

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

Expansión es el incremento de volumen de una masa de suelo, como consecuencia de la generación de una tensión de hinchamiento vertical en el seno de su estructura interna. El agente causante que da lugar a este proceso es el agua.

Los cambios de volumen ocasionan problemas significativos y de alto costo económico, en estructuras de pavimentos y en fundación superficiales como viviendas. Ya que estratos de arcilla blanda saturada, a menudo se encuentran a poca profundidad bajo el subsuelo, provocando grandes cambios de volumen.

Se estima que las pérdidas anuales a nivel mundial por daños en las construcciones sobre suelos expansivos superan los dos billones de dólares.

Los efectos provocados por estos suelos asociados a sus cambios volumétricos son conocidos en el sector de la construcción desde tiempos remotos, por lo que el tratamiento de estos suelos, requiere un análisis para tratar de reducir los efectos de la expansión mediante productos o técnicas que logren una mejor estabilización ante los cambios de humedad.

Por estas razones, desde el punto de vista ingenieril es preciso estudiar la expansión de las arcillas, cómo minimizar los riesgos destructivos de estos suelos, ya que en el departamento de Tarija, al igual que en muchas ciudades, abundan los suelos arcillosos.

Con un tratamiento apropiado se pueden reducir o estabilizar los cambios de volumen no deseados, para lo cual se presenta como solución la estabilización, para modificar las propiedades expansivas de las arcillas, utilizando la cal y el cemento como agentes estabilizantes.

El aporte a la ingeniería con la realización de este trabajo, será definir un estabilizante adecuado para controlar la expansión de arcillas. De esta manera se podrá prevenir rajaduras en las infraestructuras, provocados por los cambios de volumen de las arcillas, disminuyendo así los efectos destructivos de la expansión, y limitando su influencia sobre las obras proyectadas. También se determinara cómo influye la cal y el cemento en la expansión de arcillas al ser tratados.

Marco conceptual.

Se propone el estudio y análisis del comportamiento de la expansión de suelos arcillosos, mediante la estabilización con cal y cemento. Ya que estos productos son los más indicados para tratar suelos arcillosos, son fáciles de conseguir en nuestro medio y los ensayos a realizar son de fácil ejecución. Factores que hacen viable su estudio.

Marco Normativo.

Los ensayos de caracterización de suelos realizados en el presente documento, están basados en el marco normativo de la ABC (administradora boliviana de carreteras), al igual que todos los ensayos de estudio.

1.2 Justificación

Las arcillas expansivas, sin un control adecuado, son altamente destructivas para las obras construidas sobre ellas, por lo que estos materiales se constituyen como desechos por no cumplir con características necesarias para su uso en la construcción.

En el presente trabajo se pretende proveer de una alternativa eficaz para el control de los cambios volumétricos de arcillas expansivas, mediante el tratamiento del suelo con agentes estabilizantes, ya que estos métodos son muy utilizados en nuestro medio.

El estudio adecuado de las características expansivas de las arcillas, contribuye un punto importante para poder garantizar la vida útil de una obra, ya que dichos suelos

pueden presentar grandes cambios de volumen con resultados desastrosos para todo tipo de obras civiles.

El presente trabajo de investigación, aporta con el desarrollo adecuado de las infraestructuras, mediante un análisis del comportamiento de la expansión en las arcillas, ante un tratamiento con estabilizantes como la cal y el cemento, para seleccionar el agente más adecuado.

1.3 Identificación del problema

Ante la presencia de suelos expansivos, no se cuenta con información precisa, que permita tratar adecuadamente el fenómeno de la expansión que es tan destructivo. Por lo que en el presente trabajo se determinará el agente estabilizante más adecuado para aplicar a la arcilla expansiva, a objeto de controlar de mejor manera sus cambios volumétricos y de esta forma, reducir los daños que estos suelos puedan causar a las construcciones ante la presencia del agua.

El problema fundamental que se plantea, es determinar cuál es el agente estabilizante más adecuado, para reducir la expansión de la arcilla expansiva, y cómo varía la expansión ante la aplicación de estabilizantes.

1.4 Objetivos

El presente trabajo busca el máximo aprovechamiento del terreno en presencia de arcillas expansivas, a través de un “análisis del comportamiento de la expansión mediante métodos de estabilización de suelos” y los objetivos buscados son los que se mencionan a continuación:

1.4.1 Objetivo general

Analizar la variación de la expansión de la arcilla, mediante la aplicación de agentes estabilizantes (cal y cemento), con el objetivo de reducir los efectos de hinchamiento de la arcilla. Mediante ensayos de laboratorio y el uso de una ecuaciones empírica.

1.4.2 Objetivos específicos

- Determinar el potencial de expansión de la arcilla a través una ecuación empírica y del ensayo de expansión unidimensional.
- Estabilizar químicamente la arcilla con cal y cemento.
- Evaluar la variación de la expansión del suelo puro y de las mezclas suelo-estabilizante.
- Determinar el agente adecuado para reducir de mejor manera la expansión de la arcilla.

1.5 Hipótesis

Preparando muestras de suelo-cal y suelo-cemento, dosificadas con diferentes porcentajes y sometiendo las muestras a ensayos de laboratorio, se puede realizar un análisis del comportamiento que tiene la expansión de la arcilla a través del potencial de expansión.

Para determinar el potencial de expansión puede aplicarse una ecuación empírica y/o medirse en forma directa mediante un ensayo de expansión unidimensional.

De manera que mediante una comparación de resultados podemos definir el agente estabilizante adecuado y que mejor control ofrece al suelo en estudio.

1.5.1 Definición de variables independientes y dependientes.

Variables independientes

- Estabilización con cal.
- Estabilización con cemento.

Variable dependiente

- Análisis del comportamiento de la expansión.
- Selección del agente estabilizante que mejor efecto tiene sobre la expansión.

Tabla N° 1 *Operacionalización de la variable:*

| VARIABLE NOMINAL | CONCEPTUALIZACIÓN DE LA VARIABLE | DIMENSIÓN | INDICADOR | VALOR ACCIÓN |
|---|--|-----------------|--------------------|--------------------------|
| V1 Estabilización de suelo expansivo con cal | Análisis del comportamiento de la expansión del suelo Estabilizado con cal. | Cal | Caracterización | Finura molido |
| | | | | Granulometría |
| | | | | Peso específico |
| | | Suelo Expansivo | Suelos y geotecnia | Granulometría |
| | | | | Contenido humedad |
| | | | | Límites de consistencia |
| | | | | Peso específico |
| | | | | Compactación T-99 |
| | | Suelo-Cal | Suelos y geotecnia | C. B. R. |
| | | | | Expansión unidimensional |
| | | | | Granulometría |
| | | | | Limites consistencia |
| V2 Estabilización de suelo expansivo con Cemento | Análisis del comportamiento de la expansión del suelo estabilizado con Cemento | Cemento | Caracterización | Peso específico |
| | | | | Finura molido |
| | | | | Granulometría |
| | | Suelo Expansivo | Suelos y geotecnia | Granulometría |
| | | | | Contenido humedad |
| | | | | Limites consistencia |
| | | | | Peso específico |
| | | | | Compactación T-99 |
| | | Suelo-Cemento | Suelos y geotecnia | C. B. R. |
| | | | | Expansión unidimensional |
| | | | | Granulometría |
| | | | | Limites consistencia |
| | | | | Peso específico |
| | | | | Expansión unidimensional |
| | | | | Granulometría |

Fuente: Elaboración propia.

1.6 Alcance de la investigación

Se hace una introducción de los aspectos principales acerca de la importancia del fenómeno de la expansión de suelos arcillosos y la necesidad de un tratamiento adecuado, con la finalidad de minimizar los efectos destructivos de estos suelos sobre aquellas estructuras que sobre ellos se construyen.

Se plantea la estabilización química del suelo para analizar el comportamiento de la expansión. Cal y cemento como agentes estabilizantes, ya que la estabilización química mediante el uso de estos agentes se hace con frecuencia para mejorar las propiedades de suelos expansivos.

Se presentan los conceptos fundamentales utilizados como base para el trabajo realizado, las características físicas necesarias requeridas de los materiales estudiados, los conceptos sobre expansión como propiedad de suelos arcillosos, la mejor opción que se tiene para controlar los cambios volumétricos, los tratamientos con cal, cemento para controlarlos y su aplicación en nuestro medio.

Se describe la ubicación del lugar de estudio, los criterios que se utilizan para la toma de muestras y la realización de los ensayos de caracterización de la misma.

Se llevan a cabo las dosificaciones de la arcilla para realizar los ensayos y preparación de los diferentes especímenes, en seguida se realiza los ensayos de laboratorio necesarios para poder determinar el potencial de expansión del suelo.

Se obtienen los resultados necesarios para conseguir los objetivos planteados, tanto del análisis del suelo estabilizado con cal, como del suelo estabilizado con cemento. Además se hace una evaluación de los resultados obtenidos y se plantea la propuesta definitiva en base a ellos.

Se presentan los resultados obtenidos, a lo largo del desarrollo de la presente investigación, para el análisis del comportamiento de la expansión del suelo tratado, definiendo aquel agente estabilizante capaz de mejorar o reducir de mejor manera los cambios volumétricos del suelo arcilloso. Y finalmente se describen las conclusiones y recomendaciones, obtenidas del análisis del presente trabajo.

1.7 Metodología de estudio

1.7.1 Unidad de estudio

La unidad de estudio del presente trabajo es la expansión de suelos arcillosos.

1.7.2 Población

Los tipos de estabilización son definidos como la población para el muestreo.

Tipos de estabilización:

Estabilización mecánica y física:

- a) Geotextiles
- b) Compactación
- c) Compactación dinámica
- d) Mezclas con otros suelos
- e) Pre consolidación

Estabilización química:

- a) Estabilización con cal
- b) Estabilización con sales
- c) Estabilización con cemento
- d) Estabilización con cenizas volátiles
- e) Estabilización con asfaltos
- f) Estabilización con polímeros
- g) Estabilización con escoria
- h) Estabilización con hule de neumáticos
- i) Estabilización con resinas naturales
- j) Estabilización con aceites de petróleos
- k) Estabilización con ácidos inorgánicos

1.2.3 Selección de las muestras

De la población que tenemos, seleccionamos los métodos de estabilización que se aplican mejor a suelos arcillosos, los que reducen la plasticidad. Además se toma en cuenta la economía de los agentes estabilizadores y la posibilidad de obtenerlo con facilidad en nuestro medio.

El cemento portland como estabilizante disminuye índice de plasticidad de los suelos, brindando estabilidad volumétrica y disminuyendo de esta manera las características expansivas de los suelos.

La cal como estabilizante es indicada ya que al igual que el cemento reduce el índice plástico en las arcillas, reduce las contracciones por cambios de humedad, provocan un efecto cementante mediante reacción química, contribuyendo así a reducir el potencial de expansión de las arcillas.

Por tanto la muestra se ha definido por:

- Estabilización con cal.
- Estabilización con cemento.

Estos agentes estabilizantes son los más adecuados para reducir cambios volumétricos de las arcillas, ya que reducen la plasticidad de los suelos. Por ello se seleccionan como agentes tratantes para reducir la expansión de las arcillas en el presente trabajo.

CAPÍTULO II

EXPANSIÓN Y ESTABILIZACIÓN DE SUELOS

2.1 Suelo

Suelo se describe como una mezcla no cementada de granos minerales, partículas orgánicas, en conjunto con el agua y los espacios vacíos, que se encuentra en la superficie terrestre y sirve como soporte de las obras civiles que construye el hombre.

Los suelos en general pueden ser denominados como gravas, arenas, limos o arcillas, en función al tamaño de las partículas que predominan en él.

2.1.1 Arcillas

Las arcillas constituyen aproximadamente un 70% de la corteza terrestre, presentan una estructura laminar, son plásticos y su resistencia depende tanto del rozamiento interno de sus partículas sólidas como de la fuerza de cohesión de las mismas, por lo que también se denominan suelos cohesivos. Presentan una facilidad para modificar sus propiedades adecuándolas a cualquier aplicación y son geológicamente inestables.

La arcilla se define como partículas microscópicas menores a 0,002 mm en forma de escamas. Están constituidas en su mayoría por silicatos de aluminio hidratado, presentando además, en ocasiones, silicatos de magnesio, hierro u otros metales, también hidratados. Estos minerales tienen una estructura cristalina definida, cuyos átomos se disponen en láminas.

Los suelos arcillosos, son suelos desintegrados, transportados por el agua y por el viento hasta que se depositan y se acumulan como sedimentos. Estos depósitos se compactan por el peso de las sucesivas capas de material y se disponen en forma de capas y [estratos](#).

Minerales constitutivos de las arcillas

Las partículas de arcillas son el producto de la alteración química de las rocas, originados principalmente por la hidratación de sus componentes litológicos.

Los minerales de arcilla de acuerdo con su estructura reticular se dividen en tres grupos básicos; montmorilonitas, caolinitas e ilitas.

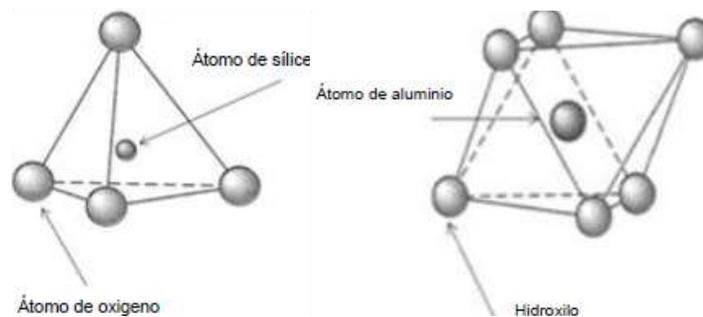
Las *montmorilonitas* están formadas por una lámina alumínica entre dos silícicas. Es el mineral producto de la hidratación de las rocas ígneas. Los minerales de este grupo tienen la propiedad de hincharse considerablemente al entrar en contacto con el agua libre. El hinchamiento se debe a la gran afinidad que tiene el mineral montmorilonita con las moléculas de agua, la cual es absorbida entrando a formar parte de la estructura molecular del mineral.

Los minerales de *caolinita* no presentan el efecto de la expansión al contacto con el agua o contracción al secarse ya que éstas no permiten la penetración del agua en su estructura molecular, las capas de agua adheridas a los granos son también muy pequeñas, lo que las hacen diferenciarse del fuerte efecto de la viscosidad intergranular que tienen las montmorilonitas.

Las *ilitas* corresponden a las arcillas que son producto de la hidratación de las micas blancas, que comúnmente se les llama como: Minerales de arcilla de estructura similar a las micas. Su constitución interna manifiesta tendencia a formar grumos de materia, lo que reduce el área expuesta al agua, por lo que su expansividad es menor que la de las montmorilonitas.

Los esquemas básicos de agrupación molecular se componen de láminas: la silícica y la alumínica.

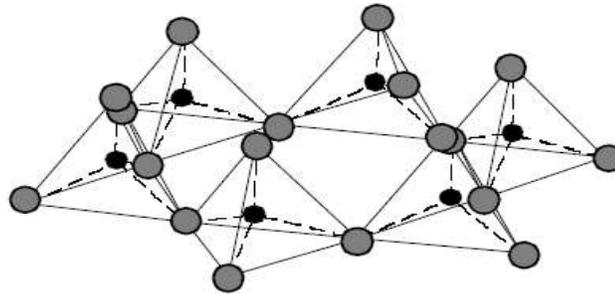
Gráfico 1. Lámina de Silícica (tetraedro) y Lámina Alumínica (octaedro).



Fuente: Elaboración propia.

Las estructuras laminares son las más representativas de los suelos arcillosos.

Gráfico 2. Estructura laminar de suelos arcillosos.



Fuente: Elaboración propia.

Capacidad de cambio de la arcilla

Los cristales de arcilla pueden cambiar cationes adsorbidos en su película superficial.

En las arcillas se produce un aumento de carga negativa en la superficie que neutraliza los enlaces rotos en los bordes de los cristales, para ello las arcillas atraen cationes y aniones de cambio colocándolos en sus superficies, la suma de estos cationes de cambio que puede absorber un mineral se denomina *capacidad de cambio catiónico o cambio iónico* de minerales arcillosos.

Este fenómeno hace que exista un riesgo constante de sustitución en cualquiera de las estructuras, que son susceptibles de ello mientras pueda presentarse ante el mineral un catión de mayor afinidad que el previamente existente. A más capacidad de cambio, más reactividad con potenciales aportadores de cationes y mayor carga negativa superficial en las partículas de la arcilla. Así ocurre con las montmorillonitas, que tienen una capacidad de cambio hasta diez veces superior a otros tipos, las caolinitas son menos susceptibles de intercambiar sus cationes que las demás.

La capacidad de intercambio crece con el grado de acidez de los cristales, es decir, es mayor si el pH del suelo es menor; la actividad catiónica se hacen más notable para valores del pH menores de 7. Las propiedades mecánicas de las arcillas pueden cambiar al variar los cationes contenidos en sus complejos de adsorción, pues a diferentes cationes ligados corresponden distintos espesores de la película de agua adsorbida, lo

que se refleja sobre todo en las propiedades de plasticidad y resistencia del suelo. Por esta razón el intercambio catiónico forzado se lo utiliza para tratar suelos con fines de mejorar su comportamiento mecánico.

Por lo anteriormente mencionado la composición mineralógica de las arcillas se constituye en el factor con mayor influencia sobre las propiedades geotécnicas del estrato como el cambio de volumen, la plasticidad, etc. Por esto una identificación química de ellas resulta ideal para predecir su comportamiento, pero estos estudios no se pueden aplicar con frecuencia por su elevado costo, por lo que se opta por otro tipo de estudios más sencillos.

Relaciones entre las partículas cristalinas de arcilla y el agua

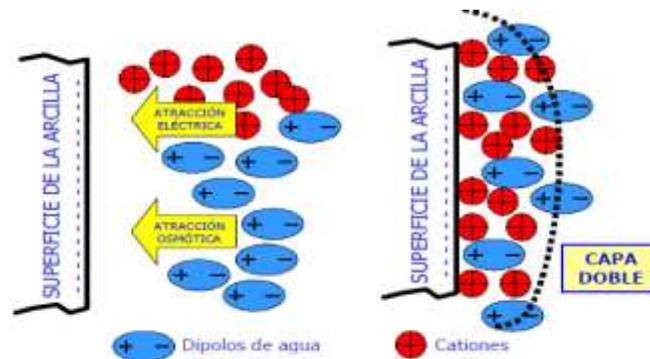
La superficie de cada partícula de suelo posee carga eléctrica negativa. La intensidad de la carga depende de la estructuración y composición de la arcilla. Así la partícula atrae a los iones positivos del agua (H^+) y a cationes de diferentes elementos químicos. Esto nos lleva a que cada partícula de arcilla se ve rodeada de una capa de moléculas de agua orientadas en forma definida y ligadas a su estructura.

Cuando una partícula cristalina de arcilla queda rodeada de agua, los átomos de oxígeno del cristal quedan en la superficie de estos. En los vértices y aristas de los cristales se rompe la continuidad de la estructura, por lo que se tiene, cargas desbalanceadas. Las cargas negativas de los átomos de oxígeno en consecuencia, crean en la superficie del cristal, un campo eléctrico hacia el exterior, con lo cual las moléculas del agua vecina se ionizan, de manera que los iones de hidrógeno positivos resultan captados por el cristal, así como también lo hacen los cationes que pudiera haber en disolución en el agua. Puesto que el agua que rodea al cristal es eléctricamente neutra, la concentración de iones positivos cerca del cristal debe estar balanceada por un número igual de iones negativos.

La arcilla ante la presencia de agua tiende a aproximarse a la superficie de las partículas, para diluir su mayor contenido salino. Con ello se consigue que los cationes se dispersen en el entorno de las partículas de manera que su concentración aumenta

creando una especie de “doble capa” eléctrica: La negativa de la superficie y la positiva por la agrupación de cationes en su proximidad.

Gráfico 3. Esquema de fuerzas de doble capa.



Fuente: Elaboración propia.

Este efecto de la incorporación de agua a la capa doble, provoca importantes cambios de volumen que se traducen en el conocido efecto de la expansividad de las arcillas.

2.1.2 Plasticidad

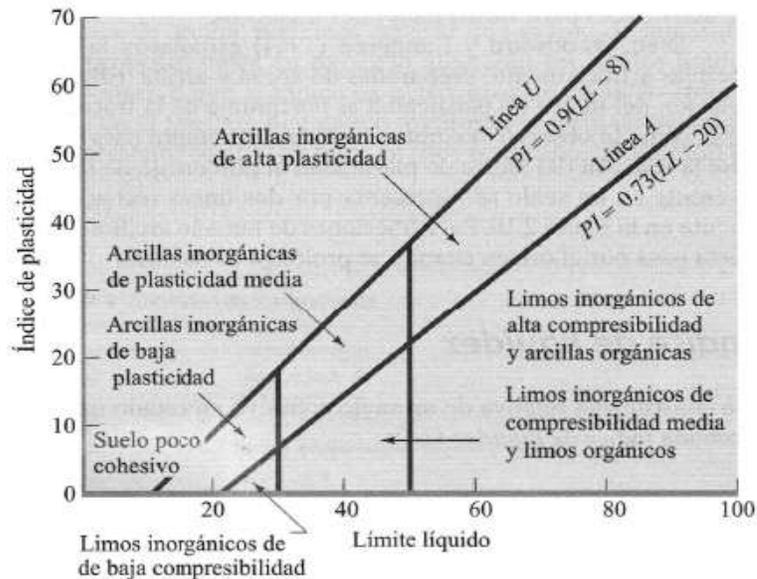
La plasticidad la definimos como la propiedad que presentan los suelos, por la cual pueden deformarse hasta cierto límite sin romperse, sin tener variaciones de volumen considerables y además sin desmoronarse ni agrietarse.

Para conocer la plasticidad de un suelo se hace uso de los límites de atterberg, estos son: límite líquido, límite plástico y límite de contracción, mediante ellos se puede dar una idea del tipo de suelo que se tiene. La diferencia entre los valores del límite líquido y límite plástico, nos da como resultado el índice **plástico** que generalmente depende de la cantidad y tipo de arcilla que se tiene en el suelo, este indica el rango de humedad a través del cual los suelos con cohesión tienen propiedades de un material plástico.

Los límites líquido y plástico son determinados a través de ensayos de laboratorio, mismos que se utilizan para identificar los suelos mediante la carta de plasticidad. “Casagrande (1932) estudio la relación del índice de plasticidad respecto al límite líquido de una amplia variedad de suelos naturales. Con base en los resultados de pruebas, propuso una carta de plasticidad” [Braja M. Das/pág. 34]. Esta carta es la base

de la clasificación de suelos finos del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).

Gráfico 4. Carta de plasticidad de Casa Grande.



Fuente: Fundamentos de ing. Geotécnica de Braja M. Das.

2.1.3 Actividad de las arcillas

“Como la propiedad plástica de los suelos resulta del agua absorbida que rodea a las partículas de arcilla, podemos esperar que el tipo de minerales arcillosos y sus cantidades proporcionales en un suelo afectaran los límites líquido y plástico. Skempton (1953) observó que el índice de plasticidad de un suelo crece linealmente con el porcentaje de la fracción de tamaño arcilloso (porcentaje de granos más finos que 2μ , en peso) presente en él. Con base en esos resultados, Skempton definió una cantidad llamada actividad, que es la pendiente de la línea que correlaciona el PI con el porcentaje de granos más finos que 2μ ”. [Braja M. Das/33]

La actividad se define como la relación existente entre el índice de plasticidad y la fracción de arcillas. Es aplicado a los suelos plásticos con propensión a padecer cambios en su volumen en presencia de diferentes contenidos de humedad.

La misma se define por la siguiente expresión propuesta por A. W. Skempton (1953):

$$A = \frac{IP}{\%part. < 0.002mm} \quad (Ec.2. 1)$$

Donde:

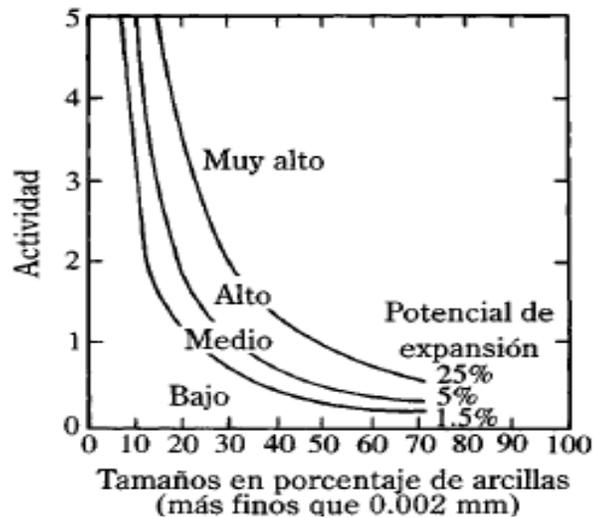
A= Actividad

IP= Índice plástico (%)

C= % < 0,002 mm (Fracción de arcilla) (%)

La actividad de las arcillas se usa como índice para identificar el potencial de expansión de estos suelos. Mediante la ayuda del Gráfico 5.

Gráfico 5. Carta de la Actividad para clasificar la expansión de las arcillas.



Fuente: Principios de ing. De cimentaciones de Braja M. Das.

Esta actividad de la arcilla puede medirse de la siguiente manera:

- A < 0.75 corresponden a arcillas relativamente inactivas
- A > 0.75 < 1.5 corresponden a arcillas con actividad normal
- A > 1.5 corresponden a arcillas progresivamente más activas

2.1.4 Suelos expansivos

Se llaman arcillas expansivas aquellas que presentan un gran cambio de volumen con la variación de la humedad. Estas se caracterizan por su elevado límite líquido (mayor a 40) y un alto índice de plasticidad (mayor a 15) como consecuencia de un alto contenido de minerales activos. Cuando se encuentran estos tipos de arcillas, es necesario efectuar pruebas de expansión y límites de consistencia, a fin de establecer el potencial expansivo de las mismas antes de emplazar cualquier obra sobre ellos.

En función de la proporción del material dominante en cada suelo, sus características estarán más o menos condicionadas por uno u otro material. Por ejemplo, cuando en un suelo la fracción condicionante es la de partículas arcillosas, sus propiedades físicas y mecánicas están dominadas por las características de estas partículas.

La clasificación de un suelo expansivo, se hace usualmente mediante el análisis de este comportamiento. Por ello se emplean para la identificación de suelos los ensayos en los que más influyen estas características, que indican casi de manera inequívoca el riesgo o la presencia de los fenómenos descritos.

Se denomina suelos expansivos aquellos que manifiestan, ante una modificación de su estado de humedad, un importante cambio de volumen como consecuencia de la generación de una tensión vertical en el seno de su estructura interna (tensión llamada de hinchamiento), estos suelos son generalmente todos los de grano fino (arcillas), que tienen la propiedad de incorporar moléculas de agua a su estructura.

Los suelos expansivos se caracterizan por tener el siguiente comportamiento físico y mecánico:

- Contracción de la arcilla debido al secado, mostrando grietas superficiales.
- Expansión de la arcilla al humedecerse.
- Tienen una consistencia pegajosa al ser mojados.
- Desarrollo de presiones de expansión cuando está confinada y no puede expandirse.
- Disminución de su resistencia al corte y de su capacidad de soporte al expandirse.

- Baja permeabilidad.

Al tratarse de suelos inestables ante la presencia del agua, requieren un tratamiento para su uso en la construcción. Dentro de las técnicas para modificar las propiedades expansivas del suelo podemos citar la estabilización química del mismo mediante el agregado de cal, cementos y sales, que modifican la plasticidad y la humedad principalmente.

Para mejorar el suelo existen diferentes técnicas y métodos y en caso de las arcillas expansivas están los siguientes:

- Estabilizar químicamente el suelo. Esto se logra alterando su composición mediante agregados de cal, cemento u otros aditivos químicos que reduzcan la capacidad de expansión y por tanto de retracción excesiva del suelo.
- Reemplazar el suelo expansivo. Se puede excavar para retirar el suelo no deseado y sustituir por otro material con mejores propiedades que se colocara compactado en reemplazo del suelo expansivo.

Este método generalmente es un tanto antieconómico cuando se trata de grandes volúmenes de suelo, por lo que es más aconsejado cuando el suelo que desea cambiarse es superficial y de reducido espesor.

- Drenar el suelo continuamente, utilizando drenantes. El inconveniente con este método es que es poco practicado y en exceso resulta económicamente costosa.
- Provocar la expansión antes de iniciar la obra, humedeciendo continuamente el suelo. Tiene el inconveniente de que los resultados son un tanto lentos y si posterior a la construcción sucede una época de sequía, se pueden producir asentamientos por retracción, lo que hace una solución poco confiable y no muy efectiva en obras como caminos.

2.2 Expansión

Expansión es la ampliación o dilatación expresada en un aumento de volumen provocado por los cambios de humedad. Se aplica generalmente a cualquier suelo que

tiene un potencial de encogerse o expandirse bajo condiciones cambiantes de la humedad.

Cuando el suelo se seca aumenta la tensión de capilaridad del agua, generando una presión negativa, y esto causa que el suelo se contraiga. En consecuencia si el suelo gana humedad, la tensión capilar disminuye provocando una expansión.

En los suelos arcillosos el factor de la humedad es el que juega un rol fundamental, la mayor o menor presencia de agua en las partículas, determina el volumen final alcanzado por la masa de suelo cuando esta se satura.

La expansión que puede alcanzar un suelo es difícil predecir con exactitud dado que depende mucho de la composición mineralógica, la orientación de estas partículas, la presión ejercida por la sobrecarga de los estratos subyacentes y las cargas de estructuras sobre dichos estratos, también depende del contenido o grado de saturación. En algunos tipos de arcilla el aumento del volumen es tan considerable que puede romper carreteras y dañar estructuras.

Debido a los diferentes daños que puede causar la expansión de los suelos a las estructuras que sobre ellos se fundan, se precisa un estudio para tararlos como la estabilización química, que principalmente produce un efecto de floculación en las arcillas, ayudando a reducir considerablemente el problema de la expansión.

“En suspensión con altas concentraciones de electrolitos, predominan las interacciones borde-carga, ya que se mantiene la carga positiva de los bordes y la carga negativa en la superficie de las arcillas: en estas condiciones de alta concentración de iones, las fuerzas eléctricas netas entre las partículas adyacentes son predominantemente atractivas, produciéndose el fenómeno de la **floculación**. Esta asociación consiste en una estructura abierta y voluminosa con grandes poros.

Por el contrario cuando la concentración de electrolitos es baja, los minerales de arcilla tienden a cargarse negativamente, en este caso predominan las fuerzas eléctricas de repulsión entre partículas adyacentes, produciéndose el fenómeno de la **dispersión**, lo

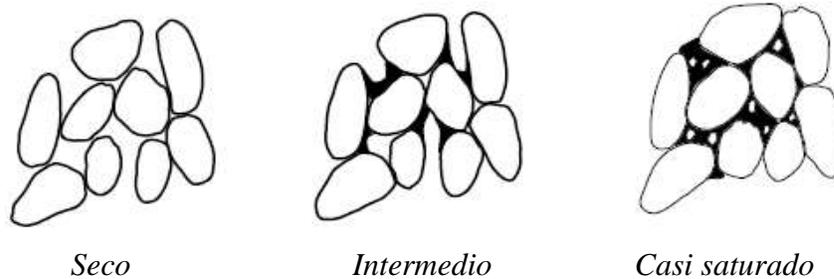
que resulta una estructura densa donde las capas de arcillas no están en contacto debido a las fuerzas repulsivas” [Ing. Geológica/L. Gonzales].

Debido a estos fenómenos es que se busca producir la floculación mediante la adición de agente químicos para la estabilización de las arcillas, reduciendo así su capacidad expansiva.

Causas de la expansión

Los suelos expansivos siempre se encuentran en un estado de saturación parcial, para el cual los poros del suelo están llenos de aire y agua.

Gráfico 6. Representación gráfica del estado de saturación del suelo.



Fuente: Elaboración propia.

En los tres sistemas el agua está sujeta a una presión de poro negativa llamada presión capilar o succión.

Al humedecer el suelo, la disminución de la succión reduce también su esfuerzo efectivo, haciendo que el suelo logre una recuperación elástica. Durante el proceso de contracción, los poros se hacen más pequeños y la tensión capilar aumenta. El proceso de saturación después de una contracción trae como consecuencia una mayor recuperación elástica; los suelos ya húmedos, en cambio se expanden menos.

El fenómeno de la expansión depende del contenido de arcilla de la muestra, ya que en el contenido mineralógico de las arcillas se encuentran los minerales más expansivos del suelo.

Los principales factores que influyen o intervienen en los cambios volumétricos son:

- Cantidad de arcilla y tipo de minerales que contiene la misma.

- Naturaleza del fluido de los poros y contenido químico del agua subterránea.
- El peso unitario del suelo.
- Las condiciones de carga, a mayor esfuerzo, menor cambio volumétrico.
- Las características plásticas del suelo como elevado límite líquido e índice plástico.
- Perfil del suelo, el espesor y posición del estrato expansible determina la magnitud y la velocidad de hinchamiento.
- Permeabilidad de la masa de suelo, la presencia de grietas o fisuras en la masa de suelo facilitan el acceso del agua.
- Periodos concentrados de alta precipitación combinados con drenaje deficiente de los alrededores de la obra.
- Presencia de vegetación próxima a la obra.
- Cambios en el nivel freático o en las condiciones atmosféricas o del entorno.

Identificación de suelos expansivos

Para identificar la presencia de suelos expansivos se debe tomar en cuenta que estos poseen contenidos significativos de arcilla (situados dentro de los símbolos CL, CH, ML, MH o SC del sistema de clasificación SUCS), que usualmente son muy duros cuando se secan, con tendencias a presentar una apariencia vidriosa al ser cortados o partidos, presentan grietas superficiales. Además la existencia de grietas de contracción en el terreno también son características comunes que presentan suelos expansivos.

La identificación mineralógica de estos suelos es un método útil pero poco practicado por ser antieconómico, por lo que convencionalmente se utilizan métodos de identificación más simples como los que a continuación se mencionan:

- *Los métodos cualitativos o indirectos*, están basados en sus propiedades índice, los cuales se basan en correlaciones entre el potencial de expansión del suelo y sus pruebas más comunes, tales como los límites de Atterberg, ecuaciones empíricas, la actividad de las arcillas y otros.

- *Los métodos directos*, generan resultados numéricos. Dentro de este grupo destacan las pruebas de expansión unidimensional, la de consolidación, etc. las cuales miden directamente las características deseadas del suelo, dándonos valores numéricos más aproximados que el de los métodos indirectos.

La presencia de suelos expansivos en las diferentes obras civiles, ya construidas, se puede evidenciar por la presencia de superficies irregulares y onduladas, agrietamientos longitudinales y grietas piel de cocodrilo en pavimentos. En otras obras se pueden presentar distorsiones y agrietamientos de pisos, puerta y ventanas desalineadas, grietas en paredes, columnas inclinadas, pandeo de muros de sótano, agrietamiento general en canales, etc.

Gráfico 7. Fisuras típicas leves en viviendas por efectos de la expansión.



Fuente: Fotografías de vivienda en zona Tabladita. Ciudad Tarija

Gráfico 8. Fisura típica moderada en vivienda por efectos de la expansión.



Fuente: Fotografía de vivienda en zona Tabladita. Ciudad Tarija.

Gráfico 9. *Fisuras típicas severas en viviendas por efectos de la expansión.*



Fuente: Fotografías de vivienda en zona Tabladita. Ciudad Tarija.

La clasificación de un suelo expansivo se basa en diferentes pruebas índice. A continuación se presentan algunas tablas, mediante las cuales se puede determinar el grado de expansión de una arcilla, a través de diferentes autores:

Elvin F. Henry (1965) presenta un patrón emergido de 151 pruebas sobre suelos expansivos:

Tabla N° 1. *Clasificación de suelos expansivo según el IP.*

| IP | EXPANSIÓN |
|-----------|-------------------|
| 0 - 14 | No crítico |
| 14 - 25 | Marginal |
| 25 - 40 | Crítico |
| > 40 | Altamente crítico |

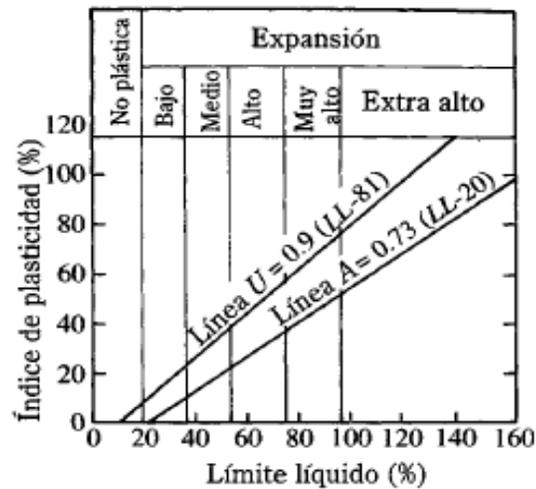
Fuente: Dakshanamurthy Raman (1973).

Tabla N° 2. *Clasificación de suelos expansivos según el LL.*

| SEGÚN EL LÍMITE LÍQUIDO | |
|-------------------------|---------------------|
| LL | Clasificación |
| 0 - 20 | No hay hinchamiento |
| 20 - 25 | Bajo hinchamiento |
| 35 - 50 | Medio |
| 50 - 70 | Alto |
| 70 - 90 | Alto Muy alto |
| > 90 | Extremo |

Fuente: Dakshanamurthy Raman (1973).

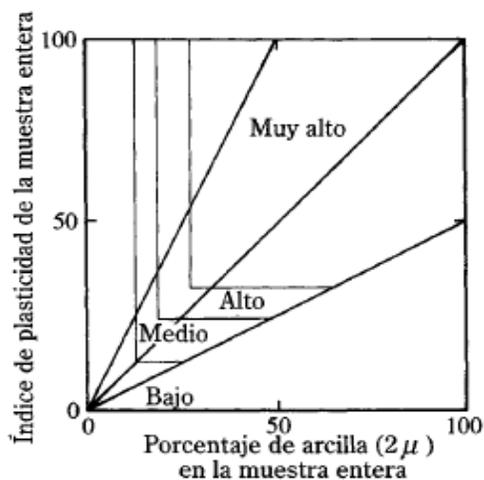
Gráfico 10. Clasificación de suelos expansivos según Abduljawwad y Al-Sulaimani (1993).



Fuente: Principios de ing. de Cimentaciones de Braja M. Das.

Gráfico 11. Clasificación de suelos expansivos según

Abduljawwad y Al-Sulaimani (1993).



Fuente: Principios de ing. de Cimentaciones de Braja M. Das.

Tabla N° 3. Sistema de clasificación de suelos expansivos

(Compilado O'Neil y Poormoayed 1980)

| LÍMITE LÍQUIDO | ÍNDICE DE PLASTICIDAD | EXPANSIÓN POTENCIAL (%) | CLASIFICACIÓN DE LA EXPANSIÓN POTENCIAL |
|----------------|-----------------------|-------------------------|---|
| < 50 | < 25 | < 0.5 | Baja |
| 50 - 60 | 25 - 35 | 0.5 - 1.5 | Marginal |
| > 60 | > 35 | > 1.5 | Alta |

Expansión potencial = expansión vertical bajo una presión igual a la presión de sobrecarga

Fuente: Principios de ing. de Cimentaciones de Braja M. Das.

Tabla N° 4. Clasificación del potencial expansivo de suelos (ASTDM D4829, 1988).

| ÍNDICE DE EXPANSIÓN | POTENCIAL DE EXPANSIÓN |
|---------------------|------------------------|
| 0 - 20 | Muy Baja |
| 21 - 51 | Baja |
| 51 - 90 | Medio |
| 91 - 130 | Alto |
| > 130 | Muy Alto |

Fuente: Copilado de O'Neil y Poormoayed (1980)

Cuando un suelo presenta un bajo potencial de expansión ante la presencia de humedad, no requiere de ningún tratamiento especial para poder fundar sobre él. Sin embargo si el suelo posee un alto potencial de expansión, este debe ser sometido a tratamientos especiales, como un tratamiento con agentes químicos o reemplazar el material por otro de mejores características. De manera que se consiga anular los problemas por expansión en las futuras estructuras que se vayan a ejecutar sobre dichos suelos.

La estabilización química de los suelos expansivos con agentes como la cal y el cemento, disminuyen el índice de plasticidad considerablemente y por tanto las características de expansión del suelo quedan sin efecto después de su tratamiento.

Para poder determinar el potencial expansivo de la arcilla, se puede recurrir al ensayo de medición directa, como es el de expansión unidimensional, que nos entrega un valor numérico de referencia del potencial expansivo de forma más directa. Este ensayo consiste en medir el valor del hinchamiento vertical de una muestra re moldeada, confinada y saturada, bajo determinadas presiones.

2.2.1 Ensayo S0604. Expansión unidimensional y presión de levantamiento en mezclas de suelo-cal (ASTMD3877)

Objeto:

Este método de ensayo suministra procedimientos para desarrollar ensayos de expansión, contracción y presión de levantamiento en muestras de suelo-cal, y puede utilizarse para determinar el contenido de cal requerido para lograr el control deseado de cambios volumétricos causados por aumentos o disminuciones de humedad.

Este ensayo puede usarse para determinar: 1) las magnitudes de los cambios de volumen bajo condiciones de carga variable, 2) la tasa de cambio volumétrico, y 3) la magnitud del cambio de presión con cambios de humedad de las mezclas de suelo-cal tomadas de la obra. Si se desea, también se puede determinar la permeabilidad de las mezclas de suelo-cal, para varias condiciones de carga.

Uso y significado:

De los resultados de estos ensayos puede calcularse el potencial relativo de expansión de las mezclas de suelo-cal que contienen diversas cantidades de cal. De tal evaluación, se puede determinar la cantidad de cal necesaria para reducir la expansión a los valores especificados. Los datos pueden utilizarse entonces, para el diseño y fijación de requisitos de especificaciones para rellenos estructurales y rellenos en la subrasante, cuando se encuentran suelos expansivos y se desea dar un cierto grado de control sobre expansión-contracción en fundaciones de estructuras y subrasante de carreteras. Los ensayos también mostrarán si suelos específicos admiten estabilización con cal.

Equipo:

1. El aparato cumplirá completamente los requerimientos del ensayo S0407 "Consolidación Unidimensional de los Suelos", exceptuando que el mínimo espesor del espécimen será de 19 mm (3/4"). Será capaz de ejercer una presión sobre el espécimen de al menos 200% de la máxima carga esperada de diseño y al menos la máxima presión de levantamiento.
2. Medidor micrométrico montado sobre el aparato como muestra la Figura S0604_1, o con otra disposición igualmente funcional. La precisión del medidor será de $\pm 0,0025$ mm (0.0001").
3. Anillo de carga
Maquinado a la misma altura del anillo del espécimen, con precisión de $\pm 0,02$ mm (0.001") y que pueda fijarse al consolidómetro.
4. Consolidómetro
Equipado con una llave de paso inferior para el drenaje y un tubo con depósito regulador para remover cualquier aire atrapado bajo el espécimen y para añadir agua al espécimen respectivamente como se muestra en la Figura S0604_1.
5. Collar de extensión

Para compactar especímenes de 100 mm (4") de altura y del mismo diámetro del anillo del espécimen. Los especímenes pueden ser compactados en un molde más grande que el anillo del espécimen y ser recortados luego para encajarlos en el anillo del espécimen.

6. Martillo compactador

a) Operado manualmente.- Un martillo metálico que tenga una cara plana circular de $50,8 \pm 0,127$ mm (2 ± 0.005 ") de diámetro, una tolerancia por el uso de 0,13 mm (0.005") que pese $2,495 \pm 0,009$ kg (5.50 ± 0.02 lb). El martillo deberá estar provisto de una guía apropiada que controle la altura de la caída del golpe desde una altura libre de $304,8 \pm 1,524$ mm (12.0 ± 0.06 " ó $1/16$ ") por encima de la altura del suelo. La guía deberá tener al menos 4 agujeros de ventilación, no menores de 9,5 mm ($3/8$ ") de diámetro espaciados aproximadamente a 90° (1.57 rad) y 19 mm ($3/4$ ") de cada extremo, y deberá tener suficiente luz libre, de tal manera que la caída del martillo y la cabeza no tengan restricciones.

b) Operado mecánicamente.- Un martillo de metal que esté equipado con un dispositivo para controlar la altura de caída del golpe hasta una altura libre de $304,8 \pm 1,524$ mm (12.0 ± 0.06 " ó $1/16$ ") por encima del suelo y que distribuya uniformemente los golpes sobre la superficie de éste. El martillo deberá tener una cara plana circular de $50,8 \pm 0,127$ mm (2.0 ± 0.005 ") de diámetro; una tolerancia por el uso de 0,13 mm (0.005") y un peso de fabricación de $2,495 \pm 0,009$ kg (5.50 ± 0.02 lb).

Nota1: El martillo mecánico deberá calibrarse con varios tipos de suelos y ajustarse su peso, si fuere necesario, para que dé los mismos resultados de humedad-peso, unitario que los obtenidos con martillos de operación manual.

Puede ser impráctico el aparato mecánico de tal manera que la caída libre sea de 305 mm (12") cada vez que caiga el martillo, como con el martillo operado manualmente. Para efectuar el ajuste de la caída libre, la porción del material suelto que recibe los golpes iniciales deberá comprimirse

levemente con el martillo para establecer el punto de impacto a partir del cual se determina la caída de 305 mm (12"). Los golpes subsiguientes sobre la capa de suelo que está siendo compactada pueden aplicarse dejando caer el martillo desde una altura de 305 mm (12") por encima de la altura inicial de asentamiento o, cuando el aparato mecánico está diseñado con un ajuste de una altura para cada golpe, todos los golpes subsiguientes deberán tener una caída libre para el martillo de 305 mm (12") medidos a partir de la altura del suelo como quedara compactado mediante el golpe previo.

c) Cara del martillo.- Deberá emplearse el martillo con cara circular, pero podrá usarse como alternativa uno con cara de sector circular. Deberá indicarse en el informe el tipo de cara usada diferente de la circular de 50,8 mm (2"), de diámetro, pero la utilizada deberá tener un área igual al de la cara circular.

7. Placas de vidrio

Para cubrir cada anillo de consolidómetro, deben ser dos.

Muestreo:

Las muestras de suelo natural para estos ensayos, se obtendrán de acuerdo con cualquiera de los métodos de muestreo de suelos aprobados. Las muestras no deberán ser secadas al horno antes de preparar los especímenes de ensayo.

Procedimiento:

8. Móntese la base del consolidómetro, el anillo del espécimen, los platos porosos y los platos de carga con el anillo de carga en el recipiente del espécimen desocupado, con la misma disposición de partes que es usada para ensayar el espécimen.
9. Colóquese el montaje anterior, sobre al aparato de carga con la misma posición que ocupará durante el ensayo.

10. Aplíquese una carga igual a una presión unitaria de 2,4 kPa (50 lb/pulg²) sobre el plato de carga.
11. Anótese la lectura inicial del medidor micrométrico, r_1 . Márquense las partes del aparato para que puedan reensamblarse en la misma posición durante el ensayo del espécimen de suelo-cal.
12. Prepárense un mínimo de 1000 g (2 lb aproximadamente) de mezcla de suelo-cal con los contenidos de cal y de agua deseados, de acuerdo con el ensayo S0605 "Preparación en el laboratorio de mezclas de suelo-cal". La mezcla no deberá tener partículas mayores de 4,75 mm.
13. Pésese el anillo del consolidómetro.
14. Con el collar de extensión en su sitio, sobre el anillo del consolidómetro, compáctese el espécimen en dicho anillo hasta el peso unitario húmedo deseado, con el compactador disponible. El espécimen deberá tener un espesor de cerca de 6 mm mayor que la altura del anillo de carga.
15. Retírese el collar de extensión y recórtese el exceso de material de la parte superior del espécimen con un emparejador u otra herramienta.
16. Retírese una muestra de los recortes para una determinación del contenido de agua según el método S0301 "Determinación en el laboratorio del contenido de agua".
17. Inmediatamente después de recortar el espécimen compactado, pésense, aníllense y cúbranse las superficies expuestas del espécimen con placas de vidrio sostenidas con abrazaderas, hasta que este sea colocado en el aparato de carga.
18. Calcúlese el peso unitario del espécimen que llena a ras el anillo del consolidómetro y el peso neto del espécimen. El peso unitario húmedo calculado, se aproximará a los 15 kg/m³ (lb/pie³) y la humedad al 1% de la requerida.

19. Si el peso unitario esperado no se logra, descártese ese espécimen. Repítase el proceso de compactación, ajustando el esfuerzo de compactación hasta obtener el peso unitario deseado.
20. Cualquier curado de los especímenes de suelo-cal, deberá hacerse en este momento. Para ello, se introducen los especímenes en recipientes sellados para prevenir evaporación del agua o carbonatación de la cal.
21. Al final del período de curado colóquense los especímenes con sus anillos confinantes de consolidómetro en el aparato de carga de acuerdo con el ensayo S0407, haciendo coincidir las partes marcadas con las señales que se usaron para la calibración inicial.
22. Aplíquese una carga de fijación de 2,4 kPa (50 lb/pulg²).
23. Anótese la lectura del medidor micrométrico, r_2 . Utilizando la diferencia entre r_1 y r_2 , determínese la altura exacta del espécimen.

Ensayo de expansión:

24. Las características expansivas de los suelos expansivos con o sin tratamiento con cal, varían con los patrones de esfuerzos aplicados.
25. Se necesitan al menos dos especímenes duplicados para un ensayo completo.
26. Utilizando los procedimientos descritos en este método y en el del ensayo S0407, se determinan los datos para dos series de ensayos: 1) Cargado y expandido, para lo cual, el espécimen no empapado se satura con agua y es cargado para prevenir la elevación del espécimen (curva A de la Figura S0604_2) y 2) expandido y cargado, para lo cual el espécimen se satura en libertad, antes de aplicarse la carga (curva B de la Figura S0604_2). La curva C de esa figura, representa cualquier proceso de carga intermedio entre los descritos.
27. **Cargado y expandido:**

Después que la carga inicial de fijación ha sido aplicada, y la lectura inicial del medidor ha sido anotada, satúrese el espécimen No.1 de la manera siguiente:

a) Llénese el depósito regulador del tubo del consolidómetro con agua destilada, cuidando de remover cualquier burbuja de aire que pueda estar atrapada en el sistema, humedeciendo lentamente la piedra porosa inferior y drenándola con la llave de paso inferior. (La cabeza de agua en el tubo del permeámetro debería estar tan baja, que el espécimen no se levante).

b) Cuando el espécimen comience a expandirse, increméntese la carga lo necesario para que el espécimen permanezca con su altura original.

c) Después de cargar hasta el máximo para medir la máxima presión de elevación y que quede constante por 48 horas como mínimo, redúzcase la carga hasta $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{4}$ y $\frac{1}{8}$ de la carga máxima y finalmente manténgase la carga en 2,4 kPa (50 lb/pulg²).

Mídase la altura para cada valor de carga. Úsese un mayor número de cargas, si se necesitan más detalles en la curva de ensayo.

d) Manténganse todas las cargas durante 24 horas o más tiempo si esto es necesario, hasta obtener valores de altura constantes.

e) Extráigase el espécimen del anillo recipiente y pésele inmediatamente. Pésele otra vez después de secarlo en horno a 105°C (221°F).

f) Determínese el contenido de agua del espécimen completo.

g) Asegúrese una muestra para el ensayo de peso específico, del espécimen secado al horno.

Determínese tal peso específico.

h) Calcúlese el grado de saturación, el peso unitario aparente seco y el peso específico del espécimen.

28. Expandido y cargado

Después que la carga de fijación inicial ha sido aplicada y la lectura inicial del medidor micrométrico se ha anotado, satúrese el espécimen No.2 de acuerdo con lo descrito en el numeral 29.

a) Permítase que el espécimen se expanda bajo la carga de fijación durante 48 horas como mínimo o hasta que la expansión esté completa.

b) Cárquese el espécimen sucesivamente con $\frac{1}{8}$, $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ y 1 del valor de la carga máxima que se aplicó al espécimen No.1 para determinar las características de reconsolidación del espécimen. Úsese un número mayor de cargas si se necesitan más detalles en el ensayo.

c) Sígase el procedimiento especificado en el método S0407, para hacer las medidas y determinaciones.

29. Expansión por carga individual.

Cuando se necesita ejecutar ensayos separados de expansión para otras condiciones de carga, úsese el siguiente procedimiento.

a) Después de que la carga inicial de fijación ha sido aplicada a los especímenes y que las lecturas iniciales del medidor micrométrico hayan sido anotadas, cárguese cada espécimen al valor de carga deseado y satúrese de acuerdo con el numeral 29, literal a).

b) Déjese expandir el espécimen bajo la carga aplicada, durante 48 horas, o hasta que la expansión se complete. Mídase la altura del espécimen expandido.

c) Redúzcase la carga hasta el valor de la carga de fijación. Déjese que la altura llegue a ser constante y mídase, entonces retírese el espécimen del anillo y háganse las determinaciones de contenido de agua, peso unitario aparente seco, peso específico y grado de saturación de acuerdo con el numeral 29, literal a).

Cálculos:**38. Datos del ensayo de Expansión**

Calcúlese la relación de vacíos como sigue:

$$e = \frac{h-h_0}{h_0}$$

Donde:

e= Relación de vacíos (volumen de vacíos/volumen de sólidos)

h= Altura del espécimen

h₀= Altura del material sólido al contenido de vacíos cero.

Calcúlese la expansión como porcentaje de la altura original de la manera siguiente:

$$\Delta (\%) = \frac{h_2 - h_0}{h_0} * 100$$

Donde:

Δ= Expansión en porcentaje del volumen inicial.

H_i= Altura inicial del espécimen.

h₂= Altura del espécimen bajo una condición de caga específica.

Gráficas de los datos de ensayo:

Con los datos obtenidos de los ensayos de expansión, háganse gráficos como el de la Figura S0604_2.

Informe:**41. Ensayo de Expansión.**

En el informe se debe incluir la siguiente información:

- a) Identificación de la muestra (No. de perforación, profundidad, localización, etc.).

- b)** Descripción del suelo ensayado y tamaño de la fracción ensayada y de la muestra total.
- c)** Porcentaje de cal mezclado con el suelo.
- d)** Condiciones iniciales de peso unitario y humedad y grado de saturación. Dar los porcentajes del peso unitario máximo y la humedad óptima para las mezclas de suelo cal compactada, basada en los métodos S0402 o S0403, Relaciones de peso unitario y humedad (Próctor estándar o modificado), indicando cual método se usa para la comparación.
- e)** Tipo de consolidómetro (de anillo fijo o flotante, tamaño del espécimen) y tipo de aparato de carga.
- f)** Un gráfico con curvas de carga-cambio volumétrico como se muestra en la Figura S0604_2 (una curva de relación de vacíos Log presión, puede incluirse si es necesario).
- g)** Una curva de Log tiempo-deformación, si se requiere.
- h)** Suministro de los datos de carga y tiempo versus cambios volumétricos en otras formas, si específicamente esto es requerido.
- i)** Contenido final de agua, peso unitario aparente seco, y grado de saturación.

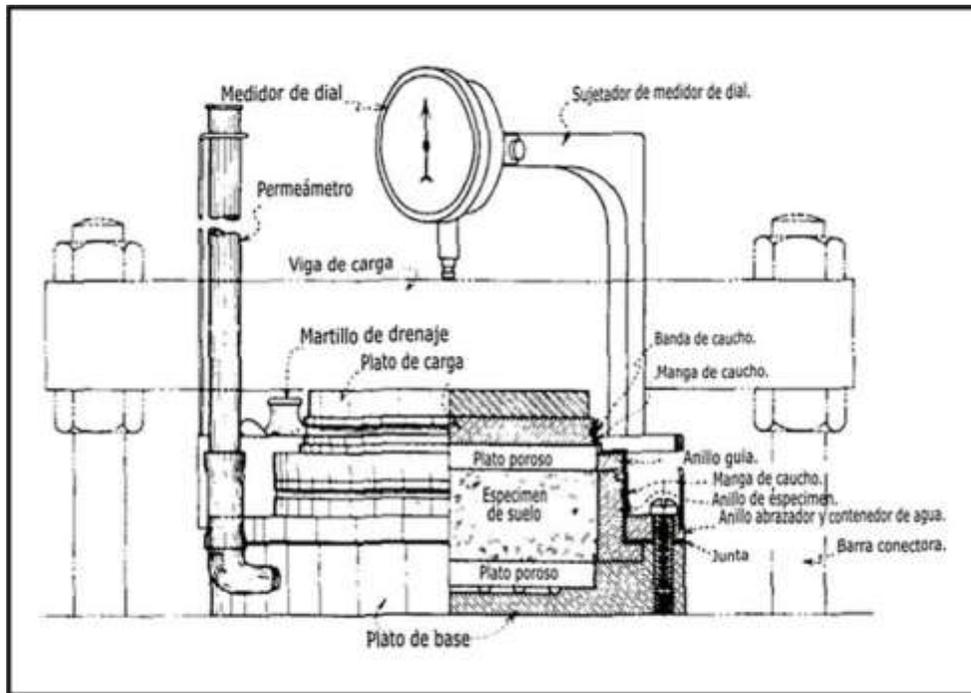


Figura S0604_1 Consolidómetro de anillo fijo

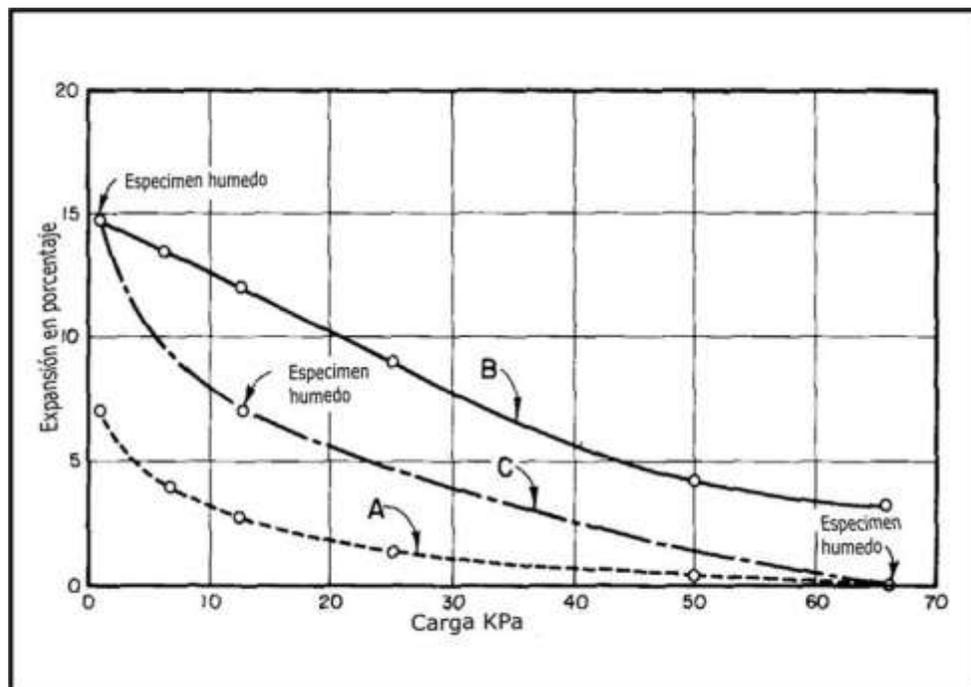
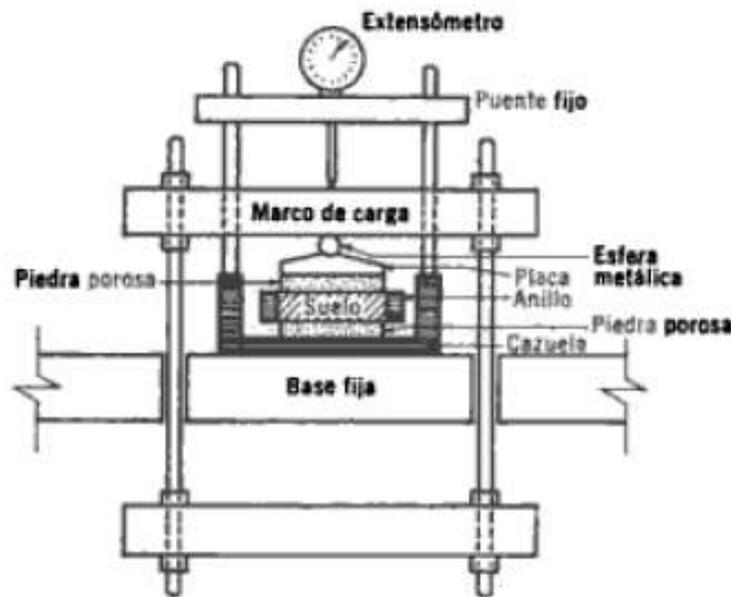


Figura S0604_2 Ejemplo de curva carga – Expansión

Gráfico 12. Detalle esquemático de colocación del espécimen para ensayo de expansión unidimensional.



Fuente: Elaboración propia.

Nota: La carga que se aplica a la muestra, se lo hace a través de un brazo de palanca y se utiliza un extensómetro o micrómetro calibrado para medir la variación de alturas sobre dicha muestra. Esta muestra se satura completamente hasta finalizar el ensayo. Cada carga aplicada al espécimen se mantiene por 24 horas ya que la muestra se estabiliza en este tiempo aproximadamente.

2.2.3 Índice de expansión y potencial de expansión

El índice de expansión puede ser determinado por medio de pruebas en laboratorio, o también se lo puede obtener mediante la relación que tiene con el índice de compresión, que se obtiene del ensayo de consolidación de suelos.

El potencial de expansión de un suelo, se puede determinar por medio de ecuaciones empíricas de diferentes autores. Cabe recalcar que los valores arrojados por las distintas ecuaciones, pueden o no relacionarse entre sí, ya que el fenómeno de la expansión es tan variable y depende de su composición mineralógica, que mientras una ecuación se adapte a una arcilla determinada, otra ecuación puede determinar valores muy

diferentes. Esto se debe a que las ecuaciones se determinaron para un tipo de arcilla, y el comportamiento de otras arcillas puede ser diferente.

La mayor parte de los estudios que se tienen son en muestras de arcilla inalteradas, por esto es difícil predecir con exactitud el valor de la expansión real del terreno ya que influyen variables como la profundidad y los estratos intermedios. No obstante lo que se pretende es minimizar el potencial de expansión en arcillas para evitar que las mismas afecten negativamente a las estructuras y por ello se pueden tomar como referencia alguna de las ecuaciones que se tienen, en base al tipo de estudio que se va a ejecutar.

A continuación se presentan algunas relaciones empíricas, de diferentes autores, para determinar el potencial de expansión de un suelo (**S**):

Para arcillas re moldeadas según Seed, Woodward y Lundgren:

$$S = 0.00216 \times (IP)^{2.44} \quad (Ec. 2.2)$$

Nayak y Christensen (1971):

$$S = 0.0229 \times IP^{1.45} \times \left(\frac{c}{w} \right) + 6.38 \quad (Ec. 2.3)$$

Schneider y Poor (1974):

$$S = 0.66 \times 10^{\left(0.9 \times \frac{IP}{w} - 1.19 \right)} \quad (Ec. 2.4)$$

Weston (1980):

$$S = 0.000195 \times LL^{4.17} \times w^{-2.33} \quad (Ec. 2.5)$$

Dónde:

S= Potencial de expansión (%)

LL= Límite líquido (%)

IP= Índice de plasticidad (%)

w= Humedad natural (%)

Las ecuaciones que tienen como variable el contenido de humedad natural, no los utilizamos en el análisis del presente trabajo, porque trabajamos con muestras moldeadas y dosificadas con agentes estabilizantes. Por tanto de aquellas muestras moldeadas el dato de la humedad natural no puede ser utilizado.

2.3 Estabilización

La estabilización es el proceso físico y/o químico por medio del cual se modifican las propiedades de suelos que no son adecuados para las construcciones civiles de modo que se puedan aprovechar al máximo sus propiedades.

Al estabilizar un suelo se alteran sus propiedades iniciales en cuanto a resistencia y deformación.

Métodos de estabilización de suelos

Estabilización mecánica; utiliza la compactación del suelo como base.

Estabilización física que utiliza como complemento la compactación para los cambios físicos y la mezcla con otros suelos.

Estabilización química; se refiere a la utilización de sustancias químicas que involucran cambios en la constitución de los suelos

Entre las ventajas que se puede conseguir con la estabilización tenemos:

- Reducir el índice de vacíos y el contenido de humedad disminuyendo de esta manera la permeabilidad del suelo.
- Minimizar la retracción y la expansión.
- Dar estabilidad volumétrica causada por la humedad.
- Aumentar la resistencia.

En resumen el objetivo de la estabilización es mejorar la calidad de los suelos obteniendo un material eficiente para el uso propuesto.

En el presente trabajo se realiza la estabilización de la arcilla, con cal y cemento, con la finalidad principal de controlar su expansión y por ende reducir su plasticidad.

2.3.1 Estabilización química

Este método para estabilizar se utiliza generalmente en suelos finos ya que las arcillas son susceptibles a los cambios en su estructura interna.

La estabilización química es un proceso mediante el cual se incorpora un aditivo químico, el cual produce cambios físicos y reacciones químicas que permiten incrementar la densidad y reducir la plasticidad de los suelos brindando una estabilidad volumétrica. Los agentes químicos que más se utilizan para este fin son: el cemento, la cal, los asfaltos, las sales y los polímeros.

En el presente trabajo estudiaremos la estabilización con cal y con cemento ya que estos productos se encuentran con facilidad en el mercado, y se adaptan a las condiciones climáticas.

2.3.2 Estabilización con cal

La estabilización de suelos con cal es una de las más antiguas formas de mejoras de suelos. El proceso físico-químico producido en el suelo al agregar cal y agua produce los siguientes efectos:

- En una primera etapa se tiene una reacción iónica donde los cationes de calcio se unen a las superficies de las láminas mediante un intercambio catiónico: desarrollando así fuerzas eléctricas, es decir se produce una rápida reacción de floculación por el intercambio iónico del calcio de las arcillas presentes en el suelo. Esta acción ayuda en edades tempranas a modificar el material aumentando o reduciendo el límite líquido y aumentando en mayor escala al límite plástico. Asimismo el suelo se vuelve menos sensible al agua y se producen cambios notables en su plasticidad.
- Acción lenta de tipo puzolánico, esta reacción se traduce por una degradación más o menos acelerada del mineral arcilloso y la formación de nuevos compuestos insolubles en agua a partir de la sílice y alúmina presentes en el

suelo virgen. Este es el proceso que afecta en la resistencia mecánica del suelo. Los resultados de este proceso son: mejora de las propiedades resistentes, reducción de la plasticidad y aumento de la trabajabilidad de los suelos.

La cal al modificar la composición mineralógica de la arcilla modifica sus respuestas al agua reduciéndose la plasticidad y teniéndose menores cambios volumétricos por variaciones en la humedad.

Entre otros efectos de mejora que produce la cal se tenemos:

- Reduce el índice plástico en forma considerable; debido a un incremento en el límite plástico y una reducción del límite líquido.
- El agua y la cal colaboran para acelerar la disgregación de los grumos de arcilla durante la operación de pulverización, lo cual facilita la trabajabilidad.
- En áreas pantanosas o en donde los suelos tienen humedades superiores a la óptima, la aplicación de la cal facilita el disgregado del suelo, lo que a su vez propicia un secado más rápido.
- Las contracciones y expansiones debidas a cambios de humedad se reducen considerablemente.
- La resistencia del suelo a la compresión se incrementa. Asimismo también el valor relativo de soporte se incrementa.
- La capa estabilizada proporciona una excelente plataforma de trabajo para la construcción de las capas superiores de la sección estructural de caminos.
- Aumenta el rozamiento interno, la cohesión del suelo.

Reducción de la plasticidad

La cal ejerce sobre los suelos plásticos ($IP > 15$) el aumento de su límite plástico (LP), lo que ocasiona una reducción de su índice de plasticidad, aumentando también la humedad óptima de compactación. En suelos poco plásticos ($IP < 15$), la cal provoca un aumento del índice de plasticidad

Empleo de la cal

Para estabilizar con cal se recomiendan suelos arcillosos con altos contenidos de arcilla de plasticidad media o alta, ya que reduce la densidad seca máxima y aumenta la humedad óptima de compactación.

La cantidad de cal necesaria para alcanzar la reducción óptima, es aquella con la cual alcanzamos una reducción mínima del IP del 50 %, los porcentajes oscilan entre 2 y 8% del peso seco del suelo.

Se recomienda que los suelos a tratar con cal tengan más del 7% de material que pasa el tamiz 200 y un IP mayor a 12, es decir suelos entre (SW-SP, SM-SC, GW-GP, GM-GC, CH-CL, MH-ML) según clasificación SUCS, estas recomendaciones hacen que la cal sea un estabilizante adecuado para aplicar a los suelos expansivos.

Reacción suelo – cal

Las reacciones que ocurren en la estabilización suelo – cal comprenden procesos físicos y químicos como la floculación y aglomeración de partículas, disminución de la plasticidad y potencial de hinchamiento, aumento de la trabajabilidad, durabilidad y constancia volumétrica. Estos fenómenos ocurren por las reacciones químicas como el intercambio catiónico, por el cual los minerales arcillosos compensan las cargas negativas mediante la adsorción de los iones solubles de la fase líquida del suelo.

Otro de los fenómenos que se presentan es la cementación que se da a largo plazo por las reacciones puzolánicas (reacción química entre la sílice y la alúmina del suelo y la cal), esta reacción comprende la solubilización de los compuestos de sílice y alúmina débilmente cristalizados en la solución de hidróxido de calcio, generándose aluminosilicatos dicálcicos y tricálcicos similares a los obtenidos en el fraguado del cemento Portland.

Esto trae a largo plazo la reducción de la plasticidad y el potencial de hinchamiento, además del incremento del tamaño efectivo de los granos, la trabajabilidad e incremento de la resistencia.

Ventajas del uso de cal apagada o hidróxido de calcio

- En nuestro medio el costo de la cal con relación a otros agentes estabilizadores es muy bajo y es un producto que se encuentra con facilidad en el mercado.
- El tiempo de aplicación de la cal en el suelo es relativamente corto en comparación con otros métodos.
- Al ser utilizada en la estabilización de sub-rasantes, sub-bases y bases, la estructura consolidada mejora con el paso del tiempo.
- Se produce un suelo impermeable con resistencia y estabilidad a largo plazo y de forma permanente.
- El incremento en la resistencia del suelo afecta directamente y de manera positiva en la reducción del espesor de la carpeta de rodadura.
- Se reducen costos de movimientos de tierra al utilizarse el mismo suelo tratado con cal y se elimina la necesidad de transportar material de otros bancos lejanos.
- El proceso de estabilización de suelos puede llevarse a cabo en época lluviosa debido a que el mismo requiere suficiente humedad.
- La cal es muy económica en comparación a otros productos.
- La cal hidratada puede ser aplicada de 2 a 3 veces más rápido que la lechada de cal.
- Es menos agresiva que la cal viva.

2.3.3 Estabilización con cemento

Cuando los granos del cemento entran en contacto con el agua se forman masas de fibras minúsculas que se traban entre sí. La solución formada por la mezcla de cemento y agua reaccionan con las partículas del suelo, donde los iones de calcio tienden a coagular las partículas de suelo cargadas negativamente produciéndose la floculación. Posteriormente se compacta la mezcla y se produce una reacción del calcio con la sílice y alúmina produciéndose compuestos de silicatos y aluminatos que aumentan lentamente la resistencia de la mezcla con el tiempo (acción puzolánica).

La estabilización de suelos arcillosos con cemento, presentan mejoras para utilizar estos materiales en la construcción de obras civiles. Las propiedades que adquiere el suelo tratado con cemento son:

- Aumenta la durabilidad de la capa estabilizada.
- Mejora el índice de CBR.
- La humedad óptima de la mezcla suelo-cemento aumenta en comparación a la del suelo en estado puro.
- Reduce el índice de plasticidad.
- Reducen los cambios de volumen del suelo.
- Mejorar la resistencia mecánica, la capacidad portante del suelo.
- Desactiva parcialmente la actividad de las arcillas, por consiguiente se tiene una menor susceptibilidad al agua.

El uso del cemento es más económico y tiene sus mejores efectos en suelos con partículas menores a 7,5cm (3plg.), con 50 % de material que pase el tamiz 200, tenga un límite líquido < 40 e índice plástico <18.

La dosificación de la mezcla es determinante para el uso de este agente, ya que es muy costoso, por lo que la proporción de este puede determinar la factibilidad de su empleo.

Reacción suelo – cemento

Las partículas de cemento hidratado ligan a los granos adyacentes de suelo y forman un esqueleto continuo, duro y resistente que encierra una matriz de suelo inalterado, este esqueleto sella los vacíos en el suelo con el que se vuelve más impermeable y más resistente a los efectos por los cambios de humedad. Se presentan también reacciones entre los componentes del cemento y de la arcilla, del que se obtiene un material adicional cementante que contribuye a la unión entre las partículas del suelo y las del cemento endurecido. La arcilla sufre alteraciones, volviéndose menos plástica y expansiva al quedar en contacto con la humedad.

Durante el endurecimiento de una mezcla de arcilla y cemento, se presenta la hidratación del cemento, este proceso incrementa el valor del pH en el agua de moldeo. Las partículas de la arcilla participan entonces en el proceso secundario, que consiste en que los iones de calcio producidos durante la hidratación del cemento atacan a la

arcilla tendiendo a intensificar la floculación iniciada por el incremento en la proporción de electrólito que acompaña a la adición del cemento.

El hidróxido de calcio al atacar las partículas arcillosas forma un material cementante adicional. El hidróxido de calcio utilizado en el proceso secundario es proporcionado por la cal liberada durante la hidratación del cemento; en esta forma los productos de la reacción primaria proporcionan el reactivo necesario para la continuación del proceso. Los procesos secundarios aumentan la resistencia y la estabilidad de la mezcla obtenida en el proceso primario.

Empleo del cemento

La estabilización suelo-cemento se utiliza frecuentemente en caminos rurales sin pavimentar, en capas base y subbase de carretas de tráfico medio y pesado, en coronación de terraplenes, se utiliza en todo tipo de firmes rígidos por su gran rigidez y para evitar el fenómeno del bombeo de finos.

No se aconseja estabilizar con cemento los suelos arcillosos con $LL > 45$ e $IP > 18$ (*CROFT 1968*) ya que se necesitan cantidades elevadas de cemento, lo que hace antieconómico su uso, sin embargo un suelo plástico mezclado con cemento es más trabajable y sus mejoras son notables en relación a otros agentes.

Las cantidades óptimas recomendadas de cemento en relación al peso seco del suelo se muestran a continuación en la tabla 5.

Tabla N° 5. *Proporción de cemento en estabilizaciones.*

| TIPO DE SUELO | % EN PESO | PROPORCIONES A ENSAYAR (%) |
|----------------------|------------------|-----------------------------------|
| A - 1 - a | 3 - 5 | 3, 5, 7 |
| A - 1 - b | 5 - 8 | 4, 6, 8 |
| A - 2 | 5 - 9 | 5, 7, 9 |
| A - 3 | 7 - 11 | 7, 9, 11 |

| | | |
|-----------|-------------|------------|
| A - 4 | 7 - 12 | 8, 10, 12 |
| A - 5 | 8 - 13 | 8, 10, 12 |
| A - 6 | 9 - 15 | 10, 12, 14 |
| A - 7 | 10 - 16 | 11, 13, 15 |
| Orgánicos | Inadecuados | - |

Fuente: Portland Cement Association

2.4 Análisis del comportamiento de la expansión mediante la estabilización química del suelo

Las arcillas expansivas pueden ser tratadas mediante agentes estabilizantes para mejorar sus características iniciales. El tratamiento aquí propuesto se basa en seguir un procedimiento basado en la “estabilización química”, utilizando la cal y el cemento como agentes estabilizantes. Esto con la finalidad de controlar los cambios de volumen provocados por las variaciones de humedad, que puedan afectar a las construcciones futuras.

Para poder evaluar de manera objetiva el comportamiento del potencial de expansión de la arcilla ante la aplicación de diferentes porcentajes de agentes estabilizantes, sin perder de vista las mejoras en otras de sus propiedades, se propone las siguientes dosificaciones de la tabla siguiente:

Tabla N° 6. *Dosificaciones realizadas con los agentes estabilizantes*

| MUESTRA | SUELO | % DE AGENTE ESTABILIZANTE |
|----------------|--------------|----------------------------------|
| 1 | Arcilla | En estado puro |
| 2 | Arcilla | 3 % Cal |
| 3 | Arcilla | 5 % Cal |

| | | |
|---|---------|--------------|
| 4 | Arcilla | 7 % Cal |
| 5 | Arcilla | 8 % Cemento |
| 6 | Arcilla | 10 % Cemento |
| 7 | Arcilla | 15 % Cemento |

Fuente: Elaboración propia.

Mediante la adición de hidróxido de calcio o cal apagada y por otro lado el cemento portland se puede mejorar significativamente la plasticidad de las arcillas, ya que estos estabilizantes presentan buenos efectos sobre suelos con índices de plasticidad elevados.

Para efectuar este estudio nos basamos en el control y reducción de las características plásticas de la arcilla, que son determinantes a momento de clasificar un suelo expansivo. Primeramente se determinan las características geológicas de la arcilla en estado puro, entre estas características el índice de plasticidad (IP) y el porcentaje de partículas menores a 0.002 mm (arcilla).

El índice de plasticidad se lo obtiene mediante el procedimiento de los ensayos de límite líquido “S0304. (ASTM D4318 AASHTO T89)” y límite plástico “S0305. (ASTM D4318 AASHTO T90)”, el porcentaje de finos se lo obtiene mediante el ensayo de análisis granulométrico con hidrómetro “S0303. (ASTM D422)”, ensayos descritos en el anexo I.

Se calcula el valor de la actividad de la arcilla mediante la siguiente ecuación:

$$A = \frac{IP}{\%part. < 0.002mm} \quad (Ec. 2.1)$$

Se determina la clasificación del potencial de expansión mediante la *Carta de la Actividad* para clasificar la expansión de las arcillas, para las siete mezclas de suelo.

Seguidamente, con ayuda de la ecuación 2.2:

$$S = 0.00216 \times (IP)^{244} \quad (Ec. 2.2)$$

Determinamos el valor del potencial expansivo (S) de todas las muestras de la tabla 6. De los resultados obtenidos mediante la ecuación 2.2 hacemos una comparación de las mejoras del potencial expansivo ante la aplicación de los estabilizantes.

Finalmente determinamos el potencial expansivo (Δ) de las muestras de forma directa en laboratorio, mediante el Ensayo “S0604. *Expansión unidimensional y presión de levantamiento en mezclas de suelo-cal (ASTMD3877)*” del anexo I.

Una vez obtenidas todas las variables necesarias, comparamos los resultados del potencial de expansión de las diferentes muestras para analizar los cambios obtenidos ante la aplicación de los diferentes porcentajes de estabilizantes. De esta manera determinamos que agente controla de mejor manera los cambios volumétricos del suelo.

Una vez determinados los porcentajes de estabilizantes adecuados, se requiere llevar a cabo una evaluación técnico-económica entre los porcentajes definidos para el control de expansión y que pueda ser aplicado en nuestro medio, ya que el factor económico es determinante a la hora de construir, y nos ayudara a definir cuál es el agente óptimo a utilizar en nuestro medio.

CAPÍTULO III

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LA EXPANSIÓN DEL SUELO Y SUELO TRATADO

3.1 Reconocimiento y ubicación del sitio de estudio

El lugar donde se realizó la toma de muestras, está ubicado en la ciudad de Tarija, en las siguientes coordenadas:

Latitud: $21^{\circ}33'47,41'' S$

Longitud: $64^{\circ}43'34,96'' O$

Gráfico 13. Ubicación del sitio de estudio. Villa Olímpica, ciudad de Tarija



**Fuente: Google Earth.*

Se optó por realizar la toma de muestras en esta zona, porque aquí se encuentra ubicada una obra muy importante del departamento, como es la Villa Olímpica, además los alrededores del lugar se encuentran aún despobladas por lo que es de prever la construcción de obras civiles y más vías de acceso, en un futuro cercano.

En los alrededores predominan los suelos finos arcillosos, por tanto suelos expansivos, lo que afectaría en gran manera a las obras que se construyan en el lugar, y a las que se encuentran en construcción.

3.2 Muestreo y caracterización

3.2.1 Selección de la muestras

La muestra que se tomó es representativa del tipo alterada, es única y en una cantidad aproximada de 220 kg, suficiente para la realización de ensayos de caracterización y de investigación.

Primeramente se realizó una inspección visual de los alrededores de la zona, se seleccionó un lugar en base a las características físicas que presentan los suelos finos arcillosos. Tomando en cuenta que el sitio no presentaba características de relleno, se trata de un corte que permitió realizar el muestreo con mayor facilidad ya que se puede observar en él el color, distribución y consistencia del mismo, además de agrietamientos producto de la pérdida de humedad.

3.2.2 Toma de muestras

Una vez identificado el punto de muestreo, se procedió a retirar todo el material de la parte expuesta a la atmosfera, hasta aproximadamente unos 50 cm de profundidad, garantizando así retirar todo material afectado por los agentes atmosféricos.

Material utilizado en toma de muestra:

- Pico
- Pala
- Bolsas plásticas y bolsas de yute

Gráfico 14. Toma de muestras



Fuente: Elaboración propia

Procedimiento:

- Con la ayuda del pico y la pala se retiró la capa superficial, unos 50 cm de ancho aproximadamente, garantizando de esta manera, que la muestra recolectada no haya sufrido alteración con materiales sueltos de la superficie, como material orgánico.
- Se procede también a retirar el material seco y o suelto de la superficie lateral del lugar, unos 30cm de profundidad, para desechar todo material alterado por agentes del medio ambiente como la lluvia y el sol.
- Para recolectar el material para el estudio, se excavó en forma de canal horizontal a lo largo del estrato de arcilla seleccionado.
- Una pequeña porción de material se colocó inmediatamente en bolsas plásticas impermeables, evitando que este pierda humedad para ser llevado directamente al laboratorio y poder determinar el contenido de humedad del suelo mediante el método “**S0301. Determinación en laboratorio del contenido de humedad del suelo (ASTM D2216)**” descrito en el anexo I.

- El resto del material excavado, fue colocado en bolsas de yute con su respectiva identificación para ser transportados al laboratorio y llevar a cabo la ejecución de los diferentes ensayos.

3.3 Ensayos de caracterización de materiales

Se procedió con la caracterización de los materiales utilizados en el presente trabajo, como: la muestra de suelo, los estabilizantes empleados y el agua.

3.3.1 Características del suelo

Con el material recolectado en el muestreo, se realizaron los ensayos de caracterización de la muestra, que representan el estado inicial del suelo.

Los pasos y procedimientos de cada ensayo de laboratorio, fueron ejecutados en base a lo estipulado en norma ABC (Administradora Boliviana de Carreteras), presentados en el anexo I, por ser esta la norma que rige en nuestro país.

Los ensayos ejecutados, para caracterizar la muestra de arcilla, se presentan en la Tabla 7 y los resultados se de los mismos en Tabla 8.

Tabla N° 7. *Ensayos de laboratorio para caracterización de la muestra de suelo puro.*

| ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DE SUELOS | |
|---|--|
| Ensayo | Norma ABC |
| Preparación de muestras por cuarteo | S0202. (AASHTO T248) |
| Análisis granulométrico | S0204. (ASTM D421 ASTM D2217 AASHTO T87) |
| Contenido de humedad del suelo | S0301. (ASTM D2216) |
| Análisis granulométrico por tamizado | S0302. (ASTM D422 AASHTO T88) |
| Análisis granulométrico - hidrómetro | S0303. (ASTM D422) |
| Límite líquido | S0304. (ASTM D4318 AASHTO T89) |
| Límite plástico e índice de plasticidad | S0305. (ASTM D4318 AASHTO T90) |
| Peso específico | S0307. (ASTM D854 AASHTO T100) |
| Compactación estándar | S0402. (ASTM D698 AASHTO T99) |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 8. *Características iniciales del suelo en estado puro.*

| CARACTERISTICAS DEL SUELO PURO | | | | | | | | | | | |
|---------------------------------------|------|------|------|-----------|-----------|-------------------|----------------------------------|---------|-------------|---------------|------|
| MAT. | LL | LP | IP | % Arcilla | W Natural | γ Relativo | γ máx. gr/cm ³ | CHO | C.B.R. 100% | Clasificación | |
| | | | | | | | | | | AASHTO | SUCS |
| Arcilla | 51.5 | 25.1 | 26.4 | 22.3 | 14.3 | 2.68 | 1.6 | 19.1 | 3 | A-7-6(17) | C H |
| % que pasa el tamiz #200 | | | | | | | = | 99.56 % | | | |

Fuente: Elaboración propia.

Se seleccionó este material para la presente investigación, debido a que presenta en sus características iniciales, un elevado índice de plasticidad y la clasificación del mismo corresponde a materiales altamente plásticos.

3.3.2 Caracterización de la cal

La cal proviene de la piedra caliza o carbonato de calcio (CaCO_3). Este material posee una alta alcalinidad y cuenta con propiedades aglomerantes.

La calcinación de piedra caliza libera dióxido de carbono y se convierte en cal viva u óxido de calcio, esta cal viva es un producto químicamente inestable que al agregarle agua (hidratación), se convierte en hidróxido de calcio, comúnmente llamada cal apagada, cal aérea o cal hidratada. En la siguiente tabla se muestran las características de la cal utilizada en el presente trabajo

Tabla N° 9. *Características de la cal.*

| CARACTERÍSTICAS DE LA CAL | |
|----------------------------------|--------------------------|
| Nombre comercial | Cal hidratada industrial |
| Nombre químico | Hidróxido de calcio |
| Fórmula química | $\text{Ca}(\text{OH})_2$ |
| Granulometría | |
| Pasa tamiz #200 | 91,5 % |
| pH de la cal apagada | |
| 10.96 | |

Fuente: Elaboración propia.

3.3.3 Caracterización del cemento

Características del cemento utilizado según el fabricante:

- Es un producto obtenido de la molienda conjunta de Clinker, yeso y puzolana.
- Desprende menor calor de hidratación, lo que reduce la retracción técnica debido a la inclusión de puzolana.
- El Clinker es producto de la mezcla y calcinación de la piedra caliza, óxido de Hierro y arcilla, en hornos giratorios a 1500 °C. Al molerse y mezclarse con yeso y otras adiciones como puzolana se obtiene el cemento.

Los ensayos efectuados para la caracterización del cemento utilizado son: el ensayo **H0207**. Peso específico del cemento hidráulico (ASTM C188 AASHTO T133) y finura de molido por medio del lavado, del anexo I. Resultados que se muestran en la tabla siguiente:

Tabla N° 10. *Características del cemento.*

| | |
|-----------------------------------|-----------------------|
| Tipo | Cemento portland |
| Finura del molido | 99,2 % pasa tamiz 200 |
| Peso específico relativo ensayado | 2.98 |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 11. *Especificaciones técnicas del cemento.*

| | |
|-----------------|------------------------|
| Norma Técnica | Norma Boliviana NB-011 |
| Tipo de cemento | IP - 30 |
| Presentación | Bolsas de 50 kg |

Fuente: Planta de Cemento El Puente - Tarija.

3.4 Preparación de especímenes

Se prepararon mezclas, para todos los ensayos de investigación, con diferentes porcentajes de estabilizantes para poder evaluar de mejor manera su comportamiento.

Se realizaron ensayos de mezclas suelo-cal y mezclas suelo-cemento. Con tres porcentajes diferentes de estabilizante.

Los ensayos de investigación efectuados a las diferentes mezclas, se muestran a continuación en tabla 12.

Tabla N° 12. *Resumen de ensayos de investigación y otros.*

| ENSAYOS DE INVESTIGACIÓN | |
|---|--------------------------------|
| Nombre de ensayo | Norma |
| Límite líquido | S0304. (ASTM D4318 AASHTO T89) |
| Límite plástico e índice de plasticidad | S0305. (ASTM D4318 AASHTO T90) |
| Análisis granulométrico - Hidrómetro | S0303. (ASTM D422) |
| Expansión unidimensional | S0604. (ASTM D3877) |

Fuente: Elaboración propia.

3.4.1 Diseño y elaboración de mezclas suelo-cal

Para el análisis de las mezclas, se realizaron tres dosificaciones, agregando al suelo puro, dosificaciones del 3, 5 y 7 % de cal respecto al peso seco de la muestra, tomando en cuenta que el suelo a tratar es muy plástico. Estos porcentajes se definieron en base a los rangos utilizados para la estabilización volumétrica con cal.

Las muestras fueron dosificadas antes de la ejecución de los ensayos. Las mezclas se dejaron reposar por un periodo de 24 horas, para que interactúen todos los componentes. Para lo cual las mezclas se colocan dentro de bolsas plásticas selladas herméticamente, evitando de esta manera que las mezclas absorban humedad del ambiente.

3.4.2 Diseño y elaboración de mezclas suelo-cemento

Las mezclas de suelo cemento fueron preparadas con porcentajes de 8, 10 y 15% de cemento respecto al peso del suelo seco puro. Estas dosificaciones se encuentran dentro del rango recomendado para la estabilización de suelos arcillosos. Las mezclas necesarias para los ensayos fueron ejecutadas de acuerdo al requerimiento de los ensayos y una hora antes de su ejecución, ya que el cemento absorbe humedad del ambiente rápidamente y su proceso de fraguado es muy rápido. Por lo que se cuenta

con aproximadamente dos horas para poder manipular las mezclas, ya que después de este tiempo, la mezcla pierde trabajabilidad.

3.5 Ejecución de ensayos de las mezclas

3.5.1 Límite líquido y límite plástico de mezclas suelo-cal

Este ensayo tiene por objeto la determinación del límite líquido de las diferentes muestras mediante la copa de Casagrande.

El límite líquido es la humedad, expresada en porcentaje, de la masa de suelo seco remoldeado que corresponde a la humedad necesaria para que entren en contacto las porciones divididas de la copa de Casagrande, aplicando 25 golpes.

Gráfico 15. Copa de Casagrande con muestra para ensayo de límite líquido.



Fuente: Elaboración propia, fotografía de laboratorio.

Preparación de muestras

Se toman 200 gramos de material seco que pasa el tamiz N°40 (0,425mm), se dosifica con 3% de cal y se deja reposar la mezcla por 48 horas para conseguir una adecuada interacción entre las partículas del suelo y la cal. La mezcla se colocó dentro de bolsas plásticas para evitar la absorción constante de humedad del ambiente.

Posteriormente se procede a ejecutar el ensayo como indica el procedimiento y uso de materiales del ensayo “*S0304. Determinación del límite líquido de los suelos (ASTM D4318 AASHTO T89)*” del anexo I.

Gráfico 16. Imágenes del ensayo límite líquido.



Fuente: Fotografía propia de laboratorio.

De la misma manera se procedió a ejecutar el ensayo para las mezclas dosificadas con 5 y 7% de cal.

Tabla N° 13. Límite líquido muestras suelo-cal.

| MUESTRA | LL |
|----------------|-----------|
| 3% cal | 42.18 |
| 5% cal | 41.30 |
| 7% cal | 41.26 |

Fuente: Elaboración propia.

El **límite plástico** de los suelos es la humedad expresada como porcentaje de la masa de suelo seco remoldeado, es el límite entre el estado plástico y el estado semisólido. Es la humedad que corresponde a la necesaria para ser re amasados sin que se disgreguen o se rompan, el valor corresponde a la frontera entre el estado semilíquido y plástico. En forma conjunta con el límite líquido se determina el índice de plasticidad del suelo en estudio, muy importante en la clasificación del suelo y del potencial de expansión del.

Este ensayo fue ejecutado tomando una porción de mezcla dosificada con cal al 3%, con la que se preparó el ensayo de límite líquido. La porción de muestra fue aproximadamente de 60 gramos, la cual se amasa con la mano. De esta manera se

siguieron los procedimientos y uso de materiales del ensayo “S0305. Determinación del límite plástico e índice de plasticidad (ASTM D4318 AASHTO T90)” del anexo I.

Gráfico 17. Ensayo de límite plástico.



Fuente: Elaboración propia, fotografía de laboratorio.

De igual manera se efectuó el mismo procedimiento para obtener el límite plástico de las mezclas de suelo – cal dosificadas al 5 y 7%.

Tabla N° 14. Límite plástico muestras suelo-cal.

| MUESTRA | LP |
|---------|-------|
| 3% cal | 35.96 |
| 5% cal | 36.72 |
| 7% cal | 37.15 |

Fuente: Elaboración propia.

3.5.2 Límite líquido y límite plástico de mezclas suelo-cemento

Este ensayo tiene por objeto la determinación del límite líquido de las mezclas suelo-cemento mediante la copa de Casagrande.

El límite líquido es la humedad expresada en porcentaje de la masa de suelo seco remoldeado que corresponde a la humedad necesaria para que entren en contacto las porciones divididas de la copa de Casagrande, aplicando 25 golpes.

Preparación de muestras

Se tomaron 200 gramos de material seco que pasa el tamiz N°40 (0,425mm.), se dosificó con 8% de cemento, e inmediatamente se procedió a ejecutar el ensayo, antes

de transcurrido una hora, ya que el tiempo máximo de trabajabilidad de las estas mezclas es de aproximadamente una hora y media.

La ejecución del ensayo se lo realiza como indica el procedimiento y uso de materiales del ensayo “**S0304. Determinación del límite líquido de los suelos (ASTM D4318 AASHTO T89)**” del anexo I.

De la misma manera se procedió para las mezclas dosificadas con 10 y 15% de cemento.

Tabla N° 15. *Límite líquido muestras suelo-cemento.*

| MUESTRA | LL |
|----------------|-----------|
| 8 % cemento | 39.84 |
| 10 % cemento | 39.05 |
| 15 % cemento | 40.01 |

Fuente: Elaboración propia.

El **límite plástico** de los suelos es la humedad expresada como porcentaje de la masa de suelo seco remoldeado, es el límite entre el estado plástico y el estado semisólido. Es la humedad que corresponde a la necesaria para ser re amasados sin que se disgreguen o se rompan, el valor corresponde a la frontera entre el estado semilíquido y plástico. En forma conjunta con el límite líquido se determina el índice de plasticidad del suelo en estudio, muy importante en la clasificación.

Este ensayo fue ejecutado tomando una porción mezcla dosificada con cal al 8%, con la que se preparó el ensayo de límite líquido. La porción de muestra fue aproximadamente de 60 gramos, la cual fue amasada con la mano hasta obtener los resultados requeridos. Posteriormente se sigue el procedimiento y uso de materiales del ensayo “**S0305. Determinación del límite plástico e índice de plasticidad (ASTM D4318 AASHTO T90)**” del anexo I, como si se tratara de un suelo cualquiera.

De igual manera se efectuó el mismo procedimiento para obtener el límite plástico de todas las mezclas de suelo- cemento dosificadas al 10 y 15%.

Tabla N° 16. *Límite plástico muestras suelo-cemento.*

| MUESTRA | LP |
|----------------|-----------|
| 8 % cemento | 35.62 |
| 10 % cemento | 35.04 |
| 15 % cemento | 36.03 |

Fuente: Elaboración propia.

3.5.3 Peso específico de mezclas suelo-cal y suelo-cemento

También llamada gravedad específica. Se define como la relación entre el peso específico de la mezcla y el peso específico del agua. Mediante este ensayo se determina la densidad de las partículas sólidas de las mezclas suelo-cal.

Gráfico 18. Ensayo de Peso específico



Fuente: Fotografía de laboratorio. Elaboración propia.

Preparación de mezclas suelo-cal

Para su ejecución se tomó 80 gramos de la mezcla de suelo-cal al 3% respecto al peso seco del suelo, preparada como se indicó con anterioridad en la preparación de mezclas suelo – cal.

Se colocó la muestra en un plato donde se le agregó una cantidad de agua necesaria para diluirla completamente y retirar todo el aire atrapado entre las partículas, se removió durante 10 minutos formando una pasta homogénea.

Posteriormente se procedió como un ensayo de suelo común como indica el procedimiento y uso de materiales del ensayo “S0307. *Determinación del peso*

específico de los suelos (ASTM D854 AASHTO T100)” del anexo I, cabe resaltar que se utilizó el mismo frasco para todos los ensayos de las diferentes mezclas. Y de igual forma se realizaron los ensayos para las mezclas con dosificaciones del 5 y 7% de cal.

Tabla N° 17. *Peso específico relativo, muestras suelo-cal.*

| MUESTRA | γ RELATIVO |
|---------|-------------------|
| 3 % cal | 2,67 |
| 5 % cal | 2,66 |
| 7 % cal | 2,66 |

Fuente: Elaboración propia.

Preparación de mezclas suelo-cemento

Para la elaboración de mezclas suelo-cemento, primeramente se dosifico a porcentajes de 8, 10,15 % de cemento, respecto al peso del suelo seco. Las dosificaciones se la realizan antes de la ejecución del ensayo, ya que el cemento tiene un tiempo corto de trabajabilidad.

Se tomó 80 gramos de mezcla suelo-cemento previamente dosificada y se colocó la muestra en un plato donde se le agrego una cantidad de agua necesaria para diluirla completamente y retirar todo el aire atrapado entre las partículas, se removió durante 10 minutos formando una pasta homogénea cuidando que no quedaran burbujas de aire atrapadas. Una vez homogenizada la mezcla, se procede a vaciar inmediatamente la muestra en el matraz, sin dejar residuos en el plato.

Posteriormente se procede como indica el procedimiento y uso de materiales del ensayo “*S0307. Determinación del peso específico de los suelos (ASTM D854 AASHTO T100)*” del anexo I, cabe resaltar que se utilizó el mismo frasco para todos los ensayos de las diferentes mezclas suelo-cemento. De esta forma se realizaron los ensayos para las mezclas con dosificaciones del 8,10 y 15% de cemento.

Tabla N° 18. *Peso específico relativo, muestras suelo-cemento.*

| MUESTRA | γ_{RELATIVO} |
|--------------|----------------------------|
| 8 % cemento | 2,70 |
| 10 % cemento | 2,72 |
| 15 % cemento | 2,72 |

Fuente: Elaboración propia.

3.5.4 Análisis granulométrico por hidrómetro para mezclas suelo-cal y suelo cemento

Este ensayo consiste en clasificar por tamaños los granos que componen un suelo y los resultados son representados gráficamente.

El análisis de este ensayo se basa en la ley de Stokes que relaciona la velocidad de una esfera, cayendo libremente a través de un fluido, con el diámetro de la esfera. El hidrómetro se usa para determinar el porcentaje de partículas de suelos dispersados que permanecen en suspensión en un determinado tiempo.

Mediante este ensayo de laboratorio determinamos el porcentaje de arcillas y limos contenidos en una determinada muestra.

Preparación de mezclas suelo-cal

La muestra utilizada para el este ensayo, fue de 50 gramos para la arcilla pura y de 80 gramos para las mezclas dosificadas, de material que pasa el tamiz N°200, tamizada y dosificada 24 horas antes de la realización del ensayo.

Estas mezclas se dejan saturar por 15 minutos con agua destilada mientras se remueve para su completa saturación, posteriormente se sigue el procedimiento y uso de materiales del ensayo “S0303. Análisis granulométrico por medio del Hidrómetro (ASTM D422)” del anexo I.

Gráfico 19. Ensayo granulométrico-Hidrómetro de arcilla pura y mezclas



Fuente: Elaboración propia, fotografía de laboratorio.

Gráfico 20. Ensayo granulométrico-Hidrómetro. Mezcla suelo-cal y arcilla pura secado al horno



Fuente: Elaboración propia, fotografía de laboratorio.

Resultados Obtenidos de ensayos de hidrómetro en muestras suelo-cal:

Tabla N° 19. Contenido de arcilla, muestras suelo-cal.

| RESUMEN HIDRÓMETROS | | | |
|----------------------------|---------------|---------------|---------------|
| Detalle | 3% cal | 5% cal | 7% cal |
| % Limos | 93.38 | 94.63 | 94.96 |
| % Arcilla | 6.18 | 4.93 | 4.60 |

Fuente: Elaboración propia.

Preparación de la muestra suelo-cemento

La muestra total utilizada para el ensayo, fue de 80 gramos de mezcla suelo-cemento al 8% respecto del suelo seco, el material utilizado pasa el tamiz N°200. Esta muestra se mezcló por 15 min con agua destilada e inmediatamente se vació a la probeta de ensayo. Posteriormente se sigue el procedimiento y uso de materiales indicado en el ensayo “*S0303. Análisis granulométrico por medio del Hidrómetro (ASTM D422)*” del anexo I.

El mismo proceso fue realizado para las diferentes dosificaciones de mezclas suelo – cemento al 10 y 15 %.

Tabla N° 20. *Contenido de arcilla, muestras suelo-cemento.*

| RESUMEN HIDRÓMETROS | | | |
|----------------------------|-------------------|--------------------|--------------------|
| Detalle | 8% Cemento | 10% Cemento | 15% Cemento |
| % Limos | 94.78 | 96.02 | 96.63 |
| % Arcilla | 4.78 | 3.54 | 2.93 |

Fuente: Elaboración propia.

3.6 Ensayos de expansión

Para poder determinar la expansión potencial de las muestras, mediante el ensayo de expansión unidimensional, se requiere llevar a cabo otros ensayos necesarios que se muestran a continuación:

Tabla N° 21. *Resumen de ensayos necesarios para determinar la expansión.*

| ENSAYOS DETERMINAR LA EXPANSIÓN | |
|--|--------------------------------|
| Compactación estándar | S0402. (ASTM D698 AASHTO T99) |
| Peso específico relativo | S0307. (ASTM D854 AASHTO T100) |

Fuente: Elaboración propia.

Para la ejecución del ensayo de expansión unidimensional de suelos “*S0604. (ASTM D3877)*”, de procedió primeramente a determinar la humedad óptima y la densidad máxima, de las diferentes mezclas ensayadas.

Gráfico 21. Consolidómetro para ensayo de expansión unidimensional.



Fuente: Elaboración propia, fotografía de laboratorio.

Gráfico 22. Colocación de muestras para ensayo de expansión unidimensional.



Fuente: Elaboración propia, fotografía de laboratorio.

Se utilizaron moldes prismáticos de 6x6 cm de área y 2.65 cm de altura para todas las muestras ensayadas. Y también se utilizó una carga de fijación equivalente a 0.75 kg de peso, equivalente a una presión de 0,21 kg/cm², esto según indica el ensayo de expansión unidimensional.

Gráfico 23. Muestra prismática para ensayo de expansión unidimensional.



Fuente: Elaboración propia, fotografía de laboratorio.

La carga máxima aplicada en el ensayo de las diferentes muestras depende de la presión máxima de hinchamiento de cada uno de los especímenes de prueba.

A medida que se satura la muestra en el consolidómetro, se aumenta la presión, para evitar que se expanda, hasta que finalmente queda en equilibrio. La carga con la que se alcanza el equilibrio, es la llamada presión máxima de hinchamiento. Esta carga es tomada como referente para la descarga del espécimen, y también en el proceso de “expandido y cargado”.

El valor de las cargas aplicadas se hizo en base a lo indicado en el ensayo estandarizado. Se lectura cada 24 horas tomando la lectura inicial y final de cada cambio de presión.

En caso de las mezclas de suelo-cal y suelo-cemento, los especímenes ya compactados y recortados, de las diferentes mezclas se dejaron en reposo por tres días, en bolsas plásticas y dentro de una conservadora para prever que no pierdan humedad. Con la finalidad que interactúe el suelo con el estabilizante aplicado.

3.6.1 Expansión del suelo en estado puro

Para determinar el potencial de expansión de la arcilla en estado puro, se procedió mediante las indicaciones del procedimiento y uso de materiales del ensayo “S0604. (ASTM D3877) expansión unidimensional de muestras suelo-cal”, tomando los valores

de la densidad máxima y la humedad óptima (CHO) determinados en la caracterización de la arcilla.

Primeramente se compacta una muestra a humedad óptima, mediante el procedimiento del ensayo “S0402. (ASTM D698 AASHTO T99) compactación estándar”. Del centro de la probeta se extrajeron dos muestras mellizas, una para el proceso de “cargado y expandido” y la otra para “expandido y cargado”.

Con la primera muestra se procede con la etapa de “cargado y expandido”, donde se determina la presión máxima de hinchamiento, misma que se utiliza como la presión máxima en el proceso de “expandido y cargado” de la segunda muestra.

Todo el proceso desde el compactado, el tallado de los especímenes, y la saturación en el consolidómetro, se lo realiza rápidamente y cuidando que las muestras no pierdan su humedad, para ello se utilizaron bolsas plásticas para cubrir los especímenes el mayor tiempo posible.

Gráfico 24. Muestra recuperada al final del ensayo de expansión unidimensional.



Fuente: Elaboración propia, fotografía de laboratorio.

De los resultados del ensayo de expansión, se determina como presión máxima de hinchamiento de 0,222 kg/cm² para la arcilla en estado puro.

3.6.2 Expansión de mezclas suelo-cal

Se realizó la dosificación y posterior compactación con cal, 24 horas antes de la ejecución de los mismos, dejándolos reposar en bolsas plásticas, de manera que las

mezclas no absorban humedad del ambiente. El reposo de las mezclas es para que interactúen las partículas del suelo con las del estabilizante.

Posteriormente se siguieron los pasos mencionados en el ensayo estandarizado “**S0402. Relaciones de peso unitario-humedad en suelos método estándar (ASTM D698 AASHTO T99)**” del anexo I, para obtener la humedad óptima de las diferentes muestras dosificadas, también se efectúa el mismo ensayo para obtener las muestras mellizas del centro de la probeta, para la prueba de expansión unidimensional. Estas muestras mellizas obtenidas, se dejan en reposo en bolsas herméticas y en conservadora, por 48 horas para dejar interactuar el estabilizante con la arcilla, antes de la ejecución del ensayo de expansión.

La presión máxima de hinchamiento es de 0,07 kg/cm², para las muestras dosificadas con 3, 5 y 7% de cal.

3.6.3 Expansión de mezclas suelo-cemento

Para determinar la humedad óptima (CHO) de las mezclas dosificadas con cemento, primeramente se realizó la dosificación con los porcentajes indicados (8, 10 y 15 % de cemento), e inmediatamente se procedió a la ejecución del ensayo “**S0402. Relaciones de peso unitario-humedad en suelos método estándar (ASTM D698 AASHTO T99)**” como una muestra cualquiera.

Cabe resaltar que los ensayos fueron ejecutados dentro de los periodos de trabajabilidad de las mezclas, ya que el proceso de fraguado del cemento es bastante acelerado.

Posteriormente se compactó, a humedad óptima una probeta de donde se extrajeron las muestras mellizas del centro de la misma, para ejecutar los ensayos de expansión unidimensional. Estas muestras obtenidas se dejan en reposo en bolsas herméticas y en conservadora, por 48 horas para dejar interactuar el estabilizante con la arcilla, antes de la ejecución del ensayo de expansión.

La presión máxima de hinchamiento para las muestras dosificadas con 8, 10 y 15 % de cemento, fue de 0,07 kg/cm², para todas las muestras.

3.7 Determinación del potencial de expansión

Resultados obtenidos de los ensayos de laboratorio, de expansión unidimensional en consolidómetro de las diferentes muestras:

Tabla N° 22. *Resultados del potencial de expansión de las mezclas, mediante el ensayo de expansión unidimensional.*

| EXPANSIÓN UNIDIMENCIONAL | | | |
|---------------------------------|----------------|-----------------------------|--------------------------------|
| N° de muestra | Muestra | (%) de estabilizante | Δ (%) |
| 1 | Arcilla | 0 | 5.399 |
| 2 | Arcilla | 3 % Cal | 0.735 |
| 3 | Arcilla | 5 % Cal | 0.592 |
| 4 | Arcilla | 7 % Cal | 0.559 |
| 5 | Arcilla | 8 % Cemento | 0.547 |
| 6 | Arcilla | 10 % Cemento | 0.502 |
| 7 | Arcilla | 15 % Cemento | 0.459 |

Fuente: Elaboración propia.

3.8 Comportamiento suelo-cal

Tabla N° 23. *Variación de la expansión del suelo estabilizado con cal, según la actividad.*

| MUESTRA | A | POTENCIAL DE EXPANSIÓN |
|--------------------|----------|-------------------------------|
| Arcilla pura | 1.181 | Medio |
| Arcilla con 3% Cal | 1.007 | Bajo |
| Arcilla con 5% Cal | 0.928 | Bajo |
| Arcilla con 7% Cal | 0.893 | Bajo |

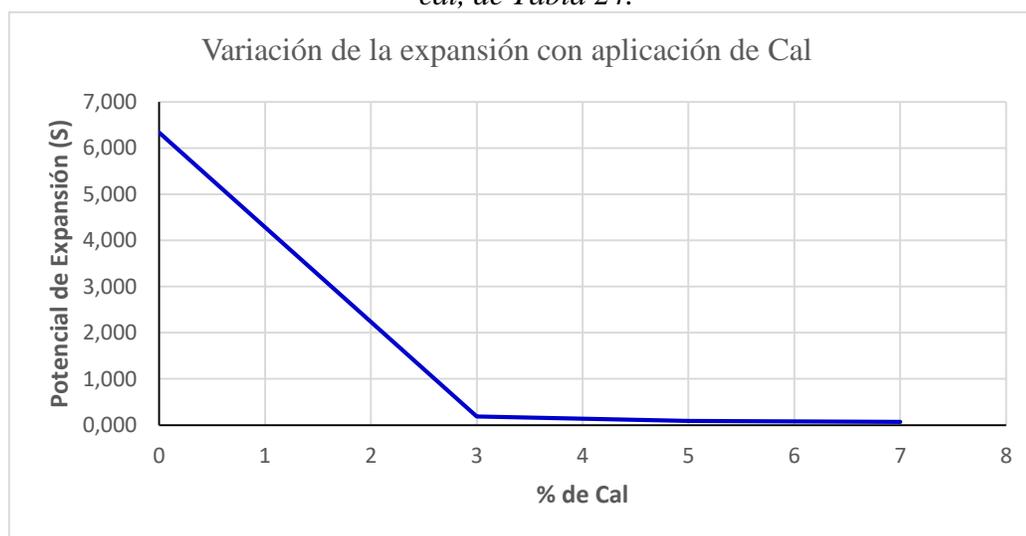
Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 24. *Variación de la expansión del suelo estabilizado con cal, según el potencial de expansión en base a ecuación 2.2*

| MUESTRA | % CAL | S |
|-----------------|-------|-------|
| Arcilla pura | 0 | 6.334 |
| Arcilla con Cal | 3 | 0.187 |
| Arcilla con Cal | 5 | 0.088 |
| Arcilla con Cal | 7 | 0.068 |

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 25. Representación gráfica del comportamiento del suelo estabilizado con cal, de Tabla 24.



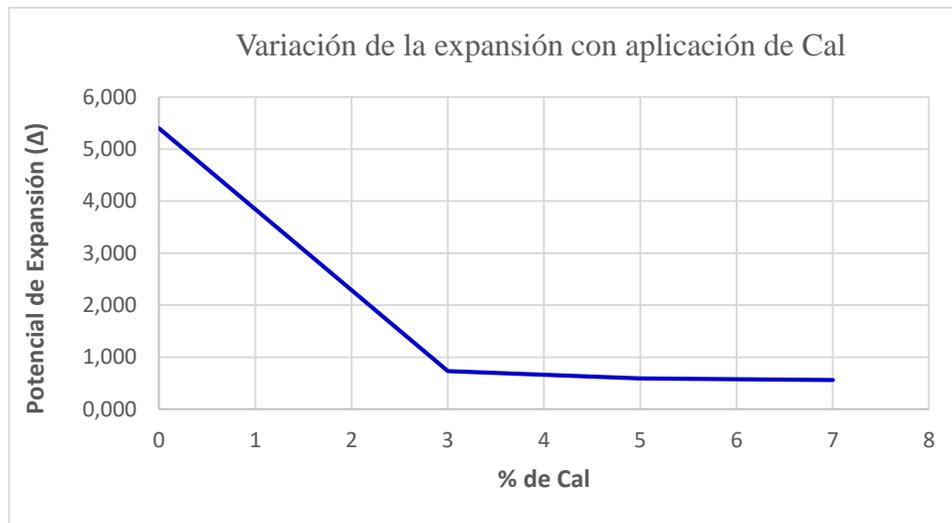
Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 25. Variación de la expansión del suelo estabilizado con cal, en base al ensayo de expansión unidimensional

| MUESTRA | % CAL | Δ |
|-----------------|-------|----------|
| Arcilla pura | 0 | 5.399 |
| Arcilla con Cal | 3 | 0.735 |
| Arcilla con Cal | 5 | 0.592 |
| Arcilla con Cal | 7 | 0.559 |

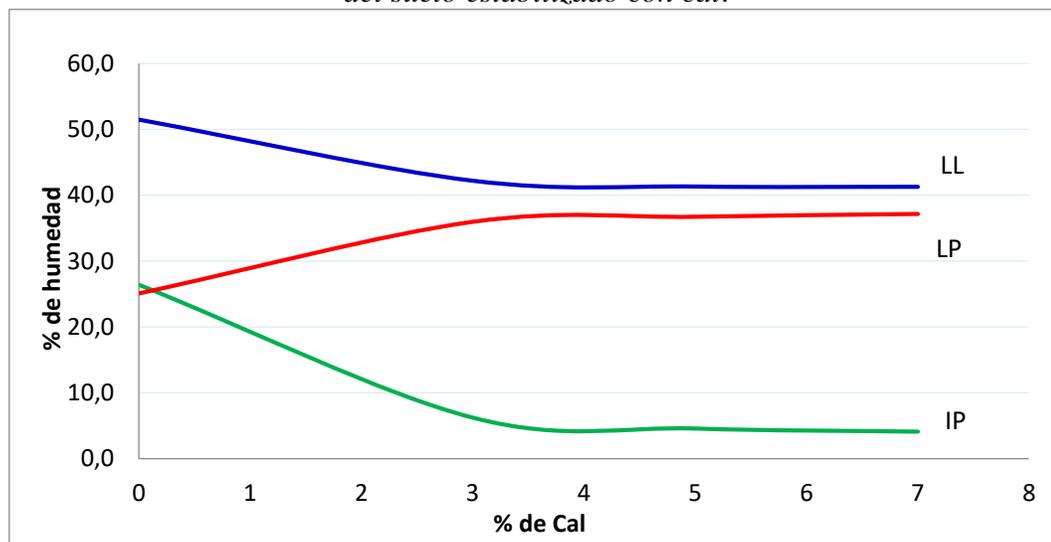
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 26. Representación gráfica del comportamiento del suelo estabilizado con cal, de tabla 25.



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 27. Representación gráfica de la variación de las características plásticas del suelo estabilizado con cal.



Fuente: Elaboración propia.

3.9 Comportamiento suelo-cemento

Tabla N° 26. *Variación de la expansión del suelo estabilizado con cemento, según la actividad.*

| .MUESTRA | A | POTENCIAL DE EXPANSIÓN |
|-------------------------|----------|-------------------------------|
| Arcilla pura | 1.181 | Medio |
| Arcilla con 8% Cemento | 0.881 | Bajo |
| Arcilla con 10% Cemento | 1.132 | Bajo |
| Arcilla con 15% Cemento | 1.359 | Bajo |

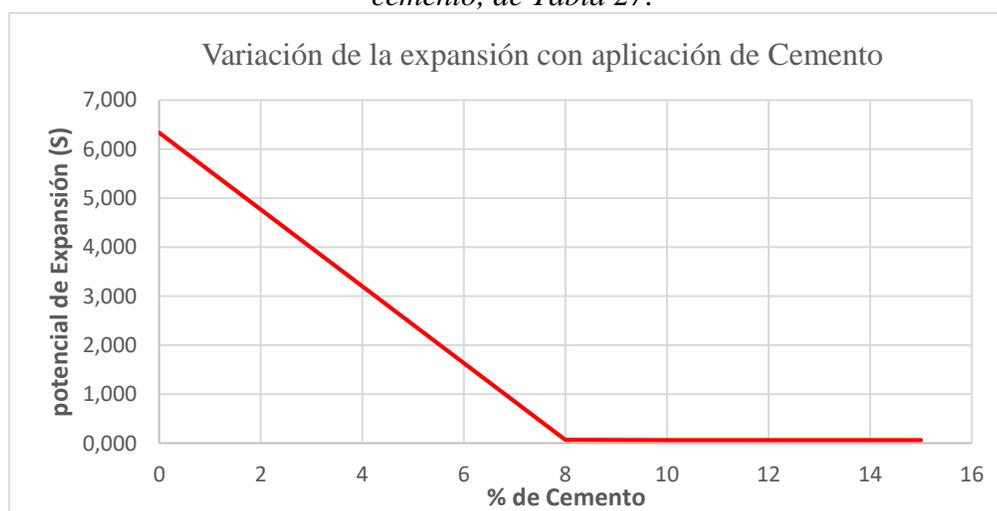
Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 27. *Variación de la expansión del suelo estabilizado con cemento, según el potencial de expansión en base a ecuación 2.2.*

| MUESTRA | % CEMENTO | S |
|---------------------|------------------|----------|
| Arcilla pura | 0 | 6.334 |
| Arcilla con Cemento | 8 | 0.072 |
| Arcilla con Cemento | 10 | 0.064 |
| Arcilla con Cemento | 15 | 0.063 |

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 28. *Representación gráfica del comportamiento del suelo estabilizado con cemento, de Tabla 27.*



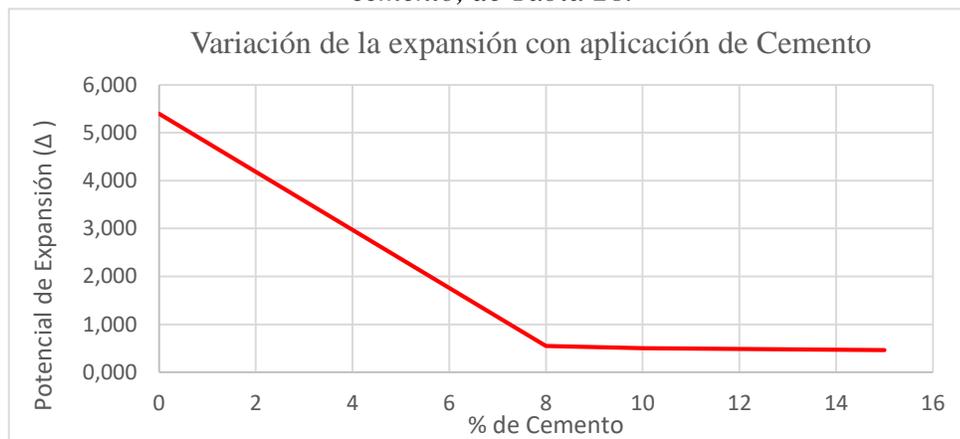
Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 28. *Variación de la expansión del suelo estabilizado con cemento, en base al ensayo de expansión unidimensional*

| MUESTRA | % CEMENTO | Δ |
|---------------------|-----------|----------|
| Arcilla pura | 0 | 5.399 |
| Arcilla con Cemento | 8 | 0.547 |
| Arcilla con Cemento | 10 | 0.502 |
| Arcilla con Cemento | 15 | 0.459 |

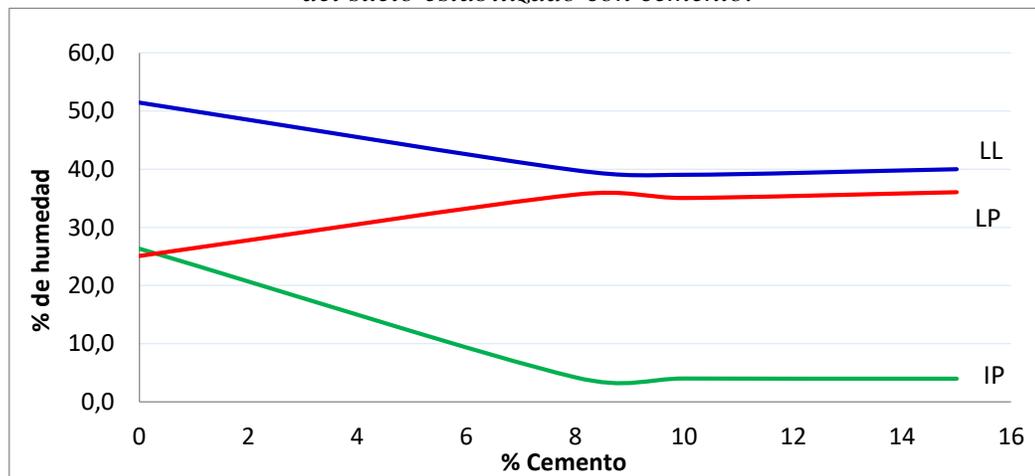
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 29. Representación gráfica del comportamiento del suelo estabilizado con cemento, de Tabla 28.



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 30. Representación gráfica de la variación de las características plásticas del suelo estabilizado con cemento.



Fuente: Elaboración propia.

3.10 Análisis económico de porcentajes óptimos

3.10.1 Análisis de costos de estabilización, con cal.

Estabilización de explanada "in situ"

Actividades:

1. Escarificación
2. Disgregación
3. Adición del conglomerante (cal, cemento)
4. Adición de agua.
5. Mezclado.
6. Extendido, compactado y acabado de la superficie de la capa.

Determinación de la cantidad de cal:

Unidad: m³

Determinación del peso del suelo natural:

$$\text{Densidad max o Peso vol. max} = \mathbf{1.607} \text{ gr/cm}^3 = 1607.000 \text{ kg/m}^3$$

Peso = Volumen * Peso volumétrico seco máximo

$$\mathbf{\text{Peso del suelo} = 1607.000 \text{ kg}}$$

$$\text{Porcentaje de CAL optimo} = 3.000 \text{ \%}$$

$$\text{Peso de la bolsa de CAL} = 11.000 \text{ kg}$$

$$\text{Costo por bolsa de CAL} = 9.000 \text{ Bs.-}$$

$$\mathbf{\text{Peso de la cal} = 48.210 \text{ kg}}$$

$$\mathbf{\text{Número de bolsas de cal} = 4.383 \text{ bolsas}}$$

$$\mathbf{\text{Costo total de cal} = 39.445 \text{ Bs.-}}$$

Determinación de la cantidad de agua:

Unidad: m³

CHO suelo-cal = **19.400** % mas 3% del optimo CHO, por evaporación

Peso del agua = 370.767 kg

Volumen de agua = 0.371 m³

Resumen de materiales:

Peso del suelo = 1607.000 kg

Peso del cemento = 48.210 kg

Volumen de agua = 0.371 m³

Determinación de materiales y costos para un tramo de un kilómetro:

Longitud del tramo = 1.00 km = 1000.00 m

Espesor de la Estabilización = 20.00 cm = 0.20 m

% Estabilizante = 3.00 %

Tabla N° 29. *Costo de estabilización con 3% de cal, para explanada de 1 km.*

| DESCRIPCIÓN | ANCHO VÍA (m) | SUELO (m ³) | CAL | | AGUA (m ³) | COSTO (Bs.-) |
|------------------|---------------------|----------------------------|----------|----------|---------------------------|-----------------|
| | | | (kg) | (bolsas) | | |
| Carretera 1 vía | 3.60 | 720.00 | 34711.20 | 3155.56 | 266.95 | 44952.48 |
| Carretera 2 vías | 7.20 | 1440.00 | 69422.40 | 6311.13 | 533.90 | 89904.96 |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 30. *Precio unitario. Estabilización con 3% de cal.*

Unidad: M3
Moneda: Bolivianos

| Descripción | Und. | Cantidad | % Productivo | | Precio | | Costo Total |
|--|------|----------|--------------|--------------|------------|--------------|---------------|
| | | | Productivo | Improductivo | Productivo | Improductivo | |
| 1. MATERIALES | | | | | | | |
| CAL | KG | 48.21000 | | | | 0.818 | 39.441 |
| TO TAL MATERIALES | | | | | | | 39.441 |
| 2. MANO DE OBRA | | | | | | | |
| PEON | HR. | 0.01445 | | | | 9.883 | 0.143 |
| CHOFER | HR. | 0.01445 | | | | 13.572 | 0.196 |
| OPERADOR EQUIPO LIVIANO | HR. | 0.00723 | | | | 13.990 | 0.101 |
| OPERADOR EQUIPO PESADO | HR. | 0.00361 | | | | 15.103 | 0.055 |
| CAPATAZ | HR. | 0.00361 | | | | 17.261 | 0.062 |
| SUBTO TAL MANO DE OBRA | | | | | | | 0.557 |
| IMPUESTO AL VALOR AGREGADO - % | | | | | | 14.94% | 0.150 |
| BENEFICIOS SOCIALES - % | | | | | | 80.85% | 0.450 |
| TO TAL MANO DE OBRA | | | | | | | 1.158 |
| 3. EQUIPO Y MAQUINARIA | | | | | | | |
| COMPACTADORA PATA DE CABRA CP533 145 HP | HR. | 0.00361 | 88.24% | | 94.753 | 262.844 | 0.878 |
| MOTONIVELADORA 120K 125 HP | HR. | 0.00361 | 100.00% | | 216.588 | 457.495 | 1.652 |
| TRACTOR AGRICOLA C/ARADO DE DISCOS 90 HP | HR. | 0.00361 | 85.78% | | 40.424 | 135.810 | 0.442 |
| CAMION CISTERNA 10000LT | HR. | 0.01445 | 79.67% | | 50.892 | 218.140 | 2.661 |
| HERRAMIENTAS - % | | | | | | 0.00% | 0.000 |
| TO TAL EQUIPO Y MAQUINARIA | | | | | | | 5.633 |
| 4. ACTIVIDAD COMPLEMENTARIA | | | | | | | |
| | | 0.00000 | | | | 0.000 | 0.000 |
| TOTAL ACTIVIDAD COMPLEMENTARIA | | | | | | | 0.000 |
| 5. GASTOS GENERALES | | | | | | | |
| GASTOS GENERALES - % | | | | | | 21.00% | 9.709 |
| TOTAL GASTOS GENERALES | | | | | | | 9.709 |
| 6. UTILIDAD | | | | | | | |
| UTILIDAD - % | | | | | | 10.00% | 4.623 |
| TOTAL UTILIDAD | | | | | | | 4.623 |
| 7. IMPUESTOS | | | | | | | |
| IMPUESTO A LAS TRANSACCIONES - % | | | | | | 3.09% | 1.871 |
| TO TAL IMPUESTOS | | | | | | | 1.871 |
| TOTAL PRECIO UNITARIO | | | | | | | 62.434 |

Fuente: Elaboración propia.

3.10.2 análisis de costos de estabilización, con cemento.

Estabilización de explanada "in situ"

Actividades:

1. Escarificación
2. Disgregación
3. Adición del conglomerante (cal, cemento)
4. Adición de agua.
5. Mezclado.
6. Extendido, compactado y acabado de la superficie de la capa.

Determinación de la cantidad de cemento:

Unidad: m³

Determinación del peso del suelo natural:

Densidad máxima o Peso vol. max= **1.607** gr/cm³ = 1607.000 kg/m³

Peso = Volumen * Peso volumétrico seco máximo

Peso del suelo = 1607.000 kg

Porcentaje de CEMENTO optimo = 8.000 %

Peso de la bolsa de CEMENTO = 50.000 kg

Costo por bolsa de CEMENTO = 55.000 Bs.-

Peso del cemento = 128.560 kg

Número de bolsas de cemento = 2.571 bolsas

Costo total del cemento = 141.416 Bs.-

Determinación de la cantidad de agua:

Unidad: m³

CHO suelo-cemento = **19.800** % mas 3% del optimo CHO, por evaporación

Peso del agua = 395.708 kg

Volumen de agua = 0.396 m³

Resumen de materiales:

Peso del suelo = 1607.000 kg

Peso del cemento = 128.560 kg

Volumen de agua = 0.396 m³

Determinación de materiales y costos para un tramo de un kilómetro:

Longitud del tramo = 1.00 km = 1000.00 m

Espesor de la Estabilización = 20.00 cm = 0.20 m

% Estabilizante = 8.00 %

Tabla N° 31. *Costo de estabilización con 8% de cemento, para explanada de 1 km.*

| DESCRIPCIÓN | ANCHO VÍA (m) | SUELO (m ³) | CEMENTO | | AGUA (m ³) | COSTO (Bs.-) |
|------------------|------------------|----------------------------|-----------|----------|---------------------------|------------------|
| | | | (kg) | (bolsas) | | |
| Carretera 1 vía | 3.60 | 720.00 | 92563.20 | 1851.26 | 284.91 | 144108.00 |
| Carretera 2 vías | 7.20 | 1440.00 | 185126.40 | 3702.53 | 569.82 | 288216.00 |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 32. *Precio unitario. Estabilización con 8% de cemento.*

Unidad: M3

Moneda: Bolivianos

| Descripción | Und. | Cantidad | % Productivo | | Precio | | Costo Total |
|--|------|----------|--------------|--------------|------------|--------------|----------------|
| | | | Productivo | Improductivo | Productivo | Improductivo | |
| 1. MATERIALES | | | | | | | |
| CEMENTO | KG | 128.5600 | | | | 1.100 | 141.416 |
| TOTAL MATERIALES | | | | | | | 141.416 |
| 2. MANO DE OBRA | | | | | | | |
| PEON | HR. | 0.01445 | | | | 9.883 | 0.143 |
| CHOFER | HR. | 0.01445 | | | | 13.572 | 0.196 |
| OPERADOR EQUIPO LIVIANO | HR. | 0.00723 | | | | 13.990 | 0.101 |
| OPERADOR EQUIPO PESADO | HR. | 0.00361 | | | | 15.103 | 0.055 |
| CAPATAZ | HR. | 0.00361 | | | | 17.261 | 0.062 |
| SUBTOTAL MANO DE OBRA | | | | | | | 0.557 |
| IMPUESTO AL VALOR AGREGADO - % | | | | | | 14.94% | 0.150 |
| BENEFICIOS SOCIALES - % | | | | | | 80.85% | 0.450 |
| TOTAL MANO DE OBRA | | | | | | | 1.158 |
| 3. EQUIPO Y MAQUINARIA | | | | | | | |
| COMPACTADORA PATA DE CABRA CP533 145 HP | HR. | 0.00361 | 88.24% | | 94.753 | 262.844 | 0.878 |
| MOTONIVELADORA 120K 125 HP | HR. | 0.00361 | 100.00% | | 216.588 | 457.495 | 1.652 |
| TRACTOR AGRICOLA C/ARADO DE DISCOS 90 HP | HR. | 0.00361 | 85.78% | | 40.424 | 135.810 | 0.442 |
| CAMION CISTERNA 10000LT | HR. | 0.01445 | 79.67% | | 50.892 | 218.140 | 2.661 |
| HERRAMIENTAS - % | | | | | | 0.00% | 0.000 |
| TOTAL EQUIPO Y MAQUINARIA | | | | | | | 5.633 |
| 4. ACTIVIDAD COMPLEMENTARIA | | | | | | | |
| | | 0.00000 | | | | 0.000 | 0.000 |
| TOTAL ACTIVIDAD COMPLEMENTARIA | | | | | | | 0.000 |
| 5. GASTOS GENERALES | | | | | | | |
| GASTOS GENERALES - % | | | | | | 21.00% | 31.123 |
| TOTAL GASTOS GENERALES | | | | | | | 31.123 |
| 6. UTILIDAD | | | | | | | |
| UTILIDAD - % | | | | | | 10.00% | 14.821 |
| TOTAL UTILIDAD | | | | | | | 14.821 |
| 7. IMPUESTOS | | | | | | | |
| IMPUESTO A LAS TRANSACCIONES - % | | | | | | 3.09% | 5.999 |
| TOTAL IMPUESTOS | | | | | | | 5.999 |
| TOTAL PRECIO UNITARIO | | | | | | | 200.150 |

Fuente: Elaboración propia.

3.11 Análisis comparativo de resultados

Tabla N° 33. Resumen de resultados obtenidos.

| MUESTRA | | PLASTICIDAD | | | EXPANSIÓN N ECUACIÓN | EXPANSIÓN LABORATORI O | COSTO UNITARI O |
|---------|---------------|-------------|-------|-------|----------------------------|------------------------------|-----------------------|
| Suelo | Estabilizante | LL | LP | IP | S (%) | Δ (%) | (Bs/m3) |
| Arcilla | 0 % | 51.4 6 | 25.10 | 26.36 | 6.334 | 5.399 | - |
| Arcilla | 3 % Cal | 42.1 8 | 35.96 | 6.22 | 0.187 | 0.735 | 62.43 |
| Arcilla | 5 % Cal | 41.3 0 | 36.72 | 4.58 | 0.088 | 0.592 | - |
| Arcilla | 7 % Cal | 41.2 6 | 37.15 | 4.11 | 0.068 | 0.559 | - |
| Arcilla | 8 % Cemento | 39.8 4 | 35.62 | 4.22 | 0.072 | 0.547 | 200.15 |
| Arcilla | 10 % Cemento | 39.0 5 | 35.04 | 4.01 | 0.064 | 0.502 | - |
| Arcilla | 15 % Cemento | 40.0 1 | 36.03 | 3.98 | 0.063 | 0.459 | - |

Fuente: Elaboración propia.

De los resultados de la plasticidad de la Tabla anterior, la arcilla pura se clasifica inicialmente según la carta de plasticidad, como un suelo CH o arcilla inorgánica de alta plasticidad, debido principalmente a su elevado índice de plasticidad y por tanto a su alto contenido de partículas menores a 0.002 mm, ya que más del 95 % del material pasa el tamiz número 200.

Una vez aplicado el primer porcentaje de cal de 3 %, se obtiene una clasificación que da como resultado un suelo ML o limo arenoso. Este cambio es debido a que la cal ha modificado la estructura interna y la composición mineralógica de la arcilla, reduciendo la plasticidad considerablemente en un 76.4 %. Producto de la reducción del límite líquido y del aumento del límite plástico.

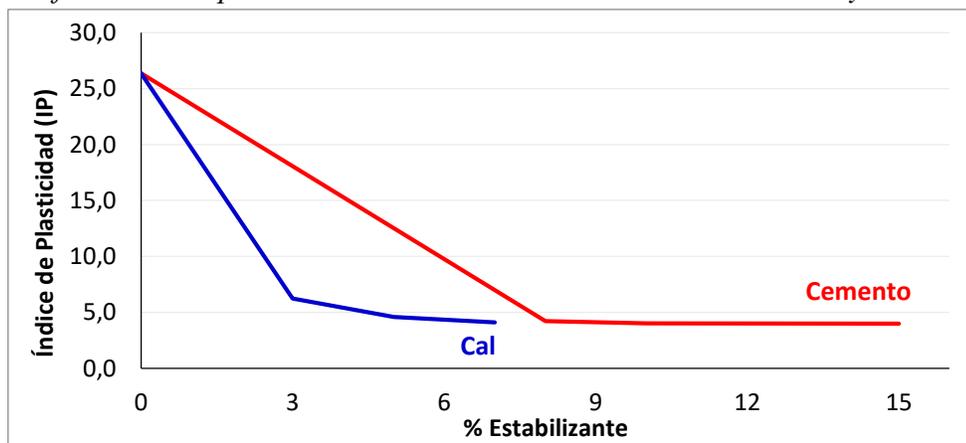
De igual manera se observan cambios en la arcilla ante la aplicación del 5 y 7 % de cal, su clasificación en ambos casos, según la carta de plasticidad, es suelo ML o suelo limo arenoso al igual que ante la aplicación del 3 % de cal. Las reducciones del índice de plasticidad son del 82.6 % ante una aplicación del 5 % de cal y de 84.4 % ante la aplicación de un 7 % de cal. Estos cambios son similares y ascendentes ante un mayor porcentaje, porque las partículas de arcilla continúan haciendo reacción con el

estabilizante, pero en el 5 y 7 % de cal son muy similares y con apenas una variación de 1.8 %, lo que indica que ya no se recomienda la aplicación del 7 % de cal ya que sus cambios no son relevantes, y lo que se busca la optimización de materiales.

En el caso de la aplicación del 8, 10 y 15 % de cemento se observa como resultado, al igual que en el caso de la aplicación de cal, una clasificación de suelo ML o limo arenoso para todos los porcentajes aplicados como tratamiento de la arcilla en estudio.

Este cambio es el resultado de la interacción entre las partículas de arcilla y las del cemento, que ha producido una cohesión entre dichas partículas, dando como resultado un aumento de su tamaño, esto reduce significativamente su índice de plasticidad, en un 84.0 % ante la aplicación de un 8 % de cemento, de un 84.8 % ante el 10 % de cemento y de un 84.9 % de reducción ante la aplicación del 15 % de cemento. En el caso de la aplicación del cemento se observa que la variación entre los diferentes porcentajes, no superan el 1 %, lo que indica que se ha logrado la estabilización de la arcilla con la aplicación del 8 % de cemento, ya que el aumento del agente implica un costo adicional y la diferencia no lo justifica.

Gráfico 31. Comparación del “IP” del suelo estabilizado con cal y cemento.



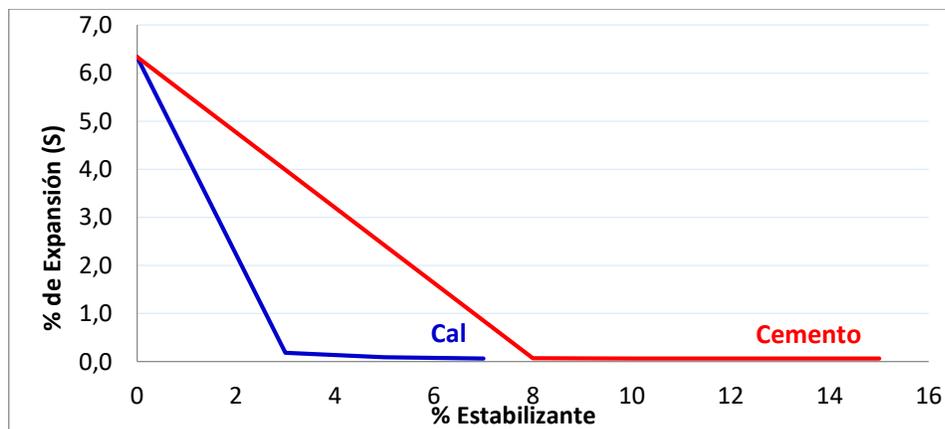
Fuente: Elaboración propia.

Del gráfico anterior podemos comparar, como reducen los valores del índice de plasticidad a medida que se aumentan los porcentajes de cal y de cemento, teniendo un descenso continuo de la plasticidad.

No se observan diferencias considerables en la variación de la plasticidad del suelo, ante la aplicación de los estabilizantes. Porque con los mínimos porcentajes aplicados de 3 % de cal y 8 % de cemento, se ha logrado controlar la plasticidad que presenta el suelo sin tratamiento, ya que se consigue un suelo equivalente a un limo arenoso según clasificación de la carta de plasticidad de casa grande.

Los valores obtenidos mediante la aplicación de cemento son menores y se van manteniendo casi constantes a medida que aumenta su porcentaje, esto es porque la arcilla en estudio ya ha conseguido una estabilización volumétrica con el mínimo de 8 % de cemento, porque de lo contrario se observarían reducciones significativas del índice de plasticidad. La disminución de la plasticidad no justifica aumentar los porcentajes de cemento a más del 8 %, ya que implicaría un costo adicional innecesario para el fin, que es disminuir la expansión mediante la reducción de las características plásticas de la arcilla analizada.

Gráfico 32. Comparación de la expansión “S” del suelo estabilizado con cal y cemento. Obtenida mediante ecuación empírica.

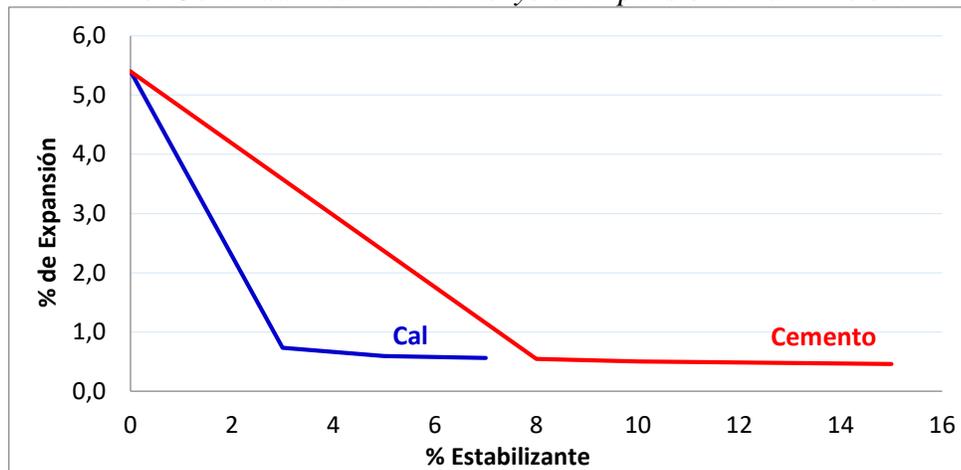


Fuente: Elaboración propia.

Observando el Gráfico anterior, la variación del potencial de expansión “S” obtenido empíricamente, que ante la aplicación del 3 % de cal y 8 % de cemento, va en descenso continuo a medida que se aumentan los porcentajes de ambos estabilizantes, esto se debe principalmente a la disminución de la plasticidad, ya que los valores del potencial de expansión son directamente proporcionales al índice de plasticidad de las muestras.

Se observa que los valores obtenidos son casi constantes ante la aplicación del cemento y la cal, resultando suficiente la aplicación de un 3 % cal y un 8 % de cemento para reducir prácticamente a cero el potencial de expansión.

Gráfico 33. Comparación de la expansión “ Δ ” del suelo estabilizado con cal y cemento. Obtenida mediante el ensayo de expansión unidimensional.



Fuente: Elaboración propia.

Observamos en el Gráfico anterior el comportamiento del suelo ante la aplicación de cal y de cemento, los valores no presentan diferencias significativas ya que ambos tienden a reducir a valores menores a uno, indicando según la clasificación de los suelos expansivos, una expansión casi nula como resultado del tratamiento con estos estabilizantes. Estos resultados son producto de la formación de una barrera que impide que el agua ingrese a la estructura interna de la arcilla debido a la aplicación de cal y de cemento.

Finalmente según el costo de una estabilización con cal, en comparación con la del cemento, podemos ver que es significativamente más económico una estabilización con cal, principalmente por el alto porcentaje de cemento requerido y el costo directo del mismo, dando como consecuencia un costo con un porcentaje de más del 300 % para estabilización con cemento respecto al uso de cal.

En resumen a la comparación de los diferentes factores presentados como la plasticidad, la expansión “S” obtenida empíricamente y la medida en laboratorio “ Δ ”, vemos que los mínimos valores obtenidos se presentan ante la aplicación del cemento,

pero estos resultados no varían la clasificación del material que paso de ser de expansividad media a expansividad baja tanto en la aplicación de 3, 5 y 7 % de cal como con 8, 10 y 15 % de cemento.

Se debe tomar en cuenta que la determinación del potencial de expansión no es exacta sino aproximada, razón por la cual existen diferentes formas de cuantificar el potencial de expansión de los suelos, en este trabajo vemos que el uso de ecuaciones empíricas es viable como referencia, ya que nuestro objetivo principal es reducir el potencial de expansión del suelo para poder ser reutilizado, es decir alcanzar una grado de expansión bajo, como los obtenidos ante la aplicación de cal y cemento.

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

Las conclusiones que se obtuvieron del presente trabajo son las siguientes:

- Se ha cumplido con los objetivos trazados. Se ha conseguido determinar la expansión de la arcilla en estudio, de manera empírica y mediante medición directa en laboratorio a través de ensayos de expansión unidimensional.
- Se estabilizó volumétricamente la arcilla, con cal y con cemento, logrando reducir su potencial de expansión de categoría media a baja, lo que la convierte en un material sin riesgos de cambios volumétricos de consideración.
- Se concluye que la aplicación de cal para el control de la expansión de la arcilla en estudio, es el estabilizante óptimo para este fin, una vez realizado el análisis técnico económico correspondiente.
- Se pudo observar que el material tratado con cemento reduce las propiedades expansivas en mayor proporción que la cal, pero su elevado costo y su mínima diferencia favorable, impiden que sea aplicable para este tipo de materiales, ya que los porcentajes requeridos de cemento son muy elevados.
- Mediante el uso de cal se consiguió mejorar las condiciones expansivas iniciales del suelo, haciendo de este un material apto para la construcción y resultando como un agente adecuado para tratar la expansión de la arcilla.
- Tomando en cuenta que el objetivo principal del presente trabajo es controlar la expansión, se propone el uso de cal en un 3 % como estabilizante óptimo para tratar cambios de volumen del suelo arcilloso, evidenciando las mejoras obtenidas en su aplicación, habiendo obtenido una reducción del potencial de expansión por debajo de cero.

Recomendaciones

Se presentan las siguientes recomendaciones:

- Antes de realizar un tratamiento con cal, se recomienda realizar el ensayo de pH, para determinar porcentajes iniciales, ya que se logra optimizar materiales.
- Para realizar cualquier construcción civil sobre suelos arcillosos, se recomienda realizar ensayos de plasticidad para verificar el grado de expansión de la arcilla, haciendo una clasificación inicial en base al límite líquido e índice de plasticidad, para poder determinar posibles daños causados por la expansión.
- En la elaboración de las muestras dosificadas para ensayos de expansión unidimensional, se recomienda mejorar las condiciones de curado de los especímenes a ensayar, ya que estos mejoran sus características con el tiempo.
- En caso de realizar un estudio con ecuaciones empíricas, se recomienda utilizar también un ensayo de medición directa, ya que no todas las ecuaciones empíricas se adaptan a todos los tipos de suelos arcillosos.
- Se recomienda el uso de cal y cemento como estabilizantes en Bolivia ya que tenemos tramos estabilizados como en el año 2015 con suelo-cemento en el proyecto: CONSTRUCCIÓN DEL TRAMO HARDEMAN–COLONIA PIRAÍ (TRAMO III-B) en la provincia Obispo del departamento de Santa Cruz, y presenta las siguientes características:
 - Ancho de calzada de 10.3 metros.
 - Longitud total del tramo estabilizado de 28.47 km.
 - Espesor de capa estabilizada de 0.20 metros.
 - Suelo estabilizado A-4, según clasificación AASHTO y ML suelo limoso, según clasificación SUCS.
 - Los porcentajes de cemento ensayados son de 3, 5 y 7 % respecto de su peso seco.

Se presenta además un detalle del proceso constructivo en el anexo III, de la estabilización suelo-cemento que se llevó a cabo en el tramo mencionado.

- Para un correcto apagado del hidróxido de calcio, se recomienda realizarlo en un espacio abierto como turriles metálicos o posos de mampostería, utilizando guantes, barbijo y ropa de seguridad para evitar quemaduras por las elevadas

temperaturas que se emanan en el proceso. Además es recomendable que la cal no presente grumos con sobre tamaños ya que estos producen más salpicaduras.

Se detalla el proceso de hidratación de la cal en el anexo III.