

# Estabilización de suelos arcillosos con cal y ceniza volante para el tratamiento de la subrasante para tramo carretero Alegría - Barranca - Distrito 6 de la ciudad de Sucre

Chicchí Callamullo Jesús Eliezer<sup>a</sup>, Llave Gudiño O.M.<sup>b</sup>

a Ingeniero Civil de la Facultad de Ingeniería Civil (USFX), Destacamento 317, Ex Campus REFISUR, 573, Sucre, Bolivia. E-mail: eliezer.chicchí.c@gmail.com

b Ingeniero Civil de la Facultad de Ingeniería Civil (USFX).

## RESUMEN

El propósito de estabilizar un suelo es mejorar sus propiedades físicas, mecánicas con el fin de obtener un material de fundación satisfactorio, ya que en muchas ocasiones los suelos no presentan las mejores características para ser usados en los diferentes proyectos de ingeniería, ya que presentan una resistencia deficiente, sufren deformaciones y a largo plazo se deterioran de manera negativa a causa de los agentes atmosféricos, por esta razón es necesario realizar ciertas adecuaciones o procesos que permitan mejorar estas características y volver aptos para su uso, así evitar transporte de material adicional que aumenta los costos de las obras y el daño ambiental producto de la explotación de este. El objetivo de esta investigación se realizó con el fin de buscar la mejor alternativa de estabilización de suelos, incorporando diferentes porcentajes de cal y cenizas de carbón para mejorar las propiedades físicas y mecánicas del suelo, de acuerdo a los estudios de suelos realizados en la subrasante, corresponde a un suelo arcilloso tipo A-6 (7), fue por ello que se procedió a una estabilización química añadiendo en diferentes porcentajes de 2%, 4% y 6% de cal hidratada, 15%, 20% y 25% de cenizas de carbón, de los cuales se determina el porcentaje óptimo del estabilizante y por consiguiente mejorar la capacidad de soporte de la subrasante.

**Palabras clave:** Estabilización, Diseño de mezcla suelo estabilizante, Suelo-cal, Suelo- cenizas de carbón.

## ABSTRACT

The purpose of stabilizing a soil is to improve its physical and mechanical properties in order to obtain a satisfactory foundation material, since on many occasions soils do not have the best characteristics to be used in different engineering projects, since they present a poor resistance, they suffer deformations and in the long term they deteriorate negatively due to atmospheric agents, for this reason it is necessary to carry out certain adaptations or processes that allow improving these characteristics and making them suitable for use, thus avoiding transport of additional material that increases the costs of the works and the environmental damage resulting from its exploitation. The objective of this research was carried out in order to find the best alternative for soil stabilization, incorporating different percentages of lime and coal ash to improve the physical and mechanical properties of the soil, according to the soil studies carried out in the subgrade. , corresponds to a clayey soil type A-6 (7), which is why a chemical stabilization was carried out, adding in different percentages of 2%, 4% and 6% of hydrated lime, 15%, 20% and 25% of coal ashes, from which the optimum percentage of the stabilizer is determined and therefore improve the support capacity of the subgrade.

**Key words:** Stabilization, Stabilizing soil mix design, Soil-lime, Soil-coal ash.

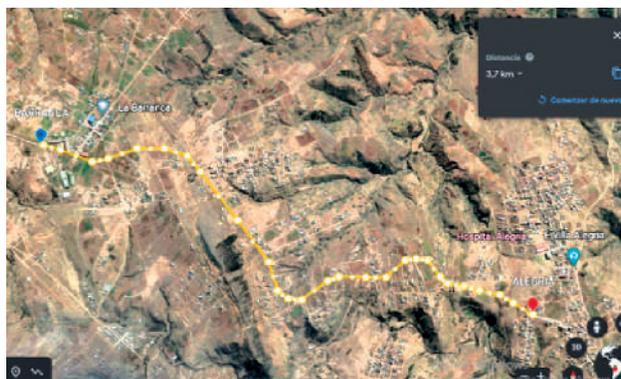
## INTRODUCCIÓN

La estabilización química consiste en alterar las propiedades del suelo usando un cierto aditivo, el cual, mezclado con el suelo, normalmente produce un cambio en las propiedades moleculares superficiales de los granos del suelo y en algunos casos, pega los granos entre sí de modo de producir un incremento en su resistencia.

El principio de estos tratamientos, se basa en la alteración del comportamiento de las arcillas mediante fenómenos de intercambio iónico y de modificación física de la estructura de sus partículas.

### Zona de estudio

El tramo Alegría - Barranca se encuentra en el distrito 6 de la ciudad de Sucre, con coordenadas geográficas 18°59'34,8468" S, 65°16'32,7396" W y 18°59'01,8672" S, 65°18'12,996" W respectivamente.



**Figura 1:** Vista satelital del tramo Alegría - Barranca

**Fuente:** <https://earth.google.com/web/@-18.9824597,-65.30223524,2948.37106612a,1970.29360415d,30y,0h,-0t,0r>

## MATERIALES Y MÉTODOS

En esta etapa se recopiló y se seleccionó toda la documentación existente concerniente a las características y datos de la comunidad Alegría-Barranca, procesos de estabilización y normativas para la realización de los estudios descritos. Dicha documentación sirvió de base para organizar el trabajo de campo y laboratorio.

### Suelo

En general los resultados más espectaculares se han obtenido en las modificaciones de suelos altamente plásticos es decir suelos arcillosos, en este sentido, se debe realizar ensayos de identificación de suelos.

El criterio de selección de la Aashto establece:

DESCRIPCIÓN	REQUERIMIENTOS A CUMPLIR
Porcentaje que pasa el tamiz N° 200	Mayor a 25 %
IP	IP > 10 %
Contenido de materia orgánica	Menor a 2 %

**Tabla 1:** Requisitos exigidos al suelo

**Fuente:** Manual de diseño de conservación vial ABC

El primer paso es identificar las principales características de comportamiento de cada uno de los materiales del subsuelo, tales como, su plasticidad, permeabilidad, granulometría, porosidad, resistencia y entre otros.

Las muestras fueron extraídas cerca de 1,50 m a 2 m de profundidad con la finalidad de apreciar el perfil estratigráfico del suelo y así mismo evitar que el material no contenga material orgánico, tal como se aprecia en las siguientes figuras 2.



a). Muestra 1



b). Muestra 2

**Figura 2:** Perfil estratigráfico de la muestra. a) muestra 1, b) muestra 2

Se realizaron 3 puntos de muestreo, con un área que garanticen sacar el material libremente, de estas 2 constan de una profundidad de 1,5 a 2 metros y la tercera a una profundidad de 1 metro. El objetivo de la tercera fue constatar que el suelo en estudio poseía las mismas características físicas que las muestras de mayor profundidad.

M	h (m)	COORDENADAS	
		S	W
1	1,5	18°59'31,8768"	65°17'23,3484"
2	1,8	18°59'17,4804"	65°17'33,5508"
3	1	18°59'10,5864"	65°17'39,0876"

**Tabla 2:** Coordenadas geográficas de las muestras obtenidas.

Se extrajo aproximadamente 400 kg de muestra por punto, el material extraído se colocó en sacos de 50 kg, posteriormente se trasladó al laboratorio de la facultad de Ingeniería Civil, para ser analizado y realizar los respectivos ensayos de laboratorio, con el fin de conocer sus características físicas y mecánicas del suelo.

### Cal

Para evitar malos resultados en la estabilización se considera una cal de buena calidad, con alto porcentaje de cal libre que este mayor a 90% de óxido de calcio.

La incorporación de la cal mejora en muchos casos las características plásticas de los suelos, haciéndolos más friables y por, sobre todo, aumentando considerablemente el valor soporte, acción que se ha demostrado continua en función del tiempo. Así mismo la cal elimina la susceptibilidad al agua de los suelos cohesivos, reduciendo la tendencia al hinchamiento de los mismos.

La cantidad de cal varía en función de la necesidad que se tenga y de las propiedades del suelo utilizado en la estabilización. Generalmente los porcentajes de cal utilizados en una estabilización varían de un 2 a 6 % en peso, la dosificación depende del tipo de arcilla, este porcentaje debe determinarse en el laboratorio.

La muestra del hidróxido de calcio que se utilizó para la realización de las pruebas de estabilización, fue comprada por bolsas de 20 kg de la fábrica San Pablo una de las fábricas que se dedica a esta actividad en la ciudad de Sucre, ubicada en la zona de Fancesa cuyo material prima proviene de la cantera Esmeralda a 1 hora con 30 minutos de la ciudad de Sucre.

Características físico-químicas:

CaO: 76,8% - 80%  
Ca(OH)2: 80% - 90%



**Figura 3:** Piedra caliza de la cantera Esmeralda

### Ceniza volante

La composición química y física de las cenizas es compleja y muy variada, donde sus componentes y propiedades producen efectos en las mezclas de concreto. Los países

desarrollados han logrado establecer normas; sin embargo, estas son solamente guías para determinar la calidad de las cenizas.

Con los requerimientos físicos y químicos de las cenizas, establecidos por las normas A.S.T.M C 618 y UNE 83 - 415, no es suficiente para que la ceniza volante analizada, cumpla con las ventajas en la aplicación en las obras ingenieriles.

COMPONENTE		CLASE F	CLASE C
SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%Mín	70	50
SO <sub>3</sub>	%Máx	5	5
Contenido de humedad	%Máx	3	3
Perdida al fuego	%Máx	12	6
MgO	%Máx	5	5
Alcalis, como Na <sub>2</sub> O	%Máx	1,5	1,5

**Tabla 3:** Requisitos químicos para las cenizas volantes según la norma ASTM C618.

**Fuente:** Luz Elena Santaella Valencia, Caracterización física y química y mineralogía de las cenizas volantes

El éxito de la ceniza volante depende de la composición química; debe contener altas proporciones de sílice, aluminio y hierro, elevada finura, mínimo de contenido de carbón, bajo porcentaje de pérdidas por ignición y un elevado peso específico.

La recolección de la muestra se realizó en las industrias ladrilleras, ubicada en la región de Campanero Sur, ciudad de Santa Cruz, a 510 Km de la ciudad de Sucre, En la figura 4 se puede observar la vista de la planta y zona de obtención de ceniza volante.



**Figura 4:** Ceniza volante de carbón

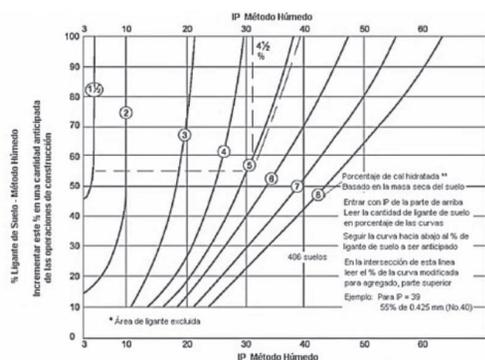
### Agua

El agua utilizada en la mezcla suelo – cal debe ser libre de aceites, ácidos, azúcares, materia orgánica y cualquier sustancia perjudicial, en conclusión, se debe utilizar agua potable.

### Fórmula de trabajo

La fórmula de trabajo se obtiene a partir del análisis de diferentes parámetros del suelo a estabilizar mediante una serie de ensayos, los cuales serán determinados bajo las especificaciones de las normas ASTM y AASHTO respectivas para cada uno. Los suelos serán analizados con diferentes porcentajes de cal a fin de encontrar un porcentaje óptimo de la misma, para el suelo en particular.

### Método gráfico AASHTO T220 (Determinación de la resistencia mezcla suelo-cal)



**Figura 5:** Ábaco de correlación para diferentes porcentajes de cal para estabilización de subrasante y bases.

**Fuente:** Manual de Aashto

El ábaco no es aplicable para suelos con menos del 10% que pasa el tamiz N°40 y material no cohesivo (IP menor a 3).

Porcentajes de cal relativamente puras, usualmente 90% o más de hidróxido de calcio y/o Mg y 85% o más que pasa el tamiz N°200.

Es una gráfica que correlaciona el índice plástico con el porcentaje ligante del suelo, esto se obtiene sabiendo el porcentaje que pasa la malla N°40. En la figura 5 hay diferentes curvas el cual representa los porcentajes de cal y la forma de usar es muy sencilla:

- Entrar por el eje superior con el índice plástico. Bajar de manera paralela a la curva más cercana.
- Con él % que pasa la malla 40 entrar por el eje de la izquierda, trazando una recta horizontal hasta intersectar a la curva del índice plástico.
- En el punto de intersección subir una recta de manera vertical hasta llegar al eje superior.
- La curva inmediata a la derecha será la del porcentaje óptimo de cal.

Sin embargo, se debe tener algunas precauciones, este método son correlaciones fue hecho de manera empírica en base a muchos suelos que se estudiaron en los EEUU.

Otro factor es que se hizo con cal hidratada con una calidad del 90% de contenido calcio.

### Análisis y diseño de mezclas suelo - cal y cenizas de carbón.

La metodología adoptada para la presente investigación es la propuesta por la Junta De Investigaciones del Transporte, que proporciona una secuencia de actividades para la evaluación de estabilizantes químicos usados en la estabilización de suelos. Los ensayos que se consideran son:

- Ensayos preliminares
- Ensayos de compactación
- Ensayos de resistencia

### Ensayos preliminares

Estas pruebas están destinadas a determinar las características físicas y mecánicas del suelo. Para poder determinar las características físicas se realizan ensayos de Granulometría, Límites de Atterberg y otros, los cuales nos permiten clasificar el suelo dentro del sistema AASHTO.

Paralelamente se fue realizando pruebas para determinar las propiedades físicas y químicas del cal hidratada y cenizas de carbón, para determinar la aptitud del mismo. Se deberá determinar el estabilizante más conveniente para la aplicación en el trabajo de investigación.

### Características físico - químicas de la subrasante

El suelo fue analizado en el laboratorio de medio ambiente y recursos naturales del Instituto Tecnológico de Alimentos (I.T.A.), con el propósito de identificar en específico el tipo de suelo en estudio.

PARÁMETROS	UD	RESULTADOS
pH	-	8,7
Materia orgánica	%	0,06
Aluminio	mg/kg	24895

**Tabla 4:** Composición química del suelo (M-1)

**Fuente:** I.T.A. (Instituto de Tecnología de Alimentos)

### Determinación del porcentaje inicial probable óptimo de cal

El suelo será analizado con diferentes porcentajes de cal a fin de encontrar un porcentaje óptimo de la misma, para el suelo en particular.

Para esto se hace uso del ábaco (Método gráfico de la AASHTO) tal como se muestra en la figura 5, una vez realizado la clasificación de suelos se tiene un  $IP = 13,9\%$  y porcentaje que pasa la malla N°40 =  $88,36\%$ , por lo que se puede observar en el ábaco un valor inicial de  $2,40\%$  de cal para el suelo en estudio.

### Ensayos de compactación

Para los ensayos de compactación suelo – cal se determinó un porcentaje inicial de cal, en base a los resultados de granulometría y límites del suelo natural, según el método gráfico de la AASHTO T-220 (Determinación de la resistencia mezcla suelo-cal) dio un porcentaje inicial de  $2,40\%$  de cal, para el presente estudio se analizó para diferentes porcentajes de  $2\%$ ,  $4\%$  y  $6\%$  de cal.

Altos niveles de cenizas de carbón debido que no se controla la temperatura de incineración de la madera.

### Ensayos de resistencia

La finalidad de este ensayo es determinar la capacidad soporte de los suelos compactados en laboratorios con una humedad óptima y niveles de compactación variables. El CBR es una medida comparativa de la resistencia del suelo en condiciones controladas de densidad y humedad, vamos a utilizar el material que pase por el tamiz N°4.

### RESULTADOS

#### Resultados de los ensayos del material en estado natural.

Se analizó el suelo más desfavorable correspondiente a la muestra 1 de tipo A-6(7).

### Análisis Granulométrico por Tamizado.

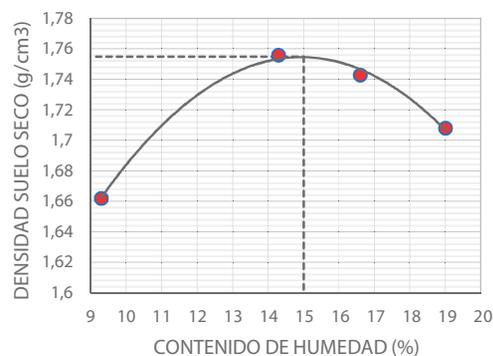
RESUMEN GRANULOMÉTRICO		
Gravas	%	6,14
Arenas	%	27,07
Arcillas y limos	%	66,79

**Tabla 5:** Resultados del Ensayo de Análisis Granulométrico.

### Ensayo Próctor Modificado T-180

PROCTOR MODIFICADO	
MATERIAL / MUESTRA	SUELO - 1
ÓPTIMO CONT. DE HUMEDAD (%)	15
MÁXIMA DENSIDAD SECA (gr/cm <sup>3</sup> )	1,755

**Tabla 6:** Resultados del ensayo Próctor Modificado del suelo natural.

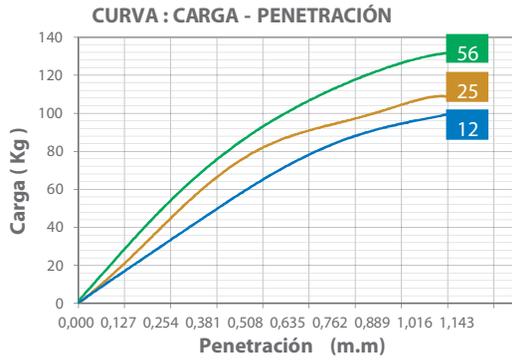


**Figura 6:** Curva de Compactación.

### Ensayo de CBR

	C. B. R.	
	0,1"	0,2"
D. Máx. 100%	3,63	4,30
D. Máx. 95%	3,41	4,12
D. Máx. 90%	3,21	3,94
% Exp.	10,44	

**Tabla 7:** Resultados de CBR

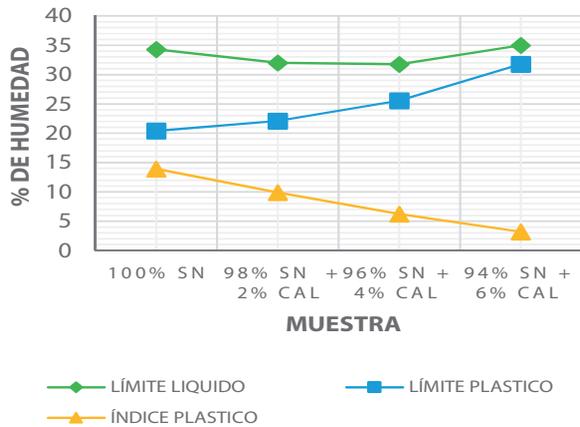


**Figura 7:** Curva CBR carga – penetración suelo natural resultados de la estabilización con cal.

**Límites de consistencia**

MATERIAL	LL(%)	LP(%)	IP(%)
100% S.N.	34,28	20,43	13,90
98% S.N. + 2% Cal	32,03	22,08	9,90
96% S.N. + 4% Cal	31,76	25,56	6,20
94% S.N. + 6% Cal	35,01	31,78	3,20

**Tabla 8:** Límites de consistencia



**Figura 8:** Variación de los límites de Atterberg con el contenido de cal

Con los diferentes porcentajes de cal observamos cómo se reduce la región plástica, es decir modificamos el comportamiento del suelo, además al bajar el contenido de agua este pasa bruscamente de un estado plástico en otras palabras deformable y viscoso a un estado sólido más rígido y friable.

Esta inmediata reducción del contenido de agua se debe primero porque añadimos un polvo seco (cal viva o cal apagada), provocando un intercambio iónico de los cationes que estabilizan la estructura laminar de las arcillas.

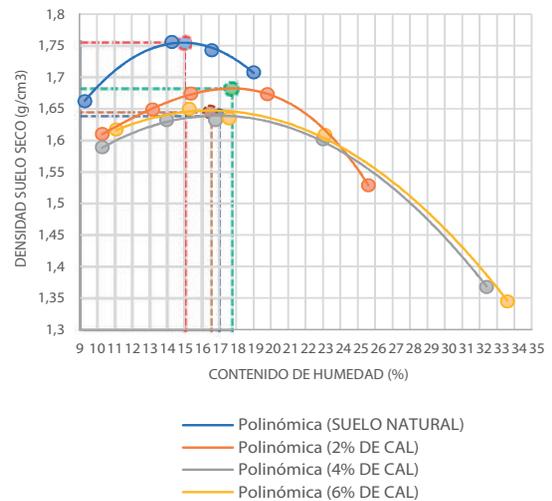
**Compactación con cal**

En las curvas de compactación se observa cómo se modifican la densidad seca máxima una vez tratados con cal, este va ser menor es decir se sitúa debajo y a la derecha del suelo natural y también la humedad óptima para compactar será de un 2 a 3% mayor que la del suelo natural.

Esta ligera reducción de la densidad no debe interpretarse como un inconveniente, por el contrario, las ventajas son evidentes, al ser más fácil alcanzar la densidad máxima y permitir trabajar con contenidos más elevados de humedad del suelo.

PRÓCTOR MODIFICADO				
Material	100% SN	98% SN + 2% Cal	96% SN + 4% Cal	94% SN + 6% Cal
Óptimo contenido de humedad (%)	15	17,7	17	16,5
Máxima densidad seca (g/cm3)	1,755	1,682	1,639	1,645

**Tabla 9:** Ensayo Próctor Modificado.



**Figura 9:** Curvas de compactación suelo – cal

**Ensayo de CBR**

En las curvas de CBR observamos cómo se va incrementando nuestra capacidad de soporte, esto es gracias a la reacción química entre el suelo y la cal reduciendo rápidamente la plasticidad del suelo, su hinchamiento, mejorando su compactabilidad y aumentando su capacidad de soporte.

MATERIAL	CBR al 95% de M.D.S. (%)	CBR al 100% de M.D.S. (%)
	0,2"	0,2"
100% SN	4,12	4,3
98% S.N. + 2% Cal	65,86	88,51
96% S.N. + 4% Cal	78,25	93,16
94% S.N. + 6% Cal	91,22	98,56

Tabla 10: Resultados del ensayo de CBR suelo – cal



Figura 10: Incremento del valor de soporte CBR para densidad máxima al 95% resultados de la estabilización con cenizas de carbón

### Límites de consistencia

Con los diferentes porcentajes de cenizas de carbón observamos cómo se reduce la región plástica, es decir modificamos el comportamiento del suelo, además al bajar el contenido de agua este suelo pierde su carácter pegajoso y pasa a tener un aspecto granular.

MATERIAL / MUESTRA	LL (%)	LP (%)	IP (%)
100% SN	34,28	20,43	13,9
85% S.N. + 15% CC	35,26	23,91	11,4
80% S.N. + 20% CC	34,66	24,82	9,8
75% S.N. + 25% CC	32,69	26,11	6,6

Tabla 11: Límites de consistencia

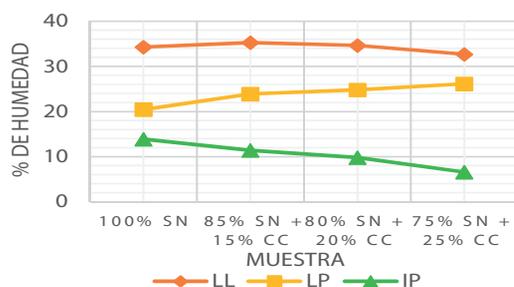


Figura 11: Variación de los límites de Atterberg con el contenido de cenizas de carbón Atterberg con el contenido de cenizas de carbón

### Compactación con cenizas de carbón

En las curvas de compactación también vemos como se modifican la densidad seca máxima una vez tratados con cenizas de carbón este va ser menor es decir se sitúa debajo y a la derecha del suelo natural, este fenómeno ocurre por el carbón aportado como sustituto al suelo ya que tiene propiedades de absorber la humedad.

PRÓCTOR MODIFICADO				
MATERIAL / MUESTRA	100% Suelo Natural	85% Suelo Natural + 15% Ceniza de Carbón	80% Suelo Natural + 20% Ceniza de Carbón	75% Suelo Natural + 25% Ceniza de Carbón
ÓPTIMO CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	15	15,5	15,55	15
MÁXIMA DENSIDAD SECA (g/cm3)	1,755	1,661	1,651	1,665

Tabla 12: Ensayo Próctor Modificado

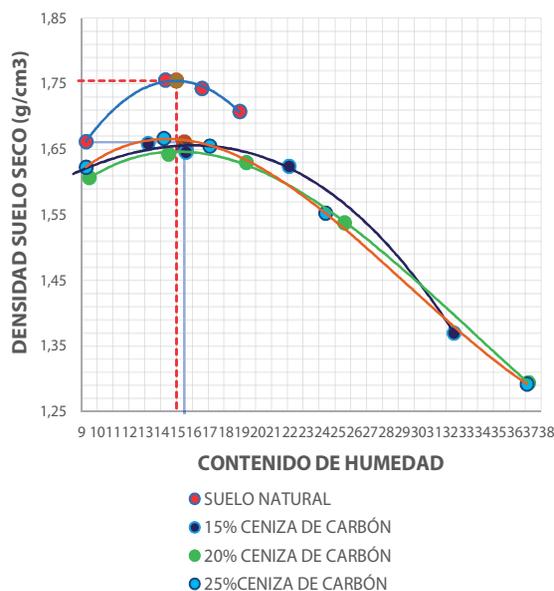


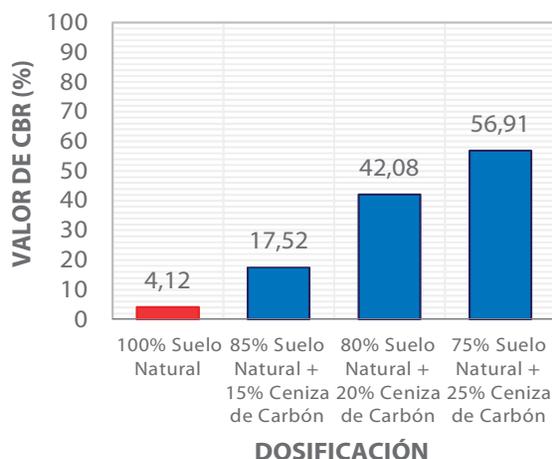
Figura 12: Curva de compactación suelo – cenizas de carbón.

### Ensayo de CBR

En las curvas de CBR observamos cómo se va incrementando nuestra capacidad de soporte, esto es gracias a la reacción química entre el suelo y la ceniza de carbón reduciendo la plasticidad del suelo, su hinchamiento, mejorando su compactación y aumentando su capacidad de soporte.

MATERIAL / MUESTRA	CBR al 95% de M.D.S. (%)	CBR al 100% de M.D.S. (%)
	0,2"	0,2"
100% S.N.	4,12	4,3
85% S.N.+ 15% CC	17,52	21,97
80% S.N.+ 20% CC	42,08	71,34
75% S.N.+ 25% CC	56,91	68,57

**Tabla 13:** Resultados del ensayo de CBR suelo – cenizas de carbón



**Figura 13:** Aumento del valor de soporte CBR para densidad máxima al 95%

**Criterios de selección del porcentaje óptimo del estabilizante según el manual de la ABC que está en base a la Aashto.**

El manual de la ABC nos da algunos criterios que se deben considerar:

Tomando como referencia para la conformación de la **capa subbase.**

Criterios de selección para porcentaje óptimo de cal			
Parámetros	Norma ABC	Suelo estabilizado	Suelo natural
Cbr	Cbr ≥ 40%	78,25	4,12%
% Expansión máxima	Expansión máx.= 2%	0,33%	10,44%
Índice de plasticidad	IP ≤ 6% (máx. 8%)*	6,20%	13,90%
Límite liquido	LL > 25%	31,76%	34,28%

\*Puede permitirse IP máx. 8% siempre que el equivalente de arena sea mayor a 30%.

**Tabla 14:** Criterio de selección del porcentaje óptimo de cal, según capa sub base.

**Fuente:** Manual de la ABC

Tomando como referencia para la conformación de la **capa base.**

Criterios de selección para porcentaje óptimo de cal			
Parámetros	Norma ABC	Suelo estabilizado	Suelo natural
Cbr (100% d.S.M.)	Cbr ≥ 90%	93,16%	4,12%
% Expansión máxima	Expansión máx.= 0,5%	0,33%	10,44%
Índice de plasticidad	Ip ≤ 6% (máx. 8%)*	6,20%	13,90%
Límite liquido	LI ≤ 25%	31,76%	34,28%

\*Puede permitirse IP máx. 8% siempre que el equivalente de arena sea mayor a 30%.

**Tabla 15:** Criterio de selección del porcentaje óptimo de cal, según capa base.

**Fuente:** Manual de la ABC

Como nuestra subrasante estabilizada es excelente para 4% de cal, presenta un CBR=78,25% con Mr=41612Psi. Entonces se podrá prescindirse de la capa sub base, es decir nuestra subrasante estabilizado se comportará como una capa base, pero se debe colocar una capa base ya que es la capa que recibe la mayor parte de los esfuerzos producidos por los vehículos, esta capa debe contener un material pétreo seleccionado preferentemente triturado, esto para evitar si en caso la subrasante estabilizada presente fisuras y esto refleje a la carpeta asfáltica.

Los esfuerzos debido al tráfico vehicular deben diluirse antes de la subrasante natural, sino ocurre esto significa que el diseño de las capas estructurales no es lo correcto, por lo que se debe volver a realizar el diseño.

**CONCLUSIONES**

Según la clasificación de suelos, mediante el sistema AASHTO, el suelo estudiado de la subrasante corresponde a un **Suelo Arcilloso** tipo A-6(7), con índice de plasticidad **IP de 13,90%**, tiene una baja capacidad de

soporte de **CBR=4,12%** resultando ser una **subrasante pobre**. Fue entonces que se procedió a estabilizar químicamente el suelo para mejorar sus propiedades físicas y mecánicas.

Los **porcentajes óptimos** para la estabilización de suelos con **cal y cenizas de carbón** son de **4% y 20%** respectivamente, con estos porcentajes logramos reducir la plasticidad del suelo natural hasta un 6,20% y 9,80% respectivamente, con esto se disminuye su compresibilidad e hinchamiento del suelo, esto se traduce en evitar los cambios de volumen cuando se tiene presencia de agua.

Con los porcentajes óptimos de cal y cenizas de carbón **incrementamos** considerablemente la **capacidad de soporte del suelo (CBR) hasta 78,25% y 42,08%** respectivamente de los agentes estabilizantes, con estos porcentajes logramos obtener una **subrasante excelente** de acuerdo a las especificaciones del manual de la Aashto y Manual de Transporte de Carreteras, entonces podemos decir que el suelo de **LA SUBRASANTE QUEDA ESTABILIZADA**.

### Ensayos en laboratorio



Figura 14: Ensayo de Límites de Atterberg



Figura 15: Dosificación suelo – cal



Figura 16: Dosificación suelo – cenizas de carbón



Figura 17: Ensayo de compactación T-180



Figura 18: Muestras secado en horno



Figura 19: Medición de la expansión



**Figura 20:** Ensayo de penetración CBR

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABC, *Manual de diseño de conservación vial*. Bolivia.
- Carpio, F. M. G., (2018). *Análisis experimental de suelos estabilizados con ceniza volante, cemento y cal para subrasante mejorada de pavimentos en la ciudad de Puno*. Puno-Perú.
- Castelló, J. D. B., (2012). *El tratamiento de Suelos Arcillosos con Cal*.
- Das, B. M., (2012). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica*. México.
- Das, B. M., (2014). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica*. México.
- Fonseca, A. M., (2002). *Ingeniería de Pavimentos para Carreteras*. 2da Edición ed. Colombia: Stella Valbuena de Fierro.
- Fernández R., & M. López, Díaz J. *Manual de estabilización de suelos con cemento y cal*. Madrid.
- Goñas L. O., (2019). *Estabilización de suelos con cenizas de carbón para uso como subrasante mejorada*, Chachapoyas Perú 2019.
- Gómez, M. G. P., (2018). *Estabilización de un suelo con cal y ceniza volante*. Bogotá.
- Heber Manrique Huevo Maldonado, A. C. O. M., (2009). *Guía básica para estabilización de suelos con la cal en caminos de baja intensidad vehicular en el Salvador*. San Salvador:
- Humpiri, Y. J. H., (2017). *Mejoramiento de suelo arcilloso con ceniza volante y cal para uso como pavimento a nivel de afirmado en la carretera desvío Huanané Chupa-Puno*. Perú.
- Navarro, G. J. A. & Sandino, A. E. D., (2015). *Estabilización de suelos cohesivos por medio de Cal en las Vías de la comunidad de San Isidro del Pegón, municipio Potosí - Rivas*.
- Sumarriva, J. J. L., (2018). *Estabilización de suelos arcillosos con cal para el tratamiento de la subrasante en las calles de la urbanización San Luis de la ciudad de Abancay*. Perú.
- Villalaz, C. C., (2004). *Mecánica de Suelos y Cimentaciones*. 5a Edición ed. México: Limusa.



