

Stabilization method with lime in subgrades for rigid pavements designed by AASHTO 93 in road projects with the presence of bofedales

Gabriela Odar, Diego Chavez, and Manuel Silvera, Msc¹

¹Ingeniería Civil, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú, u201410044@upc.edu.pe, u201110838@upc.edu.pe and manuel.silvera@upc.pe

Abstract— The bofedales are wetlands that occur at more than 3500 masl, are characterized by being composed of supersaturated clays with plasticity indexes greater than ten and with high organic content. The stabilization of a soil with lime represents an option with great advantages, since it improves the behavior of the mechanical properties of the soil as the carrying capacity of the same (CBR or MR). The present investigation, has as approach to propose a stabilization alternative applied in bofedales with the purpose of evaluating the reduction of the structural package in a rigid pavement. This will generate an antecedent for the next stages of the project to be executed. The results showed that the stabilized subgrade increased its bearing capacity thus achieving the reduction of up to 25% of the thickness of the concrete slab with respect to the initial design proposed for the project.

Keywords— Bofedales, Stabilization with lime, Rigid pavement, Subgrade, Bearing capacity.

Digital Object Identifier (DOI): http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2019.1.1.60 ISBN: 978-0-9993443-6-1 ISSN: 2414-6390
--

Método de estabilización con cal en subrasantes para pavimentos rígidos diseñados por AASHTO 93 en proyectos viales con presencia de bofedales

Gabriela Odar, Diego Chavez, and Manuel Silvera, Msc¹

¹Ingeniería Civil, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú, u201410044@upc.edu.pe, u201110838@upc.edu.pe and manuel.silvera@upc.pe

Resumen— Los bofedales son humedales que se presentan a más de 3500 msnm y se caracterizan por estar compuestos por arcillas sobresaturadas con índices de plasticidad mayores a diez con alto contenido orgánico. La estabilización de un suelo con cal representa una opción con grandes ventajas, ya que esta técnica mejora el comportamiento de las propiedades mecánicas del suelo como la capacidad portante del mismo (CBR o MR). La presente investigación, tiene como enfoque proponer una alternativa de estabilización aplicado en bofedales y diseñar el paquete estructural del pavimento rígido. Esto generará un antecedente para las siguientes etapas del proyecto a ejecutarse.

Los resultados mostraron que al estabilizar con cal la subrasante del bofedal se obtiene un incremento de hasta siete veces la capacidad portante inicial.

Palabras Claves: Bofedales, Estabilización con cal, Pavimento rígido, Subrasante, Capacidad portante, arcilla de alta plasticidad.

Abstract- The bofedales are wetlands that occur at more than 3500 masl and are characterized by being composed of supersaturated clays with plasticity indexes greater than ten with high organic content. The stabilization of a soil with lime represents an option with great advantages, since this technique improves the behavior of the mechanical properties of the soil as the bearing capacity of the same (CBR or MR). The present investigation, has as approach to propose an alternative of stabilization applied in bofedales and design the structural package of rigid pavement. This will generate an antecedent for the next stages of the project to be executed.

The results showed that when the subgrade of the bofedal is stabilized with lime, an increase of up to seven times the initial bearing capacity is obtained.

I. INTRODUCCIÓN

La estabilización con cal en subrasantes que presentan arcillas de alta plasticidad es una práctica común en el Perú. Sin embargo, esta técnica de estabilización utilizada en arcillas con alto contenido orgánico es limitada, especialmente en proyectos con altitudes mayores a 4700 msnm. Un gran porcentaje de los suelos en la sierra peruana, especialmente en zonas de gran altitud (4737 msnm), son finos; altamente plásticos, saturados

y de baja capacidad portante. Es aquí en donde la búsqueda de técnicas de estabilización de suelos tiene un rol importante. Esta metodología de estabilización o mejoramiento de suelos se puede aplicar en arcillas y limos con índices de plasticidad entre 10% y 50% con la finalidad de reducir el índice plástico, incrementar la capacidad portante del suelo base e impermeabilizarlo impidiendo el ascenso por capilaridad de aguas subterráneas [2].

La presente investigación está enfocada en proponer un método para mejorar la capacidad portante de los suelos en bofedales empleando como agente estabilizador la cal. Esta técnica fue estudiada en el Tramo I del proyecto Mejoramiento de la carretera Oyón- Ambo, con la finalidad de analizar su influencia en el espesor del pavimento rígido.

II. ESTADO DEL ARTE

A. Factores y requerimientos de un suelo para ser estabilizado con cal.

Los suelos más adecuados para estabilizar con cal son aquellos que son muy arcillosos y con índices de plasticidad mayores a 10; en el caso de los suelos granulares se deben tener índices de plasticidad mayores a 12. [1]. Los factores que deben ser considerados para la elección de la cal como agente estabilizador son el tipo de suelo a estabilizar, capacidad portante requerida de la subrasante a estabilizar, vida útil de subrasante, las condiciones medio ambientales y el costo de esta solución [2]. Además, se recomienda la estabilización con cal en arcillas con alta plasticidad, limos de baja plasticidad y otros suelos plásticos que pueden ser empleados en bases, subbase y calzadas [3].

B. La cal como agente estabilizador.

La cal es recomendada como agente estabilizador para suelos con presencia de arcillas con alta plasticidad o limos, ya que se ha comprobado que modifican sus características físico-químicas, mejora sus propiedades mecánicas, incrementa la durabilidad de la subrasante, controla el cambio de volumen de suelo, reduce los requerimientos de espesores de las capas del pavimento y reduce el polvo. Cuando se añade cal a los suelos sus iones se combinan o son absorbidos en la estructura de la arcilla causando cambios físico-químicos en las partículas del suelo. Dichos cambios tienen lugar hasta una cierta cantidad de cal, y mayores adiciones de esta no causan cambios significativos en la mezcla. Este punto es más conocido como punto de fijación o retención de cal y es además, un indicador de la eficiencia de la reacción [4] [6].

Digital Object Identifier (DOI):

<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2019.1.1.60>

ISBN: 978-0-9993443-6-1 ISSN: 2414-6390

En investigaciones realizadas para arcillas de alta plasticidad en Colombia se observa que la resistencia que se obtiene con cualquier dosificación con cal, aún con poco tiempo de curado es notablemente mayor con respecto al material sin cal. Esta relación de incremento es directamente proporcional al porcentaje óptimo de cal, la tendencia indica que los valores más promisorios sean entre 6% y 9% ya que los incrementos en la capacidad portante del suelo al agregar 12% no son significativos. [2] [5].

C. Pavimento rígido

Una vez estudiada las características del suelo con el cual el método de estabilización con cal trabaja de manera óptima, se buscó validar el incremento de la capacidad portante dentro del diseño de pavimento rígido bajo la normativa AASHTO 93. El método de diseño AASHTO 93 es un método empírico, y parte importante de las recomendaciones de diseño para su empleo, responden más bien a resultados de investigación y experiencias locales en Estados Unidos [7] [8]. A partir de este concepto, lo que se busca en esta investigación es adaptar el diseño tradicional dándole un valor diferencial con las realidades encontradas en la zona alto andina de Perú.

III. METODOLOGÍA

En el diseño de un pavimento rígido la subrasante cumple un rol importante debido a que las características y estado del suelo de fundación, definen los espesores y granulometría de la base, subbase y losa concreto. En este contexto debemos asegurar que la capacidad de soporte de la subrasante sea capaz de satisfacer los requerimientos del proyecto. Si el suelo de la subrasante no tiene la suficiente capacidad portante que demanda el proyecto, se puede emplear estabilizaciones químicas o refuerzos mecánicos. En la figura 1, se resume el método utilizado en la presente investigación.

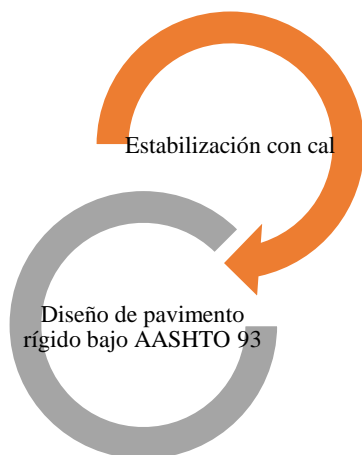


Figura 1: Metodología de trabajo

A. Método de estabilización con cal

A continuación, se presenta en la figura 2, el método de estabilización con cal en suelos de subrasante de acuerdo a las recomendaciones del manual de Lime y a experiencias realizadas por otros autores en Costa Rica, Colombia y Chile.

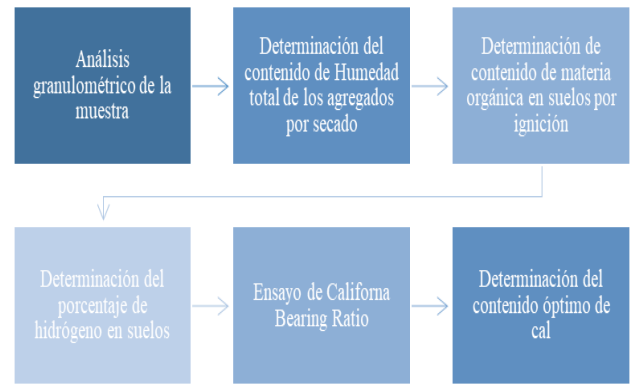


Figura 2: Estabilización con cal

- **Análisis granulométrico de la muestra:** Es necesario conocer la granulometría de subrasante a estabilizar, porcentaje de finos y sus límites de Atterberg con la finalidad de clasificar el suelo. Además, se debe contar con un $IP > 10$ para seleccionar la cal como agente estabilizador.
- **Determinación del contenido de Humedad total de los agregados por secado:** La resistencia de los suelos de la subrasante, en especial los suelos finos, se encuentra asociada directamente con las condiciones de humedad y densidad; por lo que determinar el porcentaje de humedad que presenta el suelo es información indispensable.
- **Determinación de contenido de materia orgánica en suelos por ignición:** El porcentaje de materia orgánica que presenta un suelo está relacionado directamente con la capacidad portante del mismo y la efectividad de la reacción con la cal. El manual de Lime recomienda emplear suelos con contenido orgánico menores a 3%, sin embargo, no existe una limitación de emplear suelos con mayor contenido orgánico, como es el caso de suelos presentes en los bofedales.
- **Determinación del potencial de hidrógeno:** El potencial de hidrógeno nos permite clasificar si el suelo es ácido o básico. Si se tienen suelos muy ácidos se produce una deficiencia en la reacción suelo cal. Además, como requisito indispensable la cal a emplear como agente estabilizador deberá tener un PH mayor a 12.
- **Ensayo de California Bearing Ratio:** Determinar la capacidad de soporte de suelo natural y clasificarlo en inadecuado, pobre, regular, buena, muy bueno y excelente de acuerdo al Manual de Suelos Geología y Pavimentos del Ministerio de Transportes y Comunicaciones de Perú. Si la calidad de la subrasante es pobre o regular se debe emplear estabilización o mejora del suelo; para los otros casos dependerá de las características del proyecto.
- **La determinación del contenido óptimo de cal según el procedimiento recomendado por el manual de LIME**

indica que para arcillas de alta plasticidad el porcentaje de cal en peso seco debe estar entre rangos de 2% y 8% además, la dosificación adecuada será aquella que presente un PH mayor a 12.4. Existe una falta de información acerca de emplear estabilizaciones con porcentajes de cal superiores a 9% y PH de suelo-cal menores a 12.4. Esta investigación plantea analizar el incremento de la capacidad portante del suelo para dosificaciones de cal mayores a 9% y PH menores a 12.5.

B. Diseño de pavimento rígido bajo AASHTO 93

Una vez determinada la capacidad portante del suelo estabilizado con cal, en esta investigación se propone el diseño de pavimento rígido, tomando como base los parámetros estipulados en el manual de la AASHTO 93, el cual a nivel de Latinoamérica sigue siendo el más conservador por el diseño de espesores en el paquete estructural y en experiencias en obras de gran envergadura. Para este caso se ha tomado en cuenta la variación con respecto al valor del Módulo de Reacción de la subrasante-subbase (K), el cual relaciona la interacción entre la capa de la subbase y la subrasante. En base al volumen de tráfico de la carretera utilizando la ecuación N° 1.

$$Kc = \left[1 + \left(\frac{h}{38} \right)^2 \times \left(\frac{K_1}{K_0} \right)^{\frac{2}{3}} \right]^{0.5} \times K_0$$

Ecuación 1: Módulo de reacción de la subrasante fuente: (American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993)

Donde:

$K_1 (kg/cm^2)$ = Coeficiente de reacción de la subbase granular.

$K_c (kg/cm^2)$ = Coeficiente de reacción subbase-

Módulo de reacción tomando como base subrasante

$K_0 (kg/cm^2)$ = Coeficiente de reacción de la subrasante

h = Espesor de la subbase granular

A continuación, se procedió a determinar el módulo resiliente de la subrasante y subbase. Este dato será utilizado en la ecuación 2 para cálculo del espesor del paquete estructural. El procedimiento inicia con un espesor tentativo buscando la igualdad entre ambos miembros y teniendo en cuenta el 10% de tolerancia, el cual se desprende del 90% asumido para la confiabilidad de la vía. Este valor residual contempla que solo el 10% de la vía necesitara mantenimiento al término de la vida útil del pavimento.

$$a = Z_R \times S_o + 7.35 \times \log_{10}(D + 1)$$

$$b = -0.06 + \frac{\log_{10} \left[\frac{\Delta PSI}{4.5 - 1.5} \right]}{1 + \frac{1.624 \times 10^7}{(D + 1)^{0.46}}}$$

$$c = (4.22 - 0.32p_i) \times \log_{10} \left[\frac{s'_c \times C_d 10^{0.25} - 1.132}{215.63 \times j \left[D^{0.75} - \frac{18.42}{\left(\frac{E_c}{K_{effect}} \right)^{0.25}} \right]} \right]$$

$$\log_{10} W_{18} = a + b + c$$

Ecuación 2: Ecuación para determinar el espesor de la losa de concreto

Fuente: (American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993)

IV. VALIDACIÓN

Los bofedales son humedales que se originan a más de 3500 msnm producto de las lluvias, deshielo de glaciares e infiltraciones de aguas subterráneas en las mesetas andinas. Están cubiertos por vegetales hidrofitos. Este tipo de ecosistemas está compuesto en su mayoría por arcillas y limos altamente plásticos. Se caracterizan principalmente por su alto contenido orgánico y de humedad como el que se muestra en la figura 3.



Figura 3: Bofedales en zona de estudio

En el tramo I de la carretera Oyón – Ambo, que comprende 49km de pavimento rígido, se han identificado 23 zonas de bofedales que deben ser mejoradas las cuales abarcan un total de 12247.38 m³. De estas 23 zonas se ha identificado la progresiva con mayor volumen de mejoramiento que comprende un total de 1800 m³ de suelo inadecuado para ser subrasante. Se extrajo aproximadamente una muestra de material de 0.25 m³ a los cuales se le realizaron ensayos de granulometría, límites de Atterberg, Potencial de hidrógeno y California Bearing Ratio. Los resultados se muestran en la tabla N°1.

Tabla N°1: Características del suelo en estado natural

Características del suelo	
LL	44
LP	26
IP	18
Clasificación de suelo	CL / A-7-6(16)
Contenido orgánico (CMO)	4.80%
PH	7
Humedad óptima	95%
CBR	6%

Como se puede observar en la tabla N°1 el suelo es una arcilla de alta plasticidad neutra ($IP > 10$, $PH = 7$) con alto contenido orgánico ($CMO > 1\%$) y de baja capacidad portante ($CBR = 6\%$). Estos valores hacen propicia la estabilización con cal en este tipo de suelos, sin embargo, el alto contenido orgánico puede poner en riesgo la técnica de estabilización. En este contexto se decidió estudiar el efecto de cal ante este tipo de suelos.

Se ha realizado la prueba de dos tipos de cal, por un lado, se tiene la cal Tipo I, que se emplea en obra con un PH de 12.8 y una pureza de 75%; con la cual se realizó la dosificación de cal en peso seco de 2%, 3%, 4%, 5%, 6%, 7%, 8%, 9%, 10%, 15%, 20%, 25% y 30%. Por otro lado, para la cal tipo II, cal viva, del laboratorio Chemilab con un PH de 13 y una pureza de 97% se realizó la dosificación de 5%, 6%, 7%, 8%, 9%, 10%, 15%, 20%, 25% y 30%. Para ambos tipos de cal se evaluó el PH de la mezcla suelo cal como se muestra en la figura 4.

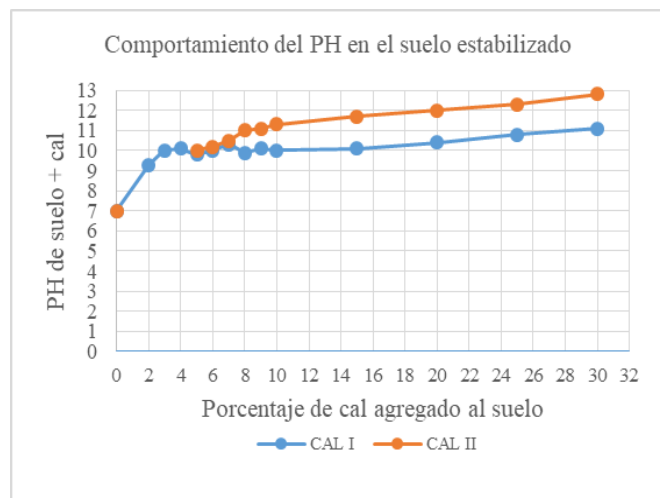


Figura 4: Incremento de PH de suelo estabilizado con cal

En la figura 4, se puede apreciar que la cal tipo II presenta una tendencia de crecimiento en el PH a mayor dosificación de cal contrario a la cal tipo I. Asimismo, se puede apreciar que con una dosificación de 30% la única cal que alcanza el PH de 12.4

es la cal tipo II contrario a la cal tipo I que llega a su punto de fijación con 4% y con un PH de 10.

Se realizó la estabilización de la muestra de suelo con la cal tipo II con dosificaciones de 7% y 10% de cal en peso seco para A-7-6(16) con la finalidad de observar el incremento de la capacidad portante del suelo y se han realizado los ensayos de CBR al 95% y 100% de humedad óptima. A continuación, en la figura 5, se muestran los resultados del ensayo para CBR al 95%.

En la figura 5, se observa que existe un incremento de la capacidad portante al incrementarse la dosificación de cal; así, el suelo estabilizado con 7% de cal presenta un CBR de 31.80% y el suelo estabilizado con 10% presenta un CBR de 43.3%. Siendo este último valor hasta 7 veces mayor al valor inicial del suelo en estado natural lo que indica un aumento significativo de la capacidad portante del suelo, A-7-6(16), que tendrá la función de subrasante en la carretera de estudio.

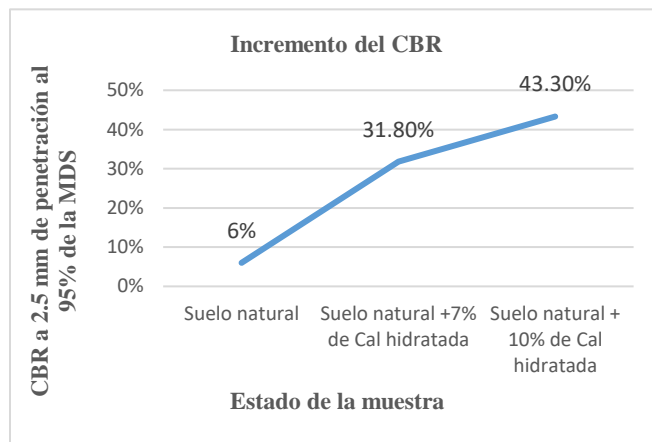


Figura 5: Incremento del CBR de la muestra

Es así que el CBR con el que se diseñará el espesor del pavimento rígido será de 43.3 %.

De las figuras 4 y 5 se puede reconocer que si bien la dosificación con cal tipo II de 7% y 10% no alcanzan el valor mínimo de PH de 12.4, se produce un incremento de hasta 7 veces de la capacidad portante del suelo.

Para el desarrollo del diseño del paquete estructural se hará uso de la ecuación N° 2. Los parámetros utilizados han sido tomados del expediente técnico del proyecto con el fin de mantener las mismas consideraciones iniciales, pero variando el coeficiente del módulo efectivo en base a la propuesta de estabilización.

Seguidamente, se trabajó la ecuación 1 mostrando los resultados a continuación:

DATOS DE LA SUBBASE

CBR= 60%

h=15 cm

Si $K \leq 10$ entonces $K = 46 + 9.08 * \log_{10} CBR$

Si $K > 10$ entonces $K = 46 + 9.08 * \log_{10} CBR^{4.34}$

$$K = 156.40 \frac{Mpa}{m}$$

DATOS DEL SUELO DE FUNDACIÓN

CBR= 43.3 %

Si $K \leq 10$ entonces $K = 46 + 9.08 * \log_{10} CBR$

Si $K > 10$ entonces $K = 46 + 9.08 * \log_{10} CBR^{4.34}$

$$K = 123.00 \frac{Mpa}{m}$$

MODULO DE REACCION COMPUESTO DE LA SUBRAZANTE (K) = 133.77 Mpa/m

En la tabla número 2 se resumen los datos con los que se ingresó a la fórmula para obtener el espesor de diseño de la losa de concreto.

Tabla N°2: Datos de entrada para el diseño bajo AASHTO 93

Datos de entrada para el diseño		
K =	133.77	Mpa/m
Ec =	27750	Mpa
S'c = Mr =	4.87	Mpa
J =	2.8	
Cd =	1	
So =	0.35	
R =	90%	
ZR =	-1.282	
Pt =	2.5	
ΔPSI =	2	
W18 (ESALS) =	6.38	x 10 ^ 6
D =	???	mm

Como se detalló en el proceso de la metodología el desarrollo de la ecuación 2 se trabajó en el miembro de la derecha y el de la izquierda con la finalidad de buscar la igualdad entre ambos valores y poder obtener el espesor de diseño. A continuación, se muestran las iteraciones desarrolladas en base a la tolerancia máxima en la tabla 3.

Tabla N°3: Alternativas de Espesores de Losa según tolerancia de confiabilidad

Alternativas para pavimento rígido						
Alternativa	Espesor de Losa (mm)	1er miembro	2do miembro	diferencia	Tolerancia	Cumple
1	192	6.8	6.795	0	0.68	OK
2	180	6.8	6.658	0.14	0.68	OK
3	170	6.8	6.544	0.26	0.68	OK
4	160	6.8	6.429	0.37	0.68	OK
5	150	6.8	6.314	0.49	0.68	OK

De la tabla 3 se puede apreciar que en las cinco alternativas planteadas se respeta la tolerancia de 0.68 entre el primer y segundo miembro la solución óptima es la alternativa 5 que nos da un espesor de losa de 150 mm o 15 cm siendo esta la alternativa con menor espesor de losa que se encuentra dentro la tolerancia admisible. La diferencia entre el primer y el segundo miembro es de 0.48.

Finalmente, en la figura 6 se presenta la estructura propuesta del paquete estructural en base a los resultados obtenidos. La cual está conformada por 4 capas. La primera, de un espesor de 30 cm compuesta por material de over con tamaño máximo de 2" a 4". La segunda, de un espesor de 15 cm compuesto por un material de transición con CBR mayor a 20%. La tercera, la subbase con un espesor de 15 cm compuesto por un material con CBR mayor 60%. Finalmente, la losa de concreto hidráulico con 15 centímetros de espesor para un concreto f'c=350 kg/cm2



Figura 6: Estructura típica de mejoramiento de bofedales utilizando Cal bajo diseño AASHTO 93

Es importante indicar que la composición y espesor de cada una de las capas que se observan en la figura 6, son producto de la mejora en el comportamiento de la subrasante al ser estabilizada con cal.

Con esta propuesta integral de mejora del comportamiento de la subrasante con cal y diseño de pavimento rígido, se espera que durante la etapa de implementación del proyecto se presenten los siguientes escenarios favorables que detallamos a continuación:

Primero, el incremento de la trabajabilidad del suelo de fundación que su vez impacta en la reducción de los tiempos de ejecución del proyecto.

Segundo, el incremento de la vida útil de la vía, buscando así la reducción de los costos de mantenimiento periódicos.

Tercero, la mejora de la capacidad del pavimento en absorber las cargas dinámicas producidas por los vehículos. Esto tomando en cuenta el tránsito futuro que podría generarse durante la vida útil del proyecto.

Adicionalmente, se debe tomar en cuenta que los bofedales son suelos saturados expuestos a un nivel freático de 0.5 m con respecto al nivel del terreno natural. Esta situación particular puede perjudicar la calidad de la subrasante estabilizada. Por un lado, existe el riesgo de la contaminación de las capas superiores del pavimento rígido y por otro se puede afectar la capacidad de soporte estimada en el diseño del pavimento rígido. Bajo este contexto se plantea que esta propuesta deberá estar acompañada de:

Primero, un sistema de drenaje superficial que contempla el uso de cunetas a los márgenes de la rasante para derivar el agua superficial producto de las lluvias.

Segundo, un drenaje interno compuesto por una capa adicional sobre la subrasante, de material de over de 4" y un subdren longitudinal con tubería colectora con la finalidad de abatir el nivel freático.

V. CONCLUSIONES

De los ensayos realizados a la muestra extraída de un bofedal del tramo I del proyecto Mejoramiento de la carretera Oyón-Ambo se concluye, que es una arcilla de alta plasticidad ($I_p > 10$) y alto contenido orgánico ($CMO = 4.8\%$). La dosificación de cal en este tipo de suelos es alta debido a la dificultad de la mezcla para alcanzar el PH de 12.4. En esta investigación el porcentaje de cal más adecuado es de 10% en peso seco.

En base a la figura 5 se puede apreciar incrementos de 5 y 7 veces la capacidad portante inicial del suelo. Validando así la hipótesis inicial de la investigación. Incluso cuando el PH de la mezcla suelo cal no ha sido el recomendado por el manual de Lime ($PH = 12.4$). Estos incrementos en la capacidad portante del suelo hacen que la subrasante sea excelente para el proyecto, según la clasificación vigente del Manual de Suelos Geología y Pavimentos del Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú.

Los valores CBR de la mezcla suelo-cal obtenidos en esta investigación podrán servir como parámetro de comparación para estabilizar suelos con características y ecosistemas similares. La aceptabilidad o rechazo de estos resultados dependerá de las especificaciones de cada tipo de proyecto.

De acuerdo a lo mencionado en la figura 1, la estabilización con cal es una actividad que se desarrolla antes del diseño del diseño de un pavimento rígido. Para poder estimar el aporte del suelo mejorado se realizó el ensayo del CBR, el cual es un dato requerido para el cálculo del módulo de reacción de la subrasante (K). Con este dato y través del uso de la ecuación general bajo los conceptos y parámetros de entrada definidos por AASHTO 93, se pudo obtener un espesor de 15 cm de losa de concreto. Este último resultado podría ser modificado ya que la AASHTO 93 no contempla factores importantes como el clima, erosión del suelo o algún agente externo dentro del diseño por lo que lo convierte en un diseño conservador.

REFERENCIAS

- [1] R. Moreno, H. Montoya, "Comportamiento de suelos residuales de diorita estabilizados con cal y su evolución en el tiempo", *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, vol. 4, núm. 6, enero-junio, 2005, pp. 111-122.
- [2] F. Elizondo, A. Navas, "Efectos de la cal en la estabilización de subrasantes", San Jose, Costa Rica, pp. 93-108, 2010.
- [3] S. Tampier, H. Echevarría, "Estabilización química de suelos: aplicaciones en la construcción de estructuras de pavimentos", *Revista de ingeniería de construcción [artículo de revista]* No. 6, enero-junio, 1989, pp. 53-78.
- [4] M. Mateos, "Estudios sobre suelo-cal", *Revista de Obras Publicas*, vol. 114, tomo I, 1966, pp. 43-46.
- [5] C. Hidalgo, C. Pandales, "Comportamiento de una pista experimental de pavimento flexible con base estabilizada con cal", *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, vol. 9, No. 16, enero-junio, 2010, pp. 37-47.
- [6] L. Gomez, W. Ferney, "Variación de las propiedades mecánicas de suelos arcillosos compresibles estabilizados con material cementante", *Revista Tecnura*, 20 (Edición especial), 2016, 95-107.
- [7] G. Thenoux, R. Gaete, "Análisis mecanística de estructuras de pavimentos utilizadas en Chile diseñadas por el método AASHTO-93", *Revista de ingeniería de construcción [artículo de revista]*, No. 19, enero-junio, 1999, p. 36-43.
- [8] Roberto de Araujo, Paulo "Evaluación de la eficiencia de pavimentos permeables en la reducción de cubo superficial", *UFRGS* 2, junio 2015.
- [9] American Association of State Highway and Transportation Officials. "Guía AASHTO para el Diseño de estructuras de Pavimentos", Washington. Obtenido de <https://es.scribd.com/doc/126459232/Guia-AASHTO-93-version-en-espanol>, 1993.
- [10] M. Young, *The Technical Writer's Handbook*, Mill Valley, CA: University Science, 1989.