

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. INTRODUCCIÓN

Las vías terrestres son un factor fundamental dentro de la infraestructura física de un país, estas influyen directamente en el crecimiento del Producto Interno Bruto nacional, agilizan el mercado, comunican poblaciones, mejoran la calidad de los servicios públicos y la calidad de vida de sus beneficiarios.

La buena planeación, construcción y supervisión de una vialidad tendrá por resultado una buena obra de calidad, pero no siempre una obra de calidad va de la mano con la economía de dicha obra. En ciertas ocasiones las obras se encarecen, pues no en todos los lugares se encuentran materiales útiles para la construcción, la mayoría de las ocasiones es necesario transportar materiales desde kilómetros ya que son los que reúnen los requisitos solicitados por la normatividad vigente. Además de hacer uso de materiales de banco, generalmente es necesario retirar gran parte del material del lugar de desplante de la vialidad.

El funcionamiento a largo plazo de cualquier proyecto de construcción depende de la calidad de los suelos subyacentes. Los suelos inestables pueden crear problemas significativos en las estructuras de los pavimentos, por tal motivo desde hace algunas décadas se ha tratado de realizar el mejoramiento de estos suelos empleando diversas técnicas de estabilización, utilizando diversos materiales, como cales, cementos, aditivos, emulsiones, enzimas, etc

Algunos métodos de mejoramiento de suelos en pavimentación es la adición de materiales elevados en calcio, como el cemento; este material mezclado en un porcentaje adecuado, con la humedad óptima y energía de compactación de acuerdo a la capa a construir han demostrado un comportamiento eficiente cuando se tiene un

buen control de calidad. Presentan una buena resistencia a los factores climáticos, adecuada absorción de los esfuerzos producidos por el tránsito, y disminuyen los costos de construcción.

A pesar de que ya se han realizado algunas investigaciones, se ha observado que cada caso presenta resultados particulares inherentes al tipo de suelo de la región en estudio, es por esta razón el presente trabajo se enfoca al estudio de un camino existente, en la ciudad de Bermejo. La situación que presenta esta vía son suelos inestables, por esta razón se plantea el uso del suelo de este sitio mejorándolo con el empleo de materiales cementantes para construir una sub-base modificada.

1.2. JUSTIFICACIÓN

Se realiza este trabajo de investigación porque en nuestro medio existen lugares que presentan carencias de suelos, o que los suelos existentes no cumplen con las especificaciones vigentes para poder ser utilizados como capa sub-base estructural de un pavimento rígido, y sobre todo en zonas de escaso material granular que es el más apropiado para la construcción de estas capas.

La utilización de estos suelos no seleccionados en proyectos viales sin que estos tengan que ser desechados, cambiados por otro material, o que sean utilizados para la construcción son los causantes de fallas y daños en la capa de rodadura del pavimento rígido.

Ante esta situación lo que se pretende realizar es el análisis de los suelos finos, material que no es seleccionado para sub bases de pavimento por no cumplir con las condiciones mínimas establecidas para constituir esta capa, por lo tanto lo que se busca es mejorar las propiedades químicas y mecánicas planteando la alternativa suelo-cemento como reemplazo a la capa sub base granular de manera que cumpla con las especificaciones, y además pueda aportar estructuralmente. Considerando que esta solución debe evaluarse en general tanto técnica como económicamente,

haciendo énfasis en el análisis estructural para determinar la incidencia de una capa sub base suelo-cemento.

Para ello se pretende analizar a detalle el comportamiento del suelo y proponer la cantidad óptima de cemento que se necesita para obtener resultados favorables que reflejen un material resistente, durable con características y propiedades necesarias para emplazar una losa de concreto y al mismo tiempo esta resistencia se vea reflejada en la parte estructural.

El estudio de evaluación del suelo-cemento como alternativa de capa sub-base para pavimento rígido se efectuara en las 180 cuadras de la ciudad de Bermejo, zona seleccionada por que presenta suelos finos y además es un lugar que tiene escaso material granular.

El hecho de utilizar el suelo-cemento como capa sub base podría solucionar los grandes problemas ocasionados por la falta de material adecuado y ante la presencia de suelos inestables, por lo tanto se estudiara esta opción para que sirva de guía demostrando así lo ventajoso que podría resultar esta alternativa de capa. Además de que reduciría el impacto ambiental que hoy en día es de gran importancia en la construcción de las carreteras.

1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.3.1. SITUACIÓN PROBLÉMICA

Dentro de la ingeniería de pavimentos existen muchas condiciones que deben cumplir cada una de las capas, generalmente la capa sub base de un pavimento rígido es de material granular, sin embargo en los proyectos que se ejecutan no siempre se encuentran con dichos materiales, si no por el contrario se encuentran con suelos inestables que presentan propiedades plásticas, que se caracteriza por ser una arcilla o limos y el problema se agrava más aún cuando no se encuentran en los yacimientos o bancos de préstamo los materiales adecuados que cumplan con especificaciones.

El funcionamiento a largo plazo de cualquier proyecto de construcción depende de la calidad de los suelos subyacentes. Los suelos inestables pueden crear problemas de fallas y daños significativos en las estructuras de los pavimentos. Entonces frente a este cuadro, se desarrollaron en el pasado y se siguen desarrollando hoy en día diferentes técnicas de mejoramiento para este tipo de suelos con diversos materiales como ser cales, cemento, emulsiones, etc. Así también el estabilizar el suelo implica ventajas de carácter económicas debido al ahorro del alto costo de transporte de los materiales de préstamo. Además, de la reducción del impacto ambiental, al evitar la explotación intensiva de los agregados y progresivo agotamiento de yacimientos o bancos de préstamos.

En la actualidad se observa que en la ciudad de Bermejo se tienen suelos inestables que podrían perjudicar de gran manera a la estructura de losa de hormigón, si este suelo no es tratado previamente antes de conformar la capa sub base, lo cual conlleva a proponer en nuestro medio una alternativa de capa, mejorando ese suelo inestable con cemento.

1.3.2. PROBLEMA

¿Cómo obtener un suelo-cemento que cumpla con especificaciones técnicas para conformación de sub bases, cuando no se dispone de material granular adecuado, y qué efecto estructural provocará?

1.4. HIPÓTESIS

Si utilizo la alternativa de suelo-cemento como capa sub base de un pavimento rígido entonces se mejoran las condiciones estructurales, así como el cumplimiento de las especificaciones, obteniendo de esta manera una mejor resistencia de sub base al agregar ciertas cantidades de cemento, con la finalidad de contar con una opción más en cuanto a materiales, para aplicar a zonas donde no se dispone de material granular adecuado.

1.5. OBJETIVOS

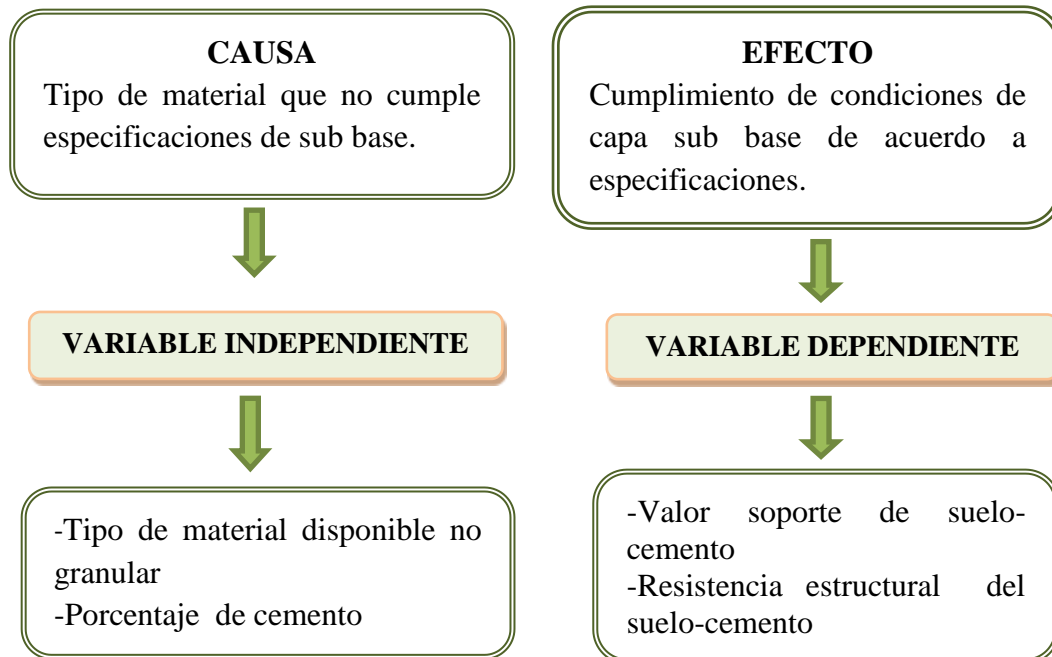
1.5.1. OBJETIVO GENERAL

Realizar la evaluación del suelo-cemento como alternativa de capa sub base para un pavimento rígido, valorando el cumplimiento de especificaciones de capa sub base, así como la evaluación del aporte estructural de la capa suelo-cemento.

1.5.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ❖ Analizar y definir los conceptos principales necesarios para desarrollar el tema de suelo-cemento.
- ❖ Identificar la zona de estudio en nuestro medio que contenga suelos finos para ejercer la investigación.
- ❖ Describir las condiciones de los materiales mediante una caracterización.
- ❖ Determinar el porcentaje óptimo de cemento para obtener una mezcla que cumpla con las condiciones estructurales necesarias para conformar una capa sub-base de un pavimento rígido.
- ❖ Evaluar la capacidad portante del suelo-cemento y su resistencia a partir de los especímenes elaborados en laboratorio.
- ❖ Realizar un análisis estructural del aporte de la capa sub base suelo-cemento en la estructura de la losa de concreto.

1.6. DEFINICIÓN DE VARIABLES DEPENDIENTES E INDEPENDIENTES



→ Variable independiente.

Se toma como variable independiente al tipo de material disponible en obra no granular, al presentarse un material que no cumple con las especificaciones vigentes para conformar una capa sub base de pavimento rígido surge el problema de cómo mejorar ese material, cambiarlo por otro o utilizarlo tal como se lo encuentra, para este estudio se elige la opción de mejorarlo el suelo con cemento para evitar costos en removerlo o peor aún utilizarlo el suelo en natural y que posteriormente provoque fallas en el pavimento, entonces analizando la alternativa de agregar cemento lo que busca es mejorar ese suelo para que cumpla con las condiciones de capa sub base a través del estudio de la cantidad de cemento que se le deberá adicionar a cada tipo de suelo que se encuentre en el lugar de estudio, y de esta manera analizar cada una de las propiedades del nuevo material en cuanto a su resistencia.

→ **Variable dependiente.**

Se plantea esta variable en función a la variable independiente, por lo tanto al realizar el análisis de cada suelo se obtendrán sus características en cuanto a tipo, densidad y valor soporte y en base a estos datos se estudiara la cantidad de cemento que se le adicionara a cada tipo de suelo, que repercutirá en el valor soporte y la resistencia estructural del suelo-cemento, pero ante todo se efectuará una valoración del material para que cumplan con especificaciones normadas, para conformar una capa sub base.

1.7. ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN

El presente estudio es una investigación de aplicabilidad del suelo-cemento como capa sub base en pavimento rígido. Para tal efecto se parte de una descripción general (introducción) del tema, así también la justificación del porqué se está efectuando, planteándose objetivos medibles para solucionar el problema que dio lugar a realizar este tema, además de una parte metodológica que nos permite plantear los métodos, técnicas y procedimientos a utilizar para cumplir con los objetivos trazados.

El fundamento teórico se desarrollara basándose en la información sobre el pavimento rígido en carreteras, específicamente sobre la capa sub base para que a través de esta información se llegue a fundamentar los criterios necesarios para tratar el estudio de la alternativa del suelo-cemento como capa sub base, a esta opción se le analizara a partir de una definición, clasificación, usos, ventajas y desventajas que representa este material, como también los materiales que lo componen y las características que deben de cumplir cada uno de ellos. Así también se estudiaran sus propiedades, los factores que se deben tomar en cuenta para realizar el diseño de las mezclas finalizando con su procedimiento de elaboración.

En la parte práctica se desarrollara un enfoque general sobre la temática, se identificara la zona de estudio de donde se obtendrán los materiales para iniciar los

respectivos estudios de caracterización de los diferentes materiales como ser el suelo y el cemento a través de ensayos en laboratorio.

Una vez identificado los diferentes materiales se establecerá la dosificación del suelo-cemento procediendo a elaborar las mezclas de prueba con las diferentes cantidades óptimas de cemento.

Para validar los resultados de esta alternativa de capa se evaluará la capacidad portante de cada prueba, la resistencia a compresión y a flexión, como también se evaluará la incidencia que pudiera tener la capa de suelo-cemento en el espesor total del pavimento.

A partir de todos los ensayos realizados se efectuará el análisis de los resultados obtenidos y se trazará las conclusiones del caso, y las recomendaciones sobre las posibles fallas que pudieran haber ocurrido en el transcurso de la práctica.

CAPÍTULO II

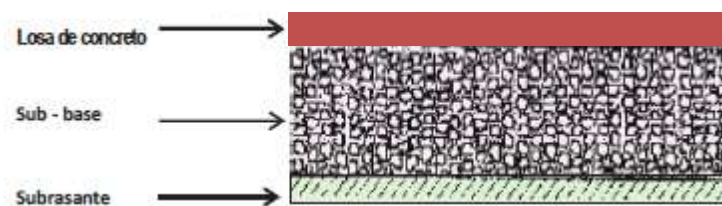
ESTADO DE CONOCIMIENTO SOBRE EL SUELO-CEMENTO APLICADOS A SUB BASES DE PAVIMENTO RÍGIDO.

1.8. PAVIMENTO RÍGIDO

El pavimento rígido son aquellos que fundamentalmente están constituidos por una losa de concreto hidráulico, apoyada sobre la sub-rasante o sobre una capa, de material seleccionado, la cual se denomina sub-base del pavimento rígido. Debido a la alta rigidez del concreto hidráulico así como de su elevado coeficiente de elasticidad, la distribución de los esfuerzos se produce en una zona muy amplia. Además como el concreto es capaz de resistir, en cierto grado, esfuerzos a tensión, el comportamiento de un pavimento rígido es suficientemente satisfactorio aun cuando existan zonas débiles en la sub-rasante. En la figura 2.1 se puede apreciar los elementos que constituyen un pavimento rígido.

Figura. 2.1

Sección de un Pavimento Rígido



Fuente: Manual para la revisión de diseños de pavimentos. Nicaragua 2008.

1.9. CARACTERÍSTICAS Y FUNCIONES DE UN PAVIMENTO RÍGIDO

Sobre el pavimento de hormigón recae la responsabilidad estructural y funcional, mientras que las capas inferiores tienen por misión asegurar su apoyo uniforme y estable. El espesor de la losa de hormigón puede ser inferior a 20 cm si el tráfico es muy ligero o llegar a 40 cm en algunas pistas de aeropuertos.

Algunas características de un pavimento rígido:

- Estos pavimentos tienen suficiente fuerza de flexión para transmitir la carga de la llanta a un área más amplia.
- La carga de la llanta se transmite por la capacidad de doblarse de la losa.
- La capa de rodadura de concreto de cemento portland (PCC) puede ser:
 - Normal o convencional
 - Reforzado (acero)
- Sub base
 - Estabilizada con cemento
 - No estabilizada
- Sub rasante compactada y natural

El pavimento rígido debe satisfacer funciones que pueden resumirse de la siguiente forma:

- Su función principal es la capacidad de absorber o resistir por si sola los esfuerzos producidos por las cargas que le son aplicada.
- El factor principal considerado en el diseño de un pavimento rígido es la resistencia estructural del concreto, es decir que las pequeñas variaciones de la resistencia de las capas inferiores tienen poca influencia en la capacidad estructural del pavimento.
- Resistir las acciones de los agentes atmosféricos, a fin de conseguir la durabilidad o vida útil prevista en el diseño.
- Proporcionar una superficie de rodadura segura, cómoda y de características permanentes bajo las cargas repetidas del tráfico, a lo largo de un periodo de tiempo en servicio.

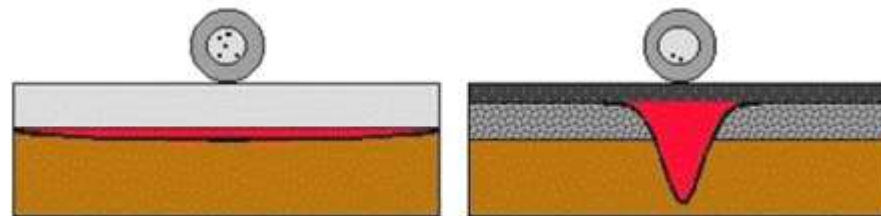
1.10. PROPIEDADES DE LOS PAVIMENTOS RÍGIDOS

La consideración de dos propiedades básicas del pavimento revela que un solo principio se aplica a cada aspecto del diseño de las subbases y subrasantes. El módulo de elasticidad del hormigón oscila entre 280 000 y 420 000 Kg. /cm². Esto significa que los pavimentos de hormigón tienen un alto grado de rigidez y la resistencia a flexión del hormigón varía de 38 a 52 Kg. /cm² a los 28 días, característica elemental de resistencia a viga.

A causa de estas propiedades, rigidez y resistencia a viga, el pavimento de hormigón distribuye las cargas que soporta sobre una gran zona de la subrasante, las deflexiones son pequeñas y las presiones unitarias transmitidas a la subrasante son muy reducidas.

Figura. 2.2

Características Estructurales de los pavimentos



Pavimento Rígido

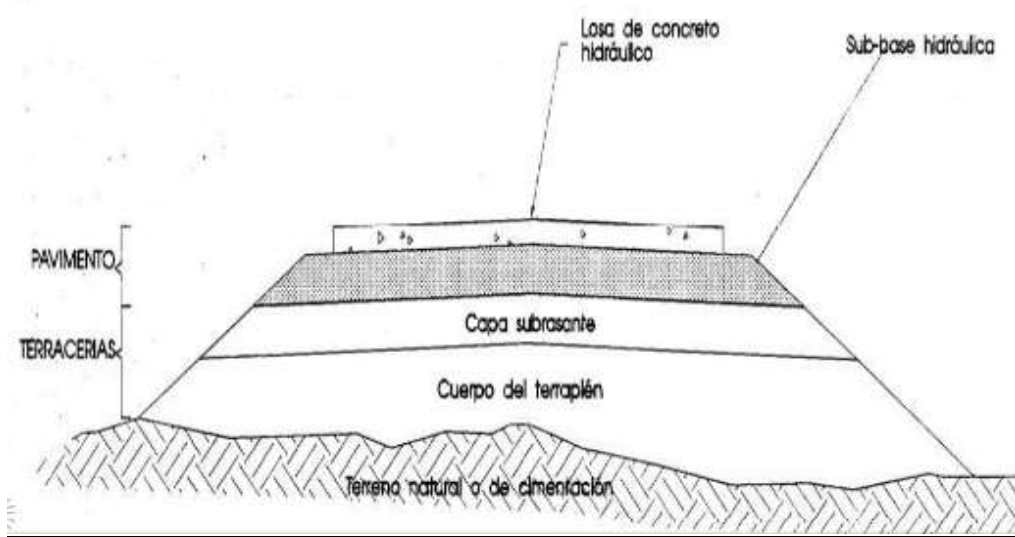
Pavimento Flexible

En el pavimento rígido, el hormigón absorbe gran parte de los esfuerzos que se ejercen sobre el pavimento, mientras que en el pavimento flexible este esfuerzo es transmitido hacia las capas inferiores.

1.11. COMPONENTES DE PAVIMENTOS RÍGIDOS

Los pavimentos de concreto cuentan con una serie de capas que se sostienen desde la sub rasante hasta la carpeta de rodadura. La calidad de los materiales que conforman las capas va mejorando a medida que se aproximan a la carpeta de rodadura.

Figura 2.3 Elementos que constituyen la estructura de pavimento rígido



Fuente: En línea. Disponible en: <http://es.slideshare.net/kevinromerolatorre/tipos-de-pavimentos>

1.11.1. SUB RASANTE.

Es la capa de terreno de una carretera que soporta la estructura de pavimento y que se extiende hasta una profundidad que no afecte la carga de diseño que corresponde al tránsito previsto. Esta capa puede estar formada en corte o relleno y una vez compactada debe tener las secciones transversales y pendientes especificadas en los planos finales de diseño.

El espesor de pavimento dependerá en gran parte de la calidad de la sub rasante, por lo que ésta debe cumplir con los requisitos de resistencia, incompresibilidad e inmunidad a la expansión y contracción por efectos de la humedad, por consiguiente, el diseño de un pavimento es esencialmente el ajuste de la carga de diseño por rueda a la capacidad de la sub rasante. Se considera como la cimentación del pavimento y una de sus funciones principales es la de soportar las cargas que transmite el pavimento y darle sustentación, así como evitar que el terraplén contamine al pavimento y que sea absorbido por las terracerías.

1.11.1.1. Características

El material deberá cumplir con las normas y características de calidad, a continuación se presentan tablas en las cuales se clasifica de acuerdo al C.B.R., el tipo de terracerías y subrasantes:

Tabla 2.1

Categorías de suelos para Terracerías y capa Subrasante

Característica	Suelos Tolerables	Suelos Adecuados	Suelos Seleccionados
Tamaño máximo	25 % > 15 cm.	< 10 cm.	< 8 cm.
Contenido de finos , %	....	≤ 35	≤ 25
Limite Liquido , %	≤ 40	≤ 40	≤ 30
Indice de Plasticidad , %	....	....	≤ 10
Peso vol. Máximo, Kg./m ³	≥ 1450	≥ 1750	....
C.B.R. %	> 3	> 5	> 10
Expansión , %	....	< 2	0

Fuente: Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto IMCYC

1.11.2. SUB BASE.

Es la capa de la estructura de pavimento destinada fundamentalmente a soportar, transmitir y distribuir con uniformidad las cargas aplicadas a la superficie de rodadura de pavimento, de tal manera que la capa de sub rasante la pueda soportar absorbiendo las variaciones inherentes a dicho suelo que puedan afectar a la sub base. La sub base debe controlar los cambios de volumen y elasticidad que serían dañinos para el pavimento.

Se utiliza además como capa de drenaje y contralor de ascensión capilar de agua, protegiendo así a la estructura de pavimento, por lo que generalmente se usan materiales granulares. Al haber capilaridad en época de heladas, se produce un hinchamiento del agua, causado por el congelamiento, lo que produce fallas en el pavimento, si éste no dispone de una sub rasante o sub base adecuada.

1.11.3. LOSA (SUPERFICIE DE RODADURA).

Es la capa superior de la estructura de pavimento, construida con concreto hidráulico, por lo que debido a su rigidez y alto módulo de elasticidad, basan su capacidad portante en la losa, más que en la capacidad de la sub rasante.

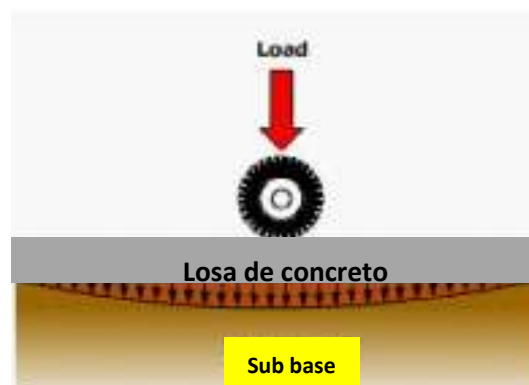
Constituye la parte fundamental del pavimento rígido, debiendo estar capacitadas para resistir los esfuerzos producidos por el tránsito y los efectos de la intemperie, y proporcionar además una superficie de rodamiento segura, cómoda y de características permanentes bajo el efecto combinado del tránsito y de los factores ambientales durante su vida útil, de manera que solo deban ser necesarias algunas actuaciones locales y esporádicas de conservación, de poca importancia y costo.

1.12. SUB BASE DE PAVIMENTOS RÍGIDOS

El uso de una capa de sub-base fue motivado por el incremento del tráfico de los vehículos pesados en las carreteras, dando como resultado un apoyo adecuado durante la vida útil de la losa de concreto.

Así que las capas que forman al pavimento de concreto hidráulico en carreteras, son; la sub-base y la losa de concreto hidráulico.

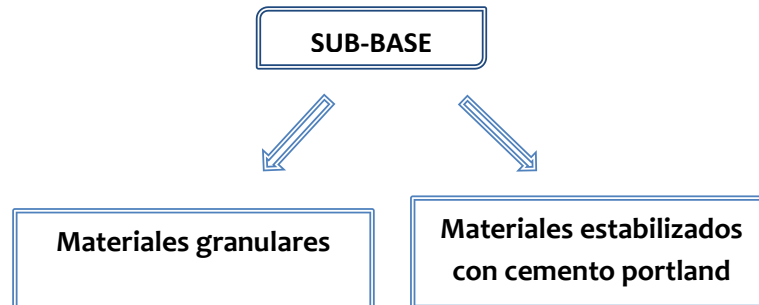
Figura. 2.4: Distribución de cargas de tráfico sobre la capa sub-base



Fuente: En línea. Disponible en:

<http://ingenieriacivilapuntas.blogspot.com/2009/05/elementos-que-integran-el-pavimento.html>

Las sub-bases pueden estar formadas por los siguientes tipos de materiales:



La función esencial de una sub-base es la de evitar el efecto de bombeo de los suelos de grano fino. Una capa de sub-base es obligada, en los casos en que se combinen suelos finos, agua y tráfico de tal forma que se induzca el efecto de bombeo. Lo anterior, es muy común durante el diseño de pavimentos importantes con exceso de volumen de tráfico, por lo que la sub-base estabilizada con puzolana y cal es la más adecuada, tanto técnicamente como económicamente, ya que cubre las condiciones que se requieren en un momento determinado a menor costo.

En cambio, en caminos secundarios de bajo tráfico, en calles residenciales y en aeropuertos para aeronaves ligeras, el efecto de succión no se produce. Así que, en estos últimos casos, el uso de una capa de sub-base no se justifica desde el punto de vista económico y los resultados deseados se pueden lograr mediante la preparación adecuada y menos costosa de la sub-rasante.

Por lo tanto, las funciones económicas de las sub-bases se podrán clasificar como sigue:

- ▶ Se necesita la sub-base. Para evitar el efecto de bombeo de finos o ascensión capilar de agua proveniente de los suelos de apoyo.
- ▶ Para ayudar a controlar los cambios volumétricos ante condiciones severas de sub-rasantes y terracerías con altos cambios volumétricos.
- ▶ Ayudar a reducir el hinchamiento diferencial excesivo por congelamiento.
- ▶ Para proporcionar una capa drenante donde se necesite.

- ▶ Proporcionar una plataforma de trabajo más estable durante la construcción del pavimento.
- ▶ Incrementar la capacidad de apoyo de los suelos colocados debajo de la losa de concreto.
- ▶ Recibir y resistir las cargas del tránsito a través de la capa que constituye la superficie de rodamiento.
- ▶ Otra función de la capa de sub-base es la de abaratar el costo de construcción de un pavimento.

1.12.1. CARACTERÍSTICAS

Las características esenciales que debe tener el material granular son las siguientes:

- Suelos tipo grava arenosa, arenas arcillosas.
- Inorgánicos.
- Libres de materia vegetal, escombros y basuras.
- Libres de material congelado.
- Sin presencia de terrones ni trozos degradables.

Requisitos que debe constituir una sub-base de tipo granular:

- Granulometría de la mezcla de suelo con agregado de acuerdo a la siguiente tabla.

Tabla 2.2
Requisitos Granulométricos de Materiales para Subbases
Mezcla suelo – agregados AASTHO M147

Tamaño de la Malla	Porcentaje que pasa en peso					
	A	B	C	D	E	F
2"	100	100	...	...	...	...
1"	...	75-95	100	100	100	100
3/8"	30-65	40-75	50-85	60-100	...	...
Nº 4	25-65	30-60	35-65	50-85	55-100	70-100
Nº 10	15-40	20-45	25-50	40-70	40-100	55-100
Nº 40	8-20	15-30	15-30	25-45	20-50	30-70
Nº 200	2-8	5-20	5-15	5-20	6-20	8-25

Fuente: AASTHO M147

- Valor soporte: el material debe tener un CBR, AASHTO T 193, mínimo de 30, efectuado sobre muestra saturada 95% de compactación, AASHTO T 180.
- Tamaño de partículas: no debe exceder de 70 milímetros ni exceder de ½ espesor de la capa.
- En general se recomiendan materiales que contengan finos en una proporción no mayor de 15%.
- Plasticidad y cohesión: la porción que pasa el tamiz 0.425 mm, no debe de tener un índice de plasticidad AASHTO T 90, mayor de 6 ni un límite líquido, AASHTO T 89 mayor de 25.
- Impurezas: el material de sub-base debe estar exento de materiales vegetales, basura, terrones de arcilla o sustancias que incorporadas dentro de la capa de sub-base puedan causar fallas en el pavimento.

Tabla 2.3

Resumen de características que debe cumplir una sub base tipo granular

Limite Liquido	25 % máx.
Indice de Plasticidad	6 % máx.
Desgaste de los Ángeles	40 % máx.
Contracción Lineal	4 % máx.
Equivalente de Arena	25 % min.
C.B.R.	≥ 30

Fuente: AASTHO M147

1.13. ESTABILIZACIÓN DE SUELOS

La estabilización de suelos se practica con el objetivo de modificar propiedades naturales del suelo para mejorar su respuesta frente a las acciones mecánicas y los factores climáticos en forma perdurable. Las propiedades que generalmente se modifican son:

- Resistencia
- Estabilidad volumétrica
- Compresibilidad
- Durabilidad
- Permeabilidad.

Los principales procesos de estabilización se clasifican en: mecánicos, físicos, químicos y físico-químicos. Los métodos prácticos de estabilización pueden involucrar uno o más procedimientos.

- **La estabilización mecánica** consiste en el manipuleo y compactación de los suelos para obtener su densificación. Al aplicar energía mecánica se reducen los vacíos que se encuentran con aire en la masa de suelo lo que aumenta su peso unitario. De esta forma se logra un aumento en la resistencia, en la

rigidez, una mejora en la estabilidad volumétrica y una disminución de la permeabilidad del suelo.

- **La estabilización física** más practicada es la granulométrica. Esta persigue la obtención de una adecuada granulometría, mediante el agregado de materiales granulares o cohesivos o ambos a la vez. Las partículas más gruesas suministran fricción y dureza, resistencia al impacto y al desgaste. Las intermedias acuanamiento de la estructura y las más finas, con la humedad que las rodea, el medio ligante o cohesivo. Con granulometrías más cerradas se obtiene un mayor número de contactos entre partículas lo que aumenta la capacidad portante del suelo y se reduce la permeabilidad. Por el contrario, granulometrías peor graduadas se diseñan por ejemplo para obtener mezclas drenantes.
- **La estabilización química** se logra mediante el intercambio iónico entre los granos del suelo y el producto estabilizante. Un ejemplo es el uso de sales neutras (cloruro de sodio, cloruro de calcio, etc.) que varían la tensión superficial y la presión de vapor de las soluciones de estos productos respecto del agua sin ellos, para mantener la humedad de compactación. Otros productos de estabilización química son ácidos inorgánicos, como el fosfórico o el fluorhídrico, ácidos y sales orgánicas, algunos polímeros, resinas combinadas y algunos desechos obtenidos de la fabricación del papel u otros productos industriales.
- **La estabilización físico-química** produce cambios en las propiedades del suelo mediante la incorporación de cementos orgánicos e inorgánicos y materiales impermeabilizantes. Algunos de los productos que se utilizan son la cal, el cemento Portland y el asfalto y sus subproductos. La selección del agente estabilizante dependerá del fin perseguido.

Al estabilizar el suelo con cemento Portland, la hidratación de este produce compuestos que a la vez reaccionan con los minerales arcillosos del suelo generando un material cementante que contribuye a la unión de las partículas de suelo y a estas con el cemento endurecido. Esto da como resultado un

material dotado de cierta rigidez y resistencia mecánica, con una mayor estabilidad volumétrica y durabilidad que el suelo primitivo.

Por lo que puede observarse, el suelo no es un material inerte, los materiales arcillosos poseen minerales que reaccionan con los agentes estabilizantes formando nuevos compuestos que modifican sus propiedades. Suelos con igual granulometría y con los mismos límites de Atterberg reaccionarán de modo distinto ante el mismo cemento según los tipos y proporciones de minerales presentes en la fracción arcillosa. Por esto es que es importante estudiar los efectos que provoca el agente estabilizante sobre cada suelo en particular.

1.14. SUELO-CEMENTO PARA SUB BASE DE PAVIMENTOS RÍGIDOS

1.14.1. DESARROLLO HISTORICO

Aunque nuestro principal propósito es referirnos a las aplicaciones prácticas del suelo cemento, consideramos conveniente situar el tema en su perspectiva histórica, haciendo una breve reseña de los acontecimientos relevantes que condujeron a su desarrollo actual. La historia de la ingeniería civil no puede dispensarse de conocer el proceso de crecimiento y maduración de un material que ha sido tan útil.

En diversas notas históricas que tratan sobre el suelo cemento se ha manifestado frecuentemente que un primer acontecimiento importante fue su propia aplicación como material para la construcción de pisos y muros, si bien en aquel entonces se trabajaba en forma empírica. Más adelante otro acontecimiento que mereció especial atención fue la utilidad de su uso en la construcción de caminos, sobre todo cuando había problemas serios de escasez de bancos de materiales apropiados.

Varios años después tuvo bastante relevancia el hecho de que, durante la segunda guerra mundial, se probó que utilizando la tecnología adecuada era posible construir pistas de aterrizaje de magnífica calidad para el servicio de los aeropuertos, disminuyendo substancialmente el tiempo de su construcción tradicional. Entonces,

utilizando el suelo cemento se podían construir económicamente excelentes pavimentos para soportar grandes cargas en muy poco tiempo. También, previo a su etapa de consolidación definitiva, debe considerarse como acontecimiento importante y afortunado el notable impulso y desarrollo de los centros de investigación tecnológico para su cabal estudio primero en Norteamérica, poco después en Europa y la U.R.R.S y finalmente en muchos otros países cuyos fructíferos resultados permitieron obtener las bases científicas para su aplicación moderna.

Actualmente, el notable desarrollo del equipo y de la tecnología para su construcción ha permitido mejorar constantemente sus usos y ampliarlos a la realización de muy diversas estructuras.

En filadelfia, E.U.A., Joseph Hay Amies, el 24 de febrero de 1914, adquirió la "U.S. Patent # 1087914" de un producto que se denominó " Alkaline Cement", manufacturado en una planta central combinando unas 60 partes de cemento Portland con alrededor de 30 partes de hidróxido de calcio y cerca de 10 partes de sosa caustica. El producto resultante fue mezclado con suelo natural y agua.

En los años de 1921 en el estado de california, E.U.A., se usa el suelo cemento para estabilizar suelos arcillosos. Posteriormente en el año 1932, el departamento de caminos estatales de carolina del sur E.U.A., creo los laboratorios para su investigación e impulso. Ya con sólidas bases, en 1935, se hizo la primera construcción supervisada de suelo cemento con técnica moderna. A partir de entonces se tuvo la certeza de la factibilidad técnica y económica de su construcción masiva con éxito.

1.14.2. DEFINICIÓN

La Portland Cement Association propone la definición siguiente: " El suelo- cemento es una mezcla intima de suelo, convenientemente pulverizado, con determinadas porciones de agua y cemento que se compacta y cura para obtener mayor densidad. Cuando el cemento se hidrata la mezcla se transforma en un material duro, durable y rígido.

1.14.3. CLASIFICACIONES

Según las porciones de cemento, suelo y agua que entran a formar parte en el suelo tratado con cemento se distinguen por su comportamiento real las tipos siguientes:

- * SUELO-CEMENTO COMPACTADO
- * SUELO-CEMENTO
- * SUELO-CEMENTO PLASTICO
- * SUELO MODIFICADO CON CEMENTO

El **Suelo-Cemento Compactado** comúnmente llamado suelo cemento, requiere una cantidad de cemento en peso que varía entre el 4% y 25% aproximadamente. Para darle dureza se compacta la mezcla. Este es el tipo que más se usa.

El suelo tratado con cemento puede ser hecho con:

- Suelo granular limpio
- Mezcla de suelos granulares y finos, predominantemente arcillosos
- Mezcla de suelos granulares y finos, predominantemente arcillosos.
- Suelos limosos
- Suelos arcillosos.

El **Suelo- Cemento Plástico (PCA)** se considera como: "la mezcla de cemento con un suelo fino muy húmedo en estado plástico. Cuando se le coloca tiene la consistencia de un mortero plástico. Frecuentemente se usa en zonas difíciles donde no es posible compactar. Requiere una cantidad de cemento mayor que el tipo compactado, esto es, mayor del 10% y no se compacta".

El **Suelo-Modificado con Cemento (PCA)** se define como: "una mezcla, dura o semidura, íntima de suelo pulverizado, agua y pequeñas cantidades de cemento que se compacta. Por lo que se distingue del suelo cemento compactado exclusivamente en la menor cantidad de cemento que se le adiciona. La cantidad de cemento en peso varía entre el 1 y 4 %. Se le utiliza principalmente cuando se requiere:

- Obtener mayor resistencia del suelo, aunque no muy alta.
- Compactar el terreno en condiciones más favorables.
- Hacer más impermeables determinados suelos.

1.14.4. MATERIALES

1.14.4.1. Suelo

En teoría, cualquier suelo puede estabilizarse con cemento, a excepción de los suelos muy plásticos, de alto contenido de materia orgánica o con un alto contenido de sales nocivas para el cemento. Sin embargo, en el campo de la aplicación práctica, los suelos que se pueden utilizar se encuentran limitados por su granulometría y plasticidad. La finalidad de los límites indicados por las diferentes normas es la de obtener mezclas económicas y durables.

1. Granulometría adecuada de las partículas

En general, la experiencia ha demostrado que para que un suelo pueda ser endurecido correctamente, mediante la adición de cantidades razonables de cemento, debe tener la granulometría siguiente:

En la distribución granulométrica, el límite máximo de partículas finas que pasan la malla N^o 200 debe ser cercana al 50%, con un límite líquido no mayor de 50 % e índice plástico menor de 25 % o sea que conviene evitar los suelos altamente compresibles y los muy plásticos.

La PCA considera que no resultan adecuados suelos cohesivos cuyo límite líquido es mayor de 45 % y su límite plástico mayor de 20 %.

Los suelos con un porcentaje de materia orgánica mayor al 2 % se consideran no aptos para su uso en mezclas de suelo-cemento.

1.14.4.2. Cemento

El tipo de cemento a utilizar dependerá de las propiedades deseadas en la mezcla y del tipo de suelo, mientras que la cantidad será función de si se busca modificar o estabilizar el suelo. En principio cualquier tipo de cemento Portland se puede utilizar. Generalmente se utiliza CPN (Cemento Portland Normal). En ciertos casos se busca disminuir el efecto de las reacciones entre los sulfatos y el cemento usando MRS (moderada resistencia a sulfatos). Cuando la mezcla se produce y se coloca en fríos es conveniente el uso de cementos del tipo ARI (alta resistencia inicial) o bien los que contienen como aditivo el cloruro de calcio.

Los cementos ARI, al tener mayor finura, tienen mayor reactividad lo que permite obtener mayor resistencia para algunos suelos.

En principio cualquier cemento puede utilizarse en la estabilización de los suelos. El cemento Portland normal tipo I es el más utilizado, aunque también se han usado mucho los de alta resistencia inicial, del tipo II. Existen trabajos de investigación que concluyen que el cemento Portland tipo I permite a la mezcla alcanzar mayor resistencia que la del tipo II pues contiene mayor cantidad de aluminato tricálcico y sulfato de calcio, pero el tipo II es preferible al tipo I cuando se trata de reducir agrietamiento. Los cementos expansivos han demostrado ser muy efectivos en suelos granulares gruesos para minimizar el agrietamiento.

La cantidad de cemento puede variar entre el 2 y 25% del peso seco de la mezcla. El promedio es del 10% y se procura que no pase del 15% por razones económicas. La tabla 2.4 proporciona el rango de cantidades de cemento requeridas para los varios tipos de suelos, clasificados por la AASHO.

Tabla 2.4 Cantidades de cemento requeridos, PCA

Cantidades de cemento requeridos		
GRUPO DE SUELOS SEGÚN AASHO	PORCIENTO POR VOLUMEN	PORCIENTO POR PESO
A-1-a	5-7	3-5
A-1-b	7-9	5-8
A-2-4	7-10	5-9
A-2-5	7-10	5-9
A-2-6	7-10	5-9
A-2-7	7-10	5-9
A-3	8-12	7-11
A-4	8-12	7-12
A-5	8-12	8-13
A-6	10-14	9-15
A-7	10-14	10-16

Fuente: AASHO

La cantidad de cemento también es función de la eficiencia del mezclado en la obra; mejorando las técnicas del mezclado se puede reducir el contenido de cemento real especificado.

1.14.4.3. Agua

El agua se incorpora a la mezcla a fin de alcanzar la humedad y el peso unitario seco especificados en la compactación. El agua correspondiente a la humedad óptima normalmente es bastante superior a la necesaria para la completa hidratación del cemento.

El agua tiene como funciones principales:

- * Hidratar el cemento para producir la aglutinación de las partículas sólidas.
- * Producir la lubricación entre las partículas para facilitar la compactación.

La cantidad de agua varía comúnmente entre el 10 y 20% del peso seco de la mezcla en suelos plásticos y menores del 10 % en los granulares.

Se recomienda que el agua que se utilice esté relativamente limpia y libre de cantidades apreciables de ácidos, álcalis y materia orgánica que puedan afectar al cemento.

Durante la construcción el cemento se hidratará completamente hasta después de 43 días en suelos plásticos y en unos 28 días en suelos granulares.

El contenido de agua se determina tomando en cuenta para alcanzar la compactación más adecuada y la necesidad de evitar los agrietamientos excesivos.

1.14.5. PROPIEDADES DE LAS BASES ESTABILIZADAS CON CEMENTO.

Las propiedades del suelo-cemento dependen de varios factores: proporción y tipo de suelo, cemento y agua, compactación, uniformidad del mezclado, curado y edad. Debido al alto número de factores que intervienen, los valores representativos de las propiedades del suelo-cemento se encuentran dentro de un rango amplio.

Las propiedades de los suelos estabilizados con cemento son:

- ▶ Densidad
- ▶ Resistencia a la compresión simple
- ▶ Resistencia a la tracción por Flexión
- ▶ Permeabilidad
- ▶ Módulo de Elasticidad

De acuerdo al Centro Técnico del Hormigón (Holcim), las propiedades del suelo – cemento, se encuentran influenciadas por factores como:

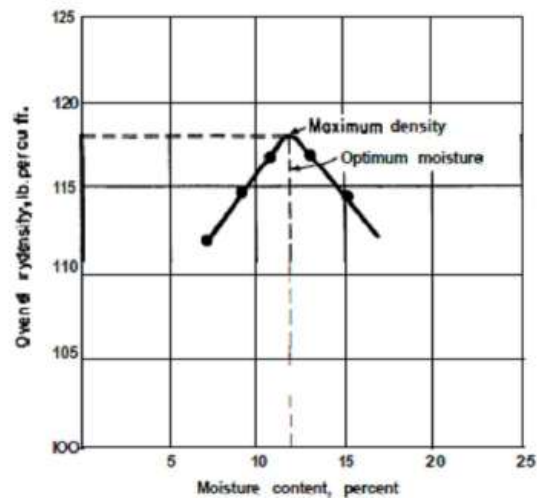
- ▶ Tipo y proporciones del suelo, del cemento y del contenido de agua
- ▶ Grado de compactación

- ▶ Uniformidad de la mezcla
- ▶ Condiciones de curado
- ▶ Edad de la mezcla compactada

1.14.5.1.DENSIDAD

Generalmente se mide la densidad seca, y se usa como parámetro de diseño y de control de calidad en obra. Al incorporarle cemento al suelo original varía la curva densidad-humedad (Figura 2.5) para una misma energía de compactación, y por lo tanto su humedad óptima y densidad seca máxima.

Figura. 2.5 Curva de densidad-humedad típica.



Este cambio, sin embargo, no es fácilmente predecible. El efecto floculante del cemento tiende a producir un aumento de la humedad óptima y una disminución de la densidad seca máxima, mientras que el alto peso específico del cemento relativo al suelo produce un incremento de la densidad.

A mayor tiempo transcurrido entre el mezclado y la compactación menor será la densidad obtenida. Este efecto puede disminuirse mediante mezclados intermedios y

con contenidos de humedad algo mayores que el óptimo. Cuanto mayor sea la densidad, mayor será la resistencia, por lo que el tiempo transcurrido entre el mezclado y la compactación interviene en el valor de resistencia. Para un mismo contenido de cemento, si se incrementa la energía de compactación se obtienen densidades mayores. Por lo tanto, para alcanzar una determinada resistencia, será necesario un menor contenido de cemento de incrementarse la energía de compactación.

Desde el punto de vista constructivo, en caso de producirse retrasos en la compactación del suelo, luego de su mezcla con cemento, se ha comprobado que si éste es mayor de dos horas, se produce una disminución significativa en la densidad y en la resistencia a compresión del suelo-cemento, pudiéndose disminuir dichos efectos realizando mezclas intermitentes varias veces por hora y con contenidos de humedad de compactación iguales o ligeramente mayores al óptimo.

Para control en el campo se utiliza el parámetro de la densidad del suelo – cemento en términos del peso específico máximo de la mezcla.

La relación $H_{\text{ópt.}}-D_{\text{máx.}}$ puede variar en un mismo tipo de suelo y con igual contenido de cemento si se cambia la energía de compactación, para una determinada energía de compactación se tiene una curva cuyo máximo valor representa el peso específico seco máximo, lo que significa que se puede obtener un mayor peso específico seco máximo si se incrementa la energía de compactación teniendo en cuenta siempre que no se llegue a fracturar las partículas del material, lo que incrementará considerablemente la resistencia a compresión de la base estabilizada mejorando de igual forma el resto de propiedades estructurales.

La manera tradicional de mezclas de suelo – cemento se ha realizado en función de la energía de compactación según norma ASTM D588 o AASHTO T 134. Sin embargo, en la actualidad algunos países han adoptado métodos de diseño de mezclas con especificaciones que tienen en cuenta mayor energía de compactación de acuerdo a la norma AASHTO T180 que viene relacionado con la compactación generada por los equipos que se disponen.

La densidad máxima obtenida en laboratorio es máximo solamente para un esfuerzo en específico, por lo que, cuando el material se compacta en campo, el esfuerzo proporcionado puede ser mayor y la curva obtenida en el laboratorio se desplazará.

1.14.5.2.RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE

Esta propiedad es la más utilizada por las normas y especificaciones que refieren al suelo-cemento para diseño de mezclas y control de calidad. Su valor es un indicador del grado de reacción de la mezcla entre suelo, cemento y el agua y del nivel de endurecimiento.

La resistencia a compresión no confinada se obtiene mediante un ensayo simple en relación al ensayo necesario para la determinación de otros parámetros como por ejemplo la rigidez o la resistencia a flexión. Es por eso que resulta muy útil conocer la relación entre este parámetro y el resto, de modo de usarla para medir indirectamente otras propiedades.

En términos generales, la resistencia a compresión simple aumenta progresivamente con el tiempo y con el contenido de cemento

Para realizar el ensayo a compresión de las muestras cilíndricas, las probetas se deberán confeccionar como para el ensayo Próctor Modificado, con el fin de alcanzar la misma densidad seca máxima, con la humedad óptima del ensayo.

La resistencia a compresión simple depende de varios factores entre los más representativos se tienen:

- El contenido y tipo de cemento
- La energía de compactación aplicada
- La eficiencia lograda en el mezclado
- Cantidad y calidad del agua
- El tiempo transcurrido después de realizar el mezclado y la compactación
- La duración y forma de hacer el curado

- Tamaño y forma del espécimen de ensayo

En la Tabla 2.5 figuran rangos típicos de resistencia a 7 y 28 días de edad para probetas saturadas previamente al ensayo.

Tabla 2.5: Valores Típicos de Resistencia a compresión simple a 7 y 28 días.

Rango de Resistencia a Compresión cilíndrica		
Tipo de Suelo, SUCS	F' c a 7 días (kg/cm ²)	F' c a 28 días (kg/cm ²)
GW, GC, GP, GM, SW, SC, SP, SM.	21-42	28-70
ML, CL	17,5-35	21-63
MH, CH	14-28	17,5-42

Fuente: ACI230.1R

Al utilizar suelo-cemento en estructuras de pavimento se suele exigir para subrasantes mejoradas una resistencia a compresión mínima a los 7 días de 1.5MPa y entre 2.0 y 2.5 MPa para bases y subbases de suelo-cemento.

La resistencia mecánica suele evaluarse también con mayor representatividad mediante un ensayo triaxial. No suele medirse la resistencia mecánica del suelo-cemento con ensayo CBR (o VSR) debido a que los valores obtenidos son tan altos que su interpretación se hace poco clara.

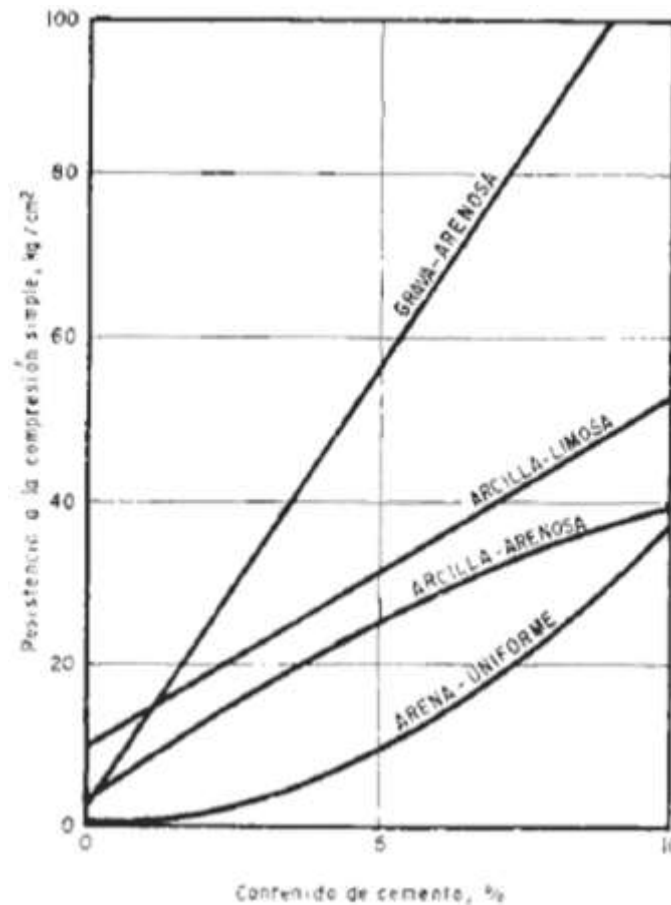
Son varios los factores que influyen en la resistencia a compresión simple: el tipo y contenido de suelo, cemento y agua, densidad, humedad, eficiencia en el mezclado, compactación y curado, forma y tamaño de la probeta, entre otros.

A continuación se desarrollan algunos factores que influyen sobre la resistencia a compresión.

- **Influencia del contenido de cemento Portland**

La Figura 2.6 muestra la variación de la resistencia a compresión simple con distintos contenidos de cemento. La resistencia aumenta casi linealmente aunque la pendiente varía mucho según el tipo de suelo.

Figura 2.6: Resistencia a compresión simple según el porcentaje de cemento de distintos suelos.

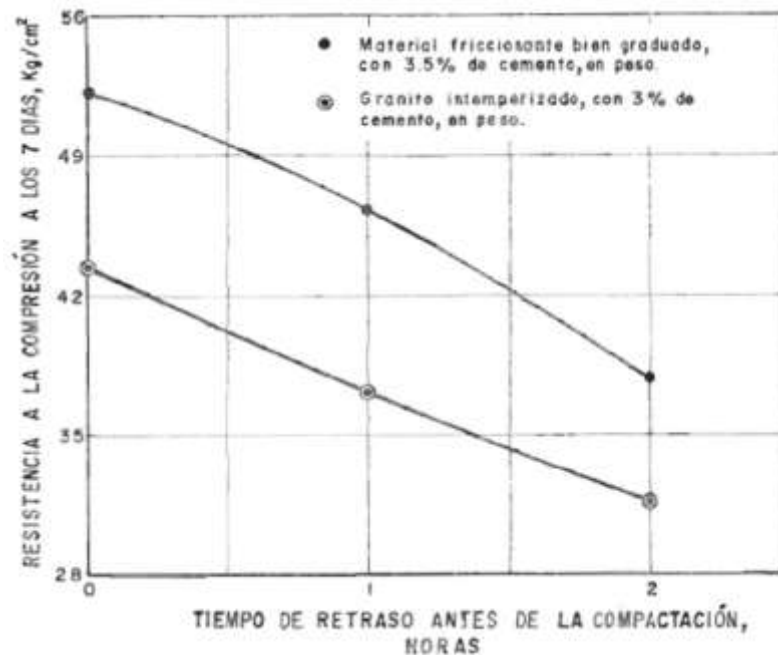


Fuente: IMCYC

- **Influencia del tiempo de atraso en la compactación**

Cuanto mayor sea el tiempo transcurrido entre la mezcla de suelo y la compactación, menor será la resistencia de ese suelo-cemento. Este fenómeno mostrado en la Figura 2.7 se explica por la pérdida de humedad debido al intercambio de agua con la atmósfera y por las reacciones del suelo y del cemento al hidratarse que modifica la densidad seca del suelo al momento de la compactación.

Figura 2.7: Resistencia a compresión simple en función del tiempo de atraso de la compactación.



Fuente: IMCYC

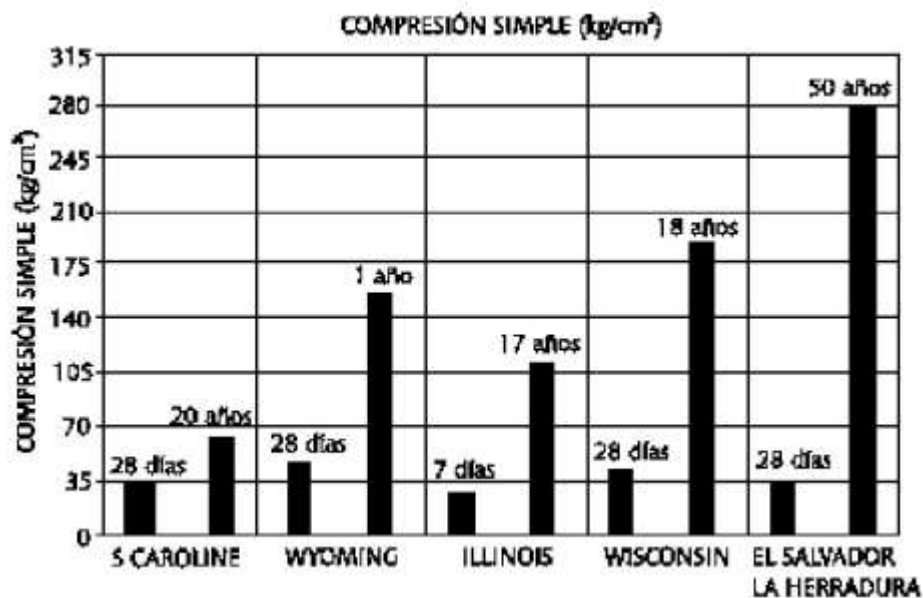
Cuantificar esta pérdida de resistencia es útil en obra, porque el tiempo trascendido entre el mezclado y la compactación depende de la logística de maquinaria.

Evidentemente la pérdida de resistencia será mayor en climas más secos, y dependerá de la mezcla de suelo-cemento. La referencia [2.7] hace ver que la pérdida de resistencia por tiempo de retraso en la compactación crece cuanto mayor es el contenido de cemento en la mezcla.

- **Influencia del tiempo y condiciones de curado**

La resistencia a la compresión simple aumenta con el tiempo. Todos los experimentos y mediciones realizados demuestran que existe un apreciable aumento de resistencia con el tiempo. La evolución de la resistencia con el tiempo puede apreciarse en la figura 2.8. La resistencia a la compresión simple aumenta considerablemente los primeros 90 días, de una a tres veces el valor a los 7 días, dependiendo del tipo de suelo y del contenido de cemento, y luego continua su crecimiento en forma más lenta.

Figura 2.8: Ganancia de resistencia a compresión a largo plazo



Fuente: IMCYC

- **Influencia del contenido de humedad**

Un mayor contenido de humedad en la mezcla al momento del ensayo de compresión simple significa menor resistencia.

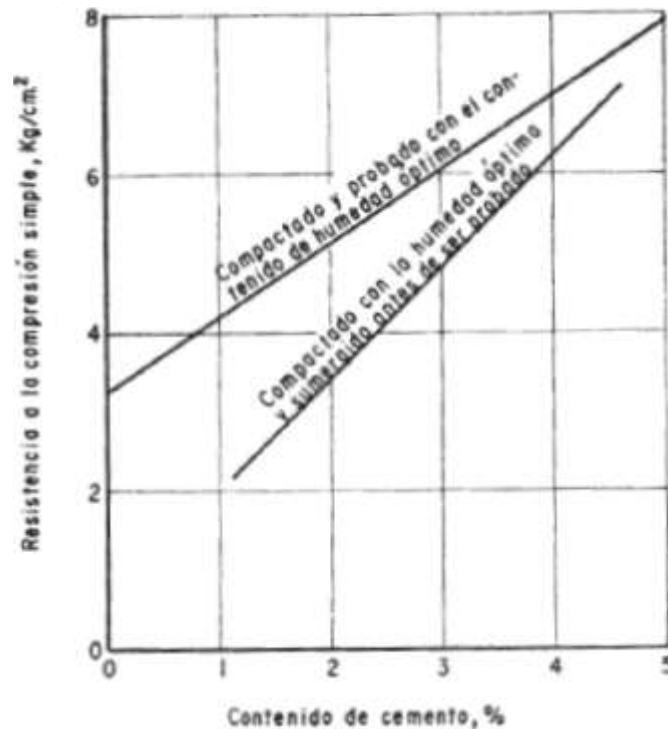
La Figura 2.9 muestra, para distintos contenidos de cemento, la diferencia de resistencia a compresión simple de una arcilla poco plástica en un caso compactada y ensayada con la humedad óptima y en el otro sumergida en el agua antes de ensayar.

Esta disminución de resistencia probablemente se explique por el desarrollo de presiones internas de poro a medida que se incrementa la carga y al mayor volumen de gel que disminuye la unión de partículas sólidas.

En las distintas normas se especifica sumergir la probeta de suelo-cemento antes del ensayo de compresión debido a que representa la peor condición y probablemente el material se encuentre gran parte de su vida útil saturado.

En la Figura 2.9, además, puede verse como para contenidos mayores de cemento la diferencia de resistencia es menor tendiendo a ser muy similares y por lo tanto prácticamente insensible al agua.

Figura 2.9: Influencia del contenido de humedad en la resistencia a compresión simple.



Fuente: IMCYC

1.14.5.3.RESISTENCIA A LA TRACCIÓN POR FLEXIÓN

La resistencia a la tracción por flexión o módulo de rotura de los suelos estabilizados con cemento tienen valores aproximados que varían de 0.18 a 0.45.

La relación de 0.18 corresponde a un suelo-cemento de alta resistencia a la compresión simple y la de 0.45 a la de baja. El módulo de ruptura a los 28 días es de 1.1 a 2 veces más al que se obtiene a los 7 días y a los 90 días es de 1.5 a 2.7 veces más al de los 7 días. Larsen et al proponen módulos que fluctúan entre 3.5 y 17.5 kg/cm².

1.14.5.4.MÓDULO DE ELASTICIDAD

El módulo de elasticidad estático es muy variable y depende del tipo de suelo y de la cantidad de cemento principalmente. En general, este módulo es bajo comparándolo con el del concreto y muy alto si se lo compara con el suelo natural. Valores burdos para un suelo-cemento granular muy bueno es de 70000kg/cm² a los 28 días, y de 40000 kg/cm² para suelos granulares mezclados con finos. La PCA da valores que fluctúan entre 35000 y 140000 kg/cm² a los 28 días. Felt y Abrahams dan de 56000 a 154000kg/cm² para suelos arenosos y de 42000 a 56000 para suelos limos arcillosos.

1.14.6. APLICACIONES

La aplicación principal del suelo-cemento es su uso en estructuras de pavimentos. Además se utiliza para la estabilización de taludes en la construcción de presas o terraplenes, revestimiento de canales y obras de almacenamiento de líquidos, estabilización de fundaciones y otras aplicaciones.

El diseño de la mezcla en cada caso será función de las propiedades a prestar en servicio.

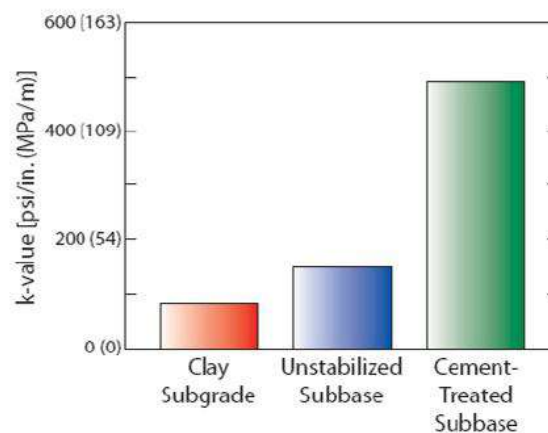
1.14.6.1.SUELO-CEMENTO EN PAVIMENTOS

El suelo-cemento se utiliza tanto en pavimentos flexibles como en pavimentos rígidos. En los primeros se coloca en una de las capas que se ubican por debajo de la

carpeta superior de rodamiento de concreto asfáltico y cumple la función de distribuir la carga a la capa subyacente. Cuando el suelo-cemento se utiliza en pavimentos rígidos, éste se coloca por debajo de la losa de hormigón y su función es la de proveer una superficie uniforme, estable y no bombeable. El bombeo de suelo en pavimentos sucede en presencia de tránsito pesado y frecuente, cuando el suelo es susceptible a entrar en suspensión y hay presencia de agua. La colocación de suelo cemento soluciona este problema ya que cumple la condición de ser no bombeable. Además, debido a su rigidez, la capa de suelo-cemento hace que sean menores las deflexiones de la losa, lo que disminuye las tensiones producidas en ésta, lo que equivale a un menor consumo de fatiga y por lo tanto alarga la vida útil del pavimento. Este último efecto de la rigidez del suelo-cemento se tiene en cuenta en los métodos de diseño de espesores de losa al considerar un kR (Módulo de reacción de la sub-rasante) mayor.

El coeficiente kR no se refiere solamente a la capa de suelo-cemento, sino al conjunto de capas que subyacen a la capa de hormigón. Este incremento del kR compuesto puede observarse en la Figura 2.10.

Figura 2.10 Incremento del módulo de reacción de la subrasante k en suelos estabilizados con cemento



Fuente: PEDRO ANTONIO SERIGOS. *Rigidez de baja deformación de mezclas de suelo de la deformación panpeano y cemento portland. Tesis de grado. Universidad de buenos aires*

Además al colocar una capa de suelo-cemento se evitan deformaciones permanentes por cargas pesadas y se logra mejor eficiencia en la transferencia de cargas en juntas, lo que reduce las intervenciones por mantenimientos y por lo tanto reduce costos.

Otro motivo por el que se utiliza una capa de suelo-cemento debajo de la losa de hormigón en pavimentos rígidos es a fin de proveer una plataforma estable y firme donde trabajen los equipos y maquinaria durante la colocación de la losa. Así se logra disminuir las demoras por malas condiciones climáticas lo que aumenta el rendimiento de los equipos.

El porcentaje de cemento en las mezclas de suelo-cemento para carpetas de rodamiento se diseña para soportar las cargas y el desgaste producido por el tránsito y ronda por lo general entre el 11 y 20%.

En Argentina existen varios casos de mejorados de suelo-cemento dentro de la red vial no pavimentada, logrando transitabilidad en los días de lluvia y por lo tanto solucionando el problema del transporte rural. Este aspecto es importante en especial cuando se trata de productos perecederos como el caso de cuencas lecheras.

1.14.7. VENTAJAS Y LIMITACIONES

Las propiedades medidas en testigos de suelo-cemento a muy largo plazo demuestran la buena durabilidad y evolución a lo largo del tiempo del material. Esta ventaja significa menores intervenciones de mantenimiento y por lo tanto menor costo total de la estructura del pavimento.

La gran mayoría de los suelos son aptos para ser estabilizados con cemento Portland. El hecho de estabilizar el suelo local implica ventajas económicas debido al ahorro del alto costo de transporte de los materiales de préstamo y al mayor rendimiento obtenido. Además, la estabilización del suelo local reduce el impacto ambiental al evitar la explotación intensiva y progresivo agotamiento de yacimientos.

Otra ventaja de suelo-cemento frente a los estabilizados granulares es su mayor resistencia y mejor distribución de cargas (Figura 2.11) lo que permite menores espesores de diseño que significan mayores rendimientos y menor costo inicial.

Figura. 2.11: Distribución de esfuerzos para capas de suelo-cemento y estabilizado granular según PCA



La gran tendencia a fisuración por retracción de las capas de suelo-cemento representa una desventaja cuando es utilizada en pavimentos flexibles ya que estas pueden reflejarse a las capas superiores. Sin embargo es posible controlar la reflexión de fisuras mediante una correcta dosificación, técnicas de prefisuración o aumentando el espesor de la carpeta asfáltica.

El tiempo inicial de fraguado del cemento limita el tiempo de ejecución de las capas de suelo-cemento siendo este un factor restrictivo en la logística de equipos y maquinaria. De ser necesario, se suelen utilizar aditivos retardadores de fraguado para alargar el tiempo disponible para la construcción.

Otra limitación del suelo-cemento es su incapacidad de resistir los esfuerzos abrasivos para demandas altas de tránsito, lo que hace necesario la construcción de capas de rodamiento superiores.

1.14.8. DISEÑO DE MEZCLAS

Los requisitos principales de mezclas de suelo-cemento endurecido son de resistencia y durabilidad.

Para proyectos donde el suelo-cemento cumpla la función de impermeabilizar, el requisito más importante es el de la permeabilidad.

Mediante ensayos de laboratorio se determina para el suelo en cuestión el contenido de cemento y de agua y la densidad necesarias para cumplir las exigencias de proyecto.

En general, las especificaciones de cada país exigen valores mínimos de resistencia mediante un ensayo de compresión a 7 días y valores de pérdida en peso máxima para ensayos de durabilidad de humedecimiento y secado, y congelamiento y deshielo.

En la Tabla 2.6. Figuran los contenidos de cemento típicos según el tipo de suelo a estabilizar.

Tabla 2.6: Valores típicos de contenido de cemento según tipo de suelo

Tipo de Suelo (HRB)	Tipo de Suelo (SUCS)	Rango de %CP en peso típico
A1a	GW GP GM SW SC SP SM	3-5
A1b	GM GP SM SP	5-8
A2	GM GC SM SC	5-9
A3	SP	7-11
A4	CL ML	7-12
A5	ML MH CH	8-13
A6	CL CH	9-15
A7	MH CH	10-16

Fuente: PCA

El pliego de especificaciones técnicas generales de la DNV para subbases o bases de suelo-cemento, exige un contenido de cemento en la mezcla tal que la pérdida en peso para los ensayos de durabilidad no supere ciertos límites transcriptos en la Tabla 2.6.

Tabla 2.7: Porcentajes de pérdida de peso máximo en ensayos de durabilidad según tipo de suelo.

Tipo de Suelo (HRB)	% pérdida de peso máximo en ensayos de durabilidad
A1 A2-4 A2-5 A3	14
A2-6 A2-7 A4 A5	10
A6 A7	7

Fuente: PCA

Una vez determinado el contenido de cemento mínimo mediante ensayos de durabilidad debe ensayarse la mezcla a compresión simple a fin de verificar que la resistencia a los 7 días sea superior a la especificada en los pliegos de especificaciones técnicas particulares. La resistencia a compresión simple mínima especificada a los 7 días es por lo general de 2.0 a 2.5 MPa para bases o sub-bases. Por lo general también se limita la resistencia a compresión máxima en aproximadamente 3.5 MPa a fin de limitar el CUC de la mezcla y así controlar la fisuración de la capa de suelo-cemento.

La norma VN-E20 “Determinación del dosaje para ensayar mezclas de suelo-cemento” detalla el procedimiento a seguir para determinar el contenido de cemento Portland con que deben ensayarse las mezclas de suelo-cemento. Los pasos que sigue este procedimiento son:

- 1) se determina la humedad óptima de moldeo mediante un ensayo de compactación según la norma para un contenido de cemento inicial dado por la norma según el tipo de suelo.
- 2) se fijan los porcentajes de cemento con los cuales se ejecutarán los ensayos de durabilidad y compresión simple en función del peso específico seco máximo obtenido en el paso anterior y la granulometría del suelo.

1.14.9. DOSIFICACIÓN DE SUELO – CEMENTO

La determinación de la adecuada cantidad de cemento se basa en el hecho de que suelos mezclados con pequeñas cantidades de cemento, estando debidamente compactados y curados, mejoran sensiblemente sus características originales de resistencia mecánica, convirtiéndose muy superiores a lo obtenido con otros materiales utilizados como capas de pavimentos. La acción de las cargas y la variación de condiciones climáticas podrían, después de cierto tiempo, disgregar la mezcla endurecida, lo que haría que perdiese el grado de estabilización alcanzado, transformándose en una simple mezcla compactada de suelo con cemento, de calidad baja e indefinida. En vista de eso, la Norma General de Dosificación procura determinar la cantidad de cemento capaz de garantizar una mezcla con permanencia de sus características mejoradas. Con este objetivo, fueron idealizados los ensayos de durabilidad por mojado y secado (y por congelamiento y deshielo en la versión original de la norma).

Tipos de dosificaciones:

1.14.9.1. Método detallado propuesto por la portland cement association

Para la Portland Cement Association el cemento requerido para la estabilización de un suelo dado se determina usualmente por una serie de pruebas de mojado-secado y de congelamiento deshielo con espesímenes compactados, a ambas las llaman de DURABILIDAD. El procedimiento es el siguiente:

- Identificación y clasificación del suelo
- Elección de la cantidad de cemento para el ensayo de compactación
- Formación de probetas de ensayo para ensayo de durabilidad
- Ejecución del ensayo de durabilidad por mojado y secado
- Ejecución del ensayo por compresión simple

1.14.9.2. Método corto de la portland cement association

El método corto no siempre indica el mínimo contenido de cemento con que tratar un suelo arenoso. Pero casi siempre proporciona un contenido de cemento dentro de la seguridad; que estará cercano al obtenido por el método detallado de la PCA.

El método corto es aplicable únicamente para suelos predominantemente arenosos.

1.14.9.3. Método rápido (PCA)

Se utiliza para obras de emergencia y para obras de poca importancia. Consiste en:

1. La elaboración de especímenes que se compactan con la humedad óptima Proctor y peso volumétrico máximo. La cantidad de cemento inicial aplicada variaría en un amplio rango.
2. Después de uno o dos días de curado se someten las probetas a piquetes con punzón o picahielo. Si no es posible penetrar en el espécimen más de 0.60 cm y si al golpearlo se escucha un sonido claro y sólido, se considera que el contenido de cemento es adecuado.

1.14.9.4. Métodos basados en proporcionar el contenido de cemento de acuerdo a su clasificación granulométrica

Consisten en clasificar el suelo y utilizar tablas preparadas de antemano para establecer la proporción de cemento.

1.14.10. PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO DEL SUELO-CEMENTO

El objetivo principal del procedimiento constructivo es el de obtener un material adecuadamente mezclado, compactado y curado que cumpla con los requerimientos exigidos. Los métodos constructivos de la capa de suelo-cemento son varios y varían desde los de menor rendimiento, con procedimientos manuales, hasta los de mayor rendimiento mezclados en planta y colocados con terminadora. A continuación se describirán las etapas de ambos métodos.

La primera etapa del método constructivo de mezclado en el lugar es la de escarificación de la superficie

Figura 2.12: Equipo escarificador-reciclador.



Fuente: Quintanilla Rodríguez, C. (2007). “El estado del arte del suelocemento en estructuras de pavimento”

Durante esta etapa se busca disgregar la superficie hasta la profundidad especificada a fin de facilitar el mezclado con el cemento y el agua y su posterior compactación.

La segunda etapa consiste en la distribución del cemento. Esta se realiza de forma manual o mediante un camión distribuidor.

Figura 2.13: Distribución manual del cemento.



Fuente: Quintanilla Rodríguez, C. (2007). “El estado del arte del suelocemento en estructuras de pavimento”

El primer método consiste en la distribución de bolsas de cemento Portland a lo largo del camino separadas según la dosificación buscada y luego abiertas por operarios para esparcir el cemento. La distribución por camión dosifica el cemento según la abertura del esparcidor y la velocidad del vehículo.

Figura 2.14: Camión distribuidor de cemento



Fuente: Quintanilla Rodríguez, C. (2007). "El estado del arte del suelocemento en estructuras de pavimento"

La tercera etapa es la distribución del agua. El agua necesaria para alcanzar la humedad óptima es distribuida mediante un camión regador, que cumple la función de transportar el agua hasta el lugar y la libera uniformemente a través de orificios calibrados en función de la velocidad del camión.

Figura 2.15: Camión regador



Fuente: Quintanilla Rodríguez, C. (2007). "El estado del arte del suelocemento en estructuras de pavimento"

La cuarta etapa es la de mezclado. Uno de los métodos, de bajo rendimiento, es el mezclado con motoniveladora. Se necesitan varias pasadas de ésta, debiendo inspeccionarse permanentemente zonas de variación de color que indican falta de homogeneidad. El mezclado con motoniveladora debe utilizarse en obras chicas ya que se necesita un operador con gran experiencia para conseguir una adecuada homogeneidad de la mezcla.

Figura 2.16: Mezclado del suelo, cemento y agua mediante motoniveladora



Fuente: Quintanilla Rodríguez, C. (2007). “El estado del arte del suelocemento en estructuras de pavimento”

La quinta etapa es la compactación. Esta consiste en la densificación de la mezcla hasta conseguir la densidad especificada mediante pasadas de equipos compactadores. El número de pasadas necesarias se determina previamente en un tramo de prueba. La compactación se realiza mediante rodillo liso o “pata de cabra” según el tipo de suelo.

Figura 2.17: Compactación mediante rodillo liso o pata de cabra



Fuente: Quintanilla Rodríguez, C. (2007). “El estado del arte del suelocemento en estructuras de pavimento”

La sexta y última etapa consiste en el curado. Esta se logra mediante el riego continuo de agua luego de la compactación y terminación realizado por un camión regador al menos dos veces por hora o la colocación de una membrana asfáltica. Esta última consiste en el riego de una emulsión asfáltica sobre la capa de suelo-cemento de modo de lograr una membrana que impida la rápida evaporación del agua en la mezcla.

Figura 2.18: Riego de membrana asfáltica de curado



Fuente: Quintanilla Rodríguez, C. (2007). “El estado del arte del suelocemento en estructuras de pavimento”

Todas las etapas constructivas antes descriptas deben realizarse antes del tiempo inicial de fraguado, este lapso ronda por lo general las 2 horas a partir del contacto entre el cemento y el agua. Posteriormente a los 7 días de curado puede realizarse la apertura al tráfico general o público.

Mezclado en Planta Central

- El mezclado de suelo cemento en planta central tiene la ventaja de tener un buen control sobre la dosificación de los materiales intervinientes, si se efectuó una correcta calibración de la misma en el inicio de la construcción (Foto 2.19). De cualquier manera, la metodología requiere la adopción de algunas precauciones mínimas para lograr una mezcla eficiente de los materiales componentes, en especial si se trabaja con suelos finos.

Figura 2.19. Mezclado en planta central



Fuente: Instituto del Cemento Portland Argentino

- Cuando se trabaja con suelos granulares por lo general no habrá dificultades para su manipulación y mezclado en planta. En cambio, en suelos finos cohesivos será necesaria la preparación previa del suelo mediante pulverizado hasta obtener granulometrías y humedades acordes con las especificadas. En estos casos será conveniente preparar acopios suficientes de materiales con granulometría y humedad controladas. Es aconsejable colocar además, cribas o zarandas en las tolvas de alimentación de la planta, para limitar el tamaño máximo de los suelos al especificado.

- Previo al inicio de los trabajos se debe efectuar una calibración adecuada de la planta mezcladora. Estas, en general, son de flujo continuo y dosifican por volumen mediante la regulación de una abertura de compuerta, velocidad de cintas o tornillos alimentadores, caudalímetros, etc. Esta regulación del equipo de producción debe controlarse periódicamente y es necesario, además, realizar calibraciones para distintas humedades de los materiales, en tanto variaciones en el tenor de agua determinaran modificaciones en el proporcionamiento de materiales secos.

- Es conveniente que la provisión de cemento al mezclador se asegure con silos de capacidad adecuada y que estén dotados de aireadores o sopladores que garanticen un flujo uniforme de material. Es importante, además, el control visual de ingreso de los distintos materiales al mezclador, para detectar rápidamente cambios o interrupciones en el flujo de cada componente, que alteren las proporciones de la mezcla.

- En el transporte a las canchas deberán reducirse al mínimo las pérdidas de humedad por evaporación, equipando a los camiones con lonas u otras coberturas adecuadas, limitando por otra parte el tiempo total de transporte a 30 minutos como máximo. Se recuerda que el plazo de manejabilidad en este caso, debe contabilizarse a partir de la mezcla del cemento con el resto de los materiales.

- La distribución de la mezcla en camino se efectuará con equipos distribuidores o extendedoras de pavimentos, trabajando en el mayor ancho posible. En caso de

distribuir con un único equipo, en dos o más fajas, se acortará la longitud de las canchas de manera de limitar el lapso transcurrido desde la distribución de una faja y la adyacente a 25/30 minutos como límite aconsejable, para evitar juntas constructivas longitudinales.

- La descarga en montones a encaballetar y distribuir con motoniveladoras, es una práctica poco recomendable por la desigual densificación que se logra en la mezcla extendida, entre las zonas compactadas por los neumáticos de la motoniveladora y aquellas que no han sido afectadas. A esto se suma la dificultad que supone la reposición de la humedad perdida por evaporación en la mezcla (que alcanza valores importantes en este tipo de procesos) en estos movimientos de distribución.

CAPÍTULO III

INVESTIGACIÓN DE APLICABILIDAD DE SUELO-CEMENTO EN LA CAPA SUB BASE DE UN PAVIMENTO RÍGIDO DE NUESTRO MEDIO.

3.1. ENFOQUE GENERAL DE LA INVESTIGACIÓN

La base de este proceso de investigación se fundamentara en todos los ensayos que definen las características de cada uno de los materiales que forman parte del estudio, para poder establecer y evaluar las mezclas de suelo cemento en base a normas y estudios ya efectuados.

El suelo utilizado es material fino, pertenece a la capa sub base para un pavimento rígido, el cual será analizado a partir de su caracterización tanto en estado natural como estabilizado con cemento, la variación que sufre el CBR (California Bearing Ratio), resistencia a compresión y flexión que ofrece, además de la prueba de humedecimiento-secado, determinando en base a estos puntos su influencia estructural en el diseño del pavimento.

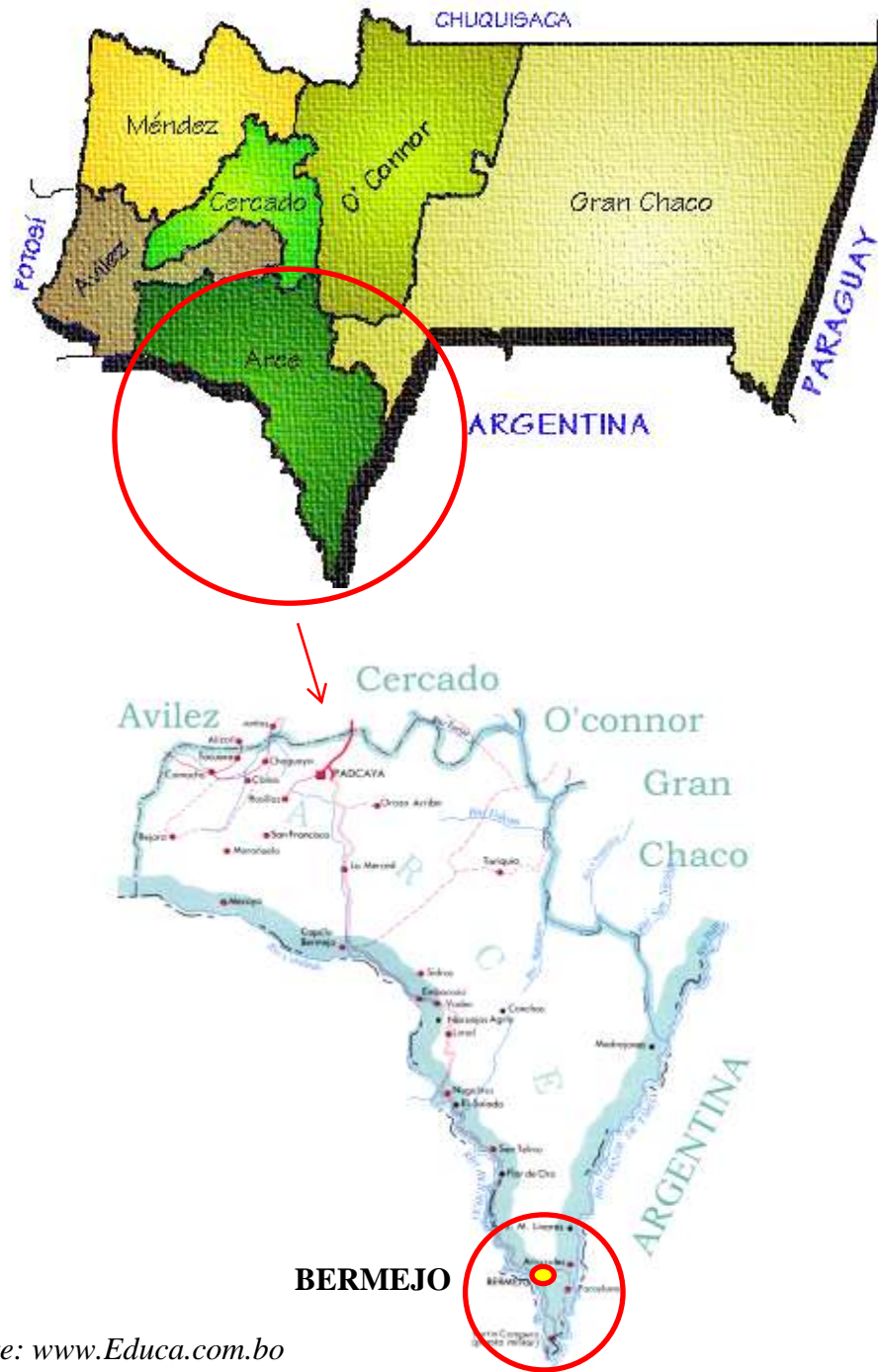
Por lo tanto la finalidad que se pretende con este trabajo es buscar el porcentaje óptimo de cemento que se refleje en una resistencia adecuada, permitiendo así definir una sub base suelo-cemento similar en cuanto a características a una de tipo granular pero con la ventaja de que ofrece mejor comportamiento en cuanto resistencia, provocando efectos estructurales en la losa de hormigón, como es la disminución del espesor de la misma.

3.2. LOCALIZACIÓN DEL AREA DE ESTUDIO

El área de estudio son las 180 cuadras de la ciudad de Bermejo, ubicada en La ciudad de Bermejo Capital de la Segunda Sección de la Provincia Arce situada al sud del

Departamento de Tarija, ubicada a los $22^{\circ} 42'$ de latitud sud, $64^{\circ} 21'$ de longitud oeste y una altitud de 409 m.s.n.m.

Imagen 3.1 Localización área de estudio



Fuente: www.Educa.com.bo

Imagen 3.2 Localización satelital del área de estudio

Fuente: Google earth

3.2.1. Antecedentes y descripción del área de proyecto

El Proyecto "CONSTRUCCIÓN PAVIMENTO 180 CUADRAS CIUDAD DE BERMEJO", consistía en la construcción de 180 cuadras de pavimento rígido, con una superficie de 230.330,58 mt², comprende un número de calles de 183, ubicadas en diferentes barrios de Bermejo.

La micro localización del proyecto se encuentra, concretamente en los barrios: Luis de Fuentes, San José, Lapacho, 1° de Mayo, Avaroa, Municipal, Miraflores, Aeropuerto, Santiago, San Juan, Las Palmeras, Azucarero, 21 de Diciembre, 15 de Abril, Barrio Lindo, Bolívar, 27 de Mayo, Moto Méndez, Barrio Central, Aniceto Arce, San Bernardo, San Antonio y 2 de Agosto.

La ubicación física de las 180 cuadras, no tienen sucesión de continuidad en las calles y barrios mencionados, sino que conforman segmentos o tramos de las calles identificadas que se unen con tramos de calles adyacentes.

Las empresas constructoras que estaban a cargo de esta obra son "PROCOSUR" y "LIROSO". El Proyecto fue paralizado en el año 2015 por problemas económicos, hasta entonces se tenía un avance del pavimentado del 40% aproximadamente.

3.3. SELECCIÓN DEL MATERIAL

Del área de estudio que son las 180 cuadras de la ciudad de Bermejo se toma como muestra 20 calles, su estudio de clasificación se obtienen de la empresa ejecutora PROCOSUR, y se presenta en el **ANEXO I**.

En base a este sondeo se definen los suelos que presenta la zona, al mismo tiempo se identifica los suelos predominantes con los cuales se trabaja este proyecto de investigación. Una vez definidos los tipos de suelos finos existentes en el lugar se realiza la toma de muestras a una profundidad de 0.60 m, altura que es requerida según norma para la obtención de muestras para una capa sub base.

3.3.1. Metodología para determinar el tamaño de la muestra

El método seleccionado para determinar la cantidad de muestras que fueron analizadas en este proyecto es el siguiente:

Muestreo probabilístico de tipo aleatorio estratigráfico, el cual consiste en considerar categorías típicas diferentes entre sí (estratos) que poseen gran homogeneidad respecto a alguna característica. Lo que se pretende con este tipo de muestreo es asegurarse de que todos los estratos de interés estarán representados adecuadamente en la muestra. Cada estrato funciona independientemente, pudiendo aplicarse dentro de ellos el muestreo aleatorio simple o el estratificado para elegir los elementos concretos que formarán parte de la muestra.

La distribución de la muestra en función de los diferentes estratos se denomina afijación, y puede ser de diferentes tipos:

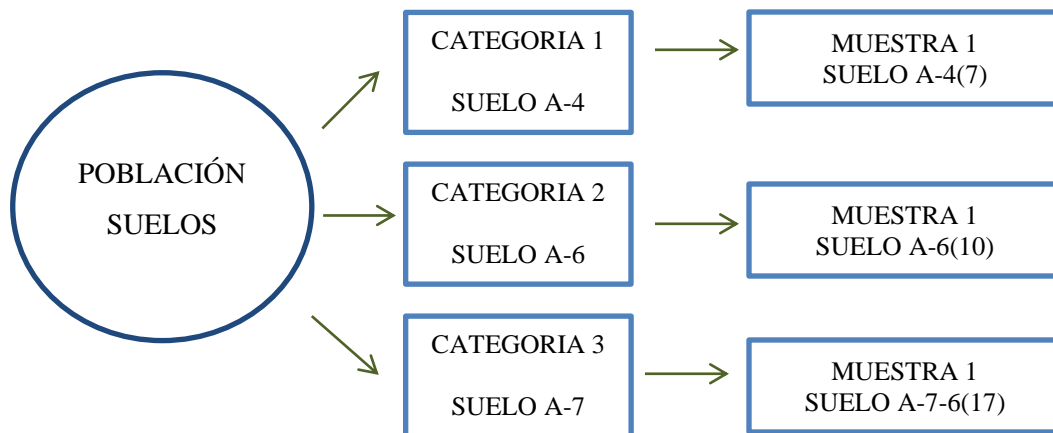
Afijación Simple: A cada estrato le corresponde igual número de elementos muestrales.

Afijación Proporcional: La distribución se hace de acuerdo con el peso (tamaño) de la población en cada estrato.

Afijación Óptima: Se tiene en cuenta la previsible dispersión de los resultados, de modo que se considera la proporción y la desviación típica. Tiene poca aplicación ya que no se suele conocer la desviación.

De acuerdo a este método lo que se hace es considerar tres categorías de suelos diferentes entre sí por la calidad que presentan, designadas de acuerdo a información obtenida del estudio de suelos del área de proyecto. De cada categoría de suelo fijada se selecciona una sola muestra, basado en el concepto de fijación simple.

Mediante el siguiente esquema se explica el concepto desarrollado anteriormente:



3.3.2. Ubicación de calles para obtención de muestras

El número de muestras que se obtienen son 3, se elige esta cantidad porque los suelos que predominan de acuerdo al sondeo proporcionado están entre los de tipo A-4, A-6 y A-7, por lo tanto se ubican tres calles que tengan estas características, y son las siguientes:

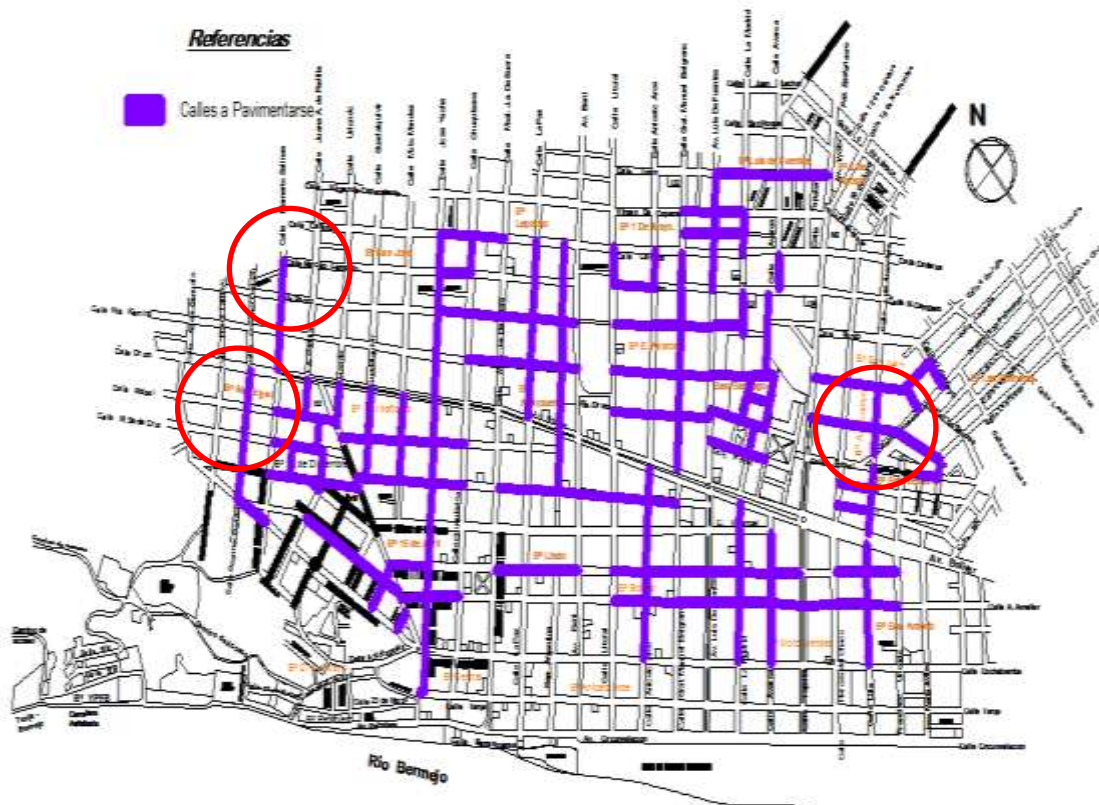
Muestra 1: Calle Mamerto Salinas entre Pando y Narciso Campero.

Muestra 2: Calle O'connor D'arlach entre Potosí y Oruro.

Muestra 3: Calle Oruro entre Barrenechea y Luis Arancibia.

Nota. Las muestras de suelo fueron obtenidas de las calles más alejadas del centro, esto debido a que las mismas no presentaban ningún mejoramiento de plataforma, por lo tanto, se tenía mayor facilidad para su obtención, en comparación con las calles próximas a la parte central en donde sí se contaba con un mejoramiento de ripiado de al menos unos 30 cm de espesor, razón por la cual se optó buscar las zonas más apartadas, pero que estén dentro del área de proyecto, donde no se provoque ningún daño o problema para los vecinos del lugar.

Imagen 3.3 Ubicación de las calles de extracción de muestras.



Fuente: Empresa PROCOSUR

3.3.3. Criterio de Selección de la Muestra

Los procedimientos de muestreo son las técnicas que se aplican para obtener muestras de suelo, alteradas o inalteradas durante una exploración del subsuelo.

❖ **Muestra alterada.-** Una muestra alterada se define como aquella donde parte de ella o toda, ha sufrido una alteración tal, que ha perdido la estructura que poseía in-situ. En general las muestras alteradas se usan para la identificación del suelo como ser:

1. Análisis granulométrico
2. Determinación de los límites líquido y plástico
3. Peso específico de los sólidos del suelo
4. Determinación del contenido orgánico
5. Clasificación del suelo

Sin embargo, las muestras alteradas no deben usarse para pruebas de consolidación, permeabilidad o de resistencia cortante, ya que estas deben hacerse con muestras inalteradas.

❖ **Muestra inalterada.-** Es aquella muestra que preserva, en la medida de lo posible, la estructura y el contenido de humedad para que represente realmente las condiciones de campo.

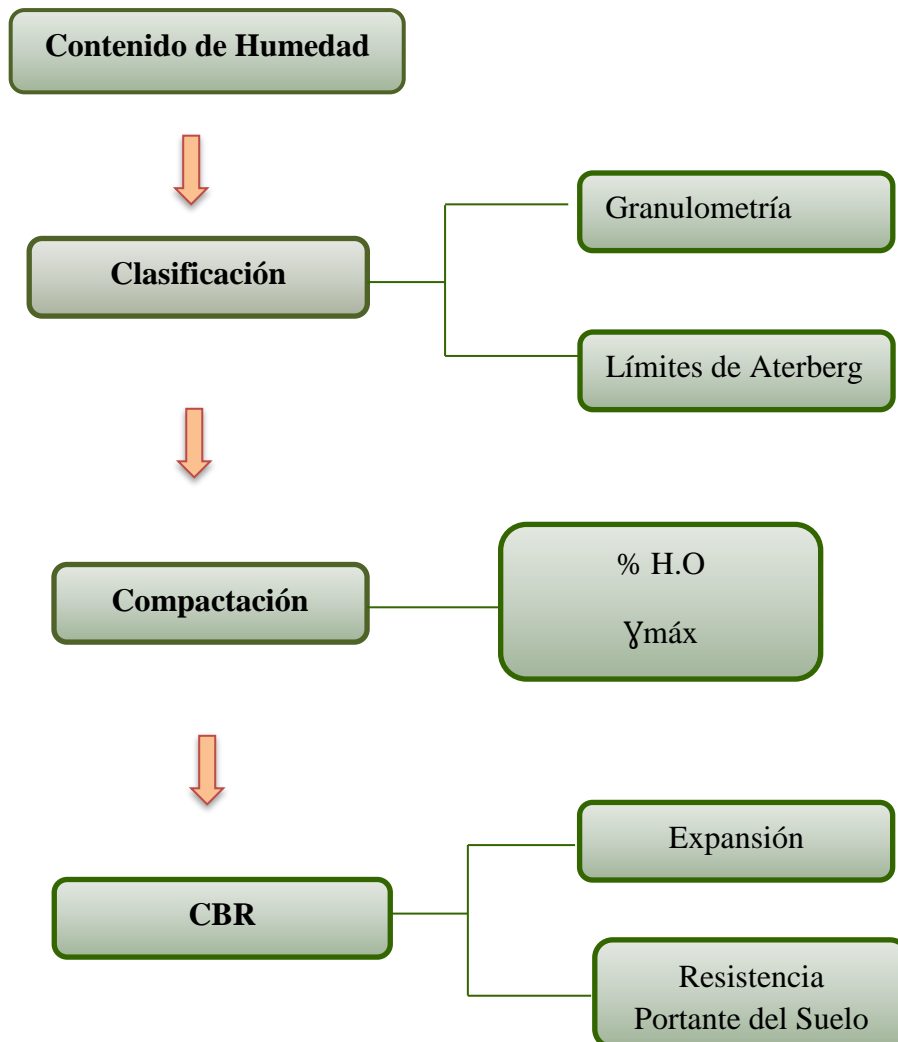
Para este trabajo de Tesis de Grado, las muestras con la que se trabajan son de tipo alterada o perturbadas debido a que los ensayos que se realizan son de tipo identificativo para cada uno de los suelos, para esto se someten a estudios de caracterización mediante el cual se determinan sus propiedades físicas y mecánicas.

Un procedimiento adecuado de muestreo, facilitará la correlación de los respectivos datos con propiedades ingenieriles.

3.4. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

Los estudios de caracterización son de vital importancia para conocer al material a tratar, así también es importante conocer las propiedades del material que se adicionarán, por lo tanto se recurre a pruebas de laboratorio para conocer las características del suelo natural y del cemento, materiales que componen este estudio, para así tener un criterio más amplio del comportamiento de un suelo tratado.

Por lo tanto para la caracterización de los materiales (suelos) son necesarios los siguientes tipos de caracterización: física, mecánica y química ambos tipos comprende ensayos específicos que se detalla a continuación.



3.4.1. ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN EN LOS SUELOS NATURALES

Se refiere a los ensayos físico-mecánicos y químicos para la caracterización del suelo sin tratar es decir el suelo sin agente estabilizador (sin cemento).

La caracterización se realiza a las tres muestras seleccionadas del área de proyecto que son identificadas de la siguiente manera:

Muestra 1: Calle Mamerto Salinas entre Pando y Narciso Campero.

Muestra 2: Calle O'connor D'arlach entre Potosí y Oruro.

Muestra 3: Calle Oruro entre Barrenechea y Luis Arancibia.

Cuadro 3.1 Ensayos de Caracterización a los Suelos Naturales

CARACTERIZACIÓN	ENSAYO	NORMATIVA
Física	Contenido de humedad	ASTM D2216
	Análisis granulométrico por tamizado	ASTM D422 AASHTO T88
	Determinación del límite líquido	ASTM D4318 AASHTO T89
	Determinación del límite plástico e índice de plasticidad	ASTM D4318 AASHTO T90
Mecánica	Ensayo de compactación método (Proctor modificado)	ASTM D422 AASHTO T180
	Determinación de la relación de soporte del suelo en laboratorio (CBR de laboratorio)	ASTM D1883 AASHTO T193

Fuente: Elaboración propia.

3.4.1.1. Contenido de Humedad de la muestra (ASTM D2216)

El contenido de agua o más comúnmente la humedad de la muestra del material se define como la relación, expresada en porcentaje, entre la masa de agua que llena los poros o "agua libre", en una masa de material, y la masa de las partículas sólidas de material.

PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO:

Consiste en obtener una muestra húmeda representativa del material utilizado, colocarlo en un recipiente al horno, pesar el recipiente vacío y luego el recipiente más la muestra húmeda obteniendo así un peso del material más el recipiente, luego llevarla al horno a temperatura $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ ($230 \pm 9^{\circ}\text{F}$) en la mayoría de los casos, el secado de una muestra durante la noche (16 horas), es suficiente, sacar del horno y pesar nuevamente el material, obteniendo un peso seco del material más el recipiente.

Imagen 3.4: Pesado De La Muestra Húmeda y secada en el horno



Fuente: Elaboración Propia

CÁLCULOS:

El contenido de agua se calcula mediante la siguiente formula:

$$w(\%) = \frac{Pa}{Pss} * 100$$

Donde:

W(%)= contenido de humedad en porcentaje.

P1= peso de la tara y de la muestra húmeda (g)

P2= peso de la tara y de la muestra seca (g)

Pa= (P1-P2) = peso del agua presente en el suelo (g)

Pss= (P2-Pc) = peso del suelo después de secar al horno (g)

RESULTADOS:

Tabla 3.1 Resultados del Contenido de Humedad Natural

HUMEDAD NATURAL	
MUESTRA N°	Porcentaje de humedad W (%)
1	4.27
2	5.74
3	4.43

Fuente: Elaboración Propia

Ver planilla en ANEXO II

3.4.1.2. Análisis Granulométrico por Tamizado (ASTM D422 - AASTHO T-88)

OBJETIVO

Este método permite, mediante tamizado, determinar la distribución por tamaños de las partículas mayores que 0,075 mm (tamiz N° 200), de una muestra de suelo.

Para determinar la granulometría del suelo se realizó por el método del lavado, debido a que se trata de material fino.

MATERIAL UTILIZADO

- Balanza
- Tamices
- Horno
- Herramientas y accesorios.-
brochas, recipientes y platos

Tamaños nominales de abertura	
(mm)	ASTM
4.75	(N° 4)
2	(N° 10)
0.425	(N° 40)
0.075	(N° 200)

PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO

- a) Se toma una muestra representativa de suelo que pasa el tamiz # 4 en una cantidad de 500 g.

Imagen 3.5: Cortado de Material por Tamiz N°4 y Cantidad de Muestra



Fuente: Elaboración Propia

- b) A continuación se deja el material reposar en agua durante 24 horas hasta que esta sature completamente, haciendo que el suelo tenga características de barro o lodo.

Imagen 3.6: Muestra en Saturación



Fuente: Elaboración Propia

- c) Hacer pasar el material por el tamiz N° 200, lavar cuidadosamente con agua potable el suelo, hasta que el agua pasante tome aspectos más claros sin sedimentación.

Imagen 3.7: Lavado de la Muestra en Tamiz N° 200



Fuente: Elaboración Propia

- d) Posteriormente el material retenido en la malla N° 200, disponer dentro de un recipiente para realizar un secado del suelo hasta una masa constante en horno a una temperatura de $110 \pm 5^\circ\text{C}$.

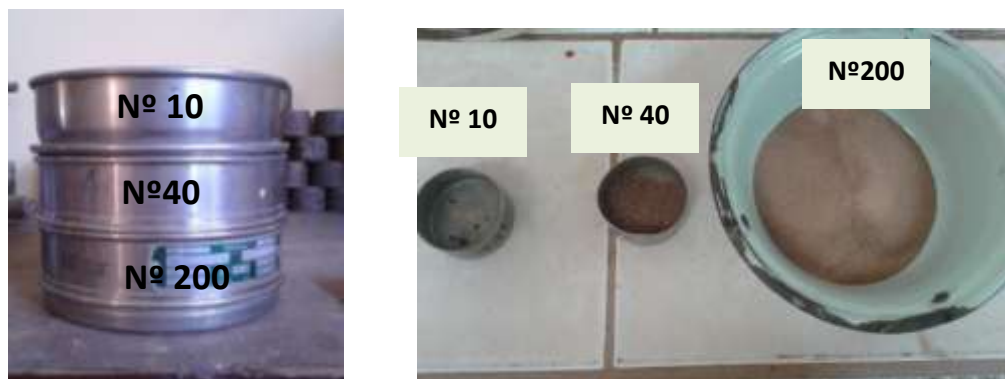
Imagen 3.8: Muestra Retenida en Tamiz N° 200



Fuente: Elaboración Propia

- e) Una vez secado el material se procede a retamizar por las mallas, N°10, N°40 y N° 200, registrando los pesos de suelo retenido en cada tamiz

Imagen 3.9: Retamizado de Suelo Seco y Cantidades Retenidas en cada Malla



Fuente: Elaboración Propia

CÁLCULOS:

- La granulometría se presenta como porcentaje acumulado que pasa por cada tamiz, indicando como primer resultado el del menor tamiz en que pasa el 100% y expresando el resultado para los siguientes tamices como la diferencia entre el porcentaje que pasa en el tamiz inmediatamente anterior al de cálculo y el retenido en el tamiz de cálculo.
- Los resultados de la granulometría se muestran en forma gráfica en un sistema de coordenadas ortogonales; en las abscisas, a escala logarítmica, se indican las aberturas de los tamices y en las ordenadas, a escala lineal, los valores de los porcentajes que pasan en cada tamiz, obtenidos de acuerdo a lo calculado en porcentaje del retenido en cada tamiz.

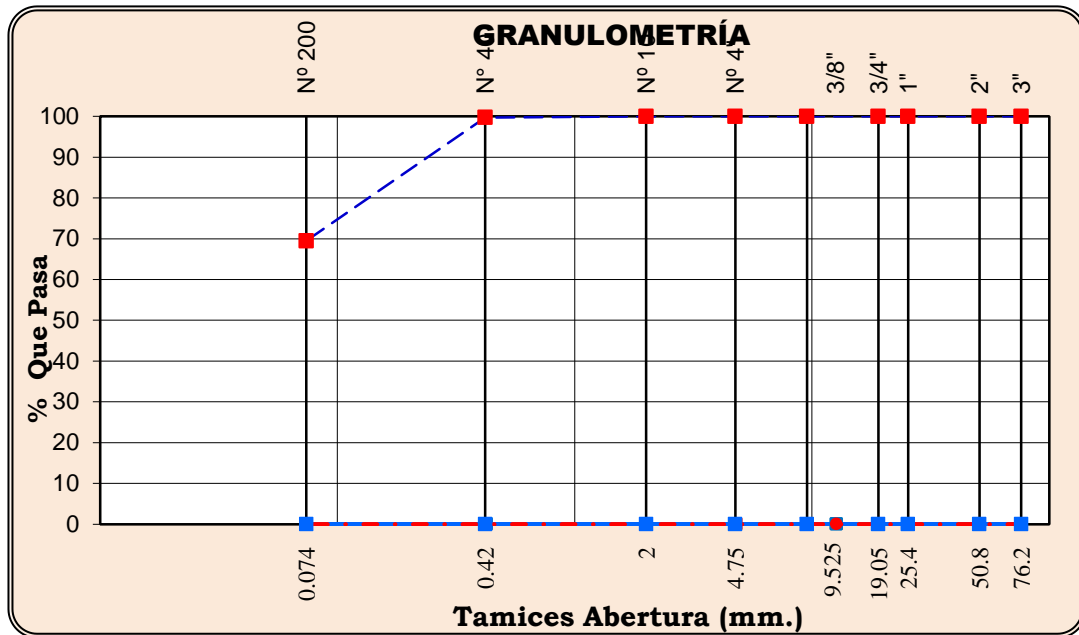
RESULTADOS:

Tabla 3.2 Resultados de Granulometría del Suelo Natural

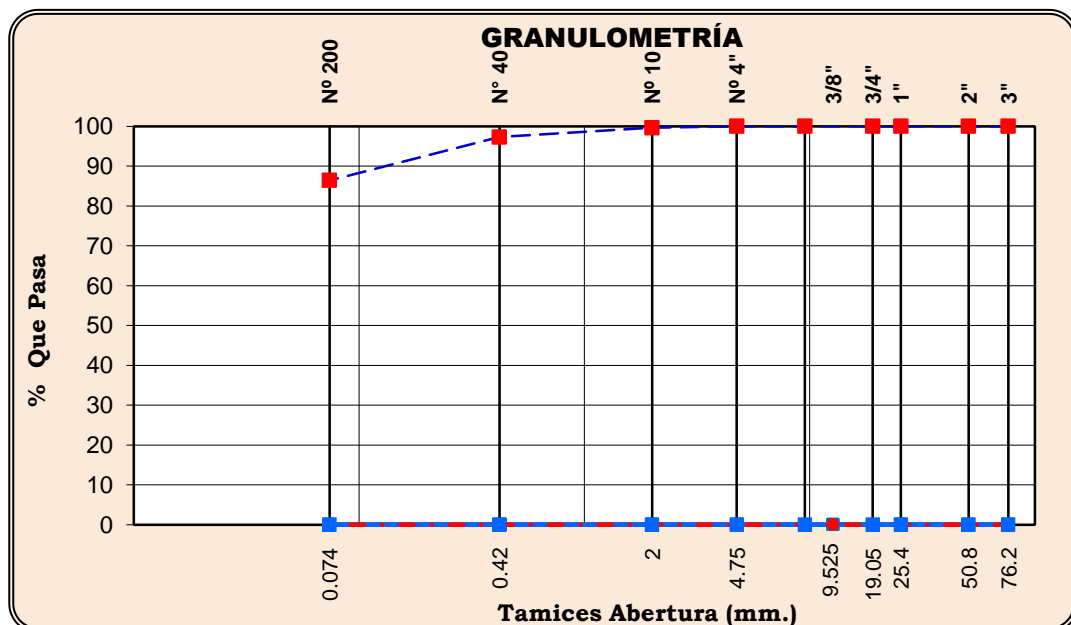
MUESTRA N°	1	2	3
Tamiz N°	% Que Pasa	% Que Pasa	% Que Pasa
3"	100.0	100.0	100.0
2"	100.0	100.0	100.0
1"	100.0	100.0	100.0
3/4"	100.0	100.0	100.0
3/8"	100.0	100.0	100.0
4	100.0	100.0	100.0
10	100.0	99.6	100.0
40	99.7	97.3	99.9
200	69.5	86.4	99.6

Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 3.1 Granulometría de la Muestra N° 1



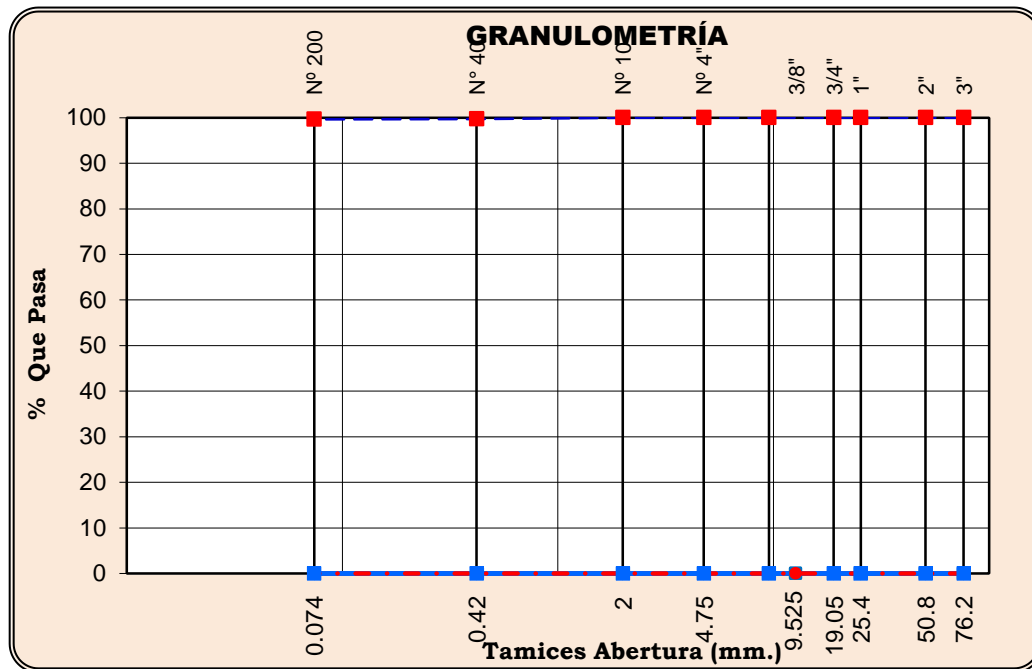
Gráfica 3.2 Granulometría de la Muestra N° 2



Fuente: Elaboración Propia

Ver planilla en ANEXO II

Gráfica 3.3 Granulometría de la Muestra N° 3



Fuente: Elaboración Propia

Ver planilla en ANEXO II

a) Análisis granulométrico por hidrómetro (ASTM D422).

Tabla 3.3 Distribución Granulométrica

	MUESTRA N° 1	MUESTRA N° 2	MUESTRA N° 3
% Pasa 200	100	100	100
% Limo Parcial	90.86	87.85	84.73
% Arcilla Parcial	9.14	12.15	15.27

Fuente: Elaboración Propia

Ver planilla en ANEXO II

3.4.1.3. Determinación del Limite Líquido (ASTM D4318 AASHTO T89)

OBJETO

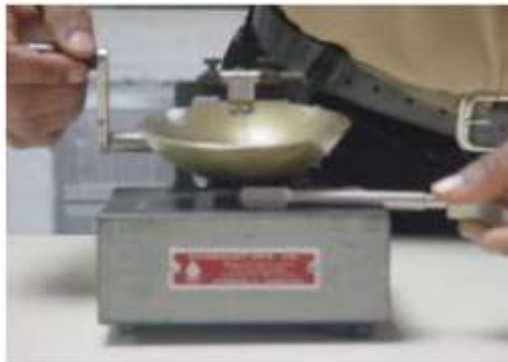
Este método establece el procedimiento para determinar el límite líquido de los suelos, mediante la máquina Casagrande.

El límite líquido es un contenido de humedad específico que divide la consistencia plástica de la líquida del suelo.

AJUSTE Y CONTROL DEL APARATO DE LÍMITE LÍQUIDO CASAGRANDE

Girar la manivela hasta que la taza se eleve a su mayor altura. Utilizando el calibrador de 10 mm (adornado al ranurador), verificar que la distancia entre el punto de percusión y la base sea exactamente de 10 mm. Caso contrario se debe aflojar los tornillos de fijación y mover el de ajuste hasta obtener la altura de caída requerida.

Imagen 3.10: Calibración de Aparato Casagrande



Fuente: Elaboración Propia

PREPARACIÓN DE LA MUESTRA

- a) Se desmenuza los terrones que presentaban los suelos, con mortero, sin reducir el tamaño natural de las partículas individuales.
- b) Se extrae una muestra de suelo de aproximadamente unos 500 gramos que pasa el tamiz 0,425 mm (N° 40).

Imagen 3.11: Material pasante por el Tamiz N° 40



Fuente: Elaboración Propia

- c) Se coloca la muestra en un plato; agregar agua y mezclar completamente mediante la espátula. Se continúa la operación durante el tiempo y con la cantidad de agua necesarios para asegurar una mezcla homogénea.

Imagen 3.12: Preparación de la Mezcla



Fuente: Elaboración Propia

PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO

- a) Colocar el aparato de límite líquido sobre una base firme.
- b) En la taza del equipo se coloca una porción de la muestra acondicionada utilizando una espátula; la masa de suelo deberá colocarse centrándola en el punto de apoyo de la taza con la base.
- c) Moldear la masa de suelo con la espátula hasta obtener una forma uniforme evitando incorporar burbujas de aire en la mezcla.

Imagen 3.13: Colocado y Moldeado de la muestra



Fuente: Elaboración Propia

- d) Enrasar y nivelar a 10mm en el punto de máximo espesor y reincorporar el material excedente al plato.
- e) Dividir la pasta de suelo, pasando el acanalador cuidadosamente a lo largo del diámetro que pasa por el eje de simetría de la taza, de modo que se forme una ranura clara y bien delineada de las dimensiones especificadas. Pasar el acanalador, manteniéndolo perpendicular a la superficie interior de la taza; en ningún caso, debe existir desprendimiento de la pasta del fondo de la taza; si ello ocurre, se retira todo el material y se reinicia el procedimiento. La

formación de la ranura se debe lograr con el mínimo de pasadas, limpiando el acanalador después de cada pasada.

Imagen 3.14: Conteo de Golpes



Fuente: Elaboración Propia

- f) Girar la manivela levantando y dejando caer la taza con una frecuencia de dos golpes por segundo, hasta que las paredes de la ranura entren en contacto en el fondo del surco a lo largo de un tramo de 10 mm. Registrar el número de golpes obtenido (N), retirar el material que se junta en el fondo del surco y colocar en una cápsula de secado para determinar su humedad (w).

Imagen 3.15: Corte y Retiro del Material



Fuente: Elaboración Propia

- g) Se debe realizar al menos 3 veces los mismos pasos a diferentes humedades se recomienda que debe estar entre los 15 a 40 golpes.

Imagen 3.16: Peso de Muestra Húmeda y muestra Seca



Fuente: Elaboración Propia

CÁLCULOS:

Con los valores del contenido de humedad y el número de golpes se construye un gráfico semilogarítmico, con la humedad (w) como ordenada y el número de golpes (N) como abscisa en escala logarítmica, luego se ajusta a una curva que relaciona estos puntos. El Límite Líquido (LL) del suelo será la humedad correspondiente a la intersección de la curva de fluidez con la abscisa de 25 golpes, aproximando a un decimal.

3.4.1.4. Determinación del Limite Plástico (ASTM D4318 AASHTO T89)

OBJETO

Este método establece el procedimiento para determinar el Límite Plástico y el Índice de Plasticidad de los suelos.

PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO

- a) Para determinar el límite plástico se debe extraer una muestra representativa de un tamaño que asegure una masa mínima de ensayo de 200g de material bajo tamiz 0,425mm (N° 40).
- b) Agregar agua a la muestra en un plato y mezclar uniformemente hasta obtener una masa pastosa, la cual se pueda amasar hasta que no se pegue en la mano,

con la mano encima de un vidrio proceder a realizar rollitos de aproximadamente 3 mm diámetro, al llegar a este diámetro aproximado el rollito debe empezar a fisurarse, entonces se debe cortar en la parte fisurada en trozos, y no puede ser re amasado ni reconstituido. Realizar entre 3 a 5 pruebas, extrayendo de cada prueba unas 3 muestras de rollitos para pesarlos y llevarlos al horno para el secado correspondiente y determinar la humedad.

Cuadro 3.2: Descripción de Realización del Ensayo

 <p>Muestra plástica</p>	 <p>Elaboración de los rollitos</p>
 <p>Pesado de muestra húmeda</p>	 <p>Muestra secada al horno</p>

Fuente: Elaboración Propia

CÁLCULOS:

1. El Límite Plástico (LP) se calcula como el promedio de las determinaciones efectuadas sobre la muestra de ensayo. Las determinaciones no deben diferir entre sí en más de dos puntos; cuando no se cumpla esta condición, se repite todo el ensayo.
2. El Índice de Plasticidad (IP) del suelo se determina de acuerdo con la fórmula siguiente:

$$IP = LL - LP$$

Dónde:

IP= Índice de Plasticidad (%)

LL= Limite Liquido (%)

LP= Limite Plástico (%)

RESULTADOS:

Tabla 3.4 Resultados Correspondientes a la Plasticidad de los Suelos Naturales

MUESTRA Nº	LÍMITES DE ATTERBERG		
	Límite Líquido (%)	Límite Plástico (%)	Índice de Plasticidad (%)
1	22.3	14.4	7.9
2	29.9	15.3	14.6
3	50.7	23.9	26.8

Fuente: Elaboración Propia

Ver planilla en ANEXO II

3.4.1.5. Clasificación del Suelo

En función a la granulometría por lavado, límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad se determina la clasificación del suelo en base a dos normativas que son:

- Sistema de Clasificación AASTHO
- Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS)

Tabla 3.5 Clasificación de los Suelos según AASTHO y SUCS

MUESTRA Nº	CLASIFICACIÓN		DESCRIPCIÓN
	ASSTHO	SUCS	
1	A - 4 (7)	CL	Arcilla baja plasticidad arenosa
2	A - 6 (10)	CL	Arcilla baja plasticidad
3	A - 7- 6 (17)	CH	Arcilla alta plasticidad

Fuente: Elaboración Propia

Ver planilla en ANEXO II

3.4.1.6. Ensayo de Compactación METODO MODIFICADO (Método “C” ASTM D422 AASHTO T180)

OBJETO

Este método establece el procedimiento para determinar la relación entre la humedad y la densidad de un suelo, compactado en un molde normalizado, mediante un pisón de 4,5 Kg. en caída libre, desde una altura de 460 mm, con una energía específica de compactación de 2,67 J/cm³ (27,2 kgf cm/cm³).

MATERIAL

- Molde metálico.- 6plg de diámetro
- Martillo metálico de 4.5 Kg y altura de caída de 46cm
- Probeta graduada
- Balanza

- Horno
- Regla de acero
- Tamiz # 4
- Herramientas.- bandeja, martillo, cuchara y alicate

PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO:

- a) Se debe preparar el suelo aproximadamente 24 kg, desintegrando los terrones y grumos hasta que pase el tamiz N° 4, y desechar lo retenido en este tamiz, una vez preparado la muestra se debe calcular su contenido de humedad, antes de compactarlo.

Imagen 3.17: Preparación de la Muestra



Fuente: Elaboración Propia

- b) Dividir el material en cuatro partes iguales de 6000 gramos cada uno, depositar en fuentes y lavadores ya que en cada uno se incrementará agua en diferentes porciones., para esto se debe aplicar el incremento de la humedad de acuerdo al siguiente ejemplo:

Siendo el contenido de humedad calculado de 2%, para llegar a 4% nos faltaría 2%, entonces, pesamos el material para el primer molde con 6000 gramos. Y asumiendo que en este peso se encontraría al 100% de agua, por lo que se trataría de 6000 cm^3 (ya que la densidad del agua se asume 1 gr/cm^3)

suponiendo una temperatura de 21°C), por simple regla de tres solo resta realizar la siguiente operación:

$$Ca = \frac{2\% * 6000g}{100\%} = 120cm^3$$

Dónde: Ca= Cantidad de agua (cm3)

- c) Se pesa el molde sin la base y sin collarín y se determina su volumen, una vez calculado los porcentajes requeridos de humedad se procede a incrementar tales cantidades de agua al suelo, mezclando y homogeneizando la muestra, para luego introducir al molde compuesto con su extensión o collarín, cada capa de material se debe colocar aproximadamente en un quinto de la altura del molde más el collar.

Imagen 3.18: Mezclado del suelo



Fuente: Elaboración Propia

- d) Una vez logrado el mezclado homogéneo del suelo se extrae una muestra de suelo para determinar el contenido de humedad real en el momento de compactado.
- e) Posteriormente se compacta 5 capas cada una a 56 golpes, uniformemente distribuidos en el molde. Al compactar la última capa debe quedar un pequeño exceso de material por sobre el borde del molde.

Imagen 3.19: Compactado



Fuente: Elaboración Propia

- f) Una vez completada la compactación se retira el collarín y se enrasa con la regla metálica hasta dejar una superficie lisa hasta la altura del molde, luego se pesa el molde sin base con el suelo compactado y enrasado, registrando en la planilla de cálculos.

Imagen 3.20: Enrasado y Peso del Molde con Muestra



Fuente: Elaboración Propia

- g) Se repite todas las operaciones anteriormente mencionadas con cada una de las fracciones restantes, hasta que haya un decrecimiento en la densidad húmeda del suelo. El ensaye se debe efectuar desde la condición más seca a la condición más húmeda al menos 4 a 5 veces.

CÁLCULOS:

Fórmula para obtener la densidad húmeda del suelo compactado:

$$\gamma_h = \frac{m}{v}$$

Donde:

γ_h = Densidad húmeda del suelo compactada (Kg/m³)

m= peso de suelo húmedo (Kg)

v= Volumen del molde (m³)

Densidad Seca

La densidad seca del suelo compactado para cada determinación, de acuerdo con la fórmula siguiente, aproximando a 10 Kg/m³.

$$\gamma_{max} = \frac{10 * \gamma_h}{w + 100}$$

Dónde:

γ_{max} = Densidad seca del suelo compactado (kg/m³)

γ_h = Densidad húmeda del suelo compactada (kg/m³)

W=Humedad del suelo compactado (%)

Para obtener la humedad óptima que será donde se dé la máxima densidad de compactación se grafica la curva de densidades en el eje de las ordenadas y porcentaje de humedad en el eje de las abscisas, para obtener una ecuación polinómica y de esta manera determinar estos dos datos importantes que nos servirán para realizar el ensayo de CBR.

RESULTADOS:

Tabla 3.6 Resultados de Compactación del Suelo Natural

MUESTRA N°	PROCTOR T-180 MODIFICADO.	
	Densidad máxima del suelo seco (Kg/m ³)	Humedad Óptima. (%)
1	1932	10.9
2	1861	11.8
3	1739	13

Fuente: Elaboración Propia

Ver planilla en ANEXO II

3.4.1.7. Determinación de la Relación de Soporte del Suelo en Laboratorio (CBR de laboratorio) (ASTM D1883 AASHTO T193).

OBJETO

Este método establece el procedimiento para determinar un índice de resistencia de los suelos, conocido como Razón de Soporte de California (CBR). El ensayo se realiza normalmente a suelos compactados en laboratorio, con la humedad óptima y niveles de energía variables.

Este método se utiliza para evaluar la capacidad de soporte de suelos de subrasante, como también de materiales empleados en la construcción de terraplenes, subbases, bases y capas de rodadura granulares.

PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO

- a) Con el contenido óptimo de humedad y la densidad seca máxima compactada de acuerdo al ensayo de Proctor, se compacta 3 moldes o probetas en un rango de 95% de la densidad máxima compactada seca determinada anteriormente.

- b) Se mezcla homogéneamente con agua cada una de las tres muestras de suelo por ensayar. Agregando la cantidad de agua necesaria para alcanzar la humedad óptima determinada en “Relación humedad-densidad”. Una vez logrado el mezclado homogéneo del suelo, se extrae una muestra de suelo para determinar el contenido de humedad real en el momento de compactado del CBR.

Imagen 3.21: Preparación de Material para CBR y muestras para Contenido de Humedad



Fuente: Elaboración Propia

- c) Para cada molde se coloca el disco espaciador sobre la placa base. Fijar el molde con su collar de extensión sobre dicha placa y colocar un disco de papel filtro grueso sobre el espaciador.
- d) Compactar cada una de las porciones de suelo húmedo en el molde, en un número de capas igual al de las probetas usadas en el ensayo de humedad - densidad. Cada probeta se debe compactar con distinta energía de 12, 25 y 56 golpes.
- e) Luego se retira el collar, y se enrasa cuidadosamente el suelo compactado con una regla al nivel del borde del molde. Rellenar con material fino bajo 5mm cualquier hueco que pueda haber quedado en la superficie.
- f) Posteriormente se saca el disco espaciador y sobre la placa base perforada se coloca papel filtro grueso, invertir el molde y fijarlo a dicha placa, con el suelo compactado en contacto con el papel filtro y pesar.

- g) Finalmente colocar el vástago ajustable sobre el molde de muestra compactada y se acomoda el aparato de expansión (extensómetro) a cada uno de los moldes, nivelando a un valor de cero en el trípode de extensómetro para poder controlar la expansión que sufrirá el suelo durante el tiempo de inmersión.

Cuadro 3.3: Compactación con diferentes energías



Fuente: Elaboración Propia

- h) Dejar sumergidas durante 96 horas los moldes. Durante este período se debe mantener la muestra sumergida a un nivel de agua constante, sin producir vibraciones que puedan alterar las mediciones de expansión.
- i) Una vez concluido el tiempo de inmersión se retira los moldes del agua dejando drenar la probeta, para esto se procedió a inclinarlas para eliminar el agua superficial durante 15 min.

- j) Retirar las cargas para pesar el molde con el suelo compactado después de la inmersión.

Cuadro 3.4: Procedimiento de Inmersión



Fuente: Elaboración Propia

Penetración

- k) Aplicar la carga en el pistón de penetración. Anotar las lecturas de carga en los siguientes niveles de penetración: 0,64; 1,27; 1,91; 2,54; 3,18; 3,81; 4,45; 5,08; 7,62; 10,16 y 12,7mm. Anotar la carga máxima alcanzada, registrando la penetración a la que se produce. El ensayo debe realizarse hasta alcanzar una penetración mínima de 7,62mm (0,300pulgadas).

Cuadro 3.5: Procedimiento de Rotura de CBR.

Fuente: Elaboración Propia

RESULTADOS:

Tabla 3.7 Resultados de CBR de los Suelos Naturales

MUESTRA N°	Humedad Optima (%)	C.B.R. (%)	Expansión (%)
1	10.9	6.8	0.96
2	11.8	2.3	1.45
3	13	1.6	3

Fuente: Elaboración Propia

Ver planilla en ANEXO II

3.4.1.8. RESUMEN DE RESULTADOS

RESUMEN DE LA CARACTERIZACIÓN DE LOS SUELOS NATURALES

Tabla 3.8 Resumen de la caracterización de los suelos naturales

MUESTRA	CONT. HUM.	GRANULOMETRÍA				LÍMITES			CLASIFICACIÓN		
		No	W%	% Pasa No 4	% Pasa No 10	% Pasa No 40	% Pasa No 200	LL	LP	IP	SUCS	AASTHO	IG
1	4.27	100,00	100,00	99,7	69.5	22.3	14.4	7.9	CL	A-4	7
2	5.74	100,00	99.6	97.3	86.4	29.9	15.3	14.6	CL	A-6	10
3	4.43	100,00	100	99.9	99.6	50.7	23.9	26.8	CH	A-7-6	17

Ver planilla en ANEXO II

MUESTRA	PROCTOR T-180 MODIF. MET. C		EXPANSIÓN	C.B.R. al 95%
No	Dens. Max. al 95% (Kg/m ³)	H. OP. (%)	(%)	(%)
1	1932	10.9	0.96	6.8
2	1906	11.8	1.45	2.8
3	1739	13	3.00	1.6

Fuente: Elaboración propia

Ver planilla en ANEXO II

3.4.2. ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN EN EL CEMENTO

El cemento utilizado en el presente trabajo es de producción local, Cemento Portland "EL PUENTE" tipo normal IP 30.

Para su caracterización se realizaron los siguientes ensayos:

- Finura del cemento (ASTM C184 ASSTHO T129)
- Peso específico (ASTM C188 ASSTHO T133)

❖ Finura del cemento

El objeto de este método es la determinación de la finura del cemento, por medio del tamiz de malla N° 200.

PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO

Se comienza pesando 50gr de muestra de cemento, para su tamizado en las malla N° 40 y 200, una vez culminado el tiempo de tamizado de aproximadamente unos 15 min. se procede a pesar los pesos retenidos en cada tamiz.

CÁLCULOS

Fórmula para determinar la finura del cemento:

$$F = \frac{Pr}{50} * 100$$

Dónde:

F= Finura del cemento expresado en porcentaje de peso.

Pr= Peso retenido en la malla N° 200

Fprom= 2.45%

❖ **Peso específico**

Este ensayo tiene por objeto establecer el método de ensayo para determinar el peso específico del cemento. Su principal utilidad está relacionada con el diseño y control de las mezclas de hormigón.

Se utiliza un matraz normal, kerosene y una balanza.

PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO

Se llena el matraz con kerosene hasta un volumen de aproximadamente 300 ml. Se coloca en baño maría de temperatura constante manteniéndola a temperatura constante.

Se toma una muestra de 64 g de cemento, se va introduciendo poco a poco en el matraz. Evitando que el líquido salpique cuando se introduce la muestra.

Después de que se ha introducido todo el cemento en el matraz se tapa y se hace rodar en posición inclinada con el fin de eliminar el aire en el cemento.

Se coloca de nuevo el matraz en el baño de temperatura constante, el cual debe estar aproximadamente del ambiente, y se hace la nueva lectura correspondiente al nuevo nivel del líquido.

CALCULOS

La diferencia entre las cantidades que representan el nivel final y el nivel inicial del líquido nos da el volumen de líquido desplazado por el cemento usado en el ensayo.

$$P. E = \frac{\text{Peso del cemento en (gr)}}{\text{Volumen desplazado en(ml)}}$$

$$\mathbf{P.E= 3.15 (gr/ml)}$$

Para confirmar y tener valores reales de las características tanto químicas como físicas del cemento EL PUENTE IP30 se consiguió el INFORME DE CONTROL DE CALIDAD DE CEMENTO de la fábrica de SOBOCE.

Tabla N° 3.9. Características del cemento EL PUENTE IP30

COMPOSICIÓN		Cemento Portland El Puente	Norma Boliviana IP-30(NB-0.1)		
ESPECIFICACIONES QUÍMICAS	PPF	%	3.47	< 7	
	SiO ₂	%	29.02		
	Al ₂ O ₃	%	6.21		
	Fe ₂ O ₃	%	2.89		
	CaO	%	57.76		
	MgO	%	3.25	< 6.0	
	SO ₃	%	2	< 4.0	
	R.I	%	15.96		
	Cal Libre	%	0.79		
ESPECIFICACIONES FÍSICAS	BLAINE	cm ² /g	4636	> 2600	
	TIEMPO DE FRAGUADO	INICIAL	Min	161	> 45
		FINAL	Hrs	4:54	< 07:0.0
	EXPANSION LE CHATELIER	mm	0	< 8	
	RELACION a/c	ml/g	0.52		
	FLUIDEZ	%	110		
	RESIDUO DE MALLAS	200M	%Ret	1.02	
		325M	%Ret	6.21	
	PESO ESPESIFICO	g/l	3020		
	RESISTENCIA A COMPRESION	3 DIAS	Mpa	22.57	> 10
7 DIAS		Mpa	26.9	> 17	
28 DIAS		Mpa	31.42	> 30	

La hoja respaldo proporcionado por la empresa SOBOCE se presentara en el **ANEXO II**

3.4.3. AGUA A UTILIZAR.

El agua requerida para todos los ensayos tanto como para el suelo natural y la mezcla suelo-cemento debe ser limpia, libre de impurezas, de sales aceites o cualquier residuo químico.

3.5. ESTUDIO DE SUELO-CEMENTO

3.5.1. ENFOQUE GENERAL

Una vez determinado todas las características de los suelos naturales, se desarrolla el estudio de la mezcla "suelo cemento" el cual es analizado a partir de los ensayos de Razón Soporte de California (CBR), resistencia a compresión simple en probetas, resistencia a flexión en vigas, durabilidad con la prueba de humedecimiento-secado y también con la clasificación de este material, determinando en base a estas prácticas las características estructurales y de evaluación que obtendrán los suelos mezclados con cemento.

Por lo tanto lo que se busca es mejorar ciertas propiedades del suelo para mejorar su reacción frente a acciones mecánicas y climáticas de manera que esta alternativa pueda ejercer un comportamiento adecuada para una sub base de pavimento rígido.

Para esto se someterá a cada muestra con 4 diferentes porcentajes de cemento para determinar cómo varia su evolución entre una y otra prueba y con el análisis de todas las mezclas realizadas determinar un valor óptimo para realizar el diseño estructural.

3.5.2. DOSIFICACIÓN

La finalidad de la Dosificación es determinar la cantidad de cemento capaz de garantizar una mezcla con permanencia de sus características mejoradas.

Según la teoría existen diferentes métodos para la dosificación del suelo-cemento, por lo tanto, de acuerdo a esta base teórica se elige el Método Detallado propuesto por la Portland Cement Association (PCA) para determinar la dosificación. Se elige esta

metodología porque es la que se mas se adecua a lo que se quiere hacer en este proyecto.

Este método propone una dosificación experimental en donde se utiliza varios contenidos de cemento para la preparación de las mezclas, para posteriormente someterlas a ensayos de durabilidad (humedecimiento secado) y resistencia a compresión simple. El análisis de resultados determina o indica el menor de ellos que es capaz de estabilizar el suelo sobre el concepto del suelo – cemento.

Entonces la dosificación propuesta son 4 porcentajes diferentes de cemento que serán aplicadas a cada una de las muestras. Los porcentajes están referidos siempre al peso del suelo seco, y son los siguientes:

% Cemento Utilizado	3%	5%	7%	9%
---------------------	----	----	----	----

Otras de las causas que indujeron a tomar como máximo valor el 9% fue sus lecturas de cbr, ya que estas eran demasiado elevadas por lo tanto aumentar un porcentaje mayor a este, representaría lecturas aún más grandes a tal punto de sobrepasar la capacidad de la máquina de CBR (aro 5000). Además un punto importante para decidir sobre las cantidades fue el costo que representa, ya que valores mayores resultaría en una obra antieconómica lo cual no es el propósito de este trabajo.

3.5.3. PREPARACIÓN DE MEZCLAS DE PRUEBA VARIANDO PORCENTAJES DE CEMENTO

Después de haber obtenido los resultados de la caracterización de los suelos naturales se procederá a la mezcla del suelo con el cemento en porcentajes de (3 %, 5%, 7% y 9%), luego del Mezclado se realiza los mismos ensayos que se ejecutaron en la caracterización de los suelos naturales, además de probetas y vigas para resistencia a flexión y compresión, donde se obtendrá resultados que posteriormente serán analizados.

Tabla N° 3.10 Distribución de Porcentajes en cada Muestra

	MUESTRA N° 1				MUESTRA N°2				MUESTRA N° 3			
% de CEMENTO	3%	5%	7%	9%	3%	5%	7%	9%	3%	5%	7%	9%

Fuente: Elaboración propia

Para la preparación de la mezcla suelo-cemento, es necesario que el suelo se encuentre suelto y pase por los tamices especificados para cada ensayo, es importante conocer el contenido de humedad a la que se encuentra el suelo antes de la adición del cemento, esto puede conocerse por diferentes métodos, otra opción es que el suelo se lo deje secar al horno, pero no es muy recomendable dejarlo más de 24 horas, esto porque el suelo puede sufrir algunas alteraciones al entrar en calor, por lo que se trabajó a partir del contenido de humedad a la que se encontraba el suelo. Conocido el contenido de humedad en porcentaje se procede a determinar a cuánto equivale este porcentaje en los 5 kg del suelo, para luego restar este peso que sería el del agua presente en el suelo para así obtener el peso del suelo seco.

Las siguientes formulas indican el procedimiento para obtener la cantidad de cemento de acuerdo al peso de suelo seco.

Contenido de humedad

$$w(\%) = \frac{Pa}{P_{SS}} * 100$$

Dónde:

w(%)= contenido de humedad en porcentaje.

Pa= peso del agua presente en el suelo.

Pss= peso del suelo después de secar al horno

Imagen 3.22: Mezcla de Suelo con Cemento



Peso del agua presente en la muestra de suelo.

$$W(g) = \frac{w(\%) * P_m}{100\%}$$

Donde:

W(g)= peso del agua presente en el suelo
para una muestra de peso Pm.

Pm= Peso de la muestra de suelo en gramos.

w(%)=contenido de humedad en porcentaje.

Peso del suelo seco de la muestra.

$$P_{ssm} = P_m - W(g)$$

Donde:

Pssm= peso suelo seco de la muestra.

Pm= peso de la muestra (g)

W(g)= peso del agua presente en la muestra
de suelo

Cantidad de cemento referida al peso de suelo seco de la muestra.

Para realizar el cálculo de la cantidad de cemento a añadir debe estar referida siempre al peso del suelo seco, se parte sabiendo al porcentaje que se desea dosificar, en este caso será una dosificación del 3%, 5%, 7% y 9%.

$$Cc(g) = \frac{d(\%) * P_{ssm}}{100\%}$$

Donde:

Cc(g)= Cantidad de cemento a añadir en
gramos.

d(%)= dosificación del cemento en
porcentaje.

3.5.4. EVALUACIÓN DEL SUELO-CEMENTO

La evaluación al suelo-cemento se lo realiza en base a los siguientes ensayos:

Cuadro 3.6: Ensayos Realizados para Suelo Cemento

ENSAYO	NORMATIVA
Contenido de humedad	ASTM D2216
Análisis granulométrico por tamizado	ASTM D422 AASHTO T88
Determinación del límite líquido	ASTM D4318 AASHTO T89
Determinación del límite plástico e índice de plasticidad	ASTM D4318 AASHTO T90
Ensayo de compactación método Proctor modificado.	(ASTM D422 AASHTO T180)
Determinación de la relación de soporte del suelo en laboratorio (CBR de laboratorio)	ASTM D1883 AASHTO T193
Resistencia a Compresión simple	INV E-613-13
Resistencia a flexión	INV E-613-13
Humedecimiento-secado	ASTM D559 AASHTO T135








Fuente: Elaboración propia

Los tres últimos ensayos son los que definen el comportamiento que tendrá la sub base de suelo-cemento en cuanto a resistencia mecánica, durabilidad y la manera de reaccionar en la deformación ante la aplicación de cargas.

3.5.4.1. Caracterización del Suelo-Cemento

La caracterización en base a límite líquido, límite plástico, granulometría y compactación tiene el mismo procedimiento que se dio a conocer en parte de caracterización de los suelos naturales. Por lo tanto para no ser repetitivos en este subtítulo se explica la elaboración de la práctica en función a los cuadros siguientes:

Cuadro 3.7: Práctica de granulometría del suelo-cemento ASTM D422 AASHTO T88

						
<p>Imagen 1:</p> <p>Contenido de humedad</p>	<p>Imagen 2:</p> <p>Preparación de la mezcla de suelo con cemento</p>	<p>Imagen 3:</p> <p>Muestras en saturación para la práctica de Granulometría</p>	<p>Imagen 4:</p> <p>Lavando la muestra saturada en tamiz N° 200 de acuerdo al Metodo del Lavado</p>	<p>Imagen 5:</p> <p>Muestra retenida en tamiz N° 200 en el lavado y secada al horno</p>	<p>Imagen 6:</p> <p>Tamizando la muestra seca en las malla :N°10 N°40 N°200</p>	<p>Imagen 7:</p> <p>Pesos retenidos en cada tamiz</p>








Fuente: Elaboración Propia

Cuadro 3.8: Práctica de Límites del suelo-cemento (ASTM D4318 AASHTO T89, AASHTO T90)

<p>Imagen 1:</p> <p>Preparacion de las mezclas para cada porcentaje de cemento</p>	<p>Imagen 2:</p> <p>Preparacion de muestra tamizando en malla Nº 40</p>	<p>Imagen 3:</p> <p>Muestras pasante Tamiz Nº 40 para limites</p>	<p>Imagen 4:</p> <p>Elaboracion del Limite Liquido en la maquina de Casagrante</p>	<p>Imagen 5:</p> <p>Elaboracion del Limite Plastico</p>	<p>Imagen 6:</p> <p>Peso de muestra humeda para su posterior secado en horno.</p>	<p>Imagen 7:</p> <p>Pesos de muestras secas de limite liquido y plastico</p>

Fuente: Elaboración Propia

Cuadro 3.9: Práctica de Compactación del suelo-cemento (ASTM D422 AASHTO T180)

						
<p>Imagen 1:</p> <p>Material utilizado para la realización de la práctica</p>	<p>Imagen 2:</p> <p>Preparación de muestra calculando los porcentajes de suelo y cemento en función del porcentaje en cada suelo</p>	<p>Imagen 3:</p> <p>Mezcla del suelo, cemento y la cantidad de agua para conseguir una densidad máxima.</p>	<p>Imagen 4:</p> <p>Mezclado para obtener una muestra homogénea</p>	<p>Imagen 5:</p> <p>Compactación Método Modificado T-180, consiste en la compactación de 5 capas cada una con 56 golpes</p>	<p>Imagen 6:</p> <p>Muestras de humedad para cada uno de los puntos que generan la curva de compactación.</p>	<p>Imagen 7:</p> <p>Pesos de muestras más molde de cada % de agua que se le agrega a la muestra para obtener la curva de compactación. En total se realiza 4 puntos.</p>

Fuente: Elaboración Propia

3.5.4.2. Determinación de la Relación de Soporte del Suelo-Cemento (CBR de laboratorio) (ASTM D1883 AASHTO T193).

Para determinar el CBR del suelo-cemento se realiza de acuerdo al método tradicional.

PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO

- a) Con la dosificación establecida de 3%, 5%, 7% y 9% se prepara el material para cada tipo de suelo, calculando la cantidad de cemento y suelo que se necesita en cada ensayo.

Imagen 3.23: Proporción de Cemento en la Mezcla



Fuente: Elaboración Propia

- b) Con el contenido óptimo de humedad y la densidad seca máxima compactada de acuerdo al ensayo de Proctor, se compacta 3 moldes o probetas a la densidad máxima compactada seca determinada anteriormente.

- c) Se mezcla homogéneamente con agua cada una de las tres muestras de suelo-cemento por ensayar. Agregando la cantidad de agua necesaria para alcanzar la humedad óptima determinada en “Relación humedad-densidad”. Una vez logrado el mezclado homogéneo del suelo-cemento, se extrae una muestra del suelo para determinar el contenido de humedad real en el momento de compactado del CBR.

Imagen 3.24: Preparación de Suelo-Cemento para CBR y muestras para Contenido de Humedad



Fuente: Elaboración Propia

- d) Para cada molde se coloca el disco espaciador sobre la placa base. Fijar el molde con su collar de extensión sobre dicha placa y colocar un disco de papel filtro sobre el espaciador.
- e) Compactar cada una de las porciones de suelo-cemento húmedo en el molde, en un número de 5 capas. Cada probeta se debe compactar con distinta energía, de 12, 25 y 56 golpes. Luego se retira el collar, y se enrasa cuidadosamente el suelo compactado con una regla al nivel del borde del molde.
- f) Posteriormente se saca el disco espaciador y sobre la base perforada se coloca papel filtro, invertir el molde y fijarlo a dicha placa, con el suelo-cemento compactado en contacto con el papel filtro y pesar.

Cuadro 3.10: Compactación del Suelo-cemento con diferentes energías



- g) Finalmente se coloca el vástago ajustable sobre el molde de muestra compactada, para poder controlar la expansión que sufrirá el suelo-cemento durante el tiempo de inmersión.
- h) Dejar sumergidas durante 96 horas los moldes. Durante este período se debe mantener la muestra sumergida a un nivel de agua constante. Una vez concluido el tiempo de inmersión se retira los moldes del agua dejando drenar la probeta durante 15 min. Retirar el vástago con las cargas, para pesar el molde con el suelo-cemento compactado después de la inmersión.

Penetración

- i) Aplicar la carga en el pistón de penetración. Anotar las lecturas de carga en los siguientes niveles de penetración: 0,64; 1,27; 1,91; 2,54; 3,18; 3,81; 4,45; 5,08; 7,62; 10,16 y 12,7mm. Anotar la carga máxima alcanzada, registrando la penetración a la que se produce. El ensayo debe realizarse hasta alcanzar una penetración mínima de 7,62mm (0,300pulgadas).

Cuadro 3.11: Procedimiento de Inmersión y penetración del ensayo CBR

<p>Nivelación con Extensómetro</p>  <p>Vástago</p>	 <p>Inmersión de Moldes durante 96 horas</p>
<p>Drenaje de probetas</p> 	<p>Peso de muestra saturada</p> 
<p>Aplicación de carga en prensa de CBR Molde sometido a carga</p>  	

3.5.4.3. ENSAYO DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE INV E-614-13; ASTM D-1633

OBJETO

Esta norma se refiere a la determinación de la resistencia a la compresión del suelo cemento, empleando cilindros moldeados como especímenes de ensayo.

El ensayo consiste en aplicar una carga axial de compresión al cilindro moldeado a una razón uniforme antes de que la falla ocurra.

Para esto se prepararon dos moldes para cada porcentaje de cemento para su posterior compresión a los 7, 14 y 28 días.

El ensayo de rotura de cilindros a compresión simple se lo realizó en el laboratorio de SEDECA.

PROCEDIMIENTO DE ENSAYO

El proceso comprendía con la preparación de las mezclas, la compactación, el curado y la compresión en la prensa. La preparación de las mezclas está a base de los porcentajes de cemento, suelo y agua.

La construcción de las probetas se realizó en el molde del Proctor T-180, para lo cual se efectuó el control de humedad y densidad requeridas para comprobar la efectividad del ensayo.

El curado de las probetas exigía de una cámara húmeda que se mantenga a $21 \pm 1^\circ\text{C}$ y al 100% de humedad relativa, pero al no contar con esta cámara en el laboratorio, se suplió con la utilización de bolsas de nylon evitando así el ingreso o evaporación del agua de la mezcla para la hidratación del cemento, así también se buscó un ambiente para mantener las probetas aisladas del contacto solar.

Luego de retiradas las probetas de la cámara húmeda se las colocó a saturación por el espacio de 5 horas, después se las ensaya en la prensa anotando la carga a la cual fallaban. La prensa mecánica tenía una capacidad de 1000 KN y contaba con un tablero en el cual se indicaba en forma digital las lecturas de cargas aplicadas.

El siguiente cuadro en base a imágenes muestra el procedimiento del ensayo.

Cuadro 3.12: Procedimiento de realización y de Rotura de Probetas a Compresión.

 <p>Cantidad de suelo y cemento para una dosificación de 5%</p>	 <p>Molde más muestra compactada</p>
<p>Desmoldado de Probetas</p> 	<p>Colocado de probeta en nylon (Cámara Húmeda)</p> 
<p>Saturación por 5 horas</p> 	<p>Rotura de probeta en prensa</p> 

Fuente: Elaboración Propia

CÁLCULO

La fórmula utilizada para determinar la resistencia a compresión simple es la siguiente:

$$R. C. S = \frac{\text{Carga de Rotura}}{\text{Area de aplicacion de carga}}$$

3.5.4.4. ESPECÍMENES PARA EL ENSAYO A FLEXIÓN INV E-616-13

OBJETO

Este ensayo cubre el procedimiento para moldear y curar en el laboratorio probetas de suelo-cemento, utilizada en pruebas de flexión.

EQUIPO

- Los moldes para pruebas a flexión tienen las siguientes dimensiones interiores $3'' \times 3'' \times 11^{1/4}''$. Los moldes deben estar diseñados para que la probeta sea moldeada con su eje longitudinal en una posición horizontal. Las partes de los moldes deberán estar encajadas, ajustadas y sostenidas adecuadamente. Los lados de los moldes deberán ser suficientemente rígidos para prevenir alabeo y ampliaciones.
- Balanza
- Horno de control termostático capaz de mantener una temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ ($230 \pm 9^{\circ}\text{F}$), para secar la humedad de las muestras.
- Elementos varios.- espátula, bandejas, taras, probeta graduada.
- Cuarto húmedo.-el curado húmedo de la probetas, debe ser capaz de manejar una temperatura de $21 \pm 1.7^{\circ}$ ($73.4 \pm 3^{\circ}\text{F}$).

PROCEDIMIENTO DE ENSAYO

Se tamiza una cantidad adecuada y representativa del suelo pulverizado, empleando el tamiz N° 4, del pasante de la malla N° 4 se obtiene 5000gr de muestra y la cantidad de cemento de acuerdo a la dosificación.

Definidas las cantidades de cada material se procede al mezclado con la humedad óptima para el porcentaje de cemento que se esté manejando, el valor de cantidad de agua es el obtenido de la práctica de compactación. Cuando se tenga un mezclado homogéneo entre los tres tipos de componentes se procede a tomar una muestra para obtener la humedad antes de la compactación para controlar la húmeda óptima.

Se divide en tres porciones iguales una masa predeterminada de suelo cemento uniformemente mezclado, para elaborar una viga con la densidad de diseño. Se coloca una de las porciones en el molde y se comienza con el compactado con el martillo de 10 lb, distribuido uniformemente en la sección transversal del molde.

Inmediatamente después de la compactación, se desmonta cuidadosamente el molde y se remueve la viga hacia una plataforma lisa rígida.

El curado de las vigas se realiza en bolsas de nylon previamente a este paso se las cubre con un papel periódico mojado para que mantenga la humedad requerida para un mejor curado.

Así también se realizó el refrentado de las vigas con una pasta de cemento para mantener la lisura que debe tener la viga según norma.

En el siguiente cuadro se ilustra en base a imágenes el procedimiento de elaboración del ensayo.

Cuadro 3.13: Procedimiento de Elaboración de Vigas.

<p>Cantidad de suelo y cemento para una dosificación de 5%</p> 	<p>Molde más muestra compactada</p> 
<p>Desmoldado de Viga</p> 	<p>Curados de vigas</p>  

Fuente: Elaboración Propia

❖ ENSAYO DE RESISTENCIA A FLEXIÓN DEL SUELO-CEMENTO INV E-616-13

OBJETO

Esta norma de ensayo se refiere a la determinación de la resistencia a la flexión del suelo-cemento, empleando una viga simplemente apoyada, cargada en los tercios de la luz.

Importancia y su uso

Este método se usa para determinar la resistencia a flexión de especímenes de suelo cemento. La resistencia a la flexión es dato significativo para el diseño estructural y para el análisis del comportamiento de un pavimento que incluya una o más capas de este material.

Se preparan dos moldes para cada porcentaje de cemento para su posterior ensayo a flexión a los 7, 14 y 28 días.

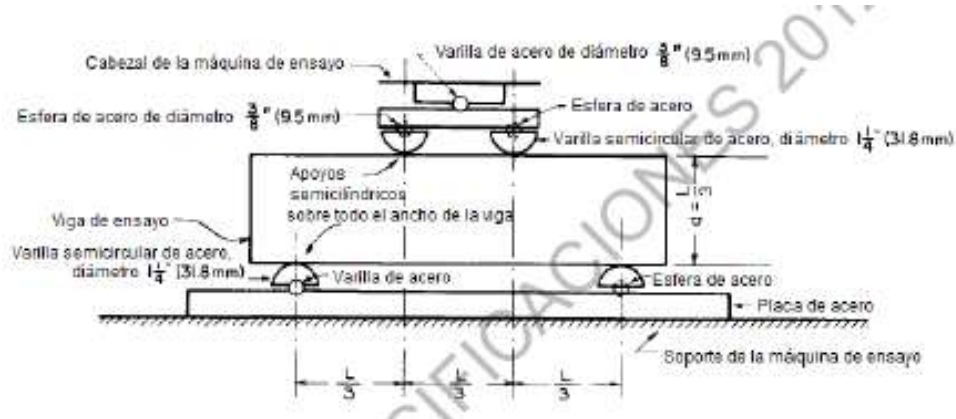
EQUIPO

- Prensa universal del laboratorio de maderas de la Facultad de Forestal.

Se debe utilizar el método de carga en los tercios al realizar ensayos de flexión a los especímenes de suelo-cemento, empleando bloques de aplicación de carga que aseguren que las fuerzas aplicadas a la viga sean solamente verticales y sin excentricidad. En la imagen 3.25 se muestra un diagrama de un aparato que cumple este propósito, el cual debe estar diseñado para operar bajo los siguientes principios:

- * La distancia entre los apoyos y los puntos de aplicación de carga debe permanecer constante en el aparato.
- * La dirección de las reacciones debe ser paralela a la carga aplicada durante todo el ensayo.

Imagen 3.25: Diagrama de un equipo para el ensayo de flexión del suelo-cemento usando una viga simplemente apoyada, cargada en los tercios de la luz.



Fuente: Norma INV E-616-13

PROCEDIMIENTO

Una vez cumplido los 7, 14 y 28 días de curado en la cámara húmeda se procede a romper las vigas para determinar la resistencia a flexión que ofrece cada una.

La rotura se realizó en el Laboratorio de Maderas de la Facultad de Forestal en la máquina de tipo Universal, los valores de carga se leen del cabezal, que es seleccionado de acuerdo a cierta escala dependiendo de la cantidad de puntos que se requiere, una vez definido el cabezal se toman las deformaciones (en base a un extensómetro) correspondiente a cada carga aplicada.

Imagen 3.26: Prensa Universal



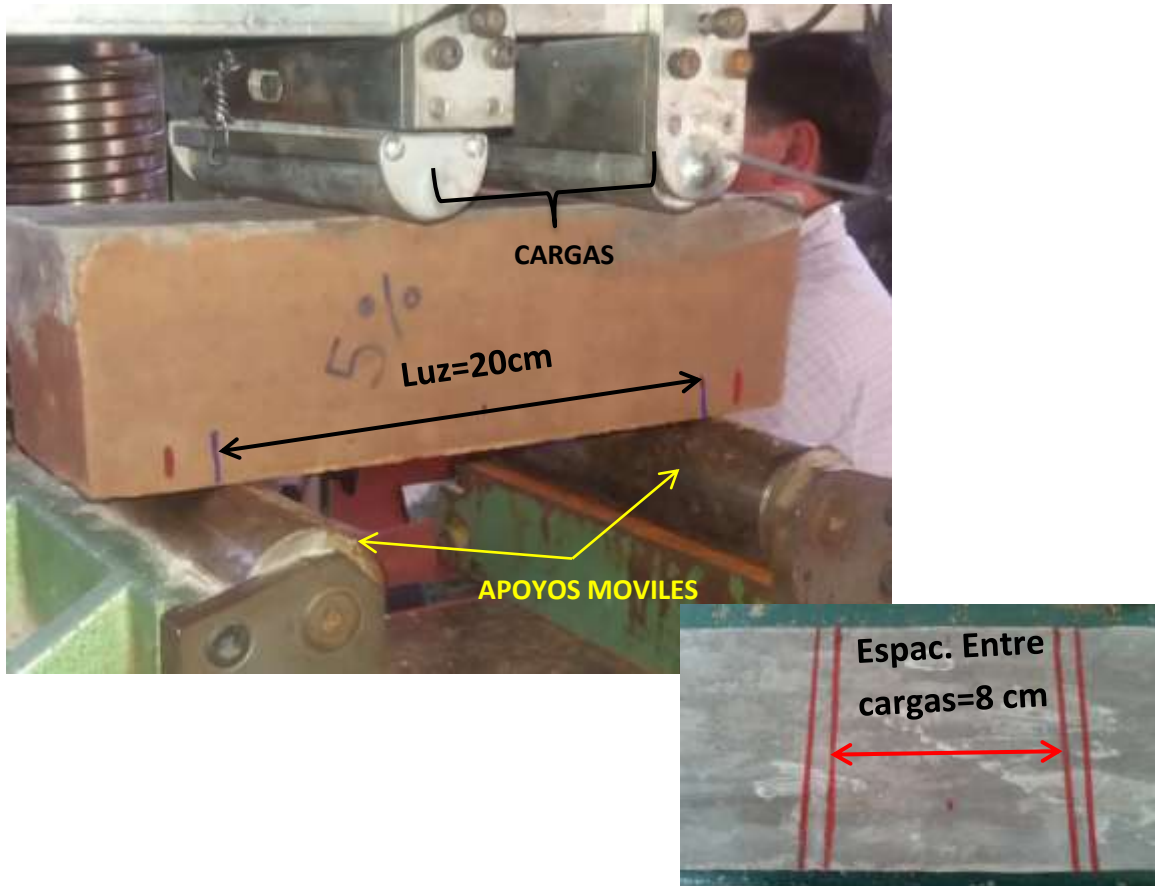
Armado de los apoyos móviles en la prensa para ubicar las vigas para ser ensayadas.



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 3.27. Ubicación de los Apoyos y de las Cargas

Dimensiones de la luz y la ubicación de la distancia a la cual se situaron las cargas.



Fuente: Elaboración Propia

Definidos los puntos donde se situaron los apoyos y las cargas, se ubican las vigas en la prensa para dar inicio al ensayo. La lectura de las cargas fueron cada 0.2 KN, por lo tanto cada 0.2 KN de carga que se aplicaba a la viga se tenía un valor de deformación en el extensómetro y así sucesivamente se continua el ensayo hasta que la viga se fisura o de lo contrario se rompa alcanzando el máximo esfuerzo que puede soportar.

En la imagen 3.29 se observa claramente la primera falla de la viga a través de una fisura.

Imagen 3.28. Lecturando la deformación en el extensómetro



Imagen 3.29. Primera Falla y Fractura en la viga



Fractura en la zona de tensión dentro del tercio medio de la luz libre.

Fuente: Elaboración Propia

CÁLCULOS

La ecuación utilizada para obtener el módulo de rotura es la siguiente:

$$R = \frac{P * L}{b * d^2}$$

Dónde:

R= Módulo de rotura (Kg)

P= Carga máxima aplicada indicada por la máquina de ensayo (kg)

L= Luz libre entre apoyos (cm)

b= Ancho promedio del espécimen en el sitio de la fractura (cm).

d= Altura promedio de la muestra en el sitio de la fractura (cm).

Se utiliza esta ecuación para determinar el módulo de rotura debido a que la fractura en todas las vigas se dan en la zona de tensión, dentro del tercio medio de la luz libre.

3.5.4.5. HUMEDECIMIENTO Y SECADO (ASTM D559 ASSTHO T135)

OBJETO

Este método de ensayo se refiere al procedimiento para determinar las pérdidas del suelo cemento, los cambios de humedad y de volumen (expansión y contracción) producidos por el humedecimiento y secamiento repetido de especímenes endurecidos de suelo cemento. Los especímenes son compactados en un molde, antes de la hidratación del cemento, hasta peso unitario máximo con el contenido óptimo de humedad.

EQUIPOS Y MATERIALES

- Un horno termostáticamente controlado que pueda mantener temperaturas de $71^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ ($160 \pm 5^{\circ}\text{F}$) para secado de los especímenes compactados.

- Cámara húmeda.- Una cámara húmeda o un recipiente cubierto que pueda mantener una temperatura de $21 \pm 1,7^{\circ}\text{C}$ ($70 \pm 3^{\circ}\text{F}$) con una humedad relativa del 100% para un almacenamiento de 7 días de los especímenes compactados. Al no contar con una cámara húmeda se suplió con la hermetización de las probetas con bolsas de nylon evitando así el ingreso o evaporación del agua de la mezcla.
- Baño de agua.- Cantidad adecuada para sumergir especímenes compactados en el agua a la temperatura ambiente.
- Cepillo de cerdas de alambre
- Desmoldador.- Aparato para desmoldar las probetas.
- Bandejas y soportes adecuados para el manejo de materiales.
- Una probeta de vidrio graduada para medir agua.

MÉTODO A, EMPLEANDO MATERIAL QUE PASA EL TAMIZ DE 4,75 MM (NO.4)

Preparación del material para el moldeo de especímenes

Se prepara el suelo de acuerdo con el diseño, con la cantidad requerida de cemento. Agregar suficiente agua para llevar la mezcla a su contenido óptimo de humedad en el momento de la compactación. Una vez lista la mezcla de suelo, cemento y agua, se compacta en el molde de Proctor estándar T-99 con el martillo de 10lb para obtener la misma energía de compactación con la que se trabajó anteriormente, para lo cual se realizó el control de humedad y densidad requeridas para comprobar la efectividad del ensayo.

Se realizó dos probetas para cada porcentaje de cemento uno para obtener datos sobre cambios de humedad y de volumen durante el ensayo y el segundo para las pérdidas del suelo cemento durante el ensayo.

Pesar el espécimen compactado y el molde, luego con el aparato para desmoldar se extrae el espécimen del molde. Además se determina el diámetro y la altura promedio del espécimen No. 1 para calcular su volumen.

Posteriormente se coloca los especímenes en bolsas de nylon para proteger su humedad y del agua libre durante un período de 7 días de curado. Una vez transcurrido este tiempo se pesan y miden las probetas para obtener datos para el cálculo de su contenido de humedad y del volumen.

Cuadro 3.14: Preparación y Moldeo de probetas de humedecimiento-secado.







<p>Mezcla de suelo, cemento y agua</p> 	<p>Compactación de la muestra</p> 	
<p>Desmoldado de probeta</p> 	<p>Peso de Muestra más Molde</p> 	<p>Curado de cilindros</p> 

Fuente: Elaboración Propia

PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO

- a) Al final del período de almacenamiento en la cámara húmeda, se sumergen los especímenes en agua, a temperatura ambiente durante un período de 5 horas.
- b) Colocar los especímenes en un horno a $71 \pm 3^{\circ}\text{C}$ ($160 \pm 5^{\circ}\text{F}$) durante 42 horas.
- c) Pesar y medir el espécimen posteriormente dar dos pasadas firmes sobre toda su área, con el cepillo de alambre. El cepillo deberá mantenerse con su eje longitudinal paralelo al eje longitudinal del espécimen o paralelo a los bordes, como sea necesario, para cubrir toda su superficie. Se aplican las pasadas con un golpe firme que corresponda aproximadamente a 13,3 N (3 lbf).
Se realizan de 18 a 20 pasadas verticales con el cepillo para cubrir los lados del espécimen y cuatro pasadas sobre cada extremo.
- d) Con el pincel se quita el polvo que queda adherido y se pesa la probeta.
- e) Los procedimientos descritos anteriormente constituyen un ciclo (48 horas) de humedecimiento y secado. Sumergir de nuevo el espécimen en agua y continuar el procedimiento durante 12 ciclos.
- f) Después de los 12 ciclos de ensayo, se seca los especímenes hasta peso constante a $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ ($230 \pm 9^{\circ}\text{F}$), registrando su peso para hallar su peso secado al horno.

Cuadro 3.15: Procedimiento del Ensayo Humedecimiento Secado.

<p>Peso de la probeta después de 7 días de Curado</p> 	<p>Dimensiones de la probeta</p> 
<p>Inmersión de probetas durante 5 horas</p> 	<p>Peso de probeta después de 5 horas de inmersión</p> 
<p>Secado al horno a 71 °C durante 42 horas</p> 	<p>Muestra seca</p> 



Fuente: Elaboración Propia

CÁLCULOS

Para calcular las pérdidas de los especímenes, se lo realiza de la siguiente forma:

- Corrección del peso seco al horno del espécimen No.2, por el agua que ha reaccionado con el cemento y el suelo durante el ensayo y que es retenida en el espécimen a 110°C (230°F), así:

$$\text{Peso seco al horno corregido} = \frac{A}{B} * 100$$

Dónde:

A = Peso secado al horno a 110°C (230°F).

B = Porcentaje de agua retenida en el espécimen.

El porcentaje de agua retenida en el espécimen No.2 después de secamiento a 110°C para emplear en la fórmula de arriba puede suponerse igual al agua retenida en el espécimen No.1.

Cuando no se moldean los especímenes No.1, no se dispone de los datos precedentes y se emplearán los valores promedios prescritos en la **Tabla 3.11**.

Por último se calcula la pérdida de suelo-cemento del espécimen No.2 con un porcentaje del peso original del espécimen secado al horno:

$$\text{Pérdida de suelo cemento \%} = \frac{X}{Y} * 100$$

Dónde:

X = Peso original secado al horno calculado menos peso final corregido, secado al horno.

Y = Peso original calculado secado al horno.

Tabla 3.11. Valores Promedio de Agua Retenida

CLASIFICACIÓN AASHTO DEL SUELO QUE SE ESTÁ ESTABILIZANDO	PROMEDIO DE AGUA RETENIDA DESPUÉS DE SECADO A 110° C, %
A-1, A-3	1.5
A-2	2.5
A-4, A-5	3.0
A-6, A-7	3.5

3.5.4.6. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE SUELO-CEMENTO

❖ RESULTADOS DE LA MUESTRA N° 1 "Calle Mamerto Salinas entre Pando y Narciso Campero"

- CLASIFICACIÓN DE SUELO CON CEMENTO

Tabla 3.12. Resultados de Clasificación del Suelo de la Muestra N° 1 con Cemento

% Cemento	Limite Líquido	Limite Plástico	Índice Plasticidad	Índice de Grupo	CLASIFICACION	
					ASSTHO	SUCS
al 3%	28.5	21.5	7	6	A-4 (6)	CL-ML
al 5%	28.3	21.7	6.6	6	A-4 (6)	CL-ML
al 7%	27.6	21.9	5.7	6	A-4 (6)	CL-ML
al 9%	28	23.2	4.8	4	A-4 (4)	M-L

Fuente: Elaboración Propia

Ver Planilla en **ANEXO III**

- COMPACTACIÓN

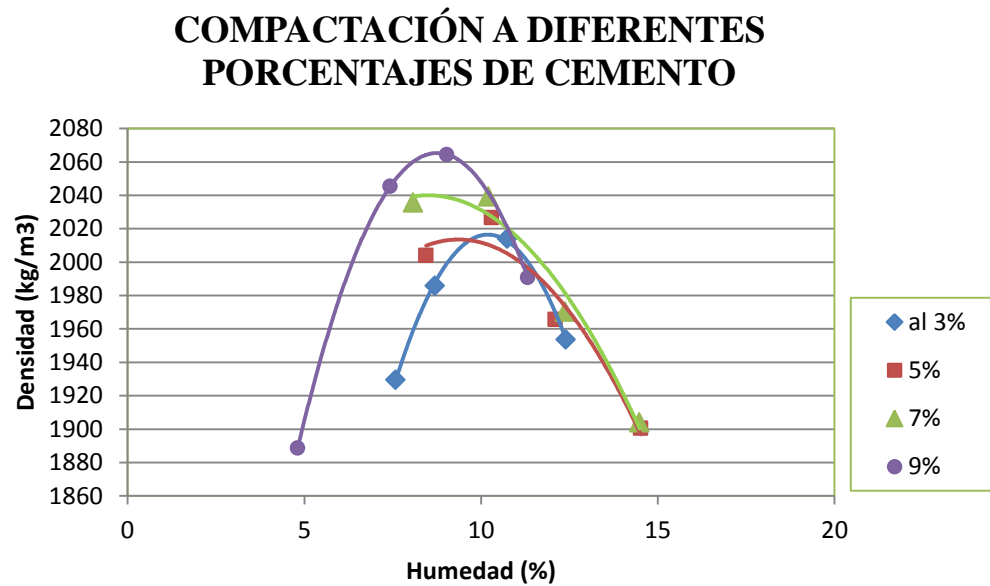
Tabla 3.13. Resultados de Compactación de la Muestra N° 1 con Cemento

% Cemento	Humedad Óptima (%)	Densidad Max. (kg/m ³)
3%	10.3	1916
5%	9.7	1931
7%	9.2	1948
9%	8.8	1962

Fuente: Elaboración Propia

Ver Planilla en **ANEXO III**

Gráfica 3.4. Curvas de compactación con porcentajes de 3%, 5%, 7%, 9%, Muestra 1



Fuente: Elaboración Propia

- CBR Y EXPANSIÓN

Tabla 3.14. Resultados de CBR y Expansión de la Muestra N° 1 con Cemento

% Cemento	CBR (%)	Expansión (%)
3%	97.7	0.05
5%	157.5	0.04
7%	215.6	0.01
9%	265.4	0.00

Fuente: Elaboración Propia

Ver Planilla en **ANEXO III**

❖ **RESULTADOS DE LA MUESTRA N° 2 “ Calle O’connor D`arlach entre Potosí y Oruro ”**

- **CLASIFICACIÓN DEL SUELO CON CEMENTO**

Tabla 3.15. Resultados de Clasificación del Suelo de la Muestra N° 2 con Cemento

% Cemento	Limite Líquido	Limite Plástico	Índice Plasticidad	Índice de Grupo	CLASIFICACION	
					ASSTHO	SUCS
al 3%	30.8	20.6	10.2	6	A-4 (6)	CL
al 5%	31.6	21.7	9.8	6	A-4 (6)	CL
al 7%	30.7	21.3	9.4	6	A-4 (6)	CL
al 9%	29.4	20.6	8.8	6	A-4 (6)	CL

Fuente: Elaboración Propia

Ver Planilla en **ANEXO III**

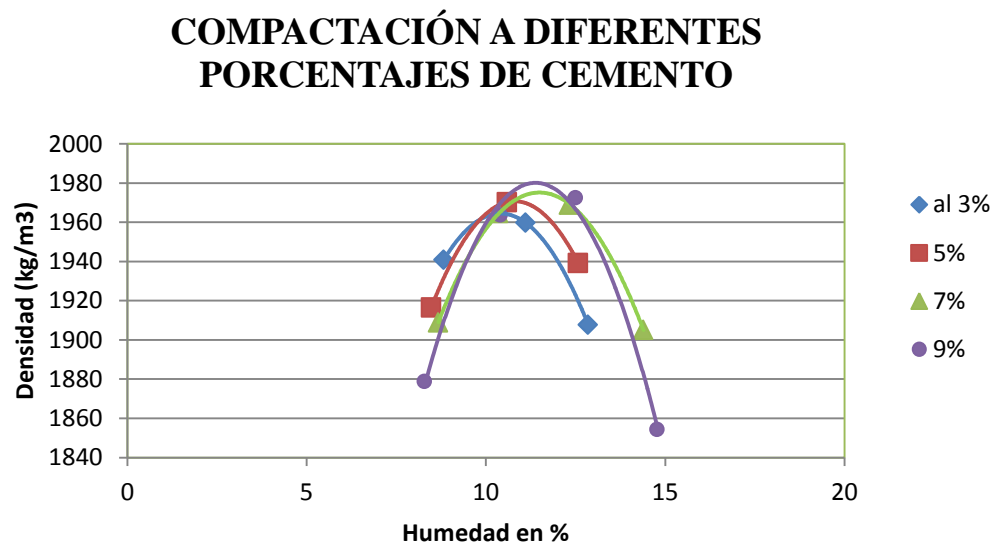
- **COMPACTACIÓN**

Tabla 3.16. Resultados de Compactación de la Muestra N° 2 con Cemento

% Cemento	Humedad Óptima (%)	Densidad Max. (kg/m ³)
3%	10.4	1866
5%	10.9	1871
7%	11.5	1876
9%	11.7	1881

Fuente: Elaboración Propia

Ver Planilla en **ANEXO III**

Gráfica 3.5. Curvas de compactación con porcentajes de 3%, 5%, 7%, 9% Muestra 2

Fuente: Elaboración Propia

Ver Planilla en **ANEXO III**

- CBR Y EXPANSIÓN

Tabla 3.17. Resultados de CBR y Expansión de la Muestra N° 2 con Cemento

% Cemento	CBR (%)	Expansión (%)
3%	76.8	0.23
5%	115.9	0.13
7%	170	0.14
9%	201.3	0

Fuente: Elaboración Propia

Ver Planilla en **ANEXO III**

❖ **RESULTADOS DE LA MUESTRA N° 3 " Calle Oruro entre Barrenechea y Luis Arancibia "**

- CLASIFICACIÓN DEL SUELO CON CEMENTO

Tabla 3.18. Resultados de Clasificación del Suelo de la Muestra N° 3 con Cemento

% Cemento	Limite Líquido	Limite plástico	Índice Plasticidad	Índice de Grupo	CLASIFICACION	
					ASSTHO	SUCS
al 3%	41.2	25.5	15.7	11	A-7-6(11)	CL
al 5%	42.5	28.1	14.4	10	A-7-6(10)	ML
al 7%	42.4	28.6	13.8	10	A-7-6(10)	ML
al 9%	38.8	25.9	12.9	9	A-6(9)	ML

Fuente: Elaboración Propia

Ver Planilla en **ANEXO III**

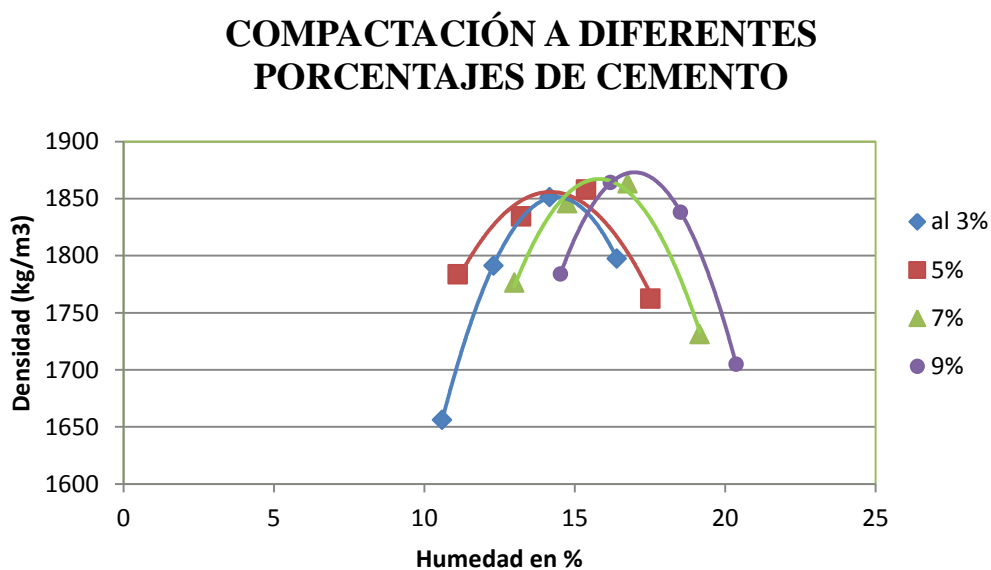
- COMPACTACIÓN

Tabla 3.19. Resultados de Compactación de la Muestra N° 3 con Cemento

% Cemento	Humedad Óptima (%)	Densidad Max. (kg/m ³)
3%	14.4	1759
5%	15.1	1765
7%	16.1	1773
9%	17	1776

Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 3.6. Curvas de compactación con porcentajes de 3%, 5%, 7%, 9%, Muestra 3



Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.20. Resultados de CBR y Expansión de la Muestra N° 3 con Cemento

% Cemento	CBR (%)	Expansión (%)
3%	33.2	0.41
5%	48.1	0.31
7%	97.1	0.25
9%	122.1	0.14

Fuente: Elaboración Propia

Ver Planilla en **ANEXO III**

❖ **RESULTADOS DE ENSAYOS ELABORADOS CON LA MUESTRA N° 1**

• **RESISTENCIA A COMPRESIÓN**

Tabla 3.21. Resultados de la Resistencia a Compresión al 3% de Cemento

N°	Probeta	% Cemento	Edad (días)	Tensión Rotura Kg./cm ²	Resist. Correg. 28 días	Resist. Prom Kg./cm ² .
1	P-1	3%	7	30.99	43.0	44.2
2	P-1	3%	7	32.75	45.5	
3	P-2	3%	14	36.91	43.4	41.7
4	P-2	3%	14	33.98	40.0	
5	P-3	3%	28	45.37	45.4	43.9
6	P-3	3%	28	42.33	42.3	

Fuente: Elaboración Propia

Ver Planilla en **ANEXO IV**

Tabla 3.22. Resultados de la Resistencia a Compresión al 5% de Cemento

N°	Probeta	% Cemento	Edad (días)	Tensión Rotura Kg./cm ²	Resist. Correg. 28 días	Resist. Prom Kg./cm ² .
1	P-1	5%	7	50.20	69.7	68.4
2	P-1	5%	7	48.36	67.1	
3	P-2	5%	14	59.39	69.9	67.9
4	P-2	5%	14	55.98	65.9	
5	P-3	5%	28	66.34	66.4	67.8
6	P-3	5%	28	69.23	69.2	

Fuente: Elaboración Propia

Ver Planilla en **ANEXO IV**

Tabla 3.23. Resultados de la Resistencia a Compresión al 7% de Cemento

Nº	Probeta	% Cemento	Edad (días)	Tensión Rotura Kg./cm2	Resist. Correg. 28 días	Resist. Prom Kg./cm2.
1	P-1	7%	7	52.27	72.6	70.3
2	P-1	7%	7	48.97	68.0	
3	P-2	7%	14	59.58	70.1	68.5
4	P-2	7%	14	56.90	66.9	
5	P-3	7%	28	72.72	72.7	71.4
6	P-3	7%	28	70.11	70.1	

Fuente: Elaboración Propia

Ver Planilla en **ANEXO IV**

Tabla 3.24. Resultados de la Resistencia a Compresión al 9% de Cemento

Nº	Probeta	% Cemento	Edad (días)	Tensión Rotura Kg./cm2	Resist. Correg. 28 días	Resist. Prom Kg./cm2.
1	P-1	9%	7	82.70	114.8	116.8
2	P-1	9%	7	85.52	118.7	
3	P-2	9%	14	97.29	114.5	112.9
4	P-2	9%	14	94.62	111.3	
5	P-3	9%	28	112.37	112.4	111.7
6	P-3	9%	28	111.09	111.1	

Fuente: Elaboración Propia

Ver Planilla en **ANEXO IV**

- **RESISTENCIA A FLEXIÓN**

Tabla 3.25. Resultados de la Resistencia a Flexión al 3% de Cemento

N°	Probeta	%	Edad	Resistencia.	Resist. Correg.	Resist. Prom	Param. Control
	N°	Cemento	(días)	(Kg/cm2)	a los 28 días	(kg/cm2)	(Kg/cm2)
1	P-1	3%	7	6.84	9.49	10.28	5 - 11
2	P-1	3%	7	7.97	11.06		
3	P-2	3%	14	9.73	11.44	10.78	5 - 11
4	P-2	3%	14	8.59	10.11		
5	P-3	3%	28	11.48	11.49	10.84	5 - 11
6	P-3	3%	28	10.20	10.20		

Fuente: Elaboración Propia

Ver Planilla en **ANEXO IV**

Tabla 3.26. Resultados de la Resistencia a Flexión al 5% de Cemento

N°	Probeta	%	Edad	Resistencia.	Resist. Correg.	Resist. Prom.	Param. Control
	N°	Cemento	(días)	(Kg/cm2)	a los 28 días	(Kg/cm2)	(Kg/cm2)
1	P-1	5%	7	10.90	15.13	13.53	5 - 11
2	P-1	5%	7	8.59	11.93		
3	P-2	5%	14	11.99	14.11	14.94	5 - 11
4	P-2	5%	14	13.40	15.76		
5	P-3	5%	28	14.88	14.88	15.69	5 - 11
6	P-3	5%	28	16.48	16.49		

Fuente: Elaboración Propia

Ver Planilla en **ANEXO IV**

Tabla 3.27. Resultados de la Resistencia a Flexión al 7% de Cemento

N°	Probeta	%	Edad	Resistencia.	Resist. Correg.	Resist. Prom.	Param. Control
	N°	Cemento	(días)	(Kg/cm2)	a los 28 días	(Kg/cm2)	(Kg/cm2)
1	P-1	7%	7	14.88	20.66	20.09	5 - 11
2	P-1	7%	7	14.06	19.52		
3	P-2	7%	14	17.70	20.82	21.55	5 - 11
4	P-2	7%	14	18.95	22.29		
5	P-3	7%	28	23.95	23.95	22.91	5 - 11
6	P-3	7%	28	21.88	21.88		

Fuente: Elaboración Propia

Ver Planilla en **ANEXO IV**

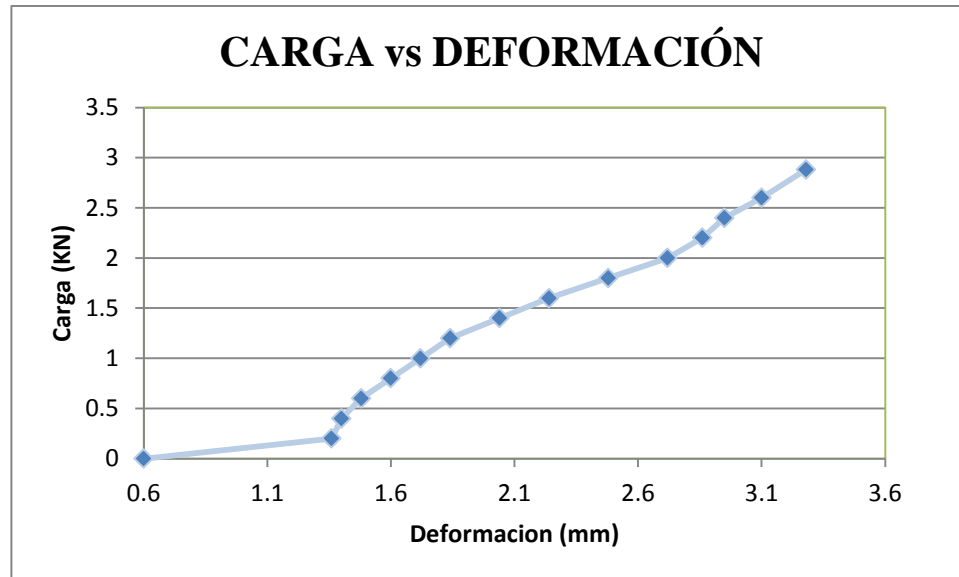
Tabla 3.28. Resultados de la Resistencia a Flexión al 9% de Cemento

N°	Probeta	%	Edad	Resistencia.	Resist. Correg.	Resist. Prom.	Param. Control
	N°	Cemento	(días)	(Kg/cm2)	a los 28 días	(Kg/cm2)	(Kg/cm2)
1	P-1	9%	7	18.75	26.03	24.13	5 - 11
2	P-1	9%	7	16.02	22.23		
3	P-2	9%	14	22.58	26.56	24.82	5 - 11
4	P-2	9%	14	19.61	23.07		
5	P-3	9%	28	27.03	27.03	25.43	5 - 11
6	P-3	9%	28	23.83	23.83		

Fuente: Elaboración Propia

Ver Planilla en **ANEXO IV**

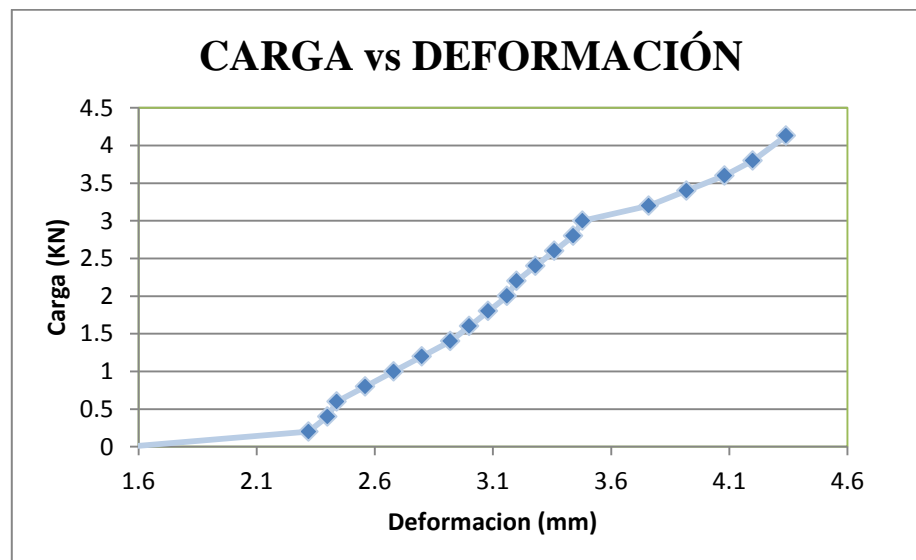
Grafica 3.7. Esfuerzo vs Deformación al 3% de Cemento



Fuente: Elaboración Propia

Ver Planilla en ANEXO IV

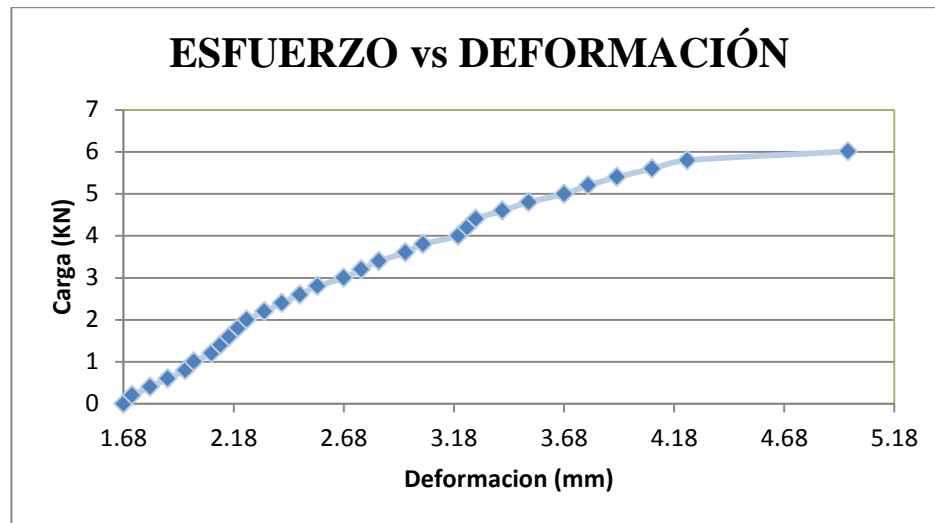
Grafica 3.8. Esfuerzo vs Deformación al 5% de Cemento



Fuente: Elaboración Propia

Ver Planilla en ANEXO IV

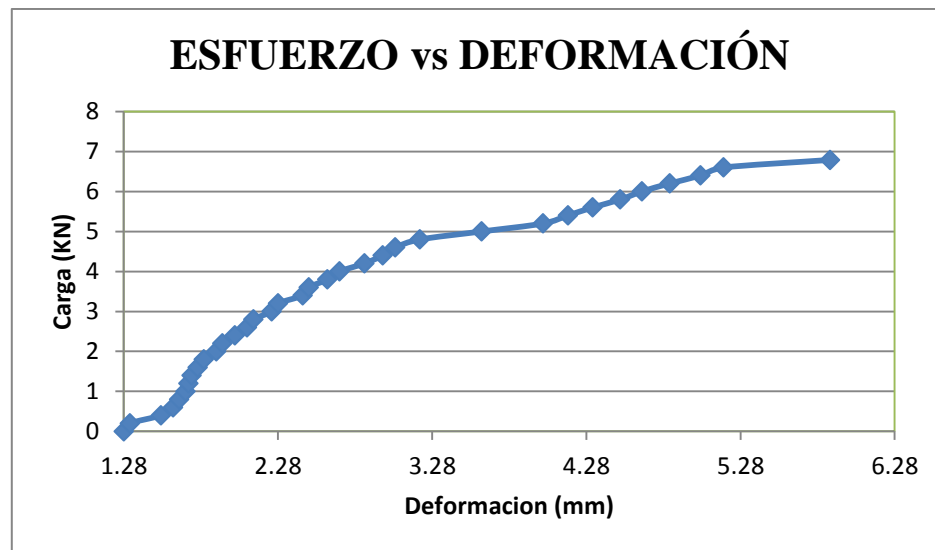
Grafica 3.9. Esfuerzo vs Deformación al 7% de Cemento



Fuente: Elaboración Propia

Ver Planilla en ANEXO IV

Grafica 3.10. Esfuerzo vs Deformación al 9% de Cemento



Fuente: Elaboración Propia

Ver Planilla en ANEXO IV

- **HUMEDECIMIENTO-SECADO**

Tabla 3.29. Resultados de Humedecimiento Secado al 3% de cemento

Ciclo N°	Pérdida S-C %
1	9.15
2	7.79
3	7.82
4	6.86
5	9.24
6	5.01
7	4.52
8	2.91
PROMEDIO	6.66

Fuente: Elaboración Propia

Ver Planilla en **ANEXO IV**

Tabla 3.30. Resultados de Humedecimiento Secado al 5% de cemento

Ciclo N°	pérdida S-C %
1	5.32
2	4.50
3	4.03
4	2.64
5	2.64
6	2.86
7	3.07
8	2.91
PROMEDIO	3.50

Fuente: Elaboración Propia

Ver Planilla en **ANEXO IV**

Tabla 3.31. Resultados de Humedecimiento Secado al 7% de cemento

Ciclo N°	pérdida S-C %
1	3.07
2	3.02
3	2.65
4	2.60
5	3.07
6	3.17
7	3.12
8	2.91
PROMEDIO	2.95

Fuente: Elaboración Propia

Ver Planilla en **ANEXO IV**

Tabla 3.32. Resultados de Humedecimiento Secado al 9% de cemento

Ciclo N°	pérdida S-C %
1	1.36
2	1.84
3	1.41
4	1.36
5	1.52
6	2.91
7	2.97
8	2.91
PROMEDIO	2.03

Fuente: Elaboración Propia

Ver Planilla en **ANEXO IV**

3.5.4.7. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LAS MEZCLAS DE SUELO-CEMENTO

1. PLASTICIDAD

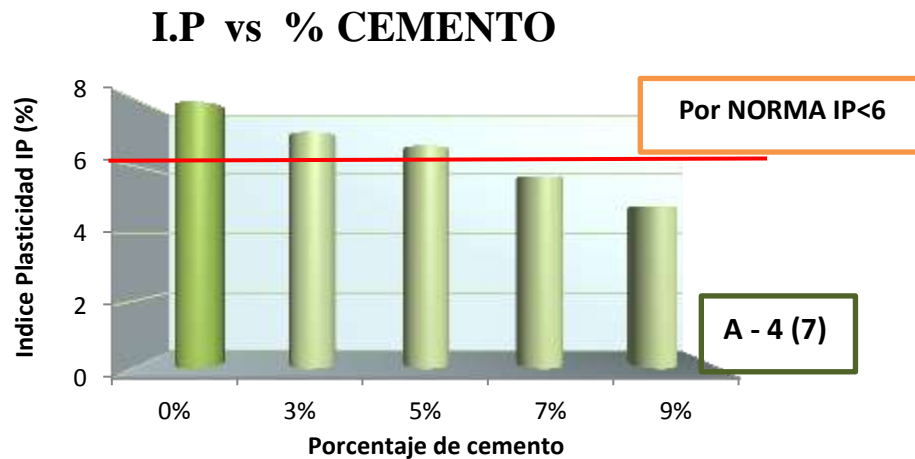
Tabla 3.33: Índice de Plasticidad suelo-cemento

ÍNDICE DE PLASTICIDAD						
Muestra N°	Tipo de Suelo	% de cemento				
		0%	3%	5%	7%	9%
1	A -4 (7)	7.9	7	6.6	5.7	4.8
2	A - 6 (10)	14.6	10.2	9.8	9.4	8.8
3	A - 7-6 (17)	26.8	15.7	14.4	13.8	12.9

Fuente: Elaboración Propia

MUESTRA N° 1 "SUELO A - 4 (7)"

Gráfica 3.11. Índice de Plasticidad vs % de Cemento (Muestra 1)



Fuente: Elaboración Propia

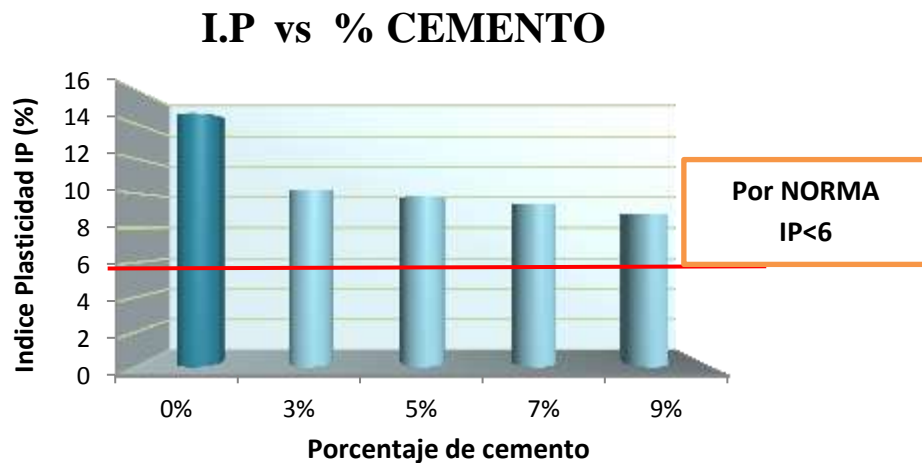
De acuerdo a la gráfica de barras que está en función del índice de plasticidad (%) y el porcentaje de cemento se observa que a medida que aumenta la cantidad de cemento la plasticidad va disminuyendo entre 11% a 60% respecto al suelo natural. Estos resultados en obra significarían que una capa sub base suelo-cemento presentaría cambios volumétricos bajos ante la presencia de agua.

El índice de plasticidad a los porcentajes de cemento del 3% y 5% podrían cumplir al límite con los valores otorgados por las normas vigentes para la conformación de capa sub base.

En cambio los porcentajes de 7% a 9% cumplen a cabalidad el valor fijado por norma ($IP < 6$).

MUESTRA N° 2 "SUELO A - 6 (10)"

Gráfica 3.12. Índice de Plasticidad vs % de Cemento (Muestra 2)



Fuente: Elaboración Propia

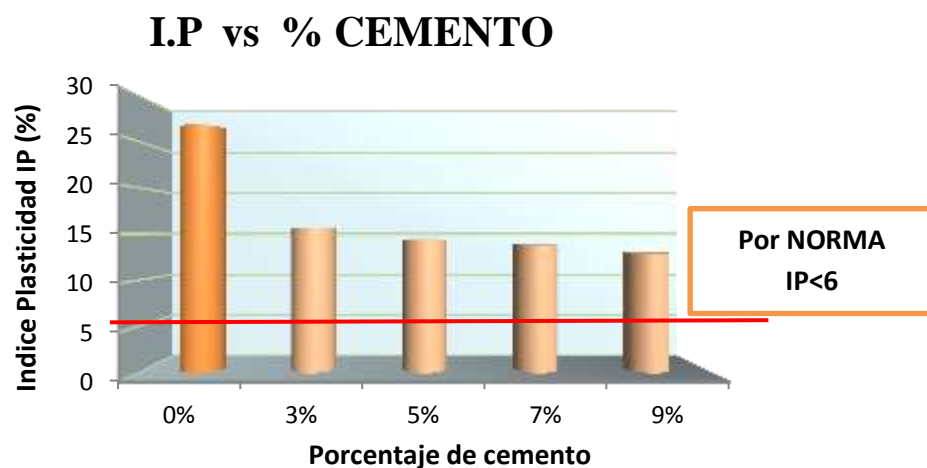
Al igual que la anterior grafica este suelo tiene el mismo comportamiento ante las variaciones de cemento, se observa que a medida que se aumenta la cantidad la

plasticidad va disminuyendo pero en este caso la disminución es de 30% a 60% respecto al suelo natural.

Se tiene una buena variación en cuanto a reducciones de los índices de plasticidad del suelo-cemento frente al natural, pero los valores alcanzados no permiten que este suelo pueda entrar como capa sub base ya que presenta $I.P > 6$.

MUESTRA N° 3 "SUELO A -7- 6 (17)"

Gráfica 3.13. Índice de Plasticidad vs % de Cemento (Muestra 3)



Fuente: Elaboración Propia

En base a esta gráfica de barras compuesto por el índice de plasticidad en (%) y el porcentaje de cemento se observa que la plasticidad disminuye entre 48% a 60% respecto al suelo natural. A pesar que presenta un gran porcentaje de reducción de plasticidad no es suficiente y no cumple con el valor especificado por normativa para una capa sub base.

2. CLASIFICACIÓN

En la clasificación de los suelos al aumentar mayor cantidad de cemento a la muestra, hace que esta reaccione mejorando granulometría, plasticidad, lo cual repercute en la disminución del índice de grupo. Todas estas variables que sufren un cambio hacen que la muestra de suelo natural mezclado con cemento mejore su clasificación, e incluso la muestra N° 2 pasa de A-6 a un A-4 a un porcentaje de 3%, el A-7 a una cantidad de 9% pasa a un A-6, pero este porcentaje representaría en obra un costo demasiado alto, por lo que no podría ser factible en cuanto a costos se refiere.

A continuación se presenta la siguiente tabla para una mejor observación de lo que pasa con cada uno de los suelos:

Tabla 3.34: Tabla de clasificación de la mezcla suelo-cemento

	L.L	L.P	I.P	CLASIFICACIÓN	
				ASSTHO	SUCS
Muestra 1					
al 0%	22.3	14.4	7.9	A-4 (7)	CL
al 3%	28.5	21.5	7	A-4 (6)	CL-ML
al 5%	28.3	21.7	6.6	A-4 (6)	CL-ML
al 7%	27.6	21.9	5.7	A-4 (6)	CL-ML
al 9%	28	23.2	4.8	A-4 (4)	ML
Muestra 2					
al 0%	29.9	15.3	14.6	A-6 (10)	CL
al 3%	30.8	20.6	10.2	A-4 (6)	CL
al 5%	31.6	21.7	9.8	A-4 (6)	CL
al 7%	30.7	21.3	9.4	A-4 (6)	CL
al 9%	29.4	20.6	8.8	A-4 (6)	CL
Muestra 3					
al 0%	50.7	23.9	26.8	A-7-6(17)	CH
al 3%	41.2	25.5	15.7	A-7-6(11)	CL
al 5%	42.5	28.1	14.4	A-7-6(10)	ML
al 7%	42.4	28.6	13.8	A-7-6(10)	ML
al 9%	38.8	25.9	12.9	A-6(9)	ML

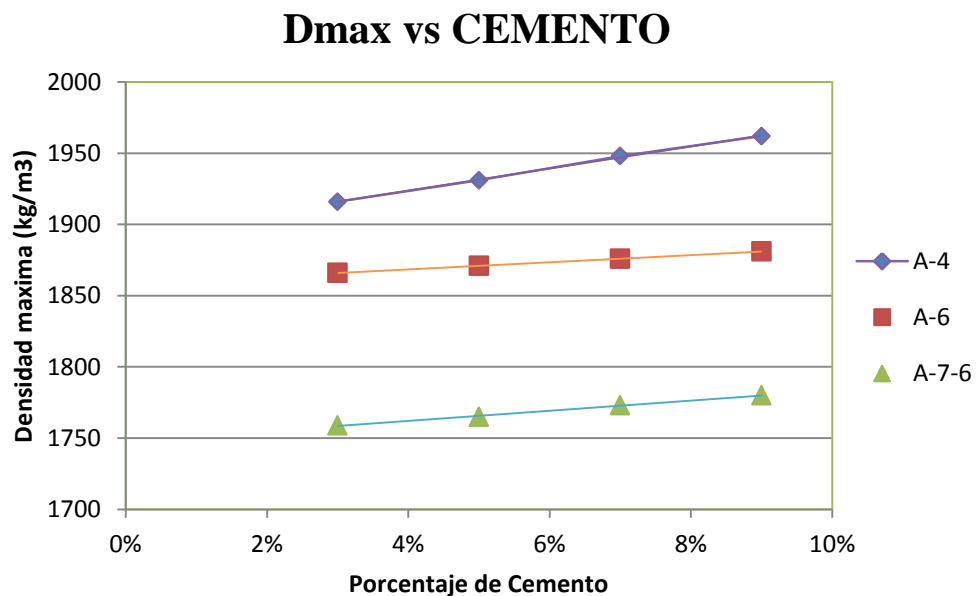
Fuente: Elaboración Propia

3. COMPACTACIÓN MÉTODO MODIFICADO T-180

Tabla 3.35: Resumen de Resultados de Compactación

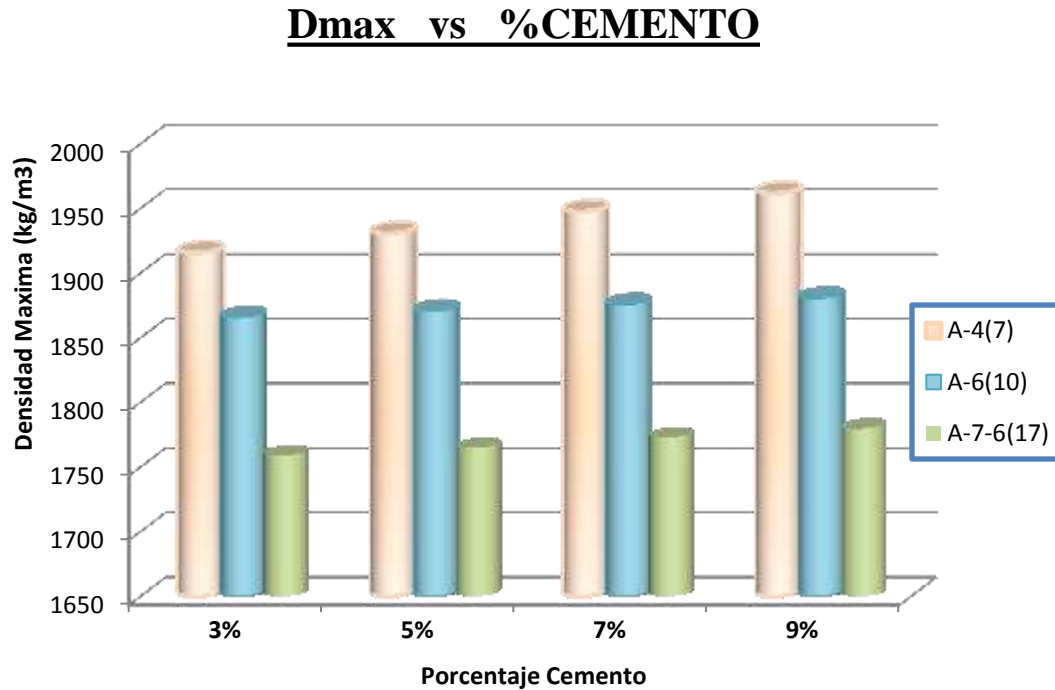
		COMPACTACIÓN				
		Muestra N° 1 "A-4 (7)"				
% cemento		0%	3%	5%	7%	9%
H.O	%	10.9	10.4	9.7	9.2	8.8
Dmax	kg/m3	1932	1915	1931	1948	1962
		Muestra N° 2 "A-6 (10)"				
% cemento		0%	3%	5%	7%	9%
H.O	%	11.8	10.5	10.9	11.5	11.7
Dmax	kg/m3	1861	1870	1871	1876	1881
		Muestra N° 3 "A-7-6 (17)"				
% cemento		0%	3%	5%	7%	9%
H.O	%	13	14.4	15	16.1	17
Dmax	kg/m3	1739	1759	1767	1773	1776

Gráfica 3.14. Densidad máxima vs % de Cemento



Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 3.15. Influencia del Cemento en la Densidad Seca



Fuente: Elaboración Propia

Como se puede observar en la gráfica, las densidades de los suelos A-4, A-6 Y A-7-6 van creciendo a medida que se va aumentando el porcentaje de cemento esto ocurre porque al agregarle el conglomerante provoca un enlace entre partículas de suelo y cemento más resistente que el suelo solo, haciendo una mezcla endurecida y de mayor resistencia gracias a las propiedades que presenta el cemento.

Es así que el suelo A-4 va de una densidad de 1915 kg/m³ al 3% de cemento hasta 1962 kg/m³ a un 9% de cemento.

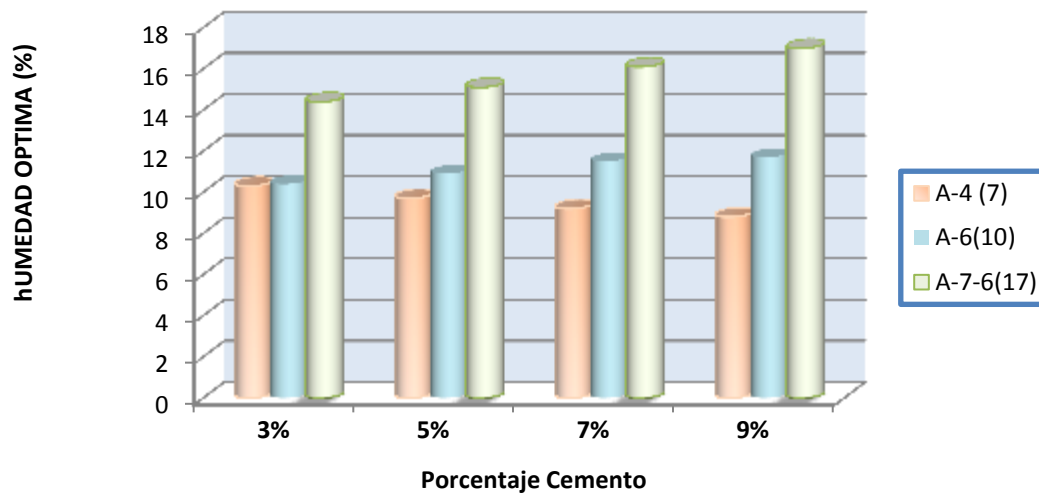
El suelo A-6 va de una densidad de 1870 kg/m³ al 3% de cemento hasta 1881 kg/m³ a un 9% de cemento.

El suelo A-7-6 va de una densidad de 1759 kg/m³ al 3% de cemento hasta 1776 kg/m³ a un 9% de cemento.

Así también se puede observar el comportamiento que tiene cada uno de los suelos respecto a la adición de cemento como ser el suelo A-4 presenta mayores densidades que el suelo A-6 y A-7-6 esto es influenciado por la calidad que presenta cada uno.

Gráfica 3.16. Humedad Optima (%) vs % de Cemento

HUMEDAD OPTIMA (H.O) vs %CEMENTO



Fuente: Elaboración Propia

Según el (Gráfico 3.16) la humedad del suelo A-4 va disminuyendo pero la densidad aumenta, al 3% se tiene una humedad de 10.4% con una densidad de 1915 kg/m³, y al 9% esta con una humedad de 8.8% y una densidad de 1962 kg/m³.

En el suelo A-6 ocurre todo lo contrario las humedades van aumentando al igual que sus densidades, al 3% de cemento presenta una humedad de 10.5% y una densidad de 1870 kg/m³ al 9% tiene una humedad de 11.7% y una densidad de 1881 kg/m³. El suelo A-7-6 tiene el mismo comportamiento con 3% de cemento tiene una humedad de 14.4% y densidad de 1759kg/m³, al 9% una humedad de 17% y una densidad de 1776 kg/m³.

4. RAZÓN SOPORTE DE CALIFORNIA (CBR) DEL SUELO-CEMENTO.

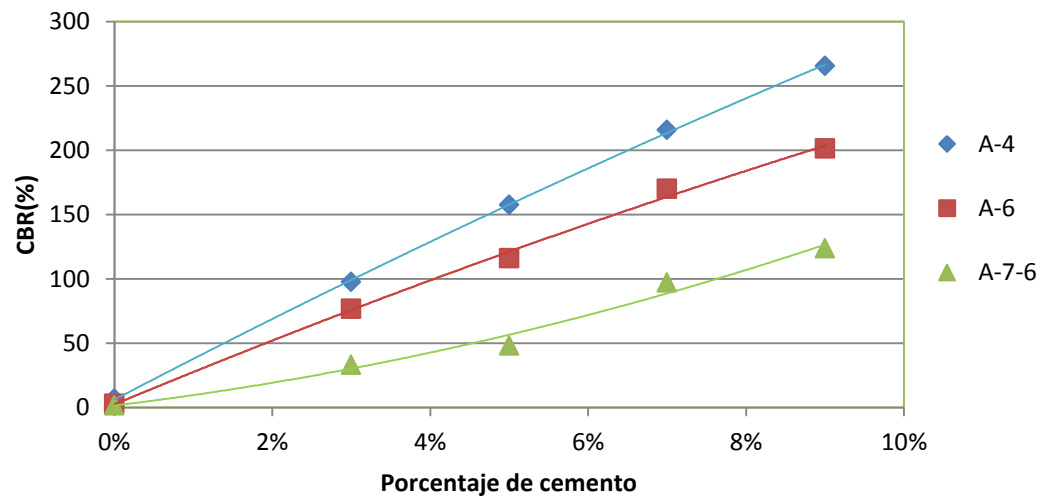
Tabla 3.36: Resumen de valores de CBR de suelo-cemento

		CBR				
		Muestra N° 1 "A-4 (7)"				
% cemento		0%	3%	5%	7%	9%
CBR	%	6.8	97.7	157.5	215.6	265.4
		Muestra N° 2 "A-6(10)"				
% cemento		0%	3%	5%	7%	9%
CBR	%	2.3	76.8	115.9	170	201.3
		Muestra N° 3 "A-7-6(17)"				
% cemento		0%	3%	5%	7%	9%
CBR	%	1.6	33.2	48.1	97.1	121.1

Fuente: Elaboración Propia

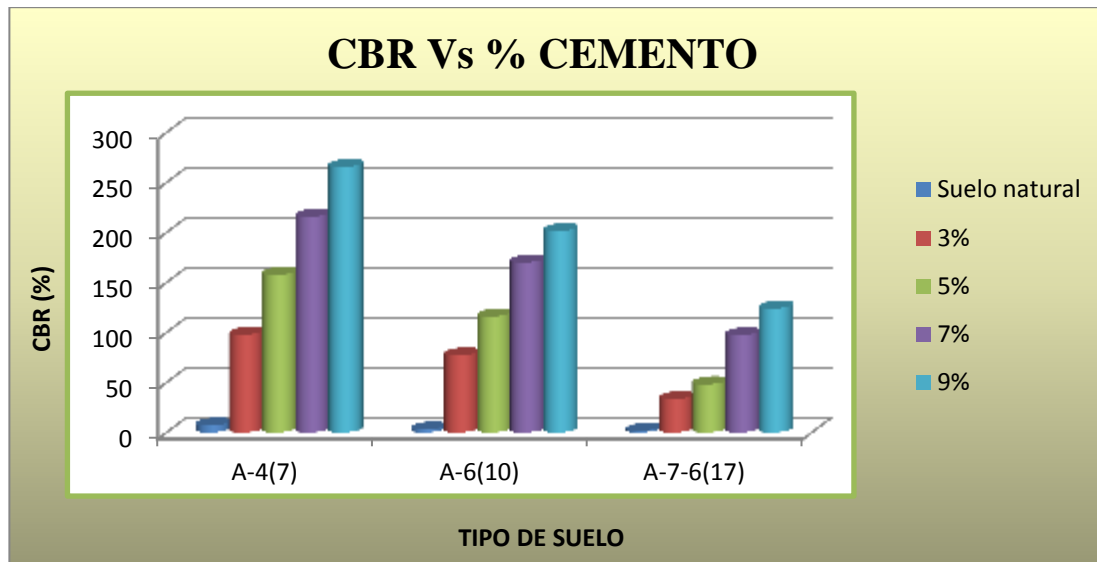
Gráfica 3.17. CBR vs % de Cemento

CBR vs %CEMENTO



Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 3.18. CBR vs % de Cemento



Fuente: Elaboración Propia

Como se puede observar en las gráficas 3.17 y 3.18 el incremento del porcentaje de CBR es bastante significativo incluso a pequeñas cantidades de cemento aplicado sobre el suelo natural, especialmente en el suelo tipo A-4 en donde, con el 3% de cemento ya cumple con los valores más que óptimos.

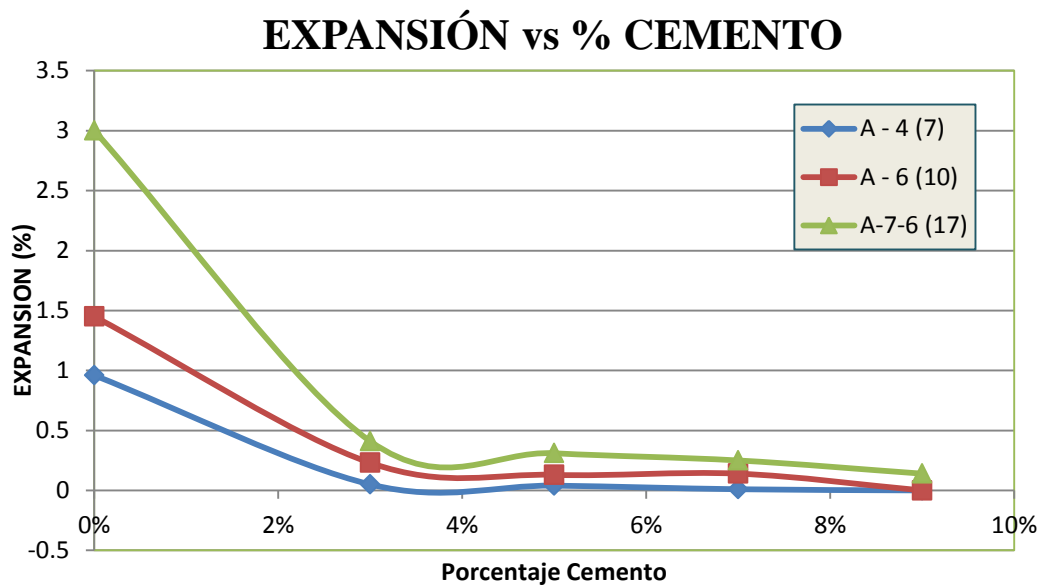
En el suelo A-6 de igual manera se tiene un valor óptimo al mínimo de cemento para una sub base según norma, pero no pasa lo mismo con el A-7 esto es justificado por que es un suelo bastante arcilloso, y con alta plasticidad que no reacciona de la misma manera que los anteriores tipos de suelo justamente por las propiedades que presenta. Pero también se observa respecto a este suelo que alcanza mejor porcentaje de capacidad portante al 7 % de cemento.

5. EXPANSION DEL SUELO CEMENTO

Tabla 3.37: Expansión del suelo-cemento

EXPANSIÓN						
Muestra N° 1 "A-4 (7)"						
% cemento		0%	3%	5%	7%	9%
Expansión	%	0.96	0.05	0.04	0.01	0
Muestra N° 2 "A-6(10)"						
% cemento		0%	3%	5%	7%	9%
Expansión	%	1.45	0.23	0.13	0.14	0
Muestra N° 3 "A-7-6(17)"						
% cemento		0%	3%	5%	7%	9%
Expansión	%	3	0.41	0.31	0.25	0.14

Gráfica 3.19. Expansión vs % de Cemento



De acuerdo a la gráfica lo que se puede visualizar es que al desarrollar la mezcla suelo-cemento se ve una significativa mejoría, ya que los valores de la expansión son prácticamente nulos especialmente en el suelo A-4 y al mínimo porcentaje de

cemento por lo que quiere decir que este suelo tiene mejor comportamiento. Estos valores son coherentes desde dos puntos de vista; uno que al estar las probetas 96 horas en saturación en la prueba de CBR, el cemento comienza a reaccionar provocando endurecimiento en la mezcla por contacto con el agua y dos de acuerdo a la hoja técnica de especificaciones químicas y físicas del cemento proporcionada por Soboce indica que es un material que no presenta expansión.

3.5.4.7.1 ANÁLISIS PARA DETERMINAR EL SUELO MÁS ÓPTIMO PARA PRUEBAS DE DURABILIDAD, COMPRESIÓN Y FLEXIÓN.

Con base a los resultados de suelo-cemento reflejados en graficas se pudo observar y analizar cuál de estas tres muestras en estudio es la que reacciona de mejor manera en cuanto a plasticidad, CBR y expansión.

Para esto se realiza una comparación con el mínimo porcentaje de cemento agregando a cada muestra y en función a los resultados que ofrecen se determinara la más óptima para someterla a otros ensayos que son necesarios para el cumplimiento de los objetivos trazados para este tema.

Tabla 3.38: Tabla Comparativa de Resultados al 3% de cemento

	Muestra N° 1	Muestra N° 2	Muestra N° 3
I.P (%)	7	10.2	15.7
CBR (%)	97.7	76.8	33.2
EXPANSION (%)	0.05	0.17	0.35

Fuente: Elaboración Propia

La muestra N°1 (suelo A-4) es la que resulta más óptimo porque presenta mejor comportamiento físico y mecánico en cada uno de los ensayos realizados, por lo tanto este suelo es sometido a pruebas de resistencia a compresión en base a probetas,

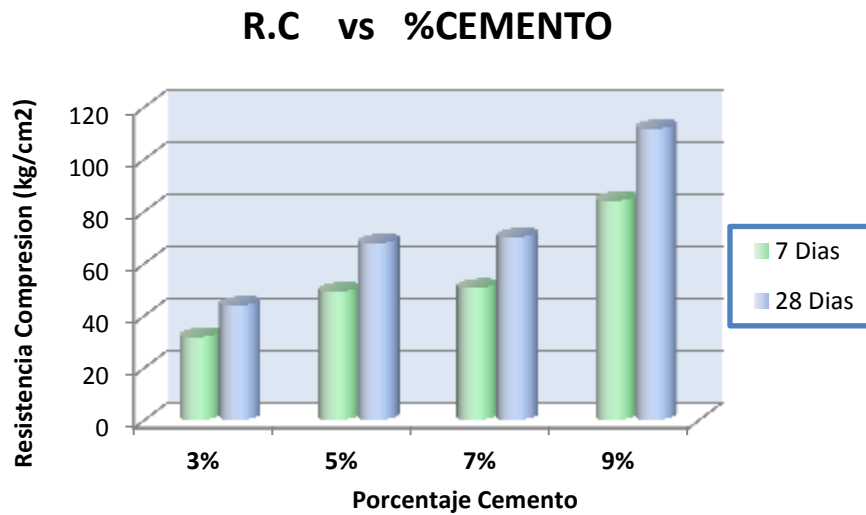
resistencia a flexión en vigas y por último el ensayo de durabilidad por humedecimiento secado. Todo esto para determinar el porcentaje óptimo de cemento al cual se diseñara una sub base suelo cemento para un pavimento rígido que cumpla con características de durabilidad y resistencia mecánica.

6. RESISTENCIA A COMPRESIÓN

Tabla 3.39: Resumen de Resistencia a Compresión A 7,14 Y 28 Días

% Cemento	7 Días	14 Días	28 Días
3%	31.87	35.44	43.9
5%	49.28	57.68	67.8
7%	50.62	58.24	70.11
9%	84.11	95.95	111.7

Gráfica 3.20. Resistencia a compresión VS % de Cemento



Fuente: Elaboración Propia

Los resultados obtenidos de la rotura de las probetas en la prensa, sometidas a la compresión simple, se muestran de forma resumida en la tabla 3.41, a partir de estos valores y la gráfica de evolución en resistencia al transcurso de los días se planteará el análisis.

Primero se fijarán los parámetros de control según la base teórica en la cual se desarrolla el tema. Estos parámetros de control determinan si el material puede o no entrar como sub base, y también definen la característica más importante que debe cumplir para registrar un comportamiento apto una vez puesto en obra.

Parámetros de control según PCA y el Instituto Mexicano del Concreto y del Cemento (IMCYC) para suelos limosos (A-4 y A-5):

Tabla 3.40: Parámetros de control en la Resistencia a Compresión

R.C.S	17 Kg/cm ² - 35 Kg/cm ²	a los 7 días de curado
R.C.S	21 Kg/cm ² - 63 Kg/cm ²	a los 28 días de curado
Resistencia a Compresión Simple para evitar FISURACION		
R.C.S → 25 kg/cm ² a 35kg/cm ²		

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a estos valores de la tabla se analizan cada uno de los resultados en base al siguiente cuadro:

Cuadro 3.16. Análisis de resultados de la Práctica de Resistencia a Compresión en base al PCA e IMCYC

% de Cemento	RCS 7 días (Kg/cm ²)	RCS 28 días (Kg/cm ²)	PCA-IMCYC R.C.S (17 Kg/cm ² - 35 Kg/cm ²) 7días	PCA-IMCYC (21 Kg/cm ² - 63 Kg/cm ²) 28días	PCA R.C.S "Figuración" (25 Kg/cm ² - 35 Kg/cm ²) 7días
3%	31.87	43.9	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
5%	49.28	67.8	NO CUMPLE	NO CUMPLE	NO CUMPLE
7%	50.62	70.11	NO CUMPLE	NO CUMPLE	NO CUMPLE
9%	84.11	111.7	NO CUMPLE	NO CUMPLE	NO CUMPLE

Fuente: Elaboración Propia

Este cuadro nos muestra que al 3% de cemento, cumplen los tres parámetros de control, el de 5%,7% y 9% no es que no cumplan por que no llegan al valor fijado, sino que por el contrario presentan altas resistencias y esto hace que no clasifiquen a lo que plasma la norma. El utilizar porcentajes elevados de cemento no solo representan mayores costos, si no que provocan que el suelo alcance estados de rigidez elevados lo cual ante la aplicación de cargas grandes podría ocasionar la ruptura del elemento ocasionando fallas en la capa a la cual le sirve de apoyo.

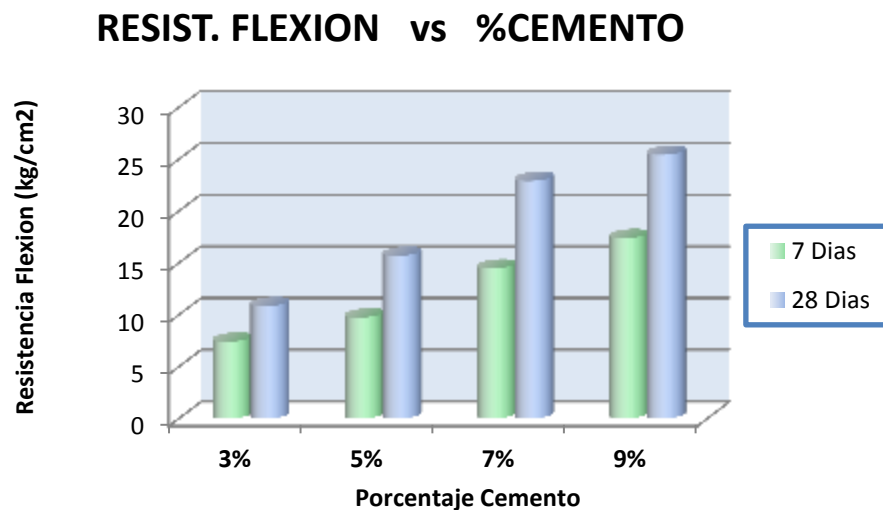
EN RESUMEN DE ACUERDO A ESTA PRÁCTICA, AL 3% DE CEMENTO SE PODRÍA DECIR QUE ES EL MÁS ÓPTIMO, PERO VEREMOS CÓMO SE COMPORTA EN LOS OTROS DOS ENSAYOS.

7. RESISTENCIA A FLEXIÓN

Tabla 3.41: Resumen de Resistencia a Flexión a 7,14 Y 28 Días

% cemento	RESISTENCIA FLEXION (Kg/cm ²)		
	7 Días	14 Días	28 Días
3%	7.41	9.16	10.84
5%	9.74	12.70	15.69
7%	14.47	18.32	22.91
9%	17.38	21.10	25.43

Gráfica 3.21. Resistencia a Flexión vs % de Cemento



Fuente: Elaboración propia

Como se puede apreciar en la gráfica la resistencia a flexión va aumentando al transcurrir del tiempo desde un 46% hasta un 61%.

Parámetros de control según el Instituto Mexicano del Concreto y del Cemento (IMCYC) para suelos finos:

Tabla 3.42: Parámetro de Control en base al Módulo de Rotura

Propiedades del suelo-cemento	
R.F. o Modulo de Rotura	5 – 11 kg/cm ²

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a los valores de la anterior tabla se analizan cada uno de los resultados en base al siguiente cuadro:

Cuadro 3.17: Análisis de Resultados de Resistencia a Flexión

% de Cemento	Modulo Ruptura 28 días (Kg/cm ²)	IMCYC (5Kg/cm ² -11 Kg/cm ²) 28días
3%	10.84	CUMPLE
5%	15.69	NO CUMPLE
7%	22.91	NO CUMPLE
9%	25.43	NO CUMPLE

Fuente: Elaboración propia

Como se puede ver en el cuadro el módulo de rotura al 3% cumple al límite con los valores establecidos para este ensayo, mientras que los demás porcentajes sobrepasan el parámetro.

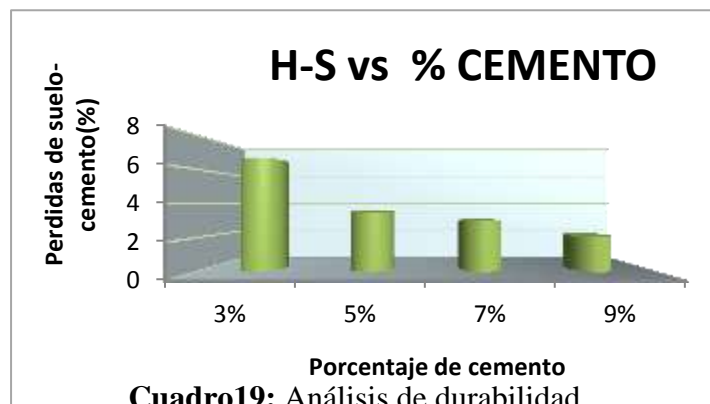
POR LO TANTO EN ESTE ENSAYO LA RESISTENCIA A FLEXION CUMPLE AL 3% DE CEMENTO DE ACUERDO A VALORES DEL IMCYC PARA UNA SUB BASE SUELO-CEMENTO.

8. DURABILIDAD "HUMEDECIMIENTO SECADO"

Tabla 3.43: Porcentaje de incremento de 7,14 Y 28 Días

% Cemento	Perdidas S-C (%)
3%	6.66
5%	3.5
7%	2.95
9%	2.03

Gráfica 3.22. Humedecimiento-secado vs % de Cemento



Fuente: Elaboración propia

De acuerdo al siguiente cuadro se analizara esta prueba:

Cuadro 3.18: Análisis de durabilidad

% de Cemento	Perdidas S-C (%)	IMCYC Max 10 %
3%	6.6	CUMPLE
5%	3.5	CUMPLE
7%	2.95	CUMPLE
9%	2.03	CUMPLE

Fuente: Elaboración propia

Como se puede ver en el cuadro la pérdida de suelo cemento al 3% cumple con los valores establecidos según la Imcyc, mientras que los demás porcentajes presentan menores valores, estos resultados se puede decir que son coherentes porque a mayor cantidad de cemento las pérdidas disminuyen ya que la mezcla presenta mayor resistencia al desgaste.

COMO ANALISIS FINAL SE CONCLUYE, DE ACUERDO A TODOS LOS ENSAYOS REALIZADOS DE COMPRESION, FLEXION Y DURABILIDAD QUE EL PORCENTAJE OPTIMO DE CEMENTO ES EL 3 % POR QUE CUMPLE TODOS LOS PARAMETROS DE NORMA QUE SE REQUIEREN PARA CONSTITUIR UNA MEZCLA DE SUELO-CEMENTO OPTIMA EN CUANTO A RESISTENCIA, COMPORTAMIENTO Y DURABILIDAD.

% OPTIMO DE CEMENTO	3 %
----------------------------	------------

Una vez definido el porcentaje óptimo de cemento con el cual se realizaría una sub base de suelo-cemento, se pasa al diseño estructural para determinar la incidencia de esta alternativa de capa en la losa de concreto.

3.5.4.8. DISEÑO DE PAVIMENTOS RÍGIDOS MÉTODO DE LA AASHTO

93:

Los pavimentos de concreto con el método de diseño de la AASHTO, se los diseña por fatiga, como fatiga se la entiende al número de repeticiones o ciclos de carga y descarga que se dan sobre un elemento. Al establecer la vida útil de diseño se está tratando de estimar el número de repeticiones de carga a las que se someterá el pavimento.

Los diseños se procederán a realizar tanto con parámetros de una sub base en estado natural y con parámetros de la base estabilizada con cemento con el porcentaje del 3%. Es decir se tendrán dos alternativas que se identifica de la siguiente manera:

ALTERNATIVA N° 1: Pavimento Rígido apoyado en base natural

ALTERNATIVA N° 2: Pavimento Rígido apoyado en una sub base suelo-cemento

PROGRAMA AASHTO 93

Variables que intervienen en el programa método AASHTO 93 son los siguientes:

W18: Transito estimado para el periodo de vida útil en ejes equivalentes de 18 kips (80 kN) .

ZR: Factor de desviación normal para el nivel de confiabilidad R.

S0: Desvío standar de todas las variables

D: Espesor de la losa del pavimento en pulg.

Δ PSI: Pérdida de serviciabilidad prevista en el diseño

Po: Serviciabilidad inicial

Pt: Serviciabilidad final

Sc': Módulo de rotura del Hormigón en psi

J: Coeficiente de transferencia de cargas

Cd: Coeficiente de drenaje

Ec: Módulo de elasticidad del hormigón, en psi

k: Módulo de reacción de la subrasante en (psi/pulg)

Todas las variables que intervienen en el diseño del espesor de la losa de hormigón a excepción del módulo de reacción de la subrazante se obtienen del diseño original del proyecto de las 180 cuadras de la ciudad de Bermejo, lugar de aplicación de este estudio.

Tabla 3.44: Especificaciones de la subbase suelo cemento y espesor de la losa de pavimento

DATOS PARA EL DISEÑO DE PAVIMENTOS DE ACUERDO AL METODO AASHTO 93	DISEÑO DE ESPESOR DE LOSA ALTERNATIVA N°1
Contenido de cemento de la subbase	3%
Tipo de cemento	El Punte IP-30
Índice de plasticidad	7%
Densidad máxima	1916 kg/m ³
Humedad optima	10.4%
CBR	97.7%
Módulo de ruptura a 28 días	10.84
Resistencia a compresión a 7 días	31.87
Resistencia a compresión a 28 días	43.9
Durabilidad (perdida admisible de suelo-cemento)	6.6%
Espesor de losa	15 cm

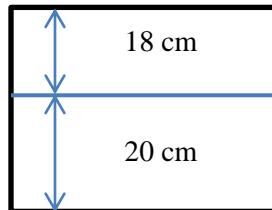
Ver desarrollo del diseño en ANEXO V

ALTERNATIVA 1	Espesor de losa	18 cm
ALTERNATIVA 2	Espesor de losa	15 cm

EL EFECTO ESTRUCTURAL QUE PROVOCA LA CAPA DE SUELO CEMENTO EN LA LOSA DE CONCRETO ES DE 3 CM.

3.5.4.9. ANÁLISIS DE COSTOS

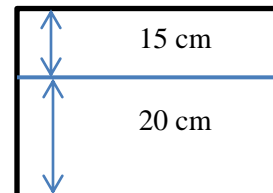
SUB BASE GRANULAR



COSTO=74.13 Bs/m³

SUBBASE SUELO-CEMENTO

Para 3% de cemento



COSTO=106.57 Bs/m³

Costo para 1Km

Datos:

L=1Km

Ancho de vía= 7m

Espesor de sub base= 0.20m

Volumen de suelo en 1Km

$$V=1000*7*0.20$$

$$V=1400 \text{ m}^3$$

COSTO SUB BASE GRANULAR

$$\text{Subbase Granular} = \frac{1400*74.13}{1} = \mathbf{103782 \text{ Bs} = 14911.21\$/\text{Km}}$$

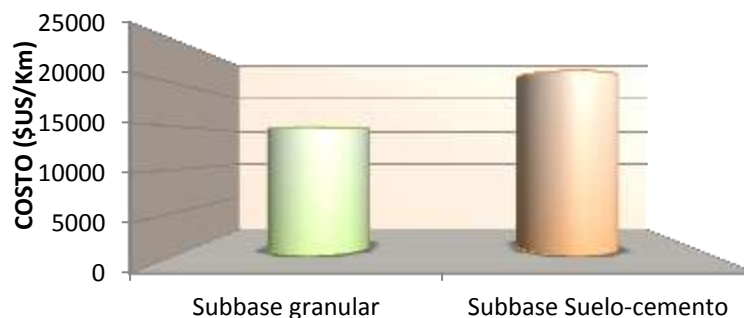
COSTO SUB BASE SUELO-CEMENTO

$$\text{Sub base Suelo – Cemento} = \frac{1400 * 106.57}{1} = \mathbf{149198\text{Bs} = 21436.49\$/\text{Km}}$$

Ver planilla en **ANEXO VI**

Comparación de Costos de una capa Sub base de acuerdo al material a utilizar	
Sub base granular	14911.21\$us/Km
Sub base suelo-cemento	21436.49 \$us/Km

COMPARACIÓN DE COSTOS



El incremento de costo de una sub base suelo-cemento frente a una granular es del 43.76% a un 3% de cemento.

3.5.4.10. COMPARACIÓN DE CARACTERÍSTICAS ENTRE UNA SUB BASE GRANULAR Y SUELO-CEMENTO

Cuadro 3.19: Comparación de características entre una subbase granular y de suelo-cemento

COMPARACIÓN DE CARACTERÍSTICAS DE UNA SUBBASE			
Sub base Granular		Sub base Suelo-Cemento	
Limite Liquido	25% máx.	Índice de Plasticidad	7%
Índice de Plasticidad	6% máx.	Resist. Compresión Simple (28días)	43.9 Kg/cm ²
Desgaste de los Ángeles	40% máx.	Resist. Flexión (28días)	10.84 Kg/cm ²
Contracción Lineal	4% máx.	Durabilidad	6.6%
Equivalente de Arena	25% mín.		
C.B.R	≥ 30		

Fuente: Elaboración propia

En el cuadro anterior se presenta las características correspondientes a cada sub base, no se pueden comparar entre ellas porque cada una tiene que cumplir especificaciones diferentes tal como se muestra en el cuadro.

3.5.4.11. TRATAMIENTO ESTADÍSTICO

MUESTRA 1	% cemento	CBR	R.C.S	R.F	DURABILIDAD
	3	97.7	43.9	10.84	6.66
	5	157.5	67.8	15.69	3.5
	7	215.6	70.11	22.91	2.95
	9	265.4	111.7	25.43	2.03
Media	184.05	73.38	18.72	3.785	
Mediana	186.55	68.96	19.30	3.225	
D. Estándar	72.51	28.16	6.68	2.01	
Varianza	5258.15	793.11	44.62	4.04	
Coeficiente de Variación	0.39	0.38	0.36	0.53	

RESULTADOS DE CBR			
% cemento	MUESTRA 1	MUESTRA 2	MUESTRA 3
3	97.7	76.8	33.2
5	157.5	115.9	48.1
7	215.6	170	97.1
9	265.4	201.2	123.8
Media	184.05	140.975	75.55
Mediana	186.55	142.95	72.6
D. Estándar	72.51	55.43	42.19
Varianza	5258.15	3072.23	1779.83
Coeficiente de Variación	0.39	0.39	0.56

Fuente: Elaboración propia

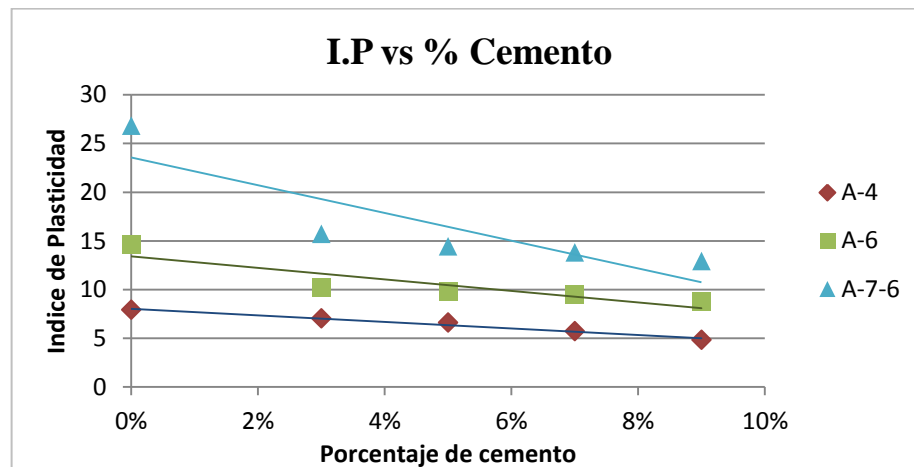
CAPITULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. CONCLUSIONES

- Se completó de manera positiva el objetivo general demostrando que la alternativa suelo-cemento aplicado a un pavimento rígido cumple con especificaciones para una capa sub base en cuanto a sus características físicas y mecánicas.
- En los tres tipos de suelos finos estudiados se puede ver que a medida que se va aumentando el porcentaje de cemento va disminuyendo considerablemente su plasticidad. Entre un 13% hasta un 60%.

Grafica 4.1. Índice de plasticidad vs % de cemento



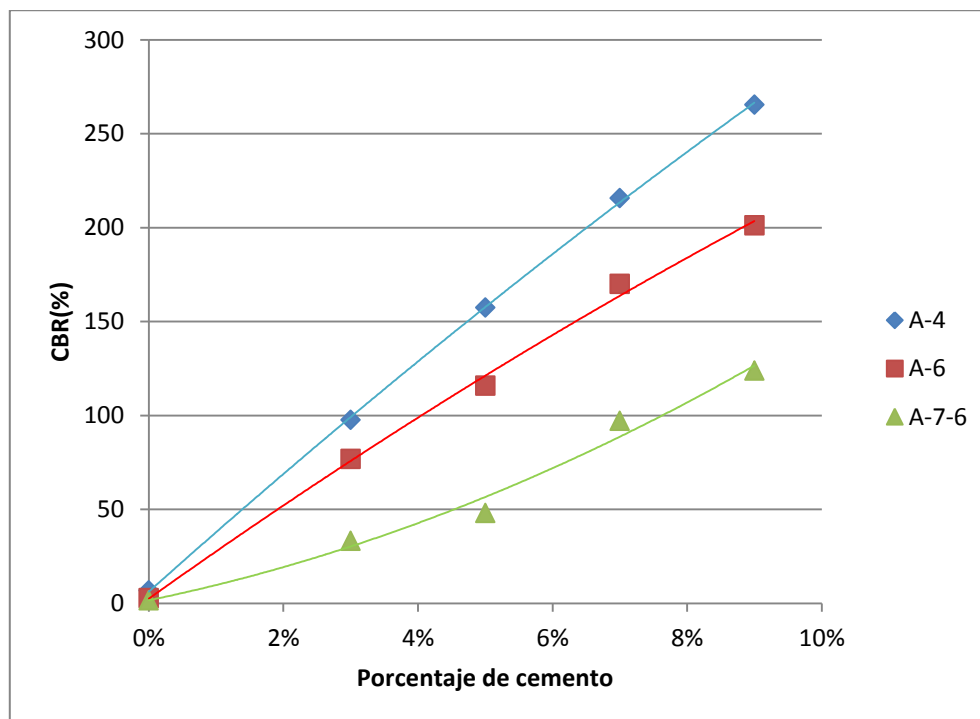
Fuente: Elaboración propia

- En el ensayo de compactación de las mezclas con cemento se observó que a cada porcentaje de cemento la densidad va en aumento esto es justificable por el hecho de que un suelo-cemento se convierte en un suelo aglomerado (masa dura)

lo cual hace que su peso sea mayor, por ende repercute en el ascenso de la densidad.

- En el CBR de cada mezcla es donde se obtienen mayor aumento en relación al suelo natural, en esta prueba el cemento tiene una gran influencia sobre las muestras ensayadas aumentando el valor en gran cantidad, variando el valor de CBR en un 30% por cada 1% de cemento. Por ejemplo las capacidades portantes del suelo A-4 son los valores más elevados, desde un 97 % hasta un 265% de capacidad portante frente a un 6.8% que presenta el suelo natural esto se lo puede observar claramente en la siguiente gráfica.

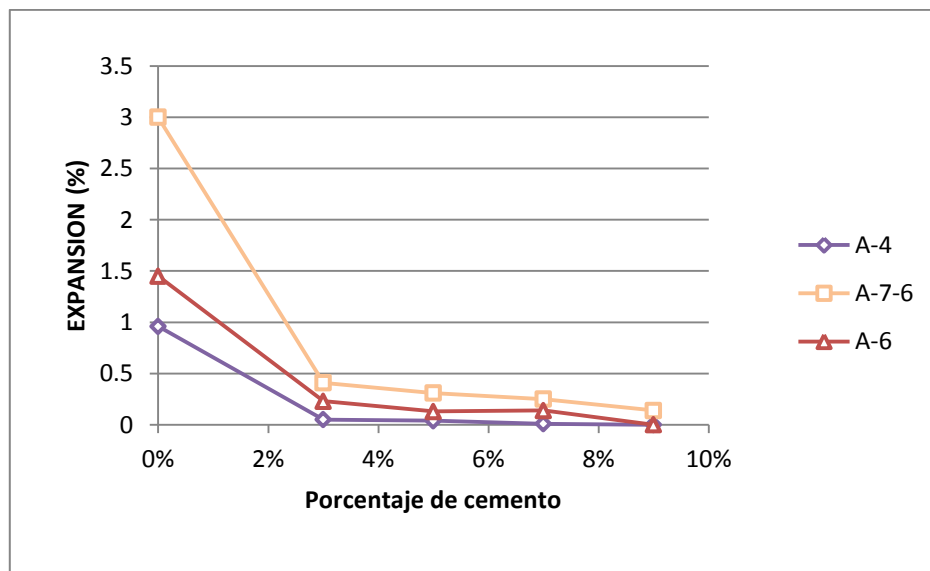
Grafica 4.2. CBR (%) vs % de cemento



Fuente: Elaboración propia

- Los resultados de la expansión nos muestran que los suelos reaccionaron favorablemente a mayor contenido de cemento, reduciéndose incluso a valores de cero, respecto al natural como se puede observar en la gráfica 4.3. El suelo que tiene una importante disminución es el suelo arcilloso de alta plasticidad A-7-6. El porcentaje de reducción en expansión va desde un 11% hasta incluso un 100%. Por lo tanto el método es válido para el mejoramiento de las características estructurales y físicas de los materiales.

Grafica 4.3. Expansión vs % de cemento



Fuente: Elaboración propia

- La práctica de resistencia a compresión elaborada con el suelo A-4 han demostrado que cumplen perfectamente los límites de resistencias establecidas especialmente el valor de 3%. Así también se tienen resistencias altas que sobrepasan los límites normados. El aumento de resistencia de los 7 días a los 28 es el siguiente:

Tabla 4.1: Porcentajes de incremento en la resistencia a Compresión de 7 a 28 días

% cemento	% de incremento en la resistencia de 7 a los 28 días
3%	37
5%	37
7%	38
9%	32

Fuente: Elaboración propia

Por lo que se puede ver la resistencia a compresión simple varía desde un 32% hasta un 38%

- La resistencia a flexión al igual que la compresión cumple los límites normados al 3% de cemento, así también tiene un crecimiento de resistencia de los 7 a los 28 días de :

Tabla 4.2: Porcentaje de incremento de 7,14 Y 28 Días

% cemento	% de incremento en la R.F de 7 a los 28 días
3%	46
5%	61
7%	58
9%	46

Fuente: Elaboración propia

- Los ensayos de durabilidad del suelo A-4 a cada porcentaje de cemento de 3%,5%,7% y 9% nos mostraron que cumplen con los valores normados demostrando así la capacidad de resistencia del suelo-cemento ante los cambios de temperatura en cada ciclo de humedecimiento secado.

- En base a los estudios realizados de resistencia compresión, flexión y humedecimiento secado, se puede considerar que el porcentaje óptimo de cemento para un suelo tipo A-4(7) es un 3%, ya que este porcentaje cumple con todos los límites expuestos por normas y técnicas de estudios sobre el suelo-cemento.
- El efecto estructural provocado por un material suelo-cemento en la losa de concreto, es de 3cm, debido a la alta resistencia que ofrece, logrando de esta manera disminuir el espesor de la losa.
- Por todos los ensayos realizados y los análisis de resultados presentados, podemos ver que los suelos arcillosos de baja plasticidad arenosos, se pueden utilizar en capa sub base de un pavimento rígido ya que se cumple con las exigencias que se tienen tanto en resistencia a compresión simple, resistencia a flexión y durabilidad, debido a que el cemento aumenta en gran cantidad el esfuerzo portante de los suelos a tal punto que los vuelven aptos para su utilización.
- Como conclusión final se puede decir que el comportamiento de un suelo-cemento es totalmente diferente respecto a un suelo natural o granular u otro tipo de material, no existiendo condiciones de especificación para valorar sus resultados de densidad y CBR, por lo tanto lo único con que se valora un suelo-cemento es en base a resistencias de compresión, flexión y durabilidad que llega tener la mezcla.

6.2. RECOMENDACIONES

- Se recomienda para suelos arcillosos de baja plasticidad arenosa, con un PH aproximado de 8.3 utilizar un porcentaje de cemento del 3% para realizar un material suelo-cemento con características de resistencia mecánica y durabilidad a cambios de temperatura.

- En base a todos los estudios realizados sobre la mezcla suelo-cemento, se sugiere que se utilicen los suelos finos naturales de fundación o de cortes que estén catalogados como material que no cumplen con especificaciones, para capas sub bases para evitar explotación de yacimientos y ríos, mitigando así en algo el impacto ambiental.
- Esta alternativa de sub base de suelo-cemento se recomienda para aquellas zonas donde no se cuenta con material granular adecuado para capas sub bases, o que las distancias de acarreo para su obtención sean demasiado largas, en función a esto también se realizó una comparación en costos.
- Tener cuidado en el momento de desmolde de las probetas para la prueba de compresión, debido a que tienden a fisurarse si no se utiliza de manera correcta el aparato para desmoldar. Estas fisuras influyen en la resistencia de la probeta.
- Debido al constante aumento de peso y volumen de los vehículos con una tasa de crecimiento elevada nos hace pensar que el suelo-cemento, en sub bases se convierte en una solución temprana, sobre todo porque ya han demostrado su efectividad en otros países.