante el proceso constructivo del pavimento. Dado a ello se reduce las alternativas y se decide la más ventajosa para lograr una buena calidad en el proceso constructivo, con resultados de costos razonables.

2.2 Efectos de la cal en los suelos arcillosos

En el proceso de la reacción entre el suelo y la cal se genera el intercambio catiónico entre los cationes de calcio y los de menor carga ubicados en la superficie de la arcilla, la reducción de la capa doble y la aparición de productos cementantes por las reacciones entre la cal y los minerales contenidos en la arcilla como el sílice y la alúmina.

La magnitud de los cambios de la estructura molecular de la arcilla según la cantidad de cal empleada, ocasionan las modificaciones en las propiedades físicas y mecánicas.

En el anexo B, se muestra los resultados de los ensayos de laboratorio del material del suelo-cal para la plataforma existente y canteras.

Los efectos en las propiedades físicas y mecánicas del suelo natural son:

a) Modificación de la granulometría

Este mecanismo se debe a la floculación de las partículas finas que se originan por el intercambio iónico en la superficie de la arcilla. Los suelos más notables que cambian su granulometría por la acción de la cal son los que presentan alto

contenido de finos y valores altos de índice de plasticidad, en comparación a los suelos de estructura arenosa.

b) Variaciones en la permeabilidad

La modificación de los tamaños de las partículas por otras más grandes (cationes de calcio) y la disminución de las fuerzas eléctricas durante el intercambio iónico, generan mayores vacíos en el suelo arcilloso aumentando la permeabilidad.

Durante la reacción puzolanica entre el suelo y la cal permite poco a poco que las fuerzas entre las partículas sean más intensas, reduciendo la separación entre sus partículas, como consecuencia disminuye la permeabilidad que puede alcanzar valores más bajos que del suelo natural la cual depende de la estructura mineralógica de la arcilla.

c) Reducción del índice de plasticidad

Se presenta la variación de los límites de Atterberg, del límite plástico y límite líquido. La cal permite elevar el límite plástico en mayor proporción que el límite líquido del suelo arcilloso, permitiendo que la diferencia aritmética de estos valores, conocido como índice de plasticidad, logre la reducción de su valor.

La variación del índice de plasticidad se aplica a toda clase de arcillas con diferente mineralogía. En su dosificación, mientras mayor cantidad de cal presente la mezcla, mayor será la reducción del índice de plasticidad hasta un cierto valor, sin embargo, a pesar que se continúe añadiendo cal, el suelo puede aumentar su valor de IP.

En la figura N°2.4 y tabla N°2.9, se muestra la variación del índice de plasticidad para cada tipo del suelo de la subrasante ante diferentes contenidos de porcentaje de cal sometido a tres días de curado y cuatro días de inmersión, donde los suelos A6 y A7-6 son los que presentan mayor variación del índice de plasticidad, además el IP del suelo A-7-6(20) no disminuye considerablemente, a

causa de la presencia de materia orgánica que altera la reacción entre el suelo y la cal.

Cabe indicar a mayores dosificaciones de cal, el suelo-cal vuelve a aumentar su índice de plasticidad.

Tabla N°2.9.- Índice de plasticidad de las muestras del suelo-cal

Procedencia del material	Prog.	% Pasa N°200	Tipo de suelo (AASHTO)	Porcentaje de cal en peso seco de la muestra			
				0%	2%	4%	6%
Plataforma existente	0+200	61.0	A-4 (2)	6.3	5.8	6.0	6.7
Plataforma existente	1+160	54.8	A-6 (5)	14.7	10.4	10.5	12.0
Plataforma existente	38+600	75.0	A-6 (6)	11.9	-	4.1	3.5
Plataforma existente	7+400	67.0	A-6 (7)	13.0	-	8.3	7.6
Plataforma existente	12+680	84.0	A-6 (9)	11.0	9.8	10.7	11.9
Plataforma existente	28+200	45.6	A-6 (13)	14.6	-	7.0	8.0
Plataforma existente	15+200	81.4	A-7-6 (17)	21.2	9.1	8.9	8.7
Plataforma existente	12+200	78.8	A-7-6 (20)	24.9	24.3	24.4	26.7
Cantera	2+600	78.0	A-7-6 (12)	14.3	11.3	11.9	12.0
Cantera	20+100	63.0	A-7-6 (11)	20.7	14.9	10.5	9.9
Cantera	38+470	50.0	A-7-6 (7)	21.2	-	8.4	9.3

Fuente: Ensayos de laboratorio de suelos

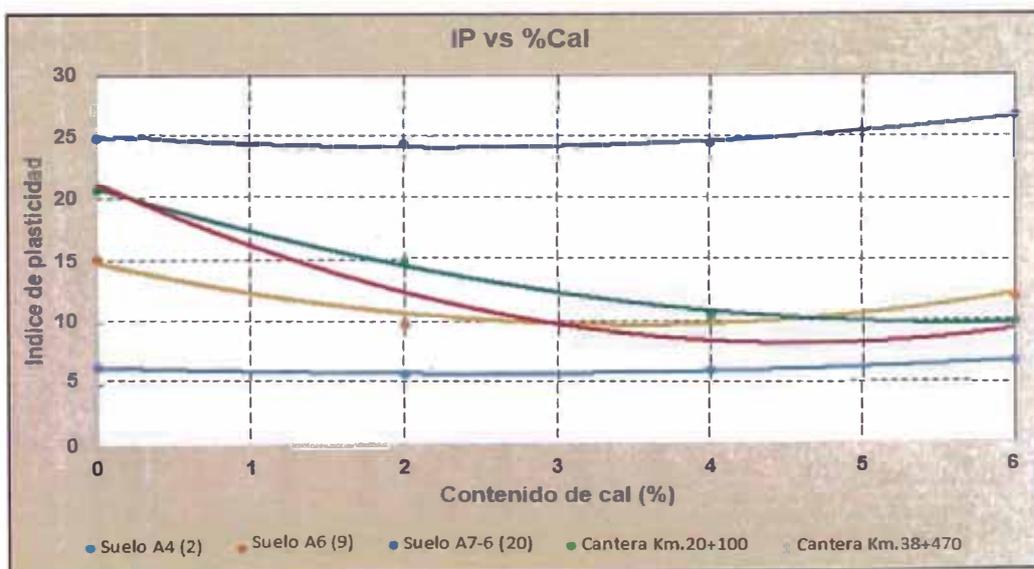


Figura N°2.4.-Variación del IP en la mezcla suelo-cal

d) Reducción de los cambios volumétricos

La reducción de la capa doble y del agua retenida entre las partículas de las arcillas, genera la disminución de la susceptibilidad del suelo tratado ante la humedad, es decir, permite a un corto plazo la reducción del riesgo a los cambios volumétricos de contracción y expansión, donde a este nivel se fija una humedad estable del suelo ante cualquier agente externo.

Para analizar el grado de expansión de las arcillas expansivas, se recurre a la tabla N°1.4, y los resultados del límite plástico e índice de plasticidad de las muestras ensayadas a lo largo de la carretera, indicados en el anexo "A". Con los resultados de laboratorio se elabora la distribución estadística de los valores del límite líquido y del índice plástico de todas las muestras ensayadas. La cantidad se expresa en porcentajes relativos para cada intervalo de valores del LL e IP, indicado en la figura N°2.5.

Los resultados de la figura N°2.5, demuestra que el 100% de los valores del límite líquido son menores a 50%, por lo tanto, según la tablas N°1.3 y N°1.5, corresponde a un grado de expansión débil. Además, el 98.7% de los valores del índice de plasticidad son menores a 25%, correspondiendo a un grado de expansión débil. Esta expansión débil va a ser disminuida o eliminada con la aplicación de la cal en el suelo expansivo ofreciendo la estabilidad volumétrica del suelo.

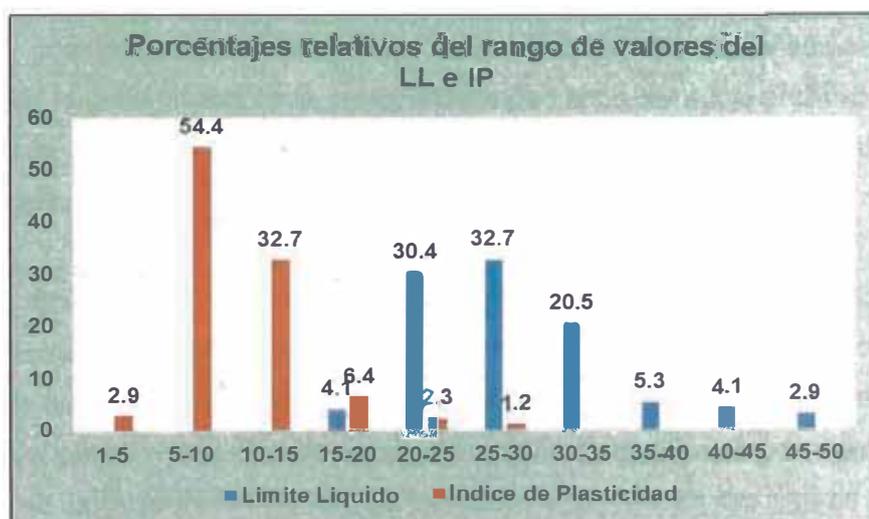


Figura N°2.5.-Distribución estadística de los valores del LL e IP

En la tabla N°2.10, se muestra los valores de los porcentajes de expansión que se obtiene del ensayo CBR para cada tipo de suelo ante la acción de la cal, observándose que con una dosificación de 2% de cal se elimina los cambios volumétricos.

Tabla N°2.10.-Porcentaje de expansión de las muestras suelo cal

Procedencia del material	Prog.	% Pasa N°200	Tipo de Suelo (AASHTO)	Suelo natural	Suelo-cal 2%	Suelo-cal 4%	Suelo-cal 6%
Plataforma existente	0+200	61.0	A-4 (2)	0.9%	0%	0%	0%
Plataforma existente	1+160	54.8	A-6 (5)	1.6%	0%	0%	0%
Plataforma existente	38+600	75.0	A-6 (6)	0.9%	-	0%	0%
Plataforma existente	7+400	67.0	A-6 (7)	1.5%	-	0%	0%
Plataforma existente	12+680	84.0	A-6 (9)	2.5%	0%	0%	0%
Plataforma existente	28+200	45.6	A-6 (13)	5.3%	0%	0%	0%
Plataforma existente	15+200	81.4	A-7-6 (17)	5.8%	0%	0%	0%
Plataforma existente	12+200	78.8	A-7-6 (20)	4.5%	0%	0%	0%
Cantera	2+600	78.0	A-7-6 (12)	5.4%	0%	0%	0%
Cantera	20+100	63.0	A-7-6 (11)	7.8%	0%	0%	0%
Cantera	38+470	50.0	A-7-6 (7)	4.8%	-	0%	0%

Fuente: Ensayos de laboratorio de suelos

e) Modificación en la compactación

La aplicación de la cal modifica las partículas de las arcillas por otras de mayor fracción ocasionando variaciones en las características de la compactación, siendo así la disminución de la máxima densidad seca del suelo arcilloso, debido a que sus partículas logran distribuirse a una energía de compactación de manera eficiente.

La segunda modificación en la compactación es el contenido de humedad óptima donde aumenta su valor con respecto al inicial para lograr la máxima densidad seca que tiene el suelo arcilloso tratado. Los resultados de la máxima densidad seca y del óptimo contenido de humedad para cada dosificación de suelo-cal se indican en la tabla N°2.11 y su representación gráfica en las figuras N°2.6 y N°2.7.

Tabla N°2.11.-Resultados de la MDS y OCH del suelo-cal

Procedencia del material	Prog.	%Pasa N°200	Tipo de Suelo (AASHTO)	Porcentaje de cal en peso seco					Tipo de Ensayo
				0%	2%	4%	6%	8%	
Plataforma existente	0+200	61.0	A-4 (2)	1.987	1.993	1.970	1.958	-	MDS
				10.8	11.6	13.0	11.2	-	OCH
Plataforma existente	1+160	54.8	A-6 (5)	2.060	2.016	2.017	2.016	-	MDS
				7.2	8.35	9.19	9.04	-	OCH
Plataforma existente	38+600	75.0	A-6 (6)	1.992	-	1.975	1.928	-	MDS
				15.3	-	10.2	11.02	-	OCH
Plataforma existente	7+400	67.0	A-6 (7)	2.067	-	1.888	1.86	-	MDS
				8.9	-	12.3	12.2	-	OCH
Plataforma existente	12+680	84.0	A-6 (9)	1.946	1.923	1.859	1.916	-	MDS
				13.0	13.2	12.4	11.9	-	OCH
Plataforma existente	28+200	45.6	A-6 (13)	1.950	-	1.948	1.944	1.89	MDS
				11.4	-	11.5	11.0	12.6	OCH
Plataforma existente	15+200	81.4	A-7-6 (17)	-	1.850	1.845	1.859	-	MDS
				-	15.8	13.2	12.1	-	OCH
Plataforma existente	12+200	78.8	A-7-6 (20)	1.947	1.960	1.904	1.917	-	MDS
				9.9	11.0	9.0	7.2	-	OCH
Cantera	2+600	78.0	A7-6 (12)	1.993	1.900	1.899	1.886	-	MDS
				10.8	11.3	13.3	12.8	-	OCH
Cantera	20+100	63.0	A7-6 (11)	1.855	1.852	1.859	1.854	-	MDS
				12.22	14.19	14.28	14.03	-	OCH
Cantera	38+470	50.0	A7-6 (7)	-	-	1.853	1.853	-	MDS
				-	-	15.5	13.5	-	OCH

Fuente: Ensayos de laboratorio de suelos

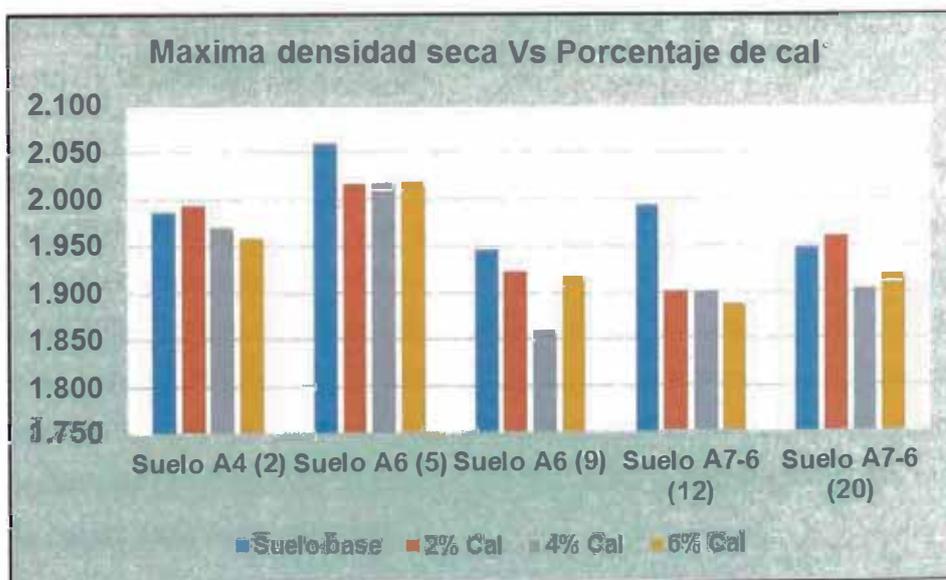


Figura N°2.6.-Variación de la MDS del suelo-cal

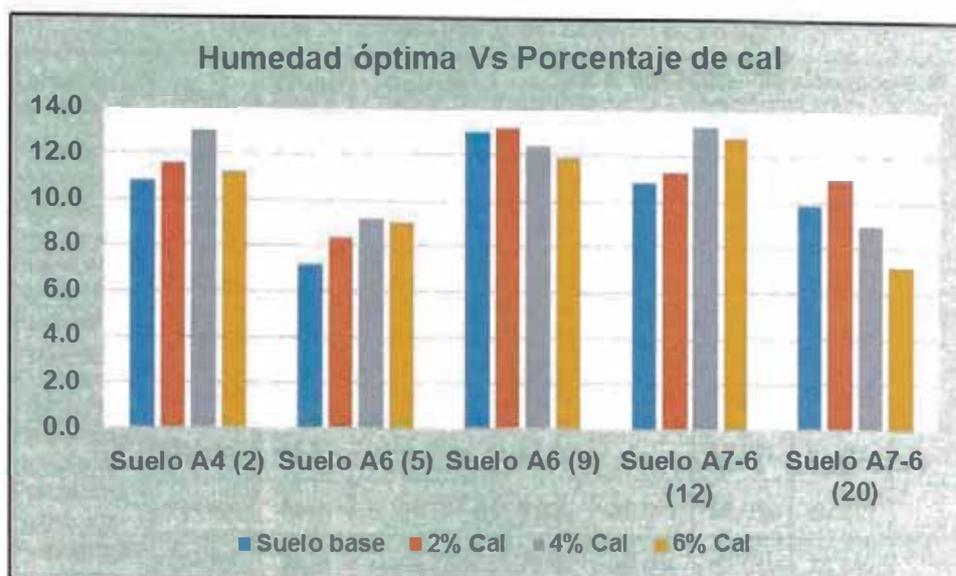


Figura N°2.7.-Variación del OCH del suelo-cal

f) Aumento de la capacidad de soporte

La estructura final de las partículas del suelo arcilloso tratado es desordenada a causa de la intervención de la cal que ocasiona la ruptura de la estructura laminar y la reducción de la capa doble de la arcilla. La distribución desordenada de las partículas de la arcilla redistribuye las tensiones solicitantes en más partículas y en direcciones diferentes, que a diferencia de la estructura laminar, donde las fuerzas transmitidas son solo ortogonales entre ellas y se distribuye en menos partículas, dado a ello, la consistencia del suelo arcilloso mejora, aumentando la capacidad de soporte CBR que se da a corto plazo con el aumento de la dosificación de la cal.

Los resultados de las muestras de suelo-cal sumergidas en un tiempo de 7 días para el CBR al 95% MDS a una penetración de 0.1" se muestran en la tabla N°2.12 y su representación gráfica en la figura N°2.8, observando que existe un punto de inflexión que indica el máximo valor de CBR a una dosificación de cal, luego de este punto empieza a disminuir conforme se aumenta la dosificación de cal, debido a que la muestra pierde resistencia al aumentar el índice de plasticidad, es por ello, que las normas CE-020 y MTC establecen como máximo 8% de cal en peso seco del suelo.

Tabla N°2.12.-Resultados del CBR del suelo-cal

Procedencia del material	Prog.	%Pasa N°200	Tipo de Suelo	CBR al 95%MDS – Penetración 0.1"				
				0%	2%	4%	6%	8%
Plataforma existente	0+200	61.0	A-4 (2)	7.6%	70.0%	88.0%	92.0%	-
Plataforma existente	1+160	54.8	A-6 (5)	8.2%	40.0%	62.0%	28.0%	-
Plataforma existente	38+600	75.0	A-6 (6)	10.8%	-	61.0%	55.0%	-
Plataforma existente	7+400	67.0	A-6 (7)	10.0%	-	77.0%	56.0%	-
Plataforma existente	12+680	84.0	A-6 (9)	7.8%	50.0%	71.0%	96.0%	-
Plataforma existente	28+200	45.6	A-6 (13)	8.0%	-	49.0%	57.0%	65.0%
Plataforma existente	15+200	81.4	A-7-6 (17)	5.5%	36.0%	52.0%	62.0%	-
Plataforma existente	12+200	78.8	A-7-6 (20)	7.0%	39.0%	57.0%	73.0%	-
Cantera	2+600	78.0	A-7-6 (12)	5.5%	47.0%	69.0%	98.0%	-
Cantera	20+100	63.0	A-7-6 (11)	3.0%	42.0%	63.0%	68.0%	-
Cantera	38+470	50.0	A-7-6 (7)	6.4%	-	68.0%	74.0%	-

Fuente: Ensayos de laboratorio de suelos

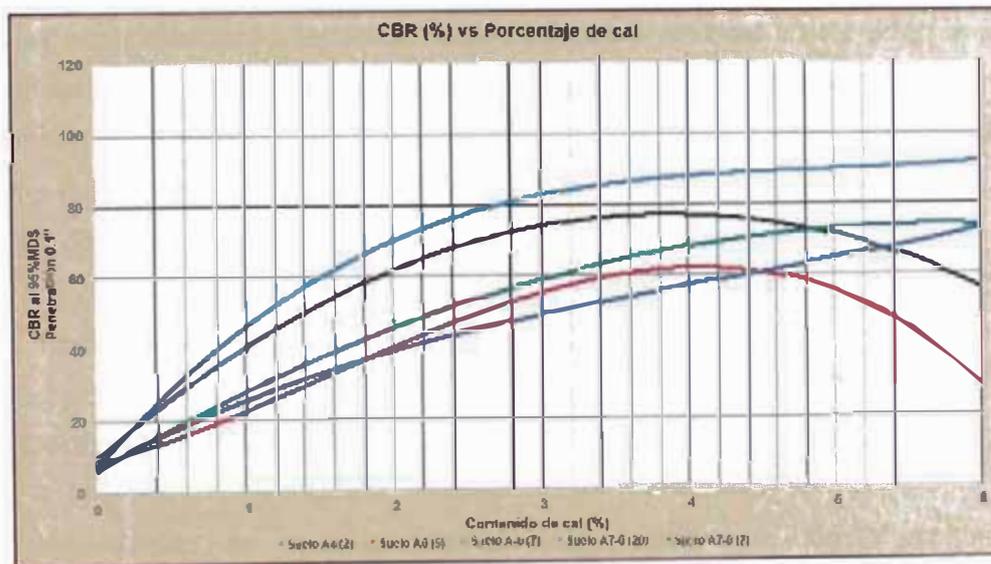


Figura N°2.8.-Variación del CBR del suelo-cal

g) Aumento de la resistencia del suelo

La reacción puzolanica que ocurre entre el suelo y la cal a largo plazo genera productos cementantes, permitiendo un aumento de las fuerzas internas entre las partículas que las que existía inicialmente en el corto plazo. Con ello se basa el aumento de la resistencia del suelo, de tal manera para obtener el desarrollo de las reacciones puzolanicas es necesario que se cuente con diversos factores:

- La cantidad suficiente de sílice y alúmina para reaccionar con la cal, lo cual no todas las clases de arcilla lo presenta en su estructura laminar.
- La presencia de un PH adecuado para la reacción, lo cual se recomienda un PH mínimo de 12.4 según la norma ASTM C-977.
- La cantidad suficiente de cal para su reacción, evitando exceso que produce colmatación de la cal al estar en contacto con el aire de la atmosfera.
- El mantenimiento de las condiciones de humedad y temperatura para favorecer el desarrollo de la resistencia, por ello es necesario el proceso de un curado continuo.

En el proyecto de la rehabilitación de la carretera no se realizó los ensayos de evaluación del PH ni el ensayo de resistencia simple ya que no está establecido en las especificaciones técnicas, dado a ello para conocer su variación ante la dosificación de la cal se procedió a realizar por elaboración propia en el Laboratorio Central del MTC una muestra externa del proyecto de tipo A-4(0), cuyos resultados (anexo C) detallan el aumento de la resistencia del suelo ante mayor dosificación de cal.

2.3 Factores a considerar en la estabilización suelo-cal

a) Contenido mineralógico de las arcillas

La optimización de la estabilización está relacionado con el contenido mineralógico de las arcillas, ya que de ello depende de la producción de los productos cementantes en la reacción puzolanica. Las características de los distintos tipos de arcillas como el tamaño de sus partículas, la capacidad del intercambio iónico, la reactividad con la cal, porcentajes de sílice y alúmina, van a influir en el aumento continuo de la resistencia del suelo a medio y largo plazo.

Estudios realizados en el Laboratorio Central Des Ponts et Chaussées (Francia), ha concluido que las caolinitas son un poco sensibles a la cal en comparación

con la montmorillonita, que logran modificaciones tempranas y aumento de resistencia a medio plazo, sin embargo, las montmorillonitas presentan alta plasticidad y mayor inestabilidad volumétrica,. En cambio, la Illita no es muy reactiva con la cal, donde el aumento de la resistencia del suelo que se establece para pavimentos se presenta mayor a un año.

b) Contenido de materia orgánica

La estructura de la materia orgánica está formada por partículas muy complejas teniendo la propiedad de reaccionar con la cal, dado a ello, disminuye el contenido de cal para generar la reacción puzolanica, permitiendo la presencia de partículas arcillosas con leves modificaciones en su estructura, en consecuencia, resultados bajos de resistencia y la fatiga de la capa del pavimento ante las cargas repetidas del tráfico. La norma CE.020: estabilización de suelos y taludes, establece que el contenido de materia orgánica del suelo natural no debe ser mayor a 3%, con el fin de no alterar la reacción puzolanica y lograr los efectos de la cal en el suelo.

c) Contenido de sulfatos solubles

Los sulfatos solubles propios del suelo, como también proveniente de las aguas subterráneas y superficiales, influyen en el proceso de la estabilización, reaccionando con los materiales cementantes, producto de la reacción puzolanica, formando nuevos materiales como la Etringita y el monosulfoaluminato, que se caracterizan por ser muy expansivo, logrando expandir la capa de suelo compactada cubierta.

El manual de carreteras: suelos, geología, geotecnia y pavimentos, establece el contenido de sulfatos no debe ser mayor a 0.2% en la estabilización de suelo-cal. Las medidas a considerar en el proceso constructivo cuando se tiene porcentajes de sulfatos mayores a lo indicado, se tienen en consideración lo siguiente:

- Si el contenido es alrededor mayor de 0.2%, se realiza los ensayos de expansión del suelo para considerar el tiempo requerido entre la fase de

mezclado y compactación, además la mezcla debe de estar a una humedad de 4% por encima de la humedad óptima, para acelerar la generación de Etringita, en caso se genere.

- En contenidos de sulfatos muy elevados con respecto a lo indicado, no se recomienda de tratar el suelo con la cal, ya que el control sería muy difícil en la etapa constructiva, pudiendo presentarse a futuro expansión del suelo una vez esparcido y compactado.

CAPÍTULO III

DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE REQUERIDO DE CAL

3.1 Métodos para el diseño del suelo-cal

Los métodos para obtener el porcentaje óptimo de cal no está establecido, sin embargo, existe principios establecidos en las normas ASTM, AASHTO y MTC, que consideran los porcentajes mínimos de cal que un suelo necesita para ser estabilizado con cal, permitiendo garantizar la eficiencia de las reacciones puzolanicas que se generan a largo plazo.

3.1.1 Método de Eades and Grim

Este método está basado en la aplicación del uso del PH para la estabilización del suelo-cal. La finalidad de su aplicación es permitir lograr la solubilidad de la sílice y la alúmina de las arcillas y poder generar las reacciones puzolanicas en el medio básico, para ello, se necesita de un medio de PH elevado de la mezcla suelo-cal, por lo que afirma que el PH mínimo debe ser igual a 12.4, siendo indicado en la norma ASTM C-977. La determinación del PH del suelo se realiza de acuerdo a las normas ASTM D-4972 y MTC E-129, y para la obtención del PH mínimo se requiere realizar varias dosificaciones de cal hidratada con el fin de lograr una curva que permita indicar el porcentaje requerido de cal (figura N°3.1).

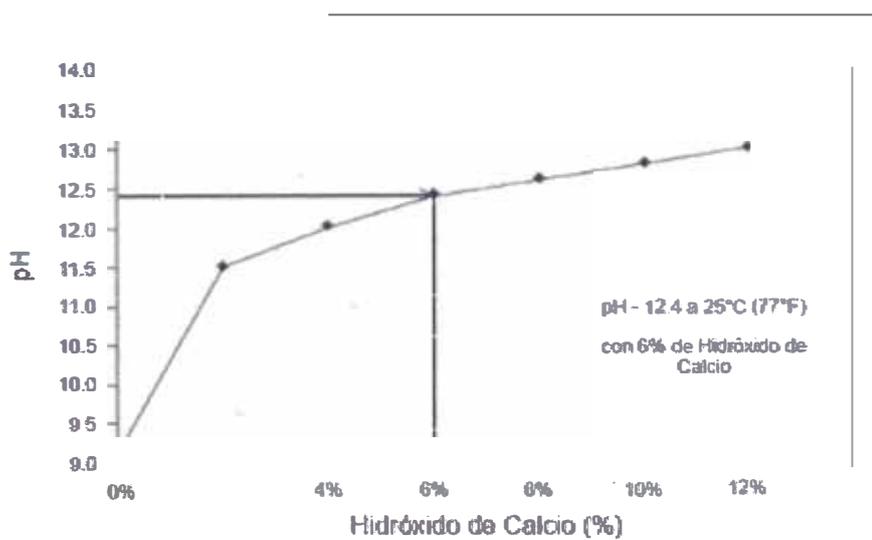


Figura N°3.1.-Diseño del suelo-cal por el método de Eades and Grim

3.1.2 Método del Departamento de Texas

El método establece el porcentaje de cal hidratada en función del índice de plasticidad y el porcentaje que pasa la malla N°40 del suelo natural, restringiendo su aplicación a los suelos que presenten valores de IP menor a 3% y porcentaje que pasa en el tamiz N°40 menor a 10%.

La metodología del método se basa en la utilización de la figura N°3.2 obtenido de la norma MTC E-1108, donde cada número ubicado en el interior de cada círculo perteneciente a cada curva, indica el porcentaje de cal hidratada en función del IP y el porcentaje que pasa la malla N°40.

En la tabla N°3.1 se muestra los resultados de los porcentajes de cal para cada tipo de suelo natural a nivel de subrasante y de las canteras utilizadas en el proyecto.

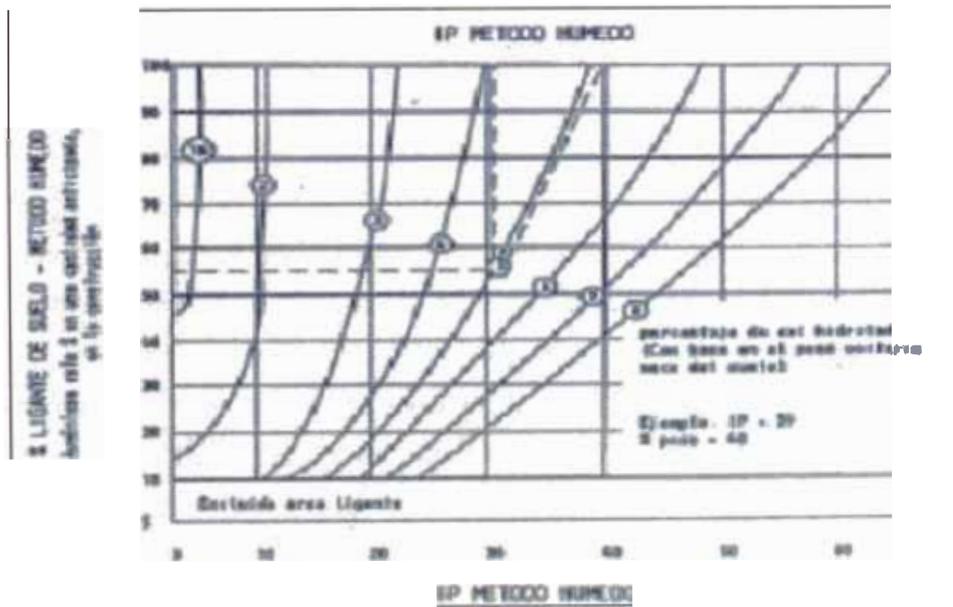


Figura N°3.2.-Diseño del suelo-cal por el método del Dpto. de Texas

Tabla N°3.1.- Porcentaje de cal por el método del Dpto de Texas

Origen del material	Progresiva	Tipo de suelo (AASHTO)	ÍP (%)	%Pasa N°200	%Pasa N°40	Porcentaje de cal
Plataforma existente	0+200	A-4 (2)	6.3	61.0	92.4%	1.5%
Plataforma existente	1+160	A-6 (5)	14.7	54.8	93.4%	2.2%
Plataforma existente	38+600	A-6 (6)	11.9	75.0	99.3%	2.0%
Plataforma existente	7+400	A-6 (7)	13.0	67.0	99.6%	2.0%
Plataforma existente	12+680	A-6 (9)	11.0	84.0	93.9%	2.5%
Plataforma existente	28+200	A-6 (13)	14.6	45.6	91.2%	2.5%
Plataforma existente	15+200	A-7-6 (17)	21.2	81.4	98.8%	3.0%
Cantera	2+600	A-7-6 (12)	14.3	78.0	99.7%	2.5%
Cantera	20+100	A-7-6(11)	20.7	63.0	98.7%	3.0%
Cantera	38+470	A-7-6 (7)	21.2	50.0	90.1%	3.0%

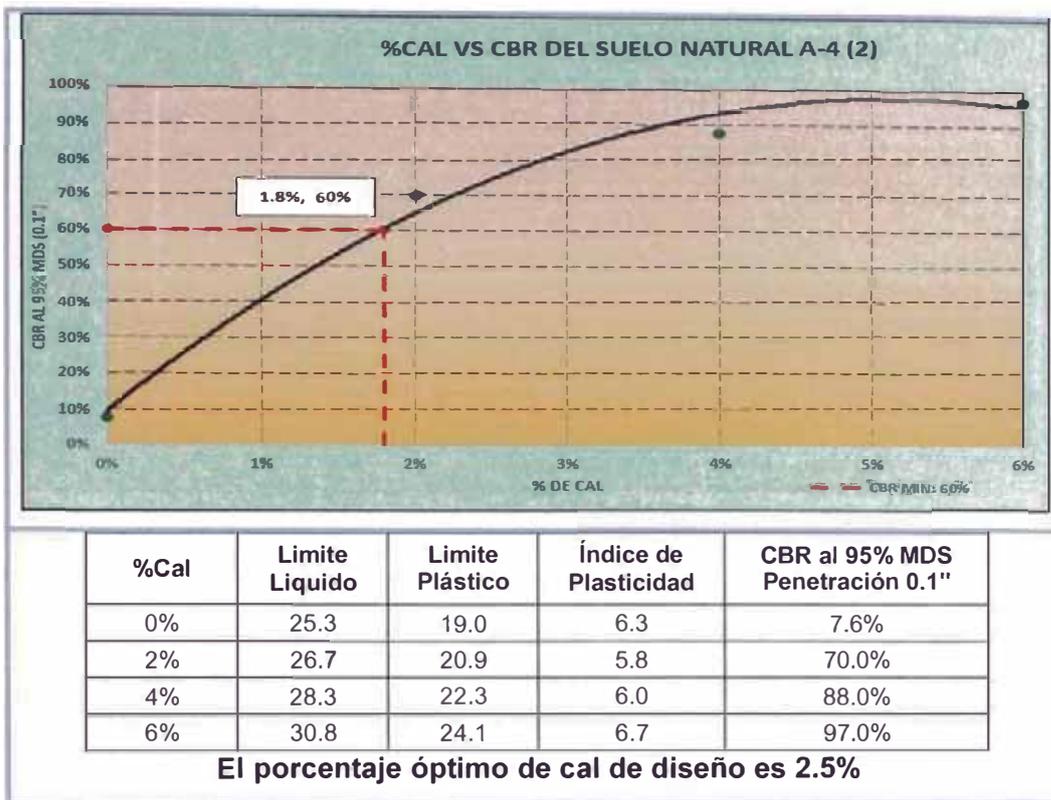
Fuente: Ensayos de laboratorio de suelos

3.2 Cálculo del porcentaje óptimo de cal

En el estudio del proyecto para la determinación del porcentaje óptimo de cal no se ha aplicado estos métodos, ya que en las especificaciones generales EG-2000 no contemplan las especificaciones mínimas para el PH y la resistencia simple para suelos estabilizados con cal, por ello, no se realizó estos ensayos, y se determina en base a los valores de CBR obtenidos para cada dosificación de cal, cuyo porcentaje óptimo de cal es aquel que logre un CBR mínimo igual a 60% y un índice de plasticidad máximo igual a 18% para materiales a nivel de subrasante. Los resultados del diseño de suelo-cal para obtener el porcentaje óptimo de cal para cada tipo de suelo existente y material de cada cantera, se muestran desde la tabla N°3.2 hasta la tabla N°3.7, obteniéndose porcentajes de cal menores a 8%, cumpliéndose con la norma CE-020.

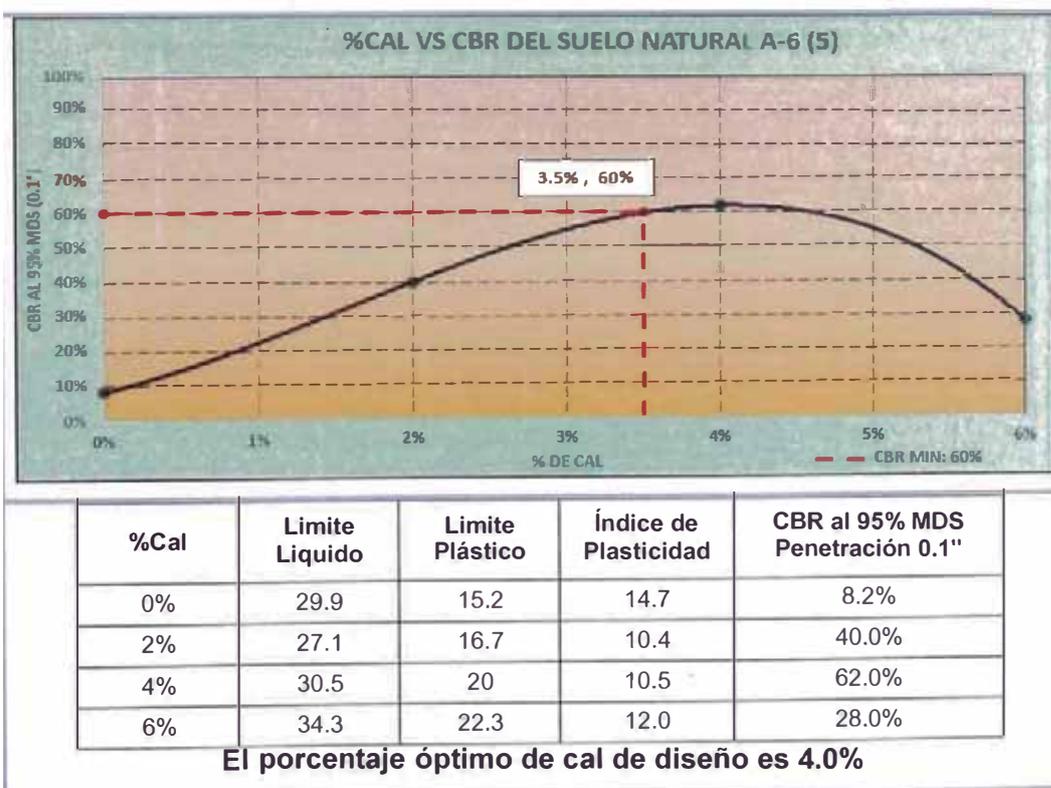
Los valores del índice de plasticidad de la mezcla suelo-cal, de acuerdo a las especificaciones del proyecto es 18% máximo, sin embargo, en el diseño de suelo-cal para el suelo A7-6(20) indicado en la tabla N°3.7, los valores de índice de plasticidad varían muy poco para cada dosificación, obteniéndose un índice de plasticidad igual a 24.4%, a causa de elevada cantidad de materia orgánica, por lo tanto, solo se permitiera estabilizar a suelos que posean un índice de grupo hasta 20 como valor máximo.

Tabla N°3.2.-Diseño de suelo-cal para el suelo A-4 (2)



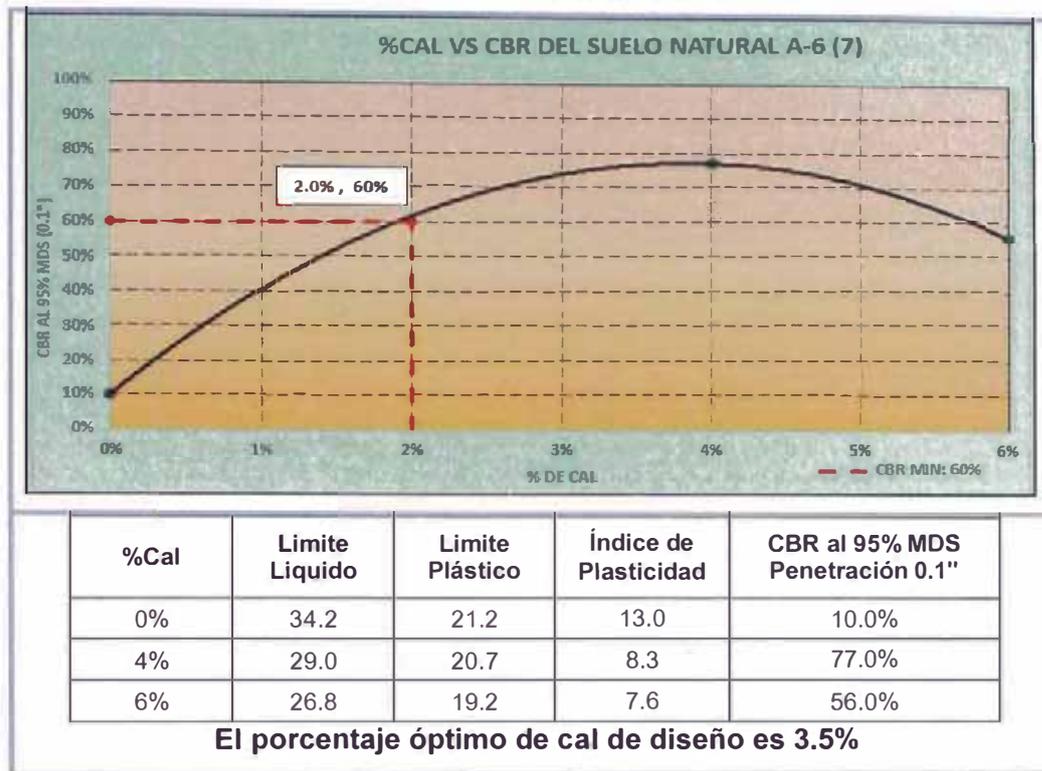
Fuente. Ensayos de laboratorio de suelos

Tabla N°3.3.-Diseño de suelo-cal para el suelo A-6 (5)



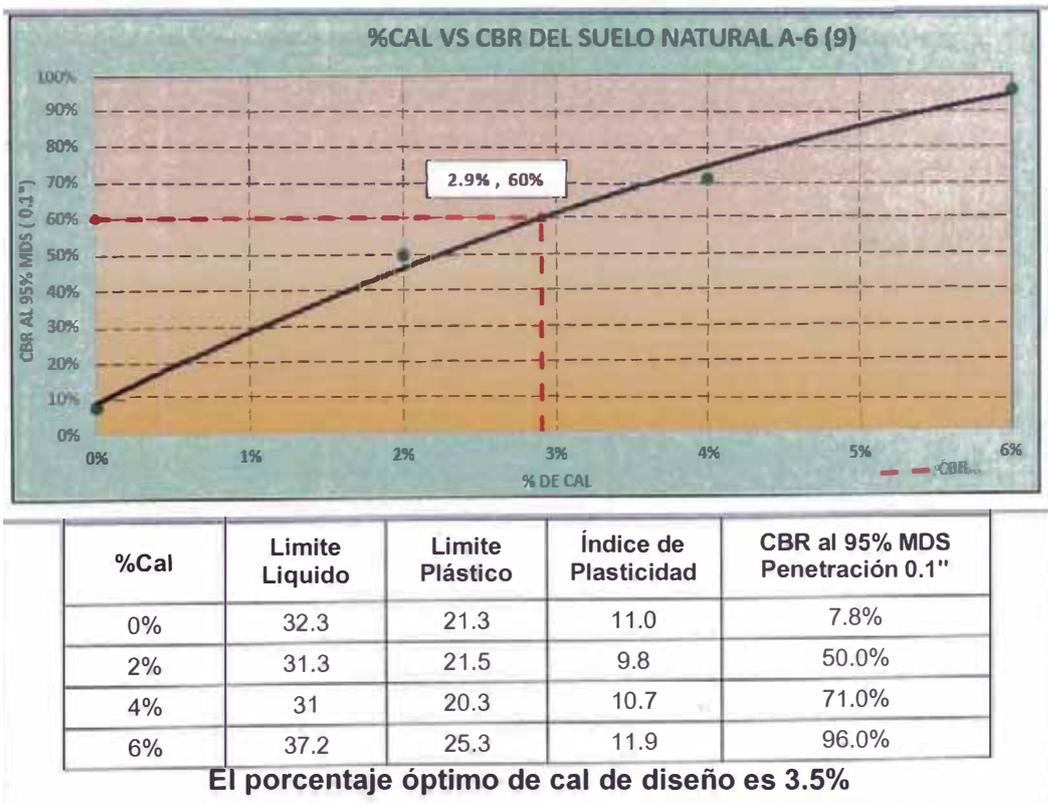
Fuente. Ensayos de laboratorio de suelos

Tabla N°3.4.-Diseño de suelo-cal para el suelo A-6 (7)



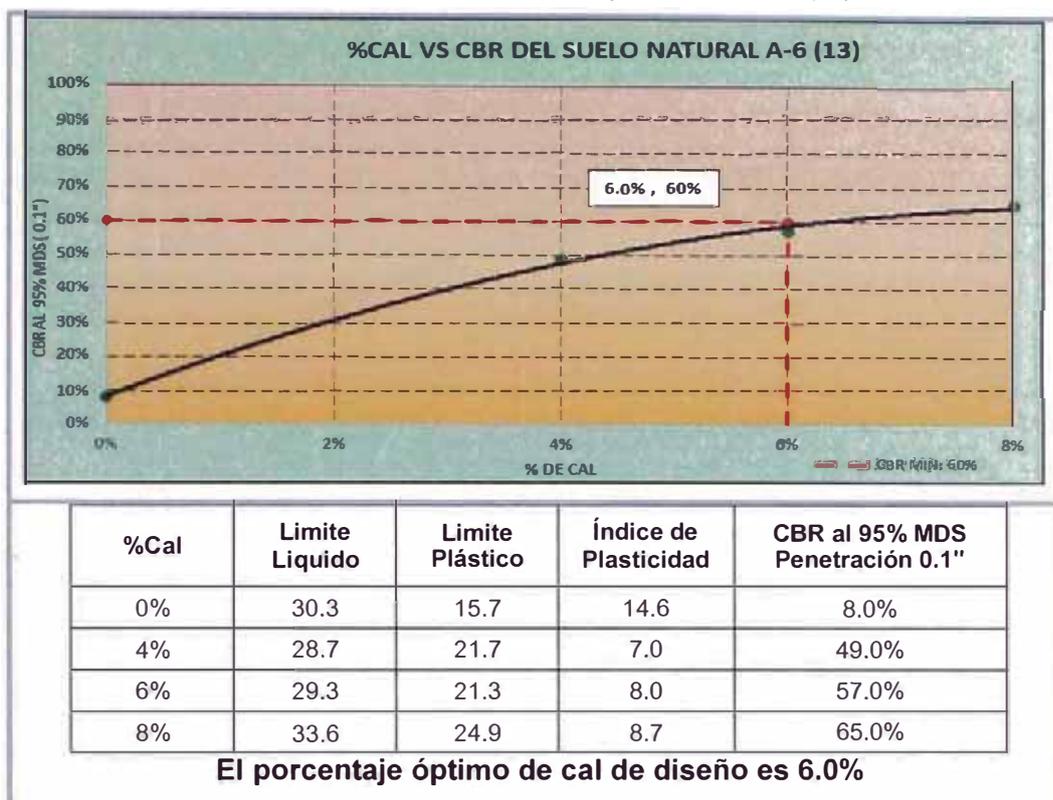
Fuente. Ensayos de laboratorio de suelos

Tabla N°3.5.-Diseño de suelo-cal para el suelo A-6 (9)



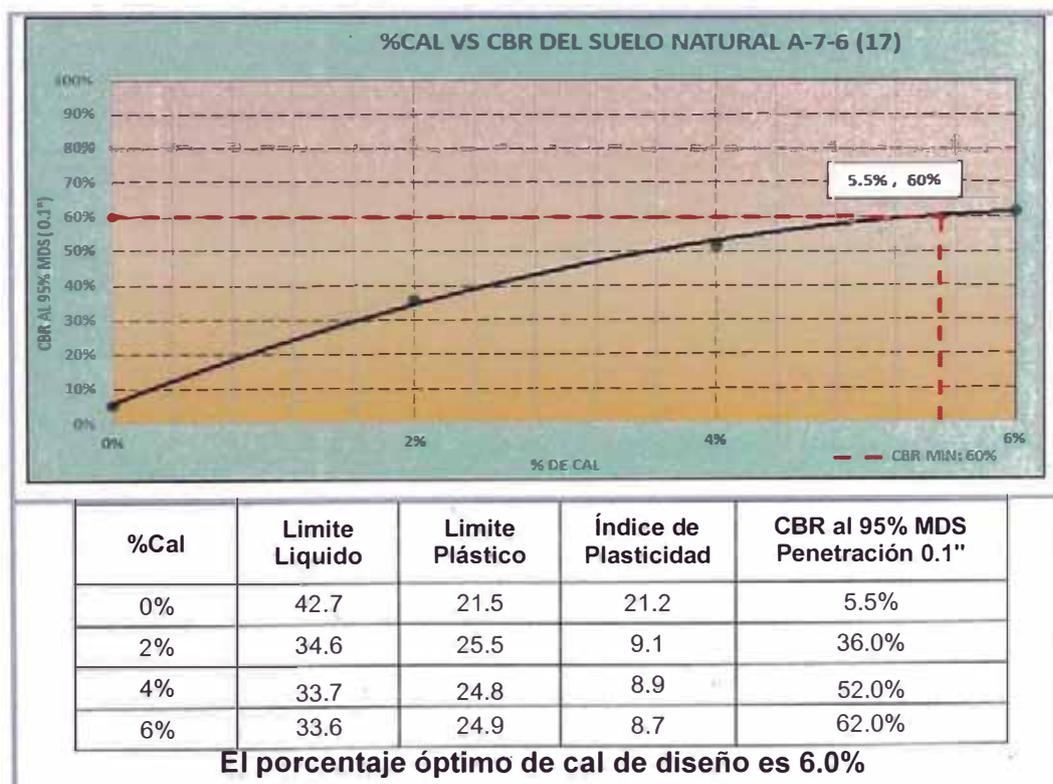
Fuente. Ensayos de laboratorio de suelos

Tabla N°3.6.-Diseño de suelo-cal para el suelo A-6 (13)



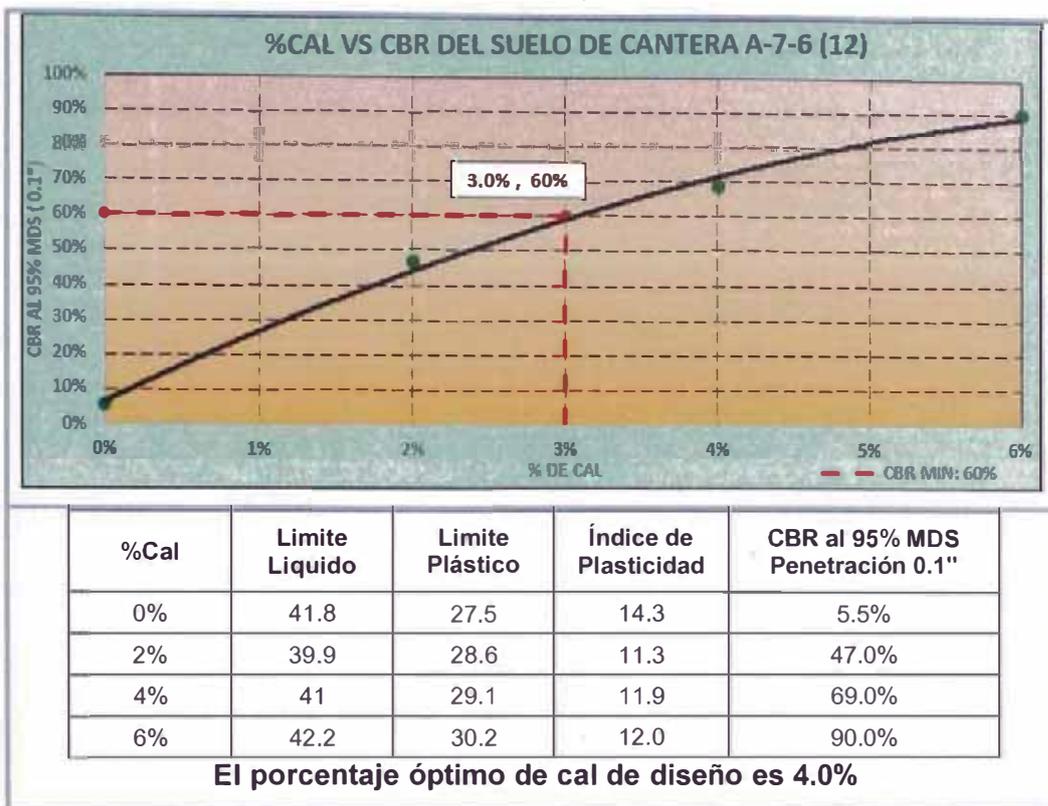
Fuente. Ensayos de laboratorio de suelos

Tabla N°3.7.-Diseño de suelo-cal para el suelo A-7-6 (17)



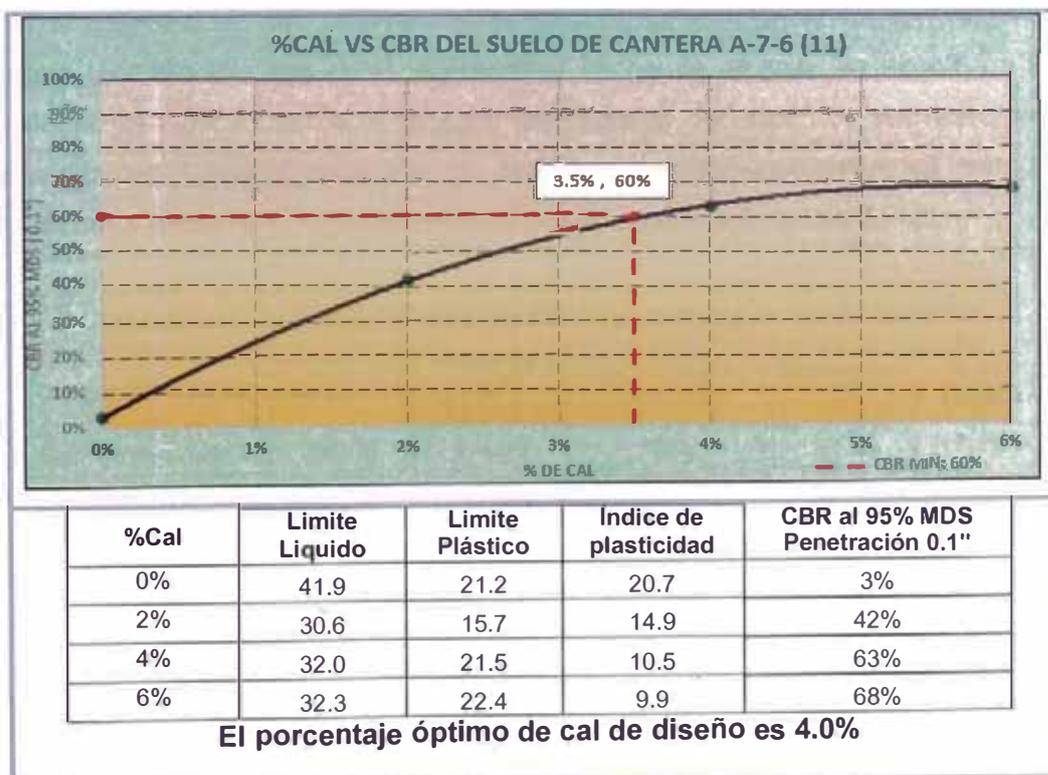
Fuente. Ensayos de laboratorio de suelos

Tabla N°3.8.-Diseño de suelo-cal para la cantera Km.2+600



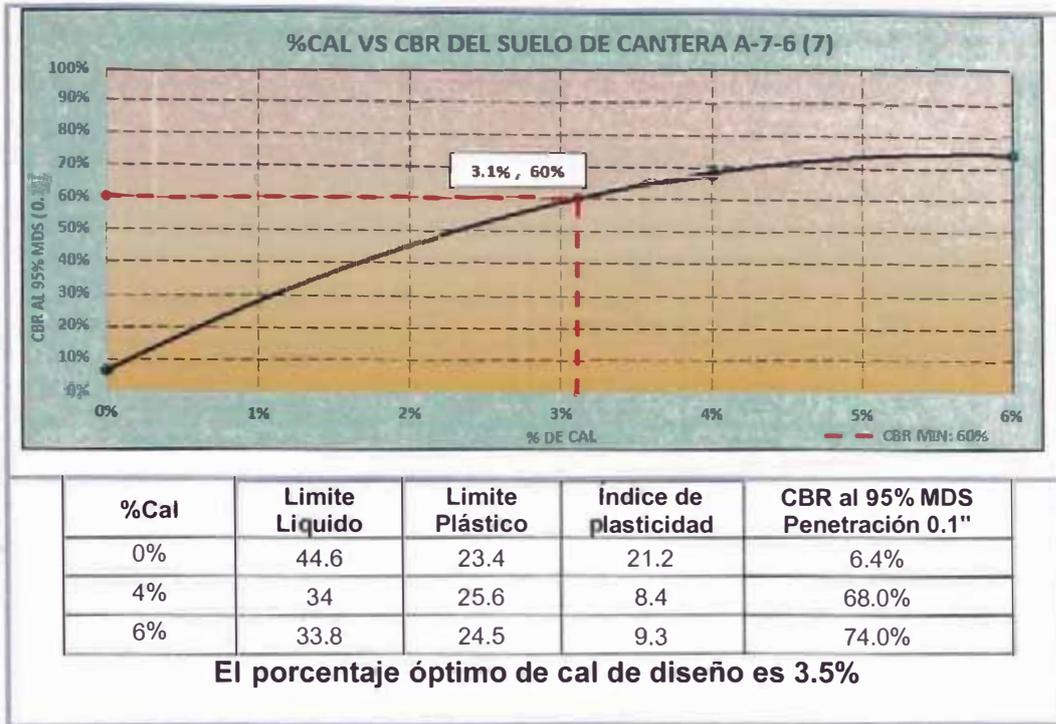
Fuente. Ensayos de laboratorio de suelos

Tabla N°3.9.-Diseño de suelo-cal para la cantera Km.20+100



Fuente: Ensayos de laboratorio de suelos

Tabla N°3.10.-Diseño de suelo-cal para la cantera Km.38+470



Fuente: Ensayos de laboratorio de suelos

En las tablas del diseño de suelo-cal, se observa que la disminución del IP y aumento del CBR, se logra con porcentajes entre 2% a 3% de cal, sin embargo, en el proyecto no se considera el ensayo de la resistencia no confinada del suelo, por ello los valores de porcentajes de cal se asignan de acuerdo a los valores de CBR mayor a 60%, para favorecer el desarrollo de las reacciones puzolanicas. Considerando ello, se realiza la comparación entre los métodos realizados (tabla N°3.11) para definir el mayor porcentaje óptimo de cal.

Tabla N°3.11.-Comparación entre resultados de métodos de diseño suelo-cal

Origen del material	Progresiva	Tipo de suelo (AASHTO)	Departamento de Texas	Método por CBR	% Cal elegido
Plataforma existente	0+200	A-4 (2)	1.5%	2.5%	2.5%
Plataforma existente	1+160	A-6 (5)	2.2%	4.0%	4.0%
Plataforma existente	7+400	A-6 (7)	2.0%	3.5%	3.5%
Plataforma existente	12+680	A-6 (9)	2.5%	3.5%	3.5%
Plataforma existente	28+200	A-6 (13)	2.5%	6.0%	6.0%
Plataforma existente	15+200	A-7-6 (17)	3.0%	6.0%	6.0%
Cantera	2+600	A-7-6 (12)	2.5%	4.0%	4.0%
Cantera	20+100	A-7-6(11)	3.0%	4.0%	4.0%
Cantera	38+470	A-7-6 (7)	3.0%	3.5%	3.5%

Fuente: Elaboración propia

El porcentaje optimo de cal entre los métodos desarrollados se aumenta en 1%, debido a las perdidas que se presentan durante el esparcido y mezclado de cal en la plataforma, mostrando el porcentaje de cal adoptado en obra en la tabla N°3.12:

Tabla N°3.12.-Resumen del porcentaje optimo de cal para cada suelo

Origen del material	Progresiva	Tipo de suelo (AASHTO)	% Cal de diseño	% Cal en obra
Plataforma existente	0+200	A-4 (2)	2.5%	3.5%
Plataforma existente	1+160	A-6 (5)	4.0%	5.0%
Plataforma existente	7+400	A-6 (7)	3.5%	4.5%
Plataforma existente	12+680	A-6 (9)	3.5%	4.5%
Plataforma existente	28+200	A-6 (13)	6.0%	7.0%
Plataforma existente	15+200	A-7-6 (17)	6.0%	7.0%
Cantera Km.2+600	2+600	A-7-6 (12)	4.0%	5.0%
Cantera Km.20+100	20+100	A-7-6(11)	4.0%	5.0%
Cantera Km.38+470	38+470	A-7-6 (7)	3.5%	4.5%

Fuente: Elaboracion propia

El aumento del uno por ciento de cal al porcentaje de cal de diseño aumenta el valor de CBR y poca variacion en el indice de plasticidad en el caso si no hubiera perdidas de los granos de cal, lo cual se puede constatar según las tablas de diseño de suelo-cal para cada tipo de suelo.

En el diseño del suelo-cal se toma los valores de CBR para 3 días de humedecido y 4 días de saturacion, asimismo, se realiza para valores cercanos a la dosificacion, el ensayo de CBR para 3 días humedecido y 17 días de saturacion, verificando el aumento del CBR para los suelos arcillosos y disminucion para los suelos de tipo arena limosa (tabla N°3.13).

Tabla N°3.13.-Variacion del CBR en el tiempo de saturacion

Progresiva	Tipo de suelo (AASHTO)	%Cal	CBR 0.1" al 95%MDS	
			3 días humedecido y 4 días saturación	3 días humedecido y 17 días saturación
5+900	A-4 (0)	4%	100%	72%
28+200	A-6(13)	4%	49%	65%
38+600	A-6(6)	4%	52%	61%
21+400	A-6 (3)	4%	51%	55%

Fuente: Ensayos de laboratorio de suelos

CAPÍTULO IV

ESTABILIZACIÓN DE SUELO-CAL EN LA CARRETERA TINGO MARÍA- PUCALLPA. SECTOR III

La sección del nuevo pavimento consiste en la construcción de la subrasante estabilizada con cal ($e=0.30m$), subbase granular ($e=0.15m$), base granular ($e=0.15m$) y una carpeta asfáltica de espesor variable (0.08-0.10m).

En este capítulo, se va a explicar solo el procedimiento constructivo y el control de calidad de la subrasante estabilizada con cal.

4.1 Procedimiento constructivo en la estabilización suelo-cal

La ejecución de la subrasante estabilizada con cal se realizó en dos capas de espesor igual a 0.15m, con el fin de garantizar la compactación al 95% MDS dadas en las especificaciones técnicas del proyecto.

a) Paso 1: Verificación del material de la subrasante

Se realiza el análisis del material para cada capa de la subrasante para proceder a realizar el diseño de suelo-cal, caso contrario, el material resulte inadecuado o requiere mejoramiento por debajo de la subrasante, se extrae todo el espesor de la subrasante y se conforma con material de la cantera especificada.

b) Paso 2: Escarificación y pulverización

Verificado el material de la subrasante, se ejecuta los trabajos de excavación de las explanaciones hasta el nivel de la subrasante. En caso el terreno de fundación es inadecuado, se realiza el mejoramiento con material de cantera para obtener los requerimientos de las especificaciones técnicas. Luego se procede a realizar la conformación de la subrasante.

Si el material de la segunda capa es adecuado, se acomoda a un costado de la vía para su posterior uso, caso contrario, se traslada a un depósito de material excedente, siendo remplazado por material de préstamo para la estabilización de la segunda capa.

Al llegar al nivel superficial de la primera capa, se escarifica en la profundidad y ancho especificado, luego parcialmente se pulveriza utilizando el escarificador de rastra de discos (figura N°4.1), eliminando los terrones mayores de 1" de tal manera de conseguir un material pulverizado, donde el 60% de la mezcla de suelo-cal deberá pasar por la malla N° 4, según requerimiento de especificación.



Figura N°4.1.-Escarificación y pulverización de la subrasante

c) Paso 3: Conformación y Nivelación

Conformación y nivelación del material natural o de cantera para la primera capa, posteriormente para su compactación con dos a tres pasadas de un rodillo liso, con el fin de lograr una superficie uniforme para el esparcido de cal, evaluándose durante su proceso el contenido de humedad del material de tal manera que se aproxime al óptimo contenido de humedad.



Figura N°4.2.-Conformación y compactación a nivel de subrasante

d) Paso 4: Extendido de cal viva

La cal viva es uniformemente esparcida sobre la subrasante nivelada en el porcentaje especificado para cada sector utilizando para ello una esparcidora (figura N°4.3), que se abastece con camiones durante su recorrido, previo a ello se requiere que la plataforma se encuentre húmeda para evitar la emisión de polvo y pérdida de la cal viva.

En este proceso se realiza el control de tasas correspondientes para cada sector mediante el método de bandeja, que consiste en verificar la cantidad de cal que deposita la esparcidora sobre la plataforma nivelada en un área de un metro cuadrado, para determinar su tasa (Kg/m^2) y verificar el control del avance que debe de ir la esparcidora. Se detalla un ejemplo para el cálculo de la tasa de cal conociendo los siguientes datos:

MDS del suelo por estabilizar = $1936 \text{ Kg}/\text{m}^3$

Espesor del material por estabilizar (e) = 0.15m

Porcentaje de cal de diseño = 3%

Por lo tanto, la tasa de cal (Kg/m^2) se calcula multiplicando la MDS, el espesor y el porcentaje de cal, siendo igual a $8.71 \text{ Kg}/\text{m}^2$.



Figura N°4.3.-Extendido de la cal viva sobre la subrasante

e) Paso 5: Proceso de mezclado

Se realiza in situ mediante la utilización de una máquina estabilizadora de suelos permitiendo realizar la mezcla del suelo-cal, la cual va acompañado de una

cisterna (figura N°4.4), la cual agrega la cantidad suficiente de agua para asegurar que la cal se hidrate por completo y logre alcanzar un 5% por encima de la humedad óptima, ya que durante el proceso de mezclado y compactación este valor disminuye. Realizado el mezclado se realiza la compactación con rodillo pata de cabra, para mantener una superficie estable ante la presencia de lluvias.

Para alcanzar la estabilización, es esencial una adecuada pulverización y la completa distribución de la cal dentro del suelo, en esta fase, inmediatamente después del mezclado, se extraen muestras para verificar que el 60% de la mezcla pase la malla N° 4 y realizar los demás ensayos para su verificación según resultados del diseño del suelo-cal.



Figura N°4.4.-Proceso de mezclado del material natural y cal

f) Paso 6: Periodo de fraguado inicial

La mezcla suelo-cal debe fraguar un tiempo de 2 a 3 días, para permitir la reacción química que cambia las propiedades del material natural.

g) Paso 7: Compactación de la mezcla suelo-cal

Se realiza con el rodillo pata de cabra para alcanzar el 95% de la máxima densidad seca obtenida en el ensayo proctor modificado (figura N°4.5). En campo se requirió alrededor de nueve pasadas para lograr lo especificado, siendo verificado el grado de compactación por medio del método de cono de arena.



Figura N°4.5.-Compactación de la mezcla suelo-cal

h) Paso 8: Periodo de fraguado final

Al culminar la compactación de la mezcla suelo-cal, se realiza el curado húmedo por un periodo de 7 días mediante el rociado de agua con cisterna, para mantener las condiciones de temperatura de la mezcla suelo-cal y así favorecer las reacciones puzolánicas, incrementando la resistencia del suelo.



Figura N°4.6.-Curado húmedo de la mezcla suelo-cal

4.2 Control de calidad en la estabilización suelo-cal

El control de calidad de la estabilización del suelo-cal se basa en la implementación y cumplimiento de acciones en obra con el fin de cumplir las especificaciones técnicas asignadas al proyecto (tabla N°4.1), que se verifica durante la etapa constructiva por tramos,

Tabla N°4.1.-Resumen de las especificaciones técnicas del proyecto

Equipo específico	Estabilizador de suelos rotativo con potencia >300 KW y distribuidor mecánico de cal equipado con dosificador volumétrico
Estabilización con cal viva para la subrasante (e=0.30m)	Estabilizar en dos capas de 0.15m. La cal debe de cumplir los requerimientos de la norma AASHTO – M216
Diseño de mezcla	En base al CBR mínimo igual a 60%
Pulverización	El porcentaje máximo que pasa la malla N°4 es 60%. (EG-2000)
Hinchamiento al 95% del proctor modificado	Menor a 0.5%
Contenido de humedad	El OCH en campo debe de estar en el rango de $\pm 2\%$ del OCH de laboratorio.
CBR	60% mínimo
Índice de plasticidad (IP)	18% máximo
Curado húmedo	Mantener húmedo por 72 horas al finalizar la compactación. (EG-2000)
Índice de grupo	El índice de grupo del material a estabilizar es hasta 20
Ropa de trabajo	Usar traje TYVEK de olefin con capucha, botines y guantes, para prevenir el contacto con la piel.
Protección de los ojos	Usar lentes de seguridad para productos químicos.
Protección de nariz y boca	Usar mascarilla con filtro protector.

Fuente: Expecificaciones tecnicas del proyecto

4.2.1 Calidad de la cal viva

La cal viva ubicada en obra proveniente de la empresa MINERA MANCOS S.A.C es analizada en el laboratorio con el fin de verificar el cumplimiento de los requisitos que establece la norma AASHTO M-216 e indicado en la tabla N°1.6.

En el anexo “B” y en la tabla N°4.2, se encuentran los resultados de los ensayos físicos y químicos de la cal viva, cuyos resultados cumplen con las especificaciones que estipula la norma AASHTO M-216.

Para el análisis de la reactividad de la cal viva (figura N°4.7) se verifica que la temperatura de la cal viva es 28.2°C y la temperatura de agua con cal es 75°C en un tiempo de 25 minutos, por lo tanto, de acuerdo al grafico N°1.2 se tiene una cal activa.

Tabla N°4.2.-Resultados de ensayos de la cal viva

Determinación	Resultado	Limites	Observación
Cal activa (CaO + MgO).	91.78%	Max. 90%	Cumple
Dioxido de carbono (CO2)	2.06%	Max. 5%	Cumple
Humedad libre (H2O)	0.00%	Max. 5%	Cumple
%Retiene malla N°30	0.17%	Max. 3%	Cumple
%Retiene malla N°200	2.57%	Max. 25%	Cumple

Fuente: Informe de ensayo de la cal viva



Figura N°4.7.-Control de reactividad de la cal viva

4.2.2 Resultados de ensayos del suelo-cal

La frecuencia y valores admisibles para los ensayos a nivel de subrasante se realizan en base a la norma EG-2000, aplicada en dos capas de 0.15m de espesor para lograr la compactación deseada. Los resultados de los ensayos del suelo-cal en pista, proveniente del suelo existente y cantera se muestran en las tablas N°4.3 y N°4.4.

Tabla N°4.3.-Resultados de ensayos de la primera capa de la subrasante

Progresiva	%Pasa Malla N°4	IP <18%	Clasificación AASHTO	Compactación		CBR 0.1"	
				DM	H.O	95 >60%	100
Km.0+000 al Km.0+330	100	5.8	A-4(2)	1.939	11.6	80	94
Km.0+330 al Km.0+540	100	16	A-7-6(9)	1.853	15.3	82	98
Km.0+540 al Km.0+900	100	14.6	A-6(8)	1.897	12.5	79	100
Km.0+900 al Km.1+000	100	9.7	A-4(4)	1.874	13.3	82	95
Km.1+000 al Km.1+190	100	12.2	A-6(8)	1.732	18.0	69	98
Km.1+190 al Km.1+360	100	13	A-6(8)	1.832	15.8	61	80

Progresiva	%Pasa Malla N°4	IP <18%	Clasificación AASHTO	Compactación		CBR 0.1"	
				DM	H.O	95 >60%	100
Km.1+360 al Km.1+520	100	10.2	A-4(6)	1.824	16.2	88	98
Km.1+520 al Km.1+830	100	11.8	A-6(7)	1.824	15.0	79	109
Km.1+830 al Km.2+280	100	12.0	A-6(7)	1.883	13.5	99	113
Km.2+280 al Km.2+430	100	7.2	A-4(3)	1.773	15.8	72	88
Km.2+430 al Km.2+570	100	7.3	A-4(1)	1.873	13.9	80	119
Km.2+570 al Km.2+720	100	9.9	A-4(3)	1.762	17.0	63	83
Km.2+720 al Km.2+920	100	14.6	A-6(9)	1.814	15.1	78	104
Km.2+920 al Km.3+000	100	14.5	A-6(10)	1.868	14.5	70	84
Km.3+000 al Km.3+390	100	8.7	A-4(1)	1.898	12.3	78	98
Km.3+390 al Km.3+620	100	12.5	A-6(3)	1.862	13.3	91	108
Km.3+620 al Km.3+880	100	11	A-6(7)	1.835	14.8	82	100
Km.3+880 al Km.4+000	100	9.2	A-4(3)	1.798	12.2	65	73
Km.4+000 al Km.4+300	100	14.8	A-6(7)	1.809	15.8	66	72
Km.4+300 al Km.4+620	100	11.9	A-6(8)	1.778	17.1	66	74
Km.4+620 al Km.4+760	100	10.4	A-4(3)	1.908	12.8	62	82
Km.4+760 al Km.4+860	100	14.4	A-6(6)	1.786	15.5	63	73
Km.4+860 al Km.4+960	100	11.8	A-6(4)	1.829	16.9	79	99
Km.4+960 al Km.5+100	100	12.6	A-6(5)	1.802	15.1	66	87
Km.5+100 al Km.5+345	100	9.7	A-4(1)	1.832	16.6	62	81
Km.5+420 al Km.5+780	100	9.5	A-4(7)	1.835	15.4	83	107
Km.5+780 al Km.6+090	100	10.2	A-4(6)	1.841	16.0	85	109
Km.6+140 al Km.6+520	100	14.9	A-6(7)	1.816	16.1	97	109
Km.6+520 al Km.6+730	100	11.9	A-6(6)	1.839	14.6	74	87
Km.6+730 al Km.7+020	100	10.3	A-4(8)	1.850	13.1	72	101
Km.7+020 al Km.7+530	100	9.5	A-4(7)	1.797	16.7	90	115
Km.7+530 al Km.7+740	100	10.1	A-4(6)	1.759	17.0	93	106
Km.7+740 al Km.7+910	100	9.4	A-4(5)	1.846	15.2	79	85
Km.7+910 al Km.8+160	100	14.9	A-6(11)	1.820	15.5	75	93
Km.8+160 al Km.8+455	100	10.4	A-4(7)	1.832	16.5	88	110
Km.8+490 al Km.8+960	100	11.8	A-6(4)	1.846	15.0	98	108
Km.8+960 al Km.9+350	100	7.9	A-4(3)	1.817	15.0	76	104
Km.9+350 al Km.9+880	100	8.1	A-4(1)	1.785	14.1	75	90
Km.9+880 al Km.10+570	100	10.5	A-6(5)	1.830	15.6	91	102
Km.10+570 al Km.11+040	100	13.8	A-6(8)	1.873	14.4	87	103
Km.11+040 al Km.11+200	100	8.8	A-4(5)	1.909	11.9	99	115
Km.11+200 al Km.11+504	100	10.2	A-4(6)	1.731	18.2	79	97
Km.11+568 al Km.11+940	100	10	A-4(5)	1.698	18.6	92	112
Km.11+940 al Km.12+500	100	12	A-6(7)	1.789	16.1	72	106
Km.12+500 al Km.12+900	100	10.9	A-6(5)	1.821	15.8	78	96
Km.12+900 al Km.13+020	100	8.9	A-6(5)	1.750	16.8	88	114

Progresiva	%Pasa Malla N°4	IP <18%	Clasificación AASHTO	Compactación		CBR 0.1"	
				DM	H.O	95 >60%	100
Km.13+020 al Km.13+460	100	8.4	A-6(5)	1.725	17.6	84	112
Km.13+460 al Km.13+860	100	11.4	A-6(9)	1.816	15.3	77	93
Km.13+860 al Km.14+220	100	7.9	A-4(4)	1.852	13.5	86	113
Km.14+220 al Km.14+600	100	8.3	A-4(4)	1.678	18.5	86	93
Km.14+900 al Km.15+120	100	8.5	A-4(5)	1.857	13.8	93	113
Km.15+120 al Km.15+500	100	8.9	A-4(6)	1.857	13.6	76	106
Km.15+500 al Km.16+000	100	11.8	A-6(7)	1.819	17.2	98	114
Km.16+000 al Km.16+380	100	9.7	A-4(6)	1.770	17.6	81	107
Km.16+380 al Km.16+620	100	9.6	A-4(4)	1.854	13.8	93	117
Km.16+620 al Km.17+000	100	7.5	A-4(3)	1.836	15.3	76	101
Km.17+000 al Km.17+460	100	13.4	A-6(7)	1.849	15.2	80	99
Km.17+460 al Km.17+700	100	11.8	A-6(6)	1.805	15.5	97	114
Km.17+700 al Km.17+800	100	9.5	A-4(5)	1.732	17.7	93	114
Km.17+800 al Km.18+000	100	8	A-4(2)	1.799	16.0	77	99
Km.18+000 al Km.18+660	100	14.5	A-6(6)	1.859	13.5	90	108
Km.18+660 al Km.19+700	100	11.8	A-6(4)	1.860	14.0	85	102
Km.19+700 al Km.20+000	100	10.7	A-6(4)	1.810	17.0	90	109
Km.36+150 al Km.36+750	100	8.8	A-4(5)	1.741	15.3	78	99
Km.37+360 al Km.37+600	100	8.2	A-4(4)	1.829	15.8	85	107
Km.37+600 al Km.38+000	100	10.4	A-4(5)	1.924	12.8	89	105
Km.38+000 al Km.38+440	100	9.3	A-4(5)	1.881	13.3	88	105
Km.38+440 al Km.38+950	100	8.7	A-4(4)	1.888	13.5	82	102
Km.38+950 al Km.40+150	100	9.2	A-4(6)	1.897	13.2	79	97

Fuente: Ensayos de laboratorio de suelos

Tabla N° 4.4.-Resultados de ensayos de la segunda capa de la subrasante

Progresiva	%Pasa Malla N°4	IP <18%	Clasificación AASHTO	Compactación		CBR 0.1"	
				DM	H.O	95 >60%	100
Km.0+000 al Km.0+360	100	13.1	A-6(8)	1.785	16.5	87	99
Km.0+360 al Km.0+600	100	9.4	A-4(6)	1.760	18.0	87	100
Km.0+600 al Km.0+700	100	8.7	A-4(5)	1.742	17.3	81	100
Km.0+700 al Km.1+090	100	10.9	A-6(6)	1.770	15.1	83	109
Km.1+090 al Km.1+385	100	14.4	A-6(9)	1.822	14.0	72	84
Km.1+385 al Km.1+720	100	8	A-4(4)	1.816	15.8	81	89
Km.1+720 al Km.2+000	100	8.5	A-4(4)	1.803	16.9	79	98
Km.2+000 al Km.2+320	100	9.2	A-4(7)	1.814	15.8	87	104
Km.2+320 al Km.2+430	100	16.6	A-7-6(9)	1.782	15.5	74	90
Km.2+430 al Km.2+510	100	10.2	A-4(5)	1.767	16.2	74	83
Km.2+510 al Km.2+720	100	12.5	A-7-6(11)	1.731	18.2	63	87
Km.2+720 al Km.3+000	100	15.3	A-6(10)	1.743	19.4	76	91

Progresiva	%Pasa Malla N°4	IP <18%	Clasificación AASHTO	Compactación		CBR 0.1"	
				DM	H.O	95 >60%	100
Km.3+000 al Km.3+410	100	12.6	A-6(8)	1.793	16.8	79	97
Km.3+410 al Km.3+620	100	7.9	A-4(4)	1.746	17.1	82	88
Km.3+620 al Km.3+880	100	9.8	A-4(2)	1.729	17.7	66	69
Km.3+880 al Km.4+000	100	10.8	A-6(5)	1.880	13.6	74	94
Km.4+000 al Km.4+300	100	8.8	A-4(0)	1.902	13.7	75	104
Km.4+300 al Km.4+620	100	10.3	A-4(5)	1.850	13.8	90	107
Km.4+620 al Km.4+760	100	12.7	A-6(5)	1.852	16.2	63	72
Km.4+760 al Km.4+860	100	12.6	A-6(4)	1.835	16.4	65	73
Km.4+860 al Km.5+100	100	10.1	A-4(3)	1.839	14.1	67	78
Km.5+100 al Km.5+345	100	12.4	A-6(6)	1.769	15.1	66	79
Km.5+420 al Km.5+770	100	9	A-4(5)	1.880	13.5	87	93
Km.5+770 al Km.6+090	100	8.7	A-4(5)	1.821	15.8	87	108
Km.6+140 al Km.6+680	100	11.5	A-6(8)	1.762	17.5	72	97
Km.6+680 al Km.7+060	100	12.8	A-6(11)	1.787	16.3	79	98
Km.7+060 al Km.7+440	100	11.8	A-6(8)	1.770	17.0	82	92
Km.7+440 al Km.7+880	100	9.6	A-4(7)	1.808	16.7	88	105
Km.7+880 al Km.8+230	100	13	A-6(7)	1.768	18.1	65	78
Km.8+230 al Km.8+455	100	10.3	A-4(6)	1.785	16.9	80	94
Km.8+490 al Km.8+910	100	12	A-6(8)	1.804	16.2	94	120
Km.8+910 al Km.9+240	100	11.8	A-4(3)	1.746	17.1	79	99
Km.9+240 al Km.9+920	100	13.8	A-6(8)	1.709	17.6	73	98
Km.9+920 al Km.10+240	100	7.1	A-4(4)	1.786	15.2	97	106
Km.10+240 al Km.10+717	100	8.8	A-4(5)	1.766	16.2	84	109
Km.10+717 al Km.11+000	100	6.9	A-4(3)	1.805	15.9	90	115
Km.11+000 al Km.11+200	100	12.1	A-6(10)	1.768	17.4	94	105
Km.11+200 al Km.11+504	100	8.4	A-4(5)	1.736	17.3	100	117
Km.11+568 al Km.12+200	100	7.9	A-4(4)	1.672	17.3	85	100
Km.12+200 al Km.13+180	100	12	A-6(6)	1.706	18.5	90	112
Km.13+180 al Km.13+420	100	7.9	A-4(4)	1.793	16.3	73	87
Km.13+420 al Km.13+840	100	12.2	A-6(6)	1.805	15.1	80	104
Km.13+840 al Km.14+220	100	10.8	A-6(6)	1.698	18.6	79	96
Km.14+220 al Km.14+600	100	9	A-4(5)	1.795	16.4	89	113
Km.14+900 al Km.15+600	100	8.6	A-4(4)	1.817	16.9	91	112
Km.15+600 al Km.16+000	100	10.1	A-4(5)	1.822	16.5	93	118
Km.16+000 al Km.16+400	100	12.4	A-6(8)	1.849	15.2	75	99
Km.16+400 al Km.16+590	100	13.4	A-6(7)	1.729	17.6	96	113
Km.16+590 al Km.16+720	100	11.8	A-6(5)	1.756	17.6	87	102
Km.16+720 al Km.17+260	100	7.2	A-4(2)	1.820	16.9	95	109
Km.17+260 al Km.17+440	100	11.2	A-6(5)	1.820	15.5	81	102
Km.17+440 al Km.18+000	100	11.9	A-6(7)	1.813	15.7	99	114

Progresiva	%Pasa Malla N°4	IP <18%	Clasificación AASHTO	Compactación		CBR 0.1"	
				DM	H.O	95 >60%	100
Km.18+000 al Km.18+640	100	12.1	A-6(7)	1.770	17.8	74	95
Km.18+640 al Km.20+000	100	9.9	A-4(6)	1.802	16.5	87	114
Km.36+150 al Km.36+750	100	9	A-4(6)	1.791	16.8	76	89
Km.37+360 al Km.37+860	100	9.3	A-4(6)	1.769	17.3	77	88
Km.37+860 al Km.38+400	100	9.1	A-4(6)	1.769	17.3	71	88
Km.38+400 al Km.38+950	100	9.7	A-4(7)	1.791	16.8	75	88
Km.38+950 al Km.40+150	100	12.2	A-6(8)	1.773	16.8	71	82

Fuente: Ensayos de laboratorio de suelos

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

Los efectos de la cal mejoran las propiedades físicas y mecánicas del suelo arcilloso, disminuyendo el índice de plasticidad y aumento del CBR como muestra la tabla N°5.1, además, los resultados de CBR del suelo-cal para cada tipo de suelo supera el valor mínimo igual a 60%, establecido por las especificaciones técnicas del proyecto, por lo tanto, la dosificación de cal es correcta.

Tabla N°5.1.-Resultados de los ensayos de las muestras de suelo-cal

Origen del material	Prog.	%Pasa N°200	Tipo de suelo (AASHTO)	% Cal en obra	IP Inicial (%)	CBR 0.1" Inicial 95%MDS	IP Final (%)	CBR 0.1" Final 95%MDS
Plataforma existente	0+200	61.0	A-4 (2)	3.5%	6.4	7.6	5.8	80
Plataforma existente	1+160	54.8	A-6 (5)	5.0%	14.7	8.2	10.2	88
Plataforma existente	7+400	67.0	A-6 (7)	4.5%	11.4	10	7.2	72
Plataforma existente	12+680	84.0	A-6 (9)	4.5%	15.1	7.8	10.9	78
Plataforma existente	28+200	45.6	A-6 (13)	7.0%	14.6	8.0	8.0	84
Plataforma existente	15+200	81.4	A-7-6 (17)	7.0%	21.2	5.5	8.6	91
Cantera	2+600	78.0	A-7-6 (12)	5.0%	14.3	5.5	12.7	63
Cantera	20+100	63.0	A-7-6(11)	5.0%	20.7	3.0	12.1	74
Cantera	38+470	50.0	A-7-6 (7)	4.5%	21.2	6.4	9.7	75

Fuente: Ensayos de laboratorio de suelos

- El 97.8% del terreno a nivel subrasante presenta grado de potencial débil y 2.2% como grado de potencial moderado, los cuales, estos cambios volumétricos de expansión son reducidos a suelos no expansivos, verificado en el proceso de ensayo de CBR del suelo-cal.
- En temporada seca, la precipitación media mensual es 36.2mm y la humedad relativa es 84%, siendo valores significativos, por lo que no se presenta problemas de contracción de las arcillas a nivel de subrasante, mientras en temporada de lluvia, se utiliza cubiertas para proteger la

plataforma y alcanzar el OCH. Finalizado el proceso de compactación, las lluvias no afectan a la capa compactada ya que el suelo-cal no sufre cambios de humedad por la reducción de la capa doble.

- En campo, a nivel de subrasante existe materiales granulares, siendo el menor CBR de diseño igual a 13.7% y el mayor igual a 36.2% desde el Km.20+000 al Km.58+769, por lo que no fue necesario su estabilización por su buena capacidad de soporte. Asimismo, el material de base de la carretera existente se encontraba en buenas condiciones para uso como subbase.
- El valor del CBR del suelo-cal para un tiempo de 3 días humedecido y saturado por 4 días es menor para un tiempo de saturación por 17 días (tabla N°5.2), es decir, se observa el incremento del CBR a un corto plazo fundamentando la eficiencia de las reacciones puzolanicas en los suelos arcillosos, sin embargo, para el suelo A-4(0) el CBR disminuye, indicando que hay una débil reacción puzolanica por ser un suelo arenoso limoso, en consecuencia, este suelo no es adecuado para estabilización con cal.

Tabla N°5.2.-Resultados del CBR en el tiempo de saturación

Progresiva	%Pasa N°200	Tipo de suelo (AASHTO)	%Cal	CBR 0.1" al 95%MDS	
				3 días humedecido y 4 días saturación	3 días humedecido y 17 días saturación
5+900	38.3	A-4 (0)	4%	100%	72%
28+200	45.6	A-6(13)	4%	57%	65%
38+600	75.0	A-6(6)	4%	52%	61%
21+400	59.5	A-6 (3)	4%	51%	55%

Fuente: Ensayos de laboratorio de suelos

- El contenido de materia orgánica restringe la utilidad y mejoramiento de las propiedades del suelo para ser estabilizados con cal, donde se adoptó hasta suelos que presenten como máximo un índice de grupo igual a 20, observando muy poca variación del índice de plasticidad sin lograr disminuir al máximo requerido, dado a ello suelos con igual o mayor índice de grupo igual a 20 se traslada a un DME.

5.2 Recomendaciones

- Las normas del MTC no establece las especificaciones técnicas para la evaluación del PH en la estabilización del suelo-cal, sin embargo, se recomienda su aplicación para lograr la solubilidad de la cal en el suelo arcilloso en base a un PH mínimo igual a 12.4, obteniendo la elección del porcentaje mínimo de cal en la estabilización.
- Se recomienda para aquellos suelos que presenten contenido de sulfatos mayor a 0.2% (valor máximo por el MTC), se aplique otro criterios de dosificación con el menor contenido de calcio y mezclado con otros aditivos, ya que, la cal reacciona con los sulfatos generando materiales expansivos, reflejando las grietas en la capa de rodadura.

BIBLIOGRAFÍA

- ANCADE (2005). Tratamiento de suelos con cal. España.
- Correa Morocho, M. Estudio de Suelos para la Construcción del Complejo educativo "Túpac Amaru" Tumán-Chiclayo. Tesis para obtener el Título profesional. Facultad de Ingeniería Civil. Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, 1996.
- Fernández Condeña, R. Diseño y Proceso Constructivo de Suelos Estabilizados en Pavimentos Asfálticos- Aplicación a la Carretera Interoceánica Sur-Tramo III. Tesis para obtener el Título profesional. Facultad de Ingeniería Civil. Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, 2009.
- Herrero, E. (2008). La cal y sus acciones sobre el terreno. En. Estabilización de suelos con cal en carreteras y líneas de alta velocidad". Zaragoza, España.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2005). Manual de Ensayos de Materiales EM - 2000. Dirección General de Caminos y Ferrocarriles.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2013). Manual de Carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos. Lima, Perú.
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2012). Norma CE.020: Estabilización de Suelos y Taludes. Lima, Perú.
- Ugaz Palomino, R. Estabilización de Suelos y su Aplicación en el Mejoramiento de Subrasante. Tesis para obtener el Título profesional. Facultad de Ingeniería Civil. Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, 2006.
- Vadillo, (1990). "Control de Calidad de Cal Hidratada o Hidróxido de Calcio", en Revista de Química, junio, Vol. IV - N°1, pp. 5-10.
- Overseas Road Nota 31 (1993). A Guide to the Structural Design of Bitumen-Surfaced Roads in Tropical and Sub-Tropical Countries, 15 de mayo del 2014, 10:20 h, www.transport-links.org