

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

En la ingeniería nos encontramos con diferentes problemáticas a las que nos enfrentamos diariamente en especial en el área vial ya que al construir una carretera no se puede garantizar una alta resistencia en el suelo por lo que se deteriora fácilmente en dichos tramos, por lo cual se opta por buscar mejoras para ello y se aplican distintos tipos de mezclas con el suelo ya que este tiene distintas características y propiedades dependiendo a su tipo de clasificación, no cuenta con las mismas propiedades, en este caso nos enfocaremos en lo que es la mezcla de suelos con cemento. Para mejorar las propiedades y características del suelo.

Con el fin de obtener un mejoramiento en las vías terciarias en Tarija en el tramo de Junacas-Santa Rosa de Polla se tiene propuesto realizar mezclas de suelos con cemento para poder obtener propiedades aptas para aplicarlas en este tramo de vía, se realizara una clasificación del suelo del tramo mediante pruebas de laboratorio asimismo también se harán ensayos de laboratorio con el cemento para definir sus propiedades y características para luego realizar una dosificación de mezcla de suelos con cemento de acuerdo a los resultados obtenidos más óptimos, se realizará la aplicación de esta mezcla con los porcentajes de dosificación definidos en el tramo en estudio.

Dentro del departamento de Tarija se cuenta con una variedad de suelos, los cuales por lo general no cuentan con una alta resistencia por lo que se plantea una comparación de la mezcla de suelos en su estado natural y suelos con cemento para aplicar en un tramo de carretera. Este tipo de mezcla es ideal para realizar estos mejoramientos en el tramo que se aplique, sus propiedades permiten tener mayor resistencia a las cargas de tráfico. Aplicando estas mezclas se daría un mejoramiento en las vías terciarias y se da una mejor oportunidad de traslado a los comunarios de la zona hacia la ciudad y mayor seguridad vial evitando las fallas del suelo que puedan presentarse en la carretera.

1.2 Planteamiento del problema

1.2.1 Situación problemática

Dentro de las vías terciarias en el departamento de Tarija son las que unen una red principal o secundaria con una comunidad, por lo general, estas suelen ser de tierra y muchas veces el material es compuesto por arcilla lo cual es desfavorable para el diseño de carreteras ya que presentan una baja resistencia (CBR) lo cual afecta a la estructura de la carretera.

Dentro de la ciudad de Tarija según ensayos realizados en distintos barrios se puede comprobar que los CBR de suelos finos son valores muy bajos y por ello necesitan mejoras como se puede ver en un proyecto de grado ya realizado. (Huallpa Impa, 2021)

Con la evaluación de la subrasante natural se podrá identificar las propiedades del suelo que compone el tramo de investigación, con los cuales se realizará un mejoramiento mediante la combinación de un conglomerante (cemento) para que dicho suelo mejore su resistencia.

Para que considerar el tipo de subrasante medimos el CBR de acuerdo a sus valores obtenidos se puede considerar favorable o desfavorable. Como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 1. 1. Valores de CBR según el tipo de suelo

			Sistema de clasificación	
Nro. CBR	Clasificación general	Usos	Unificado	AASHTO
0-3	Muy Pobre	Sub-rasante	OH,CH,MH,OL	A5,A6, A7
3-7	Muy pobre a regular	Sub-rasante	OH,CH,MH,OL	A4,A5,A6, A7
7-20	Regular	Sub-base	OL,CL,ML,SC,SM,SP	A2,A4,A5,A6, A7
20-50	Bueno	Sub-base y base	GM,GC,SW,SM,SP,GP	A-1b,A2-5,A-3,A2-6
>50	Excelente	Base	GW,GM	A-1a,A2-4,A-3.

Fuente: Manual de laboratorios de suelos de ingeniería civil-Joseph E. Bowles

El tramo que se tomó para aplicar la comparación de mezclas de suelos con cemento para el mejoramiento del tramo Junacas-Santa Rosa de Polla es con el fin de obtener un mejoramiento en la resistencia y vida útil de la carretera ya que se encuentran varias fallas y es necesario tener una carretera que sea transitable en toda época del año para que puedan movilizarse los comunarios de esta zona.

Al no contar con un mejoramiento de carreteras constante en este tramo la misma se va deteriorando y no cuenta con el mantenimiento de manera continua por lo que los comunarios deben encargarse de ello en algunas ocasiones y en la parte económica no está muy disponible por lo cual dejan que esta carretera vaya dando lugar a más fallas y sea en ocasiones intransitable.

El monto económico para realizar el mantenimiento con material granular llamado "ripio" corre por parte de los comunarios de esta zona es elevado por lo que es complicado estar en mutuo acuerdo por el costo que afecta a su economía familiar de distintas maneras. Por ello se propone realizar una mejora con este tipo de mezclas con cemento para que el manteniendo no sea constante y cuente con una mayor rigidez en épocas de precipitaciones y a la vez cuidar la economía y el estado de la carretera a largo plazo para mejorar la libre transitabilidad de los comunarios de la zona hacia la ciudad con su producción y en caso de abastecimiento necesario.

1.2.2 Problema

¿Cuál es la proporción de mezcla suelo-cemento que mejorara la resistencia del suelo natural de la carretera en el tramo Junacas-Santa Rosa de Polla?

1.3 Justificación

Al realizar esta investigación referente a la comparación del suelo en su estado actual con el tipo de mezcla de suelo con cemento aplicado en vías terciarias del departamento de Tarija en el tramo de Junacas-Santa Rosa de Polla, es de mucha importancia en su aplicación debido a las siguientes principales razones:

La necesidad de mejorar las condiciones de este tramo de carretera ya que se encuentra con varias fallas dado que no cuenta con mantenimiento y con ninguna mejora por ningún tipo de mezcla además del material granular llamado ripio.

No cuenta con alguna mezcla que ayude a mejorar la resistencia del suelo y su vida útil de este tramo dado que su mantenimiento es precario.

Al realizar la comparación de los resultados de los ensayos de mezclas de suelo con cemento se podrá tener mayor conocimiento sobre sus resistencias que se logre a lo largo del tramo mediante ello obtener un porcentaje óptimo de cemento, probando distintos porcentajes de cemento, para poder adicionar a la mezcla con el fin de mejorar sus propiedades físicas y mecánicas del suelo en su estado natural sometido a investigación para aplicar esta mezcla.

Colaborar a las comunidades que se encuentran dentro de este tramo principalmente en el tiempo donde existe un alto nivel de precipitaciones y la carretera sufre deterioros, con la aplicación de estas mezclas (porcentaje óptimo de cemento) se podrá mejorar este tramo de carretera para garantizar el mejor acceso vial para la libre transitabilidad hacia la ciudad con sus diferentes productos agrícolas y ganaderos.

En la parte económica resulta beneficioso ya que este tipo de mezclas de suelo con cemento, resultan más económicas que otro tipo de mezclas, y de igual forma cumplen su función de mejorar las propiedades del suelo obteniendo una mejor resistencia. Dando así mayor vida útil a la carretera en donde se aplica esta mezcla así evitando el constante mantenimiento en la carretera.

En el área social también beneficia ya que al contar con un mejoramiento en las carreteras permite que haya una mejor transitabilidad entre una comunidad y otra y puedan tener una relación más estrecha entre sí.

En el ámbito académico implementar este tipo de estudios a mezclas de suelo- cemento para tener mayor conocimiento y poderlas aplicar en vías terciarias no solamente dentro del departamento si no a nivel nacional teniendo en cuenta los estudios que sean necesarios para ello.

1.4 Objetivos de la investigación

1.4.1 Objetivo general

Comparar la mezcla de suelos con cemento a diferentes porcentajes de cemento para obtener el mejoramiento de la resistencia del suelo aplicado al tramo JUNACAS-SANTA

ROSA DE POLLA. Con su porcentaje optimo de cemento lograr una mayor resistencia del suelo en su estado natural

1.4.2 Objetivos específicos

- Caracterizar el suelo en el tramo JUNACAS- SANTA ROSA DE POLLA
- Verificar las propiedades del cemento a utilizar según su ficha técnica.
- Realizar las dosificaciones para las mezclas de suelo con diferentes porcentajes de cemento para el tramo en estudio.
- Determinar las propiedades de las mezclas de suelos con cemento del tramo en estudio
- Efectuar un análisis de resultados y comparar las mejores opciones a aplicar en dicho tramo.
- Elaborar precios unitarios de acuerdo al porcentaje de cemento a utilizar

1.5 Hipótesis

Si, al realizar la mezcla adecuada de suelos en su estado natural con un porcentaje ideal de cemento, se podrá establecer un incremento de la resistencia del suelo dentro del tramo JUNACAS-SANTA ROSA DE POLLA.

1.6 Definición de variables independientes y dependientes

De acuerdo con el diseño de investigación seleccionado para comprobar las Hipótesis planteadas, las variables a medir deberán clasificarse desde el punto de vista metodológico. Para fines prácticos, en términos generales, existen cuatro tipos de variables: dependiente, independiente, de confusión y universal. Pero en esta ocasión solo se mencionarán las variables dependientes e independientes.

1.6.1 Variable independiente

Las variables independientes, no son manipulables por el investigador y, se busca en la observación, para después hacer el análisis. Se deben considerar cuando se pretende determinar la relación entre al menos dos variables: la independiente y la dependiente.

- Mezclas de suelo con cemento a diferentes porcentajes

1.6.2 Variable dependiente

La variable dependiente, es aquella cuya variación en su valor viene motivada por fluctuaciones en las variables independientes. La variable dependiente, es en torno a la cual gira la investigación, buscándose determinar cómo impactan en ella las variables dependientes o explicativas.

- CBR

Tabla 1. 2. Cuadro de operacionalización

Variable Independiente	Concepto	Medición	Unidad
Mezclas de suelo y cemento a diferentes porcentajes.	Es una mezcla para el mejorar la resistencia del suelo en una carretera.	Se medirá la resistencia de la mezcla.	Kg/cm ²
Variable Dependiente	Concepto	Medición	Unidad
CBR	Es un parámetro del suelo que cuantifica su capacidad resistente como subrasante, sub base y base en el diseño de pavimentos.	Se mide por medio de ensayos de carga y deformación en una prensa hidráulica	%

Fuente: Elaboración propia

1.7 Diseño metodológico

El diseño metodológico es un esquema en el que se organizan e incluyen las variables a ser abordadas y los procedimientos para desarrollar la investigación.

1.7.1 Unidad

La unidad de estudio de esta investigación es la resistencia que se llega a obtener al mezclar el suelo natural el cemento, determinando un porcentaje óptimo de cemento por medio del cálculo.

1.7.2 Población

En la población tenemos las diferentes mezclas de suelo con cemento.

1.7.3 Muestra

La muestra que se tiene es el mejoramiento del tramo de vía de 5 kilómetros en Junacas-Santa Rosa de Polla con una mezcla de suelo con cemento, que se encuentra en el departamento de Tarija- Provincia Cercado.

1.7.4 Muestreo

Tomando en cuenta los parámetros estadísticos se basó en los métodos de muestreo aleatorio estratificado y muestreo aleatorio intencional. Para la clasificación de suelo más desfavorable. En el muestreo aleatorio intencional se tomó varias muestras de suelo de la subrasante del tramo de investigación que abarca estas dos comunidades, se está tomando una distancia de 5 kilómetros, del cual se obtuvo muestras de 70 kilogramos cada 500 metros ya sea de la parte izquierda derecha de manera intencional para no causar daños a la carretera y tener mayor facilidad al obtener las muestras. Con estas muestras se procedió a realizar la caracterización del suelo.

En el muestreo aleatorio estratificado de las muestras tomadas para su estudio se clasificó el suelo y los que contaban con las mismas propiedades agruparlos en unidades de estudio del mismo tipo de suelo. De cada punto del muestreo se hizo el análisis granulométrico y los límites de consistencia del suelo para obtener su clasificación según AASHTO. En cada punto se hizo tres ensayos en laboratorio para mayor seguridad y precisión en los resultados.

En cuanto al cemento se obtiene una bolsa de cemento FANCESA IP-40, se realiza la caracterización respectiva para verificar que se cumpla con sus especificaciones técnicas de fabricación.

Una vez obtenida la caracterización de los materiales se realizan ensayos de CBR con suelo natural y con suelo-cemento con diferentes porcentajes de cemento para obtener el porcentaje óptimo. Con el porcentaje óptimo obtenido se realiza 30 moldes de CBR para obtener sus resistencias.

1.8 Métodos y técnicas empleadas

Se toma en cuenta que método y técnica se usara para realizar dicha investigación.

1.8.1 Selección de métodos y técnicas.

El método inductivo es una forma de razonamiento para llegar a conclusiones que va desde lo más específico hasta lo más general. Comienza con unas observaciones y medidas específicas para llegar a unas conclusiones generales.

Para llegar a una conclusión por medio de este método hay que seguir los siguientes pasos:

- Observar hechos y registrar como conocimiento previo.
- Captar/ observar un patrón.
- Desarrollar una teoría

En este método de razonamiento es importante que los hechos examinados sean lógicos para que las ideas expuestas tengan coherencia.

Se debe destacar que las teorías inducidas pueden estar incompletas o erradas, por lo que se centran únicamente en algunos sucesos y no abarcan toda la realidad de los hechos.

En esta investigación se usará la metodología inductiva al estudiar las mezclas de suelo con cemento cuando se dosifique en porcentajes del 0%, 2%, 3%, 4% 6% 9% para obtener mediante ensayos el porcentaje de cemento óptimo para aplicar a la dosificación de la mezcla. Después de tener estas dosificaciones con el porcentaje optimo se realizará pruebas de resistencia mediante la prensa de CBR.

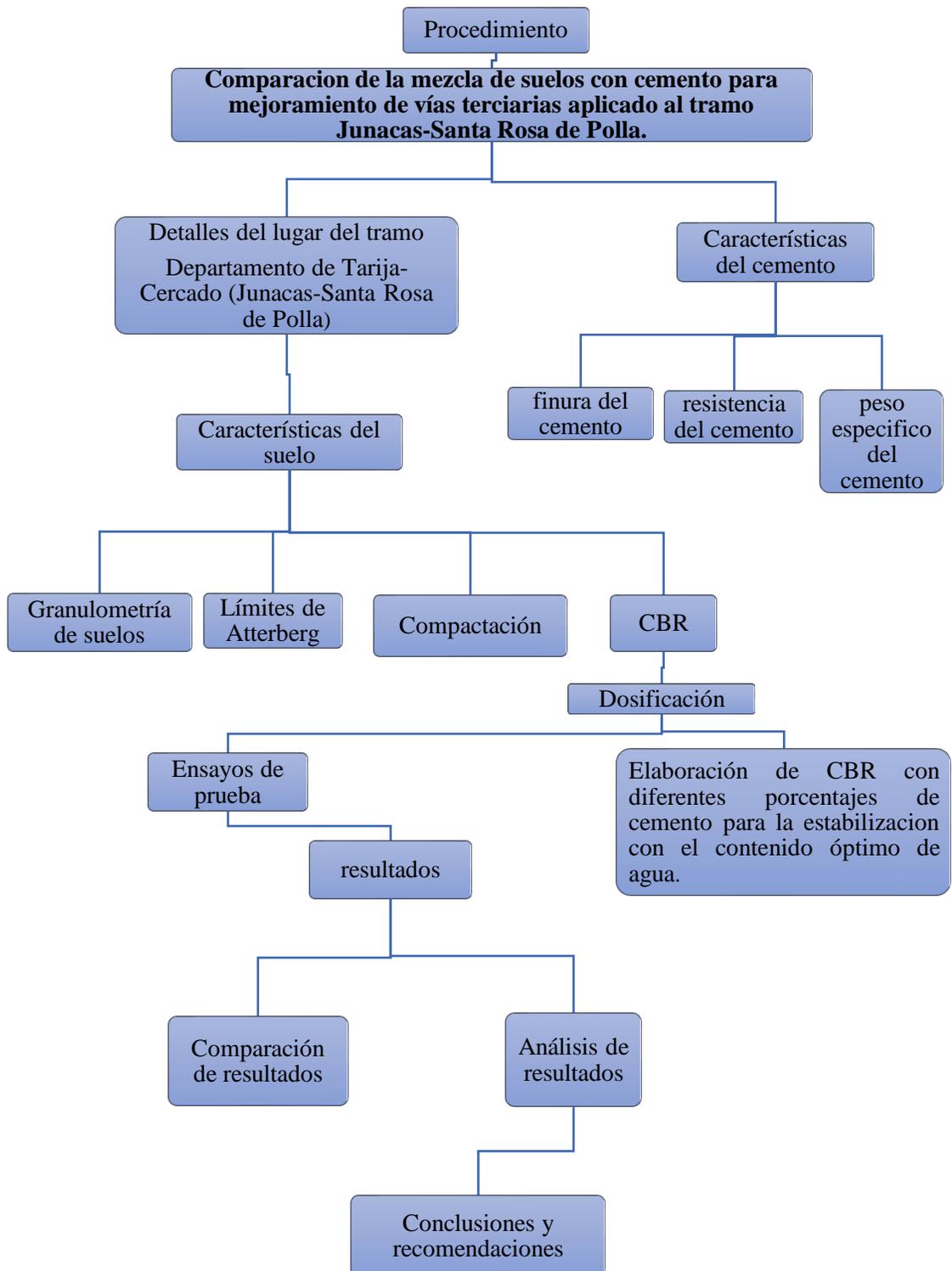
Una vez obtenidos los resultados se realizará un análisis de estos y se llegara a una conclusión para probar si es factible o no mejorar las propiedades del suelo con cemento.

1.8.2 Técnicas empleadas

La técnica de muestreo utilizada en esta investigación es experimental, se realizaron ensayos para caracterizar el suelo y el cemento. También se realizaron ensayos de CBR con suelo natural y con cemento para obtener el porcentaje óptimo.

1.9 Proceso de aplicación

Gráfico 1.1. Procedimiento de aplicación.



Fuente: Elaboración propia

1.10 Alcance

El alcance de esta investigación es obtener un porcentaje óptimo de mezcla que pueda lograr el mejoramiento del suelo natural, comparando las mezclas de suelo con cemento a diferentes porcentajes para obtener las características de resistencia tanto en el suelo natural como en las mezclas de suelo cemento.

Se realiza un muestreo aleatorio estratificado de las muestras tomadas para su estudio de caracterización del suelo, para ello se procede a agruparlos en unidades de estudio del mismo tipo de suelo. De cada punto del muestreo se hizo el análisis granulométrico y los límites de consistencia del suelo para obtener su clasificación según AASHTO. En cada punto se hizo tres ensayos en laboratorio para tener una mayor seguridad y precisión en los resultados.

En cuanto al cemento se obtiene una bolsa de cemento FANCESA IP-40, se realiza la caracterización respectiva para verificar que se cumpla con sus especificaciones técnicas de fabricación.

Una vez obtenida la caracterización de los materiales se realizan ensayos de CBR con suelo natural y diferentes porcentajes de cemento (0%, 2%,3%, 4%, 6% y 9%) para obtener el porcentaje óptimo para aplicar a la dosificación de la mezcla. Con el porcentaje optimo obtenido se realiza 30 moldes de CBR para obtener sus resistencias en cuanto mejoran con respecto al suelo natural.

Una vez obtenidos los resultados se realizará un análisis de estos y se llegara a una conclusión para probar si es factible o no mejorar las propiedades del suelo con cemento.

CAPITULO II

COMPARACIÓN DE LA MEZCLA DE SUELOS CON CEMENTO PARA EL MEJORAMIENTO DE VÍAS TERCIARIAS

CAPITULO II

COMPARACIÓN DE LA MEZCLA DE SUELOS CON CEMENTO PARA EL MEJORAMIENTO DE VÍAS TERCARIAS

2.1 Definición de suelo

El suelo es el material suelto y terroso, compuesto por piedras, gravas, arenas, arcilla, turba vegetal, que pueden presentarse solos o combinados entre algunos o entre todos.

El suelo es el material de construcción más abundante dentro de las prácticas de la ingeniería Civil, además se utiliza como el material de terraplenes viales. (Braja, 2015)

Los suelos se forman por la destrucción de la roca y la acumulación de materiales distintos a lo largo de los siglos, en un proceso que involucra numerosas variantes físicas, químicas y biológicas, que da como resultado una disposición en capas bien diferenciadas, como las de un pastel, observables en los puntos de falla o fractura de la corteza terrestre. (concepto, 2023)

Para el ingeniero el concepto de "suelo" está relacionado con la obra que pueda hacer sobre él, con el o en él. (Whitlow, 1999)

Figura 2. 1. Suelo



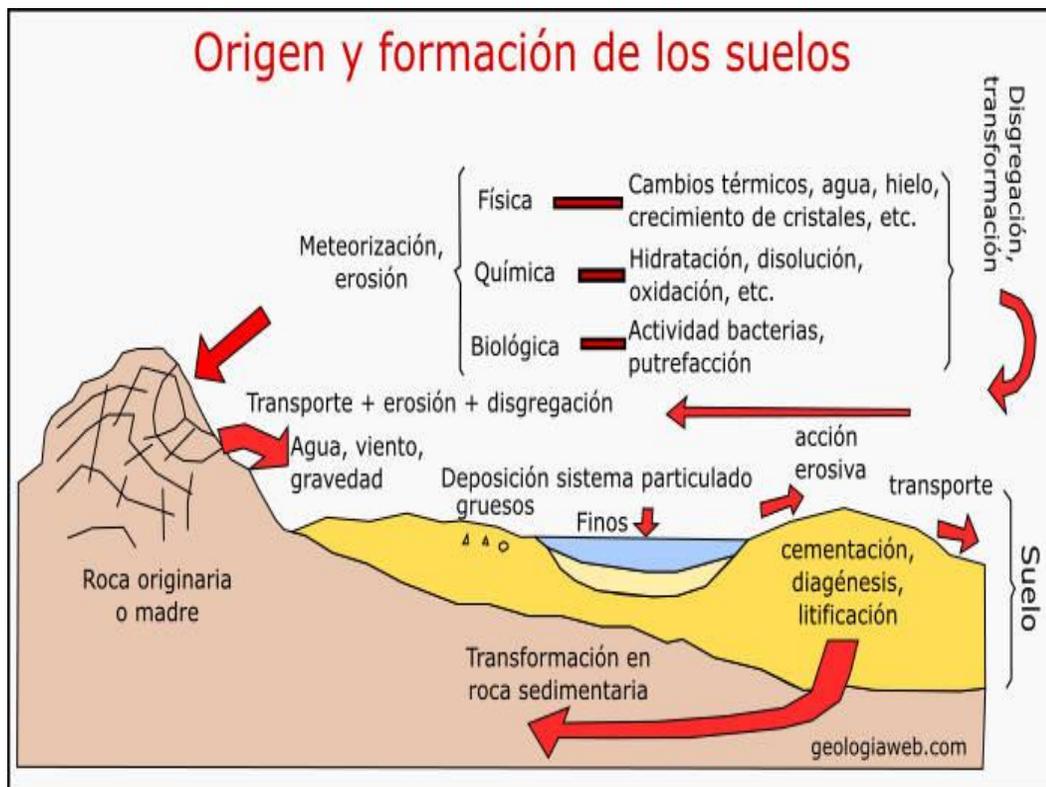
Fuente: Elaboración propia

2.2 Depósitos de suelo natural

Al estar una roca expuesta al intemperismo, afectado por agentes atmosféricos como ser el viento, lluvia, heladas, calentamientos y otros; comienza un proceso de transformación y desintegración, esta puede ser de las dos formas. Desintegración mecánica y desintegración química; la primera referida a un quebramiento continuo de las rocas y la segunda a una desintegración consecuencia de la reacción química de los minerales que constituyen la roca con otros elementos como por ejemplo el agua, sulfatos, etc.

Así mismo, la desintegración mecánica de las rocas, originan materiales como ser: gravas, arenas y limos; la desintegración química va más allá, pues de esta forma las arcillas de características plásticas. (Braja, 2015)

Figura 2. 2. Desintegración mecánica y química del suelo



Fuente: geologiaweb (2018)

2.3 Tamaño de partícula del suelo

Independientemente de su origen, los tamaños de partículas que conforman el suelo pueden variar en un amplio intervalo. Los suelos son generalmente llamados grava, arena,

limo o arcilla, dependiendo del tamaño predominante de las partículas dentro del suelo. Para describir los suelos por su tamaño de partícula, varias organizaciones han desarrollado límites de separación de tamaño de suelo.

La tabla 2.1 muestra los límites de separación de tamaño de suelo desarrollados por el Instituto de Tecnología de Massachusetts, el Departamento de Agricultura de E.U., la Asociación Americana de Carreteras Estatales y Oficiales del Transporte, el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de E. U. y la Oficina de Reclamación de E.U. En esta tabla el sistema del MIT se presenta sólo a modo de ejemplo, ya que juega un papel importante en la historia del desarrollo de los límites de separación de tamaño de suelo. Sin embargo, en la actualidad el Sistema Unificado es casi universalmente aceptado y ha sido adoptado por la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales. (Braja, 2015)

Tabla 2.1. Límites de tamaño de suelos separados

Nombre de la Organización	Tamaño de grano (mm)			
	Grava	Arena	Limo	Arcilla
Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT)	>2	2 a 0,06	0.06 a 0,002	<0.002
Departamento de Agricultura de E. U. (USDA)	>2	2 a 0,05	0,05 a 0,002	<0,002
Asociación Americana de Carreteras Estatales y Oficiales del Transporte (AASHTO)	76,2 a 2	2 a 0,075	0,075 a 0,002	<0,002
Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (cuerpo de ingenieros del Ejército de E.U., Oficina de Reclamación de E. U., Sociedad Americana para Pruebas y Materiales)	76,2 a 4,75	4,75 a 0,075	Finos (por ej...limos y arcillas) <0,075	

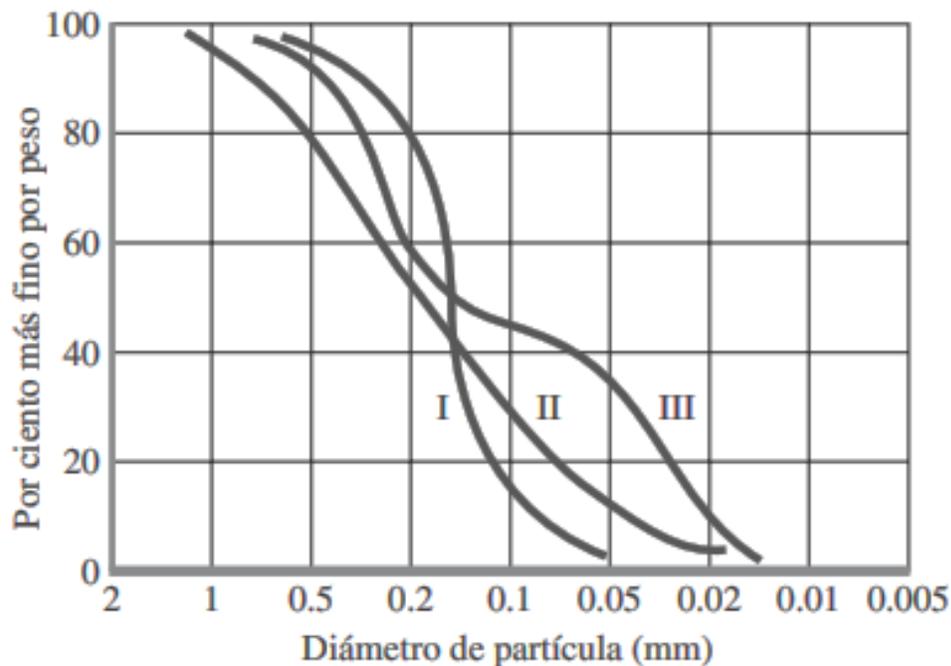
Fuente: Fundamentos de Ingeniería Geotécnica (Braja M. Das) (2015)

2.4 Curva de distribución granulométrica

Los resultados del análisis mecánico se presentan generalmente en gráficas semilogarítmicas como curvas de distribución granulométrica (o de tamaño de grano). Los

diámetros de las partículas se grafican en escala logarítmica y el porcentaje correspondiente de finos en escala aritmética.

Figura 2.3. Curva de Distribución Granulométrica



Fuente: Fundamentos de Ingeniería Geotécnica (Braja M. Das) (2015)

En la figura 2.3 se muestran tres curvas:

La curva I representa un tipo de suelo en el que la mayoría de los granos son del mismo tamaño. A esto se le denomina suelo pobremente clasificado.

La curva II representa un suelo en el que el tamaño de las partículas está distribuido en un amplio rango, este tipo de suelo se denomina bien clasificado.

La curva III representa tal suelo que se denomina brecha clasificada.

2.5 Consistencia del suelo

La consistencia de un suelo varía con la humedad, a principios de 1900, un científico sueco, Albert Mauritz Atterberg, desarrolló un método para describir la consistencia de los suelos de grano fino con contenidos de agua variable, definió los estados de consistencia de un suelo, observando que el mismo tiene desde un grado de saturación hasta un grado seco tiene los siguientes estados.

2.5.1 Límite líquido (LL)

El límite líquido (LL) se define como el contenido de agua en el que el comportamiento de un suelo arcilloso cambia del estado plástico al estado líquido. Sin embargo, la transición del comportamiento plástico al líquido es gradual en un rango de contenido de agua, y la resistencia al cizallamiento del suelo no es realmente cero en el límite líquido. (Geotechnical, 2023).

Figura 2. 4. Ensayo de limite liquido



Fuente: Elaboración propia

2.5.2 Limite plástico (LP)

El límite plástico se define como el contenido de agua, en porcentaje, con el cual el suelo, al ser enrollado en rollitos de 3.2 mm de diámetro, se desmorona. El límite plástico es el límite inferior de la etapa plástica del suelo.

La prueba es simple y se lleva a cabo enrollando repetidamente a mano sobre una placa de vidrio una masa de suelo de forma elipsoidal.

El índice de plasticidad (PI) es la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico de un suelo.

Figura 2. 5. Elaboración de Limite Plástico



Fuente: Elaboración propia

2.6 Compactación de suelos

La compactación aumenta las características de resistencia de los suelos, incrementando de este modo la capacidad de carga de las cimentaciones construidas sobre ellos. La compactación también disminuye la cantidad de solución no deseada de las estructuras y aumenta la estabilidad de los taludes de los terraplenes. En el proceso de la compactación del suelo generalmente se utilizan rodillos de ruedas lisas, rodillos compactadores de suelo, rodillos neumáticos de goma y rodillos vibratorios. (Braja, 2015)

Figura 2. 6. Equipo de compactación en carreteras



Fuente: Cueva del ingeniero civil (2012)

2.6.1 Principio de compactación

La compactación es la consolidación del suelo por la eliminación de aire, lo que requiere energía mecánica.

El grado de compactación de un suelo se mide en términos de su peso unitario seco. Cuando se añade agua a la tierra durante la compactación, ésta actúa como agente suavizante sobre las partículas del suelo. Éstas se deslizan una sobre la otra y se mueven en una posición densamente empaquetadas.

El peso unitario seco después de la compactación primero aumenta a medida que se incrementa el contenido de humedad (figura 2.7).

Tenga en cuenta que en un contenido de humedad $w = 0$, la unidad de peso húmedo (γ) es igual a la unidad de peso seco (γ_d), o $\gamma = \gamma_d(w = 0) = \gamma_1$.

Cuando el contenido de humedad se aumenta gradualmente y el mismo esfuerzo compactador se utiliza para la compactación, el peso de los sólidos del suelo en una unidad de volumen aumenta gradualmente.

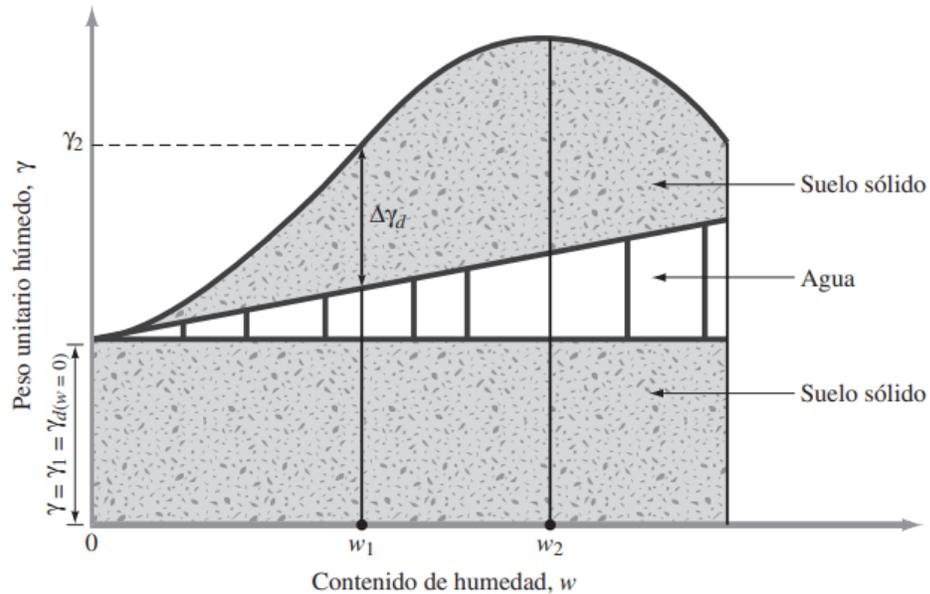
Por ejemplo, con $w = w_1$, el peso unitario húmedo es igual a $\gamma = \gamma_2$.

Más allá de cierto contenido de humedad $w = w_2$ (figura 2.7), cualquier aumento en éste tiende a reducir el peso unitario seco. Esto es debido a que el agua llena los espacios que han sido ocupados por las partículas sólidas.

El contenido de humedad en el que se alcanza el peso unitario seco máximo generalmente se denomina contenido de humedad óptimo. (Braja, 2015)

La prueba de laboratorio utilizada generalmente para obtener el peso unitario seco máximo de compactación y el contenido óptimo de humedad se denomina prueba Proctor de compactación (Proctor, 1933)

Figura 2. 7. Principios de compactación



Fuente: Fundamentos de Ingeniería Geotécnica (Braja M. Das) (2015)

2.6.2 Prueba Proctor modificada

Con el desarrollo de rodillos pesados y su uso en la compactación en campo, la prueba Proctor estándar fue modificada para representar mejor las condiciones de campo. Esto se refiere a veces como la prueba Proctor modificada (Norma ASTM D-1557 y Norma AASHTO T 180).

Para la realización de la prueba Proctor modificada se utiliza el mismo molde, con un volumen de 943.3 cm^3 , como en el caso de la prueba Proctor estándar. Sin embargo, el suelo es compactado en cinco capas por un martillo que pesa 44.5 N (masa = 4.536 kg) y tiene una caída de 457.2 mm . Las especificaciones dadas para las pruebas Proctor adoptadas por ASTM y AASHTO sobre el volumen del molde (943.3 cm^3) y el número de golpes (25 golpes/ capa) son generalmente las adoptadas. Para los suelos de grano fino que pasan el tamiz núm. 4.

Sin embargo, en cada designación de prueba los tres diferentes métodos sugeridos reflejan el tamaño del molde, el número de golpes por capa y el tamaño máximo de las partículas en un agregado de suelo usado para la prueba. (Braja, 2015)

Un resumen de los métodos de prueba se da en la tabla 2.2

Tabla 2.2. Especificaciones de la prueba Proctor (Norma ASTM Prueba 1577)

Elemento	Método A	Método B	Método C
Diámetro del molde	101,6 mm	101,6 mm	152,4 mm
Volumen del molde	943,3 cm ³	943,3 cm ³	2124 cm ³
Peso del martillo	44,5 N	44,5 N	44,5 N
Altura de la caída del martillo	457,20 mm	457,20 mm	457,2 mm
Numero de golpes del martillo por capa de suelo	25	25	56
Numero de capas de compactación	5	5	5
Energía de compactación	2696 kN-m/m ³	2696 kN-m/m ³	2696 kN-m/m ³
Suelo utilizado	Porción que pasa el tamiz núm. 4 (4,57 mm). Puede ser utilizada si 20% o menos del peso del material es retenido en el tamiz núm. 4	Porción que pasa el tamiz de 9,5 mm. Puede utilizarse si el suelo retenido en el tamiz núm. 4 es más de 20% y 20% menos del peso del material es retenido en el tamiz de 9,5 mm.	Porción que pasa el tamiz de 19 mm. Puede utilizarse si más de 20% del material retenido en el tamiz de 9,5 mm y menos del 30% del peso es retenido en el tamiz de 19 mm.

Fuente: Fundamentos de Ingeniería Geotécnica (Braja M. Das) (2015)

Figura 2. 8. Martillos utilizados en las pruebas Proctor estándar y modificada



Fuente: Fundamentos de Ingeniería Geotécnica (2015) (cortesía de ELE international)

2.7 Clasificación de suelo según AASHTO

El Sistema de Clasificación AASHTO actualmente en uso, se muestra en la tabla 2.3. De acuerdo con este sistema, el suelo se clasifica en siete grupos mayores: A-1 al A-7.

Los suelos clasificados en los grupos A-1, A-2 y A-3 son materiales granulares, donde 35% o menos de las partículas pasan por la criba No. 200. Los suelos de los que más del 35% pasan por la criba N°. 200 son clasificados en los grupos A-4, A-5, A-6 Y A-7.

Para clasificar un suelo de acuerdo con la tabla 2.3 los datos de prueba se aplican de izquierda a derecha. Por un proceso de eliminación, el primer grupo desde la izquierda en el que los datos de prueba se ajusten, es la clasificación correcta.

Para la evaluación de la calidad de un suelo como material para subrasante de carreteras, se incorpora también un número llamado índice de grupo (GI) junto con los grupos y subgrupos del suelo. Este número se escribe en paréntesis después de la designación de grupo o de subgrupo. En general, la calidad del comportamiento de un suelo como material para subrasantes es inversamente proporcional al índice de grupo. (Braja, 2015)

Tabla 2.3. Clasificación de materiales para subrasantes de carreteras

Clasificación general	Materiales granulares (35% o menos de la muestra que pasa la malla No. 200)						
	A-1			A-2			
Clasificación de grupo	A-1-a	A-1-b	A-3	A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7
Análisis por cribado (porcentaje que pasa las mallas)							
No. 10	50 máx.						
No. 40	30 máx.	50 máx.	51 mín.				
No. 200	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.
Características de la fracción que pasa la malla No. 40							
Límite líquido				40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.
Índice de plasticidad	6 máx.		NP	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.
Tipos usuales de materiales componentes significativos							
	Fragmentos de piedra grava y arena		Arena fina	Grava y arena limosa o arcillosa			
Tasa general de los subrasantes				De excelente a bueno			
Clasificación general	Materiales limo-arcilla (más del 35% de la muestra que pasa la malla No. 200)						
	A-4		A-5	A-6	A-7 A-7-5* A-7-6†		
Análisis por cribado (porcentaje que pasa por las mallas)							
No. 10							
No. 40							
No. 200	36 mín.		36 mín.	36 mín.	36 mín.		
Características de la fracción que pasa por la malla No. 40							
Límite líquido	40 máx.		41 mín.	40 máx.	41 mín.		
Índice de plasticidad	10 máx.		10 máx.	11 mín.	11 mín.		
Tipos usuales de materiales componentes significativos							
	Suelos limosos			Suelos arcillosos			
Tasa general de los sobrantes			De mediano a pobre				
*Para A-7-5, $PI \leq LL - 30$							
†Para A-7-6, $PI > LL - 30$							

Fuente: Fundamentos de Ingeniería Geotécnica (Braja M. Das). (2015)

2.8 CBR (California Bearing Ratio)

El ensayo de relación de soporte de California se desarrolló por parte de la División de Carreteras de California en 1929 como una forma de clasificación de la capacidad de un suelo para ser utilizado como Sub-rasante o material de base en construcción de carreteras. Durante la segunda guerra mundial, el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos adoptó este ensayo para utilizarlo en la construcción de aeropuertos. El ensayo CBR (la ASTM denomina el ensayo simplemente un ensayo de relación de soporte) mide la resistencia al corte de un suelo bajo condiciones de humedad y densidad controladas. El ensayo permite obtener un número de la relación de soporte, pero de la aseveración anterior es evidente que este número no es constante para un suelo dado, sino que se aplica solo al estado en el cual se encontraba el suelo durante el ensayo. De paso, es interesante comentar que el experimento puede hacerse en el terreno o en un suelo compactado, pero este aspecto se encuentra fuera del objetivo del presente manual de laboratorio.

El número CBR (o simplemente, CBR) se obtiene como la relación de la carga unitaria (en libras por pulgada cuadrada) necesaria para lograr una cierta profundidad de penetración del pistón de penetración (con un área de 19.4 cm²) dentro de la muestra compactada de suelo a un contenido de humedad y densidad dadas con respecto a la carga unitaria patrón requerida para obtener la misma profundidad de penetración en una muestra estándar de material triturado. En forma de ecuación esto es:

$$\text{CBR} = \frac{\text{carga unitaria del ensayo}}{\text{carga unitaria patrón}} * 100\%$$

De esta ecuación se puede ver que el número CBR es un porcentaje de la carga unitaria patrón. En la práctica, el símbolo de porcentaje se quita y la relación se presenta simplemente por el número entero, como 3, 45, 98. (Bowles, 1981)

La prueba CBR de suelos consiste básicamente en compactar un terreno en unos moldes normalizados, sumergirlos en agua y aplicar un punzonamiento sobre la superficie del terreno mediante un pistón normalizado. Con este método se puede medir la resistencia al corte de un suelo bajo condiciones de humedad y densidad controlada. (Geotecnia, s.f.)

El número CBR usualmente se basa en la relación de carga para una penetración de 2.5 mm. Sin embargo, si el valor de CBR a una penetración de 5.0 mm es mayor, el ensayo

debería repetirse (ordinariamente). Si un segundo ensayo produce nuevamente un valor de CBR mayor de 5.0 mm de penetración, dicho valor debe aceptarse como valor final del ensayo.

El valor de CBR se utiliza para establecer una relación entre el comportamiento de los suelos principalmente con fines de utilización con base y Sub-rasante bajo pavimentos de carreteras y aeropistas. La siguiente tabla da calificaciones típicas. (Bowles, 1981)

Tabla 2.4. Valores de CBR según el tipo de suelo

			Sistema de clasificación	
Nro. CBR	Clasificación general	Usos	Unificado	AASHTO
0-3	Muy Pobre	Sub-rasante	OH,CH,MH,OL	A5,A6, A7
3-7	Muy pobre a regular	Sub-rasante	OH,CH,MH,OL	A4,A5,A6, A7
7-20	Regular	Sub-base	OL,CL,ML,SC,SM,SP	A2,A4,A5,A6, A7
20-50	Bueno	Sub-base y base	GM,GC,SW,SM,SP,GP	A-1b,A2-5,A-3,A2-6
>50	Excelente	Base	GW, GM	A-1a,A2-4,A-3.

Fuente: Manual de laboratorios de suelos de ingeniería civil- (Bowles, 1981)

Según la norma ASTM 1883 y según esto el CBR es un ensayo de carga que usa un pistón metálico, de 0.5 pulgadas cuadradas de área, para penetrar desde la superficie de un suelo compactado en un molde metálico a una velocidad constante de penetración. Se define CBR, el parámetro del ensayo, como la relación entre la carga unitaria en el pistón requerida para penetrar 0.1” (2.5 cm) y 0.2” (5 cm) en el suelo ensayado, y la carga unitaria requerida para penetrar la misma cantidad en una piedra picada bien gradada estándar; esta relación se expresa en porcentaje.

Los valores de CBR cercanos a 0% representa a suelos de pobre calidad, mientras que los más cercanos a 100% son indicativos de la mejor calidad. (Sanchez Leal, 2018)

Figura 2. 9. Moldes de ensayos de CBR



Fuente: Elaboración propia

Figura 2. 10. CBR sumergido en el agua y sobrecargas que se utilizan



Fuente: Elaboración propia

2.8.1 Limitaciones del ensayo

La siguiente es una lista no exhaustiva de limitaciones que tiene el CBR y que suscitan la mayoría de las críticas a este ensayo:

El valor de CBR no comporta, pero es un parámetro geomecánico, aunque está asociado a múltiples correlaciones y métodos semiempíricos de diseño de pavimentos.

Durante el ensayo bajo condición de 4 días de inmersión no es posible controlar el grado de saturación del suelo. El espécimen es sacado del agua y dejado escurrir por 15 minutos antes de ser ensayado. Este escurrimiento incrementa la succión en el suelo de forma descontrolada, lo que da lugar a resultados sesgados.

La gráfica densidad versus CBR recomendada en el procedimiento ASTM para obtener el CBR de diseño del suelo no es, por definición, una curva de diseño. Por tanto, en el sentido estricto, no debería ser usada para diseñar el suelo compactado. De hacerse se obtendrían resultados sesgados ya que no hay forma de asegurar que todos los especímenes pertenecientes a la gráfica tienen el mismo grado de saturación. (Sanchez Leal, 2018)

Figura 2. 11. Obtención de valores de carga y deformación en la prensa CBR



Fuente: Elaboración propia

2.9 Clasificación de carreteras

Las carreteras constituyen un aspecto fundamental en el desarrollo de un país, ya que por medio de estas se busca solventar la necesidad de movilizarse de un lugar a otro, lo cual facilita la interacción de las comunidades rurales y urbanas, permitiendo el intercambio de bienes y servicios. Según su funcionalidad se clasifican en:

2.9.1 Primarias

Las carreteras constituyen un aspecto fundamental en el desarrollo de un país, ya que por medio de estas se busca solventar la necesidad de movilizarse de un lugar a otro, lo cual facilita la interacción de las comunidades rurales y urbanas, permitiendo el intercambio de bienes y servicios.

2.9.2 Secundarias

Son aquellas vías que unen las cabeceras municipales entre sí y/o que provienen de una cabecera municipal y conectan con una carretera Primaria. Las carreteras consideradas como Secundarias pueden funcionar pavimentadas o en afirmado

2.9.3 Terciarias

Son aquellas vías de acceso que unen las cabeceras municipales con sus veredas o unen veredas entre sí. Las carreteras consideradas como Terciarias deben funcionar en afirmado. Se entiende como carreteras terciarias las vías que conectan municipios con centros poblados y/o corregimientos en áreas rurales además de las vías a cargo de la Subdirección de la Red Terciaria del Instituto Nacional de Vías. (INVIAS, 2016)

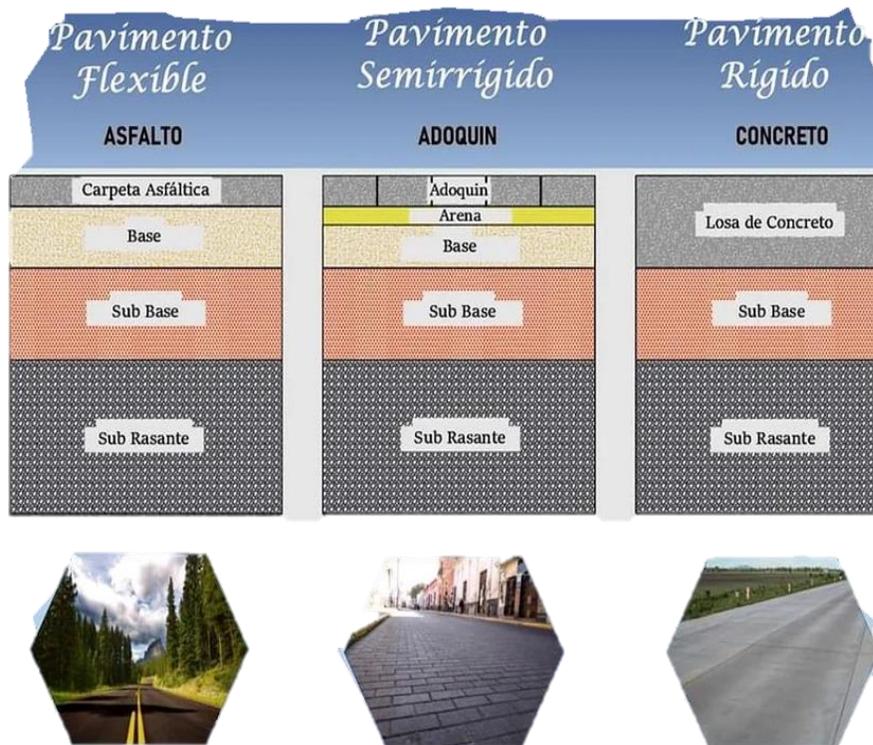
2.10 Pavimento

Un pavimento normalmente está constituido por 4 capas, sub-rasante, base, Sub-base y capa de rodadura, con la estabilización del suelo-cemento se puede llegar a reemplazar la capa de base o de Sub-base. Para el caso de las vías terciarias simplemente se realiza la estabilización del suelo y se omiten las demás capas, dejando una vía en afirmado. (García Toro, 2019)

Estas estructuras estratificadas se apoyan sobre la subrasante de una vía obtenida por el movimiento de tierras en el proceso de exploración y que han de resistir adecuadamente

los esfuerzos de las cargas repetidas del tránsito le transmite durante el periodo para el cual fue diseñada la estructura del pavimento.

Figura 2. 12. Tipos de pavimento



Fuente: El constructor (2022)

2.11 Subrasante

La subrasante es la superficie terminada de la carretera a nivel de movimiento de tierras (corte y relleno), sobre la cual se coloca la estructura del pavimento o afirmado. La subrasante es el asiento directo de la estructura del pavimento y forma parte del prisma de la carretera, que se construye entre el terreno natural allanado o explanada y la estructura del pavimento. La sub rasante es la capa superior del terraplén o el fondo de las excavaciones en terreno natural, que soportará la estructura del pavimento, y está conformada por suelos seleccionados de características aceptables y compactados por capas para constituir un cuerpo estable en óptimo estado, de tal manera que no se vea afectada por la carga de diseño que proviene del tránsito.

Su capacidad de soporte en condiciones de servicio, junto con el tránsito y las características de los materiales de construcción de la superficie de rodadura, constituyen las variables básicas para el diseño del afirmado, que se colocará encima.

En caso de que el suelo, debajo del nivel superior de la sub rasante, tenga un CBR < 6% (sub rasante pobre o sub rasante inadecuada), corresponde estabilizar los suelos. (MTC, 2014)

Tabla 2.5. Categorías de subrasante

Categorías de subrasante	CBR
S0: Subrasante inadecuada	CBR < 3%
S1: Subrasante pobre	De CBR ≥ 3% a CBR <6%
S2: Subrasante regular	De CBR ≥ 6% a CBR <10%
S3: Subrasante buena	De CBR ≥ 10% a CBR <20%
S4: Subrasante muy buena	De CBR ≥ 20% a CBR <30%
S5: Subrasante excelente	CBR > 30%

Fuente: (MTC, 2014)

La capa final del terraplén de una carretera debe ser basado en la resistencia que se obtiene del CBR, si se trata de un mejoramiento se debe cumplir un porcentaje de CBR para definir un espesor de subrasante.

Los 30 cm. superiores de los terraplenes o de los cortes deben ser constituidos o presentar materiales con CBR mayor o igual a 8% y expansión menor a 2%, correspondiente al 95% de la densidad seca máxima del ensayo AASHTO T-180-D y para el ensayo AASHTO T-193.

El diseño o la SUPERVISIÓN podrán requerir el aumento del grado de compactación hasta el 100% de la densidad máxima del ensayo mencionado, cuando los materiales de los cortes y/o préstamos adyacentes no tengan el valor especificado para el CBR. Si aun así no cumplen con los requisitos, se procederá a la construcción de la capa superior de los terraplenes o a la sustitución de la capa superior equivalente de los cortes, de modo a obtener el CBR mínimo indicado en la tabla siguiente: (ABC, Manual de especificaciones técnicas generales de construcción, 2011)

Tabla 2.6. CBR de subrasante

Profundidad debajo de la subrasante (cm)	CBR mínimo requerido
0 a 20	8%
20 a 40	6%
40 a 60	4%
60 a 90	3%
Mayor a 90	2%

Fuente: (ABC, Manual de especificaciones técnicas generales de construcción, 2011)

2.12 Definición de cemento

El cemento es un polvo fino que se obtiene de la calcinación a 1,450°C de una mezcla de piedra caliza, arcilla y mineral de hierro.

El cemento es el material de construcción más utilizado en el mundo. Aporta propiedades útiles y deseables, tales como, resistencia a la compresión (el material de construcción con la mayor resistencia por costo unitario), durabilidad y estética para una diversidad de aplicaciones de construcción. (Cemex, 2023).

Figura 2. 13. Bolsas de cemento Fancesa



Fuente: Cemento Fancesa (2021)

2.13 Propiedades del cemento

Las propiedades más relevantes del cemento son: la finura, peso específico y resistencia del cemento. Cada parámetro se describe a continuación.

2.13.1 Finura

La finura de molido del cemento es una característica íntimamente ligada al valor hidráulico del cemento ya que influye decisivamente en la velocidad de las reacciones químicas que tienen lugar durante su fraguado y primer endurecimiento. Al entrar en contacto con el agua, los granos de cemento se hidratan solo en una profundidad de 0.01 mm por lo que si dichos granos fuesen muy gruesos, su rendimiento sería muy pequeño al quedar en su interior un núcleo prácticamente inerte Si el cemento posee una finura excesiva, su retracción y calor de fraguado son muy altos (lo que en general resulta muy perjudicial); el conglomerante resulta ser más susceptible a la meteorización (envejecimiento) tras un almacenamiento prolongado; disminuye su resistencia a las aguas agresivas, Pero siendo así que las resistencias mecánicas aumentan con la finura, se llega a una situación de compromiso: el cemento Pórtland debe estar finamente molido pero no en exceso. (DETERMINACION DE LA FINURA DEL CEMENTO, 2007)

Figura 2. 14. Tamizado de cemento por tamiz N°. 200



Fuente: Elaboración propia

2.13.2 Peso específico del cemento

El peso específico del cemento es un factor de cierta relevancia en el estudio de las propiedades del mismo, aunque cabe destacar que no es un índice de su calidad, sino por el contrario es usado para el cálculo de peso y volúmenes en una mezcla de concreto y para deducir otras características del cemento, principalmente. El valor del peso específico en el cemento se encuentra normalmente entre los siguientes valores 3.10 gr/cm^3 y 3.15 gr/cm^3 . Es posible que este valor se encuentre entre 3.00 gr/cm^3 a 3.10 gr/cm^3 , en dicho caso se dice que el cemento es adicionado. (Mario, 2008).

Figura 2. 15. Determinación del peso específico del cemento



Fuente: Elaboración propia

2.14 Tipos de cemento Portland

Con esta denominación, existen cinco tipos:

- Cementos Portland, Tipo I

Son los conglomerantes hidráulicos constituidos a base de Clinker Portland en proporción no menor del 95% en masa y de cualquiera de los componentes adicionales definidos en

esta norma (NB 011), o mezcla de ellos, en proporción no mayor del 5% en masa. Este núcleo no incluye ni el regulador de fraguado, ni los eventos aditivos.

- Cementos Portland con puzolana, tipo IP

Son los conglomerantes hidráulicos constituidos a base de Clinker Portland en proporción no menor del 70% ni mayor del 94% en masa, de puzolana natural en proporción no menor del 6% ni mayor del 30% en masa y otros de los componentes adicionales definidos en esta norma, en proporción comprendida entre el 0% y el 5% en masa. Este núcleo no incluye ni el regulador de fraguado (que deberá añadirse al mismo en la proporción adecuada), ni los eventos aditivos.

- Cementos Portland con filler o caliza, tipo IF.

Son los conglomerantes hidráulicos constituidos a base de: Clinker Portland en proporción no menor del 65% hoy ni mayor del 94% en masa, filler o caliza en proporción no menor del 6% ni mayor del 20% en masa y de otros de los componentes adicionales definidos en esta misma norma, en proporción comprendida entre el 0% y el 5% en masa. Este núcleo hoy no incluye ni el regulador de fraguado (que debe añadirse al mismo en la proporción adecuada), ni los eventos aditivos.

- Cemento Portland con adición de escoria, tipo IS

Son los conglomerantes hidráulicos constituidos a base de: Clinker Portland en proporción no menor a 65% y no mayor a 94%, escoria en proporción no menor al 6% ni mayor al 35% en masa y de otros componentes adicionales definidos en esta norma en proporción entre el 0% y 5% en masa. Este núcleo no incluye ni el regulador de fraguado (que debe añadirse al mismo en la proporción adecuada), ni los eventos aditivos.

- Cemento Portland mixto, tipo IM

Son los conglomerantes hidráulicos constituidos a base de: Clinker Portland en proporción no menor a 65% y no mayor a 94% y la combinación entre escoria; Filler; Caliza y puzolana en proporciones entre 6% al 35% en masa y de otros componentes adicionales definidos en esta norma en proporción entre el 0% y 5% en masa. Este núcleo no incluye

ni el regulador de fraguado (que debe añadirse al mismo en la proporción adecuada), ni los eventos aditivos.

Tabla 2.7. Clasificación y composición de los cementos

Tipo de cemento			Proporción en masa, en % ¹				
Denominación	Designación	Tipo	Componentes principales				Componentes adicionales
			Clinker	Puzolana	Filler	Escoria	
Cemento Portland	Portland	I	95 a 100				0 a 5
	Portland con puzolana ⁴	IP	60 a 94	6 a 40			1 a 5
	Portland con filler calizo ³	IF	65 a 94		6 a 35		2 a 5
	Portland con escoria	IS	65 a 94			6 a 35	3 a 5
	Portland mixto	IM	65 a 94	6 a 35			4 a 5

Fuente: Norma Boliviana (NB 011)

¹ en estos valores se excluyen: el regulador de fraguado y los aditivos.

² los componentes adicionales pueden ser puzolana, hoy filer, caliza o escoria, a menos que sean componentes principales del cemento.

³ para Cementos tipo IF, se debe realizar el control del filler calizo mediante el método del azul de metileno.

⁴ el índice de actividad de la porcelana se debe realizar mediante el método del ensayo de la norma ASTM C 311

2.15 Características del cemento Fancesa según su tipo

Según su catálogo la empresa Fancesa ofrece 3 tipos de variedades de cemento basados sus especificaciones técnicas en la norma NB 011.

El cemento se debe proteger de la intemperie al ser transportado o almacenado. Las buenas condiciones de almacenamiento en ambientes exentos de humedad, permitirán mantener sus características por 2 meses o más, a partir de la fecha de envasado.

2.15.1 Cemento Fancesa IP-30 líder

Se clasifica por su composición y resistencia como cemento portland con puzolana tipo IP- 30, con categoría resistente mínima de 30 MPa a 28 días en mortero normalizado.

Norma americana ASTM C 595, se clasifica como Type IP - Portland-pozzolana cement.

Norma europea EN 197-1, corresponde al cemento CEM II/B-P.

Sus características con los que cuenta este tipo de cemento son:

Elevadas resistencias mecánicas, bajo calor de hidratación, alta impermeabilidad en hormigones y morteros, alta resistencia a ataques químicos y sulfatos, mínima fisuración y retracción térmica, excelente trabajabilidad y acabado de obra

mayor durabilidad, mínima reacción expansiva álcali/agregado, ecológico y amigable con el medio ambiente.

Campo de aplicación recomendado:

Hormigones estructurales en general de viviendas y edificios, hormigones en masa, pavimentos rígidos, suelo-cemento, obras hidráulicas, hormigones y morteros para ambientes agresivos y cuando se requiera alta impermeabilidad, muros, revoques y pisos.

Figura 2. 16. Cemento IP-30 líder



Fuente: Cemento Fancesa (2021)

2.15.2 Cemento Fancesa IP-30 superior

Se clasifica por su composición y resistencia como cemento portland con puzolana tipo IP- 30, con categoría resistente mínima de 30 MPa a 28 días en mortero normalizado.

Norma americana ASTM C 595, se clasifica como Type IP - Portland-pozzolana cement.

Norma europea EN 197-1, corresponde al cemento CEM II/B-P.

Sus características con los que cuenta este tipo de cemento son:

Elevadas resistencias mecánicas, menor calor de hidratación, mayor impermeabilidad en hormigones y morteros, mayor resistencia a ataques químicos y sulfatos, menor fisuración y retracción térmica, excelente trabajabilidad, mayor durabilidad, menor reacción expansiva álcali/agregado.

Campo de aplicación recomendado:

Hormigones estructurales en general de viviendas y edificios, prefabricados de hormigón, pavimentos rígidos, obras hidráulicas, hormigones y morteros para ambientes agresivos y cuando se requiera alta impermeabilidad.

Figura 2. 17. Cemento IP-30 superior



Fuente: Cemento Fancesa (2021)

2.15.3 Cemento Fancesa IP-40

Se clasifica por su composición y resistencia como cemento portland con puzolana tipo IP-40, con categoría resistente mínima de 40 MPa a 28 días en mortero normalizado.

Norma americana ASTM C 595, se clasifica como Type IP - Portland-pozzolana cement.

Norma europea EN 197-1, corresponde al cemento CEM II/A-P.

Características:

Altas resistencias iniciales, menor tiempo de fraguado, hormigones impermeables, resistente a ataques químicos, buena trabajabilidad, hormigones durables, moderada reacción expansiva álcali/agregado.

Campo de aplicación recomendado:

Hormigones estructurales de alta resistencia inicial, hormigones para desencofrados rápidos. elementos pre y post tensados, prefabricados de hormigón, hormigones proyectados (Shotcrete).

Figura 2. 18. Cemento IP-40 superior



Fuente: Cemento Fancesa (2021)

2.16 Estabilización de suelos

El primer problema que se plantea el ingeniero diseñador de pavimentos, cuando no dispone de materiales granulares adecuados para la construcción de las capas del pavimento, es la decisión sobre el tipo de tratamiento de estabilización más adecuado para los suelos locales disponibles, con el fin de hacerlos aptos para la construcción de dichas capas. Según el tipo de suelo por tratar, el diseñador debe determinar el tipo de estabilización más conveniente, dentro de los cuales encontramos: (Dorfman, 1988)

Tabla 2.8. Tipos de estabilización

Tipo	Estabilización	Produce
Mecánica	Proceso de compactación	Densificación
Física	Granulometría	Fricción y cohesión
	Suelo-Betún	Cohesión impermeabilización
Físico-química	Suelo-cal	Intercambio iónico y cementación
Química	Suelo cemento	Intercambio iónico y cementación

Fuente: Estabilización de suelos (Dorfman, 1988)

2.17 Estabilización física

Busca aumentar la fricción, la cohesión y la impermeabilidad. Cuando un material se ajusta granulométricamente por medio de adición de material o ajustes a su banda granulométrica, genera en el material resultante mayor fricción entre las partículas y cohesión de la masa del suelo.

Figura 2. 19. Estabilización física



Fuente: Estabilización de suelos. Blog de ingeniería civil (2014)

2.18 Estabilización mecánica

Se realiza por medio del proceso de compactación. La compactación mejora las propiedades del suelo y en particular la densificación del suelo, el aumento de resistencia y la capacidad de carga, así mismo ayuda a reducir su compresibilidad y aptitud para absorber agua. (Dorfman, 1988)

La estabilización mecánica es el proceso donde la compactación, es el proceso artificial por el que las partículas de suelo son obligadas a estar más relacionadas unas con las otras, disminuyendo la cantidad de vacíos. Los resultados de un proceso de compactación dependen de varios factores, unos se refieren al tipo de suelo, otros relativos al método de compactación que se emplea. Estos factores suelen denominarse “las variables” que rigen el proceso de compactación. (Blog de ingeniería civil, 2014)

Figura 2. 20. Estabilización mecánica



Fuente: Estabilización de suelos. Blog de ingeniería civil (2014)

2.19 Estabilización físico-química

Se realiza en suelos con gran cantidad de finos plásticos, como limos y arcillas especialmente. Si el suelo es tratado con hidróxido de calcio produce en la masa de suelo resultante un intercambio iónico y cementación. Generalmente, con este tipo de estabilización se busca reducir la plasticidad del suelo, aumentar su resistencia, trabajabilidad y estabilidad volumétrica.

Se saca el suelo contaminado del sitio y se lleva a un lugar de disposición final (sitio seguro). Eventualmente se agrega cal u otro reactivo para evitar la lixiviación de metales.

Figura 2. 21. Estabilización mecánica



Fuente: Estabilización. Ecoasfalt (2022)

2.20 Estabilización química

Se realiza en suelos finos tipo arenas, mediante la adición de un agente hidráulico, como es el caso del cemento Portland, que al mezclarse íntimamente con el suelo y al desarrollar su propiedad hidráulica, produce una reacción química, intercambio iónico y cementación.

La resistencia del suelo y su estabilidad aumentan significativamente al respecto. (Dorfman, 1988)

La estabilización química implica la aplicación de aditivos químicos para mejorar el comportamiento de los suelos. Se utiliza para mejorar la manejabilidad del suelo, haciendo el material más fácil de usar como material de construcción. También se usa para reducir la plasticidad y el potencial de expansión-contracción. Si las arcillas son dispersivas, se utiliza para flocular las partículas. Cuando las arcillas son difíciles de compactar, se pueden añadir productos químicos para dispersar ligeramente sus partículas y ayudar en el proceso. Los aditivos más comunes son cal, cemento y cenizas volantes. Los principales efectos de la estabilización del suelo son: modificar el suelo, acelerar la construcción y mejorar la fuerza y durabilidad del suelo. (Braja, 2015)

2.21 Estabilización de suelo-cemento en la actualidad

Existen diversas razones que actualmente determinan un mayor uso del suelo cemento en la construcción de estructuras de pavimentos. Tanto consultores como entidades encargadas de la administración vial coinciden en que la demanda de un transporte de calidad requiere una mayor durabilidad de los materiales, estructuras de pavimentos y subrasantes. Para lograr la misma, es indispensable contar con estructuras de pavimento que tengan capas de elevada capacidad de soporte y resistentes a los agentes atmosféricos, Así mismo, otra de las razones de peso para el uso del suelo cemento en carreteras es el aspecto de protección del medio ambiente, el cual cada vez impone mayores limitaciones para la búsqueda y explotación de bancos de materiales, práctica que por muchos años ha sido utilizada. Es importante destacar a este respecto que es posible incorporar y aprovechar muchos suelos locales mediante la estabilización con cemento, eliminando la explotación de bancos de material y reduciendo a la vez los costos de transporte de material a la obra, lo que significa construir una carretera de menor tiempo y costo y con un menor impacto al medio ambiente. Finalmente, la posibilidad de reducir espesores de capas que conforman la estructura del pavimento sin disminuir la capacidad estructural de la misma es uno de los logros que pueden obtenerse de las características que tiene el suelo cemento, debido a su relativamente elevado módulo de elasticidad. Esto se traduce en ahorros de materiales y aumento en los rendimientos de construcción. Debido a las múltiples ventajas que tiene los suelos tratados con cemento, diversos países lo aplican de forma casi generalizada. Estados Unidos de América, España y Colombia son otros ejemplos de uso masivo del suelo cemento en la construcción de carreteras y patios de carga. ((ISCYC), 2020)

El cemento ayuda a aumentar la resistencia de los suelos y aumenta la fuerza con el tiempo de curado. Los suelos granulares y los suelos arcillosos de baja plasticidad son los más adecuados para la estabilización con cemento. (Braja, 2015)

El proceso de estabilización comienza con la caracterización del suelo de estudio a través de apiques en el terreno, la muestra se lleva al laboratorio para realizar ensayos de análisis granulométrico, límites de Atterberg, CBR y Proctor como mínimo. También se mide la capacidad de soporte de dicho material para tener un indicativo de su calidad en términos

de resistencia. (Garcia Toro, Estudio de la tecnica de suelo-cemento para estabilizacion de vias terciarias en Colombia que posea un alto contenido de caolín, 2019)

Figura 2. 22. Estabilización con cemento (estabilización química)



Fuente: Wikipedia – Solelboneh (2010)

2.22 Estabilización con cemento

El suelo-cemento consiste en mezclar suelo con cemento, y compactarlo en su contenido óptimo de humedad. La función del cemento es aglutinar el material y convertirlo en una masa endurecida de carácter estable. El agua hidrata el cemento y ayuda a obtener la máxima densidad lubricando los granos y partículas de suelo. Una vez que el suelo y el cemento han sido mezclados y compactado, inicia la acción del cemento la cual provoca el endurecimiento de la masa.

Al mezclar un suelo con cemento, se produce un nuevo material, duro, con mejores características que el usado como agregado. Esta estabilización no es tan sensible a la humedad como la hecha con asfalto. Pueden usarse todos los suelos para efectuarla, excepto los altamente orgánicos, aunque los más convenientes son los granulares, de fácil disgregado. Los limos, las arenas limosas y arcillas, todas las gravas y las arenas, son agregados adecuados para producir la mezcla suelo-cemento, que tienen excelentes cualidades, que respecto a la de los suelos granulares son:

a) Tiene mayor módulo de elasticidad.

- b) Es más impermeable.
- c) Es muy resistente a la erosión del agua.
- d) En presencia de la humedad, en lugar de perder resistencia, la aumenta.
- e) Su resistencia aumenta con el tiempo. La cantidad de cemento necesaria varía con el tipo de suelo, siendo menor si el suelo es poco arcilloso.

El criterio de diseño de las mezclas suelo-cemento es para obtener un material de mayor resistencia. No sólo se debe pensar en disminuir plasticidad. La resistencia a la compresión, es uno de los parámetros primordial de análisis en la estructura de un pavimento. El procedimiento de construcción consta de las fases siguientes: (Huezo Maldonado & Orellana Martinez, 2009)

- a) Mezclado de cemento y suelo a estabilizar.
- b) Colocación de agua, hasta llegar a obtener la humedad optima dentro de la mezcla suelo-cemento.
- c) Compactación
- d) Curado de unos 7 días.

Figura 2. 23. Cemento extendido sobre la vía para la estabilización de suelo-cemento



Fuente: Pro-Road Global (2023)

2.22.1 Clasificación del suelo-cemento

El suelo-cemento se ha definido y se ha clasificado desde diversos puntos de vista a partir de diferentes modificaciones realizadas en el material de partida, el contenido de cemento y el tipo de suelo. Las más reconocidas son:

- Suelo-cemento

El contenido de cemento en peso suele ser del orden del 3 al 7% en peso de materiales secos; a largo plazo, su resistencia a compresión suele ser superior a 4 MPa. El contenido de agua se elige para obtener mezclas de consistencia seca que permitan su compactación con rodillo. El suelo-cemento se usa normalmente como capa de apoyo de otros materiales tratados con cemento o de concreto hidráulico, o bien como capa resistente bajo capas bituminosas. Puede fabricarse en planta central o ejecutarse in situ.

- Suelo mejorado o modificado con cemento:

Se usa en subrasantes o explanadas y se define como una mezcla de suelo y una cantidad pequeña de cemento, generalmente inferior al 2% en peso, añadida con el fin de mejorar algunas propiedades de los suelos. Al contrario que el suelo-cemento, la mezcla resultante sigue teniendo la estructura de un material suelto, al menos a corto plazo. La mejora o modificación con cemento se usa generalmente con suelos de grano fino, plásticos y a veces con humedades naturales excesivas con dificultad de compactación, expansividad y baja capacidad de soporte. El conglomerado modifica moderadamente sus características a corto y largo plazo, haciendo utilizables los suelos. Por su limitada o nula resistencia mecánica se recomienda usarlo como subrasante de pavimentos de tráfico ligero y medios. Para los casos de tráfico pesado y de alto volumen se sugiere colocar una subrasante de mayor capacidad de soporte sobre el suelo modificado con cemento.

- Suelo estabilizado con cemento:

Se usa también en subrasantes o explanadas, especialmente en estructuras de pavimentos para tráfico pesado. Es una mezcla de suelo, cemento y agua, con un contenido mínimo de conglomerante en peso del 2% a fin de obtener un material dotado de una rigidez y resistencia mecánica. (Argos, 2022)

2.22.2 Contenido de cemento

La cantidad de cemento puede variar entre el 2 y 25 por ciento del peso seco de la mezcla. El promedio es del 10 % y se procura que no pase del 15% por razones económicas. (INVEAS, 2004)

Tabla 2.9. Cantidades de cemento requeridas

Grupo de suelos según aashto	Por ciento por volumen	Por ciento 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: Portland cement association soil-cement laboratory handbook

2.22.3 Tipos de suelos para estabilizar con cemento

Básicamente cualquier suelo puede estabilizarse con cemento a excepción de los suelos muy plásticos, orgánicos o con altos contenidos desales que pueden afectar el desempeño del cemento. Existen diversos criterios que limitan y especifican las características que debe tener un suelo para considerarse aceptable en la elaboración de una mezcla de suelo cemento.

Los materiales que pueden ser utilizados para la elaboración de suelo cemento deberán cumplir con las siguientes características:

- Contenido de finos que pasa el tamiz No. 200 debe de variar del 5 al 35%.
- Contenido de arcilla debe de ser inferior al 15%.
- Partículas retenidas en el tamiz No. 4 debe variar del 50 al 100%.

- Suelos con clasificación GW, GP, SW, SP, GM, SM, GC, SC, ML, son utilizables, descartándose los desechos de construcción y suelos orgánicos.
- La humedad de la mezcla tendrá una tolerancia máxima del 2% de la humedad óptima.
- Limite líquido permitido menor al 40%.
- Índice plástico permitido menor al 8%.

Es importante mencionar que el objetivo de limitar algunas características del suelo principalmente el índice de plasticidad y los requisitos granulométricos, es obtener una mezcla económica en términos de la cantidad de cemento y del buen comportamiento estructural de los suelos estabilizados.

2.22.4 Especificaciones mínimas

Las recomendaciones para la estabilización con cemento pueden hacerse tentativamente extensibles a la estabilización con cal, salvo especificaciones particulares. Casi todos los tipos de suelos pueden ser estabilizados con cemento, con excepción de suelos altamente orgánicos y arcillas muy pesadas, la gradación del material es muy amplia y permite el uso de una gran variedad de materiales. Normalmente el tamaño máximo se limita a 2” (5.4 cm) y al menos el 55% del material debe pasar por el tamiz No. 4, ya que mezclado con el cemento y en su humedad de diseño y adecuada compactación, sirve como de mortero ligante del esqueleto formado por los tamaños superiores, dando gran resistencia y soporte.

Existen tres exigencias básicas para obtener un buen suelo cemento:

- a) Contenido adecuado de humedad (cerca a la humedad óptima de compactación o de compactación o densidad máxima).
- b) Contenido uniforme de cemento, estas dos exigencias deben ser fijadas previamente por el laboratorio, por preparación de briquetas o moldes de ensayo.
- c) Finalmente adecuada compactación para densidad máxima, también fijada por el laboratorio. Pruebas que están normalizadas tanto en la ASTM como en la AASHTO. Complementariamente se debe tener en cuenta las condiciones locales de clima y granulometría de suelo. (Benavides Bastidas, 2006)

CAPÍTULO III

APLICACIÓN PRÁCTICA DE MEZCLAS DE SUELOS CON CEMENTO EN EL TRAMO JUNACAS -SANTA ROSA DE POLLA

CAPÍTULO III

APLICACIÓN PRÁCTICA DE MEZCLAS DE SUELO-CEMENTO EN EL TRAMO DE JUNACAS- SANTA ROSA DE POLLA

3.1 Ubicación

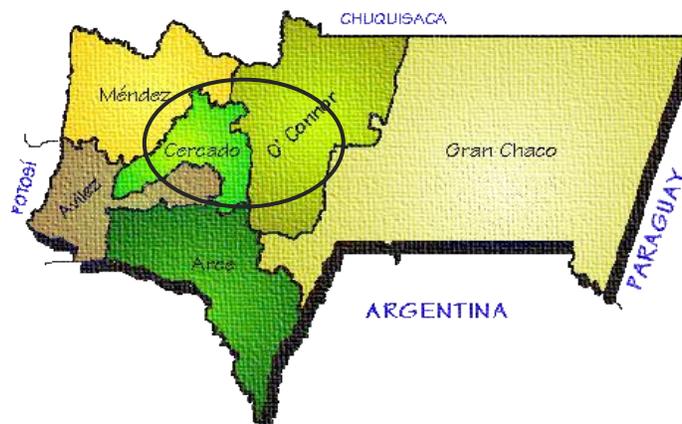
La zona de estudio se encuentra ubicada en Bolivia dentro del Departamento de Tarija en la Provincia Cercado:

Figura 3.1. Mapa Político del Estado Plurinacional de Bolivia



Fuente: Pinterest (2015)

Figura 3.2. Mapa Político del Departamento de Tarija



Fuente: Bolivia informa (2007)

esta característica del lugar representa una condición desfavorable en tiempos de precipitación provocando que la carretera sea de difícil acceso e incluso en algunas ocasiones intransitable para los comunarios que transitan a pie.

Se muestra en la figura 3.4 se muestra foto de un sector de la carretera de esta investigación.

Figura 3.4. Características de la zona de investigación



Fuente: Elaboración propia

3.2.1 Extracción de la muestra de suelos

Se tomó muestras cada 0.5 km de distancia en una distancia total de 5 km para analizar sus propiedades del suelo y definir su caracterización.

A continuación, se muestra una tabla 3.1 de las coordenadas de los puntos que se tomó la muestra de suelo en cada punto se tomó un total de 70 a 75 kilos de suelo para realizar los distintos ensayos y también se compenso rellenando ese punto excavado con material de la zona.

Figura 3.5. Puntos de extracción de muestra



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.1. Coordenadas de puntos de muestreo

Puntos/Coordenadas	Abscisa E (m)	Norte S (m)
Punto P0	349731,45	7631505,18
Punto P0-m	349866,24	7631981,48
Punto P1	349945,48	7632467,25
Punto P1-m	349912,72	7632935,41
Punto P2	350155,45	7633224,65
Punto P2-m	350530,48	7633454,16
Punto P3	350494,2	7633952,56
Punto P3-m	350249,56	7634342,48
Punto P4	350182,74	7634724,42
Punto P4-m	349692,48	7634816,26
Punto P5	349412,15	7635028,12

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.6. Medición de la carretera cada 50 metros con wincha métrica



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.7. Obtención de muestras de suelo en los diferentes puntos



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.8. Subsananando los lugares de muestreo



Fuente: Elaboración propia

3.3 Caracterización de suelos

Para realizar la caracterización de los suelos se procedió a realizar el cuarteo de las muestras de suelo de todos los puntos a lo largo del tramo de donde se obtuvo la muestra.

Figura 3.9. Cuarteador mecánico, suelo cuarteado de los distintos puntos



Fuente: Elaboración propia

3.3.1 Granulometría de suelos

Como se puede presenciar en el suelo está compuesto de material con arcilla y grumos por lo cual se procedió a realizar granulometría por el método del lavado y tamizado, para lo cual se dejó saturando por un periodo de 24 horas con el fin de que se disgreguen estas partículas de arcilla que se encuentra en el suelo.

Figura 3.10. Saturación del suelo, fino (platos) y grueso (bandejas)



Fuente: Elaboración propia

Con ayuda del tamiz N°. 10 para el suelo granular y N°. 200 para el suelo fino, sacando una pequeña muestra de 300gr de lo que pasa en el tamiz N°. 10 para facilitar el lavado, se realizó el lavado del material luego el retenido se colocó en el horno para posteriormente realizar el tamizado por la serie de tamices.

Figura 3.11. Lavado suelo granular tamiz N°. 10, material fino tamiz N°. 200



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.12. Secado el material para posterior granulometría



Fuente: Elaboración propia

Por cada punto de muestreo se realizaron tres ensayos para tener mayor confiabilidad en los resultados, posteriormente se obtuvo un promedio de los tres ensayos, con estos resultados se graficaron las curvas de distribución granulométrica, las cuales vemos que no cuentan con mucha variación.

Figura 3.13. Tamizado para realizar granulometría material granular



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.14. Tamizado para realizar granulometría material fino



Fuente: Elaboración propia

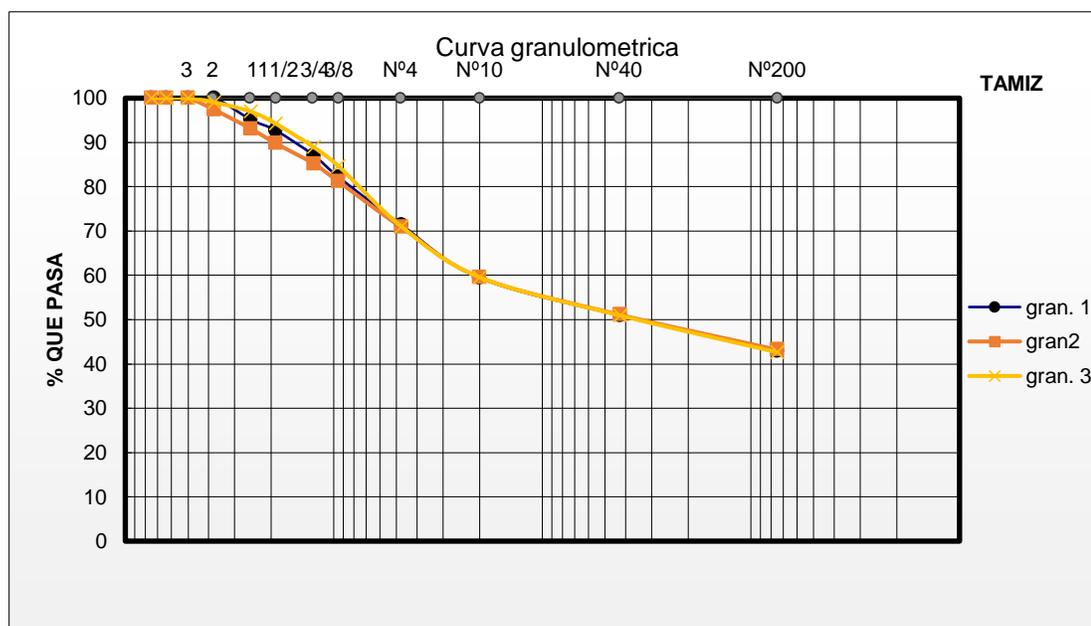
En la tabla 3.2 se muestra la granulometría del suelo del punto analizado P1 y en la gráfica 3.1 las curvas granulométricas. Los demás resultados se mostrarán en el Anexo 1.

Tabla 3.2. Granulometría del suelo P1

Peso Total (gr.)		5000	A.S.T.M.		
GRANULOMETRÍA DEL SUELO GRUESO					
Tamices	Tamaño (mm)	% del total que pasa 1	% del total que pasa 2	% del total que pasa 3	% del total que pasa prom
3"	76,20	100,00	100,00	100,00	100,00
2 1/2"	63,50	100,00	100,00	100,00	100,00
2"	50,80	100,00	100,00	100,00	100,00
1 1/2"	38,10	100,00	97,39	99,07	98,82
1"	25,40	95,14	93,09	96,95	95,06
3/4"	19,05	92,71	89,80	94,23	92,25
1/2"	12,50	87,10	85,19	88,94	87,08
3/8"	9,50	82,19	81,16	84,64	82,66
N 4	4,80	71,42	70,85	71,06	71,11
No. 10	2,00	59,43	59,53	59,55	59,50
No. 40	0,43	50,93	51,10	50,95	50,99
No. 200	0,08	42,88	43,20	42,65	42,91

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.1 Curvas granulométricas de suelos



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.3. Resultados de granulometría

PUNTO	Gran. % pasa 3"	Gran. % pasa 2 1/2"	Gran. % pasa 2"	Gran. % pasa 1 1/2"	Gran. % pasa 1"	Gran. % pasa 3/4"	Gran. % pasa 1/2"	Gran. % pasa 3/8"	Gran. % pasa N° 4	Gran. % pasa N° 10	Gran. % pasa N° 40	Gran. % pasa N° 200
P0 (1)	100	100	100	93	88,28	85,08	79,25	74,53	63,66	52,29	45,31	44,91
P0 (2)	100	100	100	100	96,43	94,03	85,68	80,23	66,95	55,38	45,67	44,02
P0 (3)	100	100	100	100	94,14	91,17	84,95	80,71	69,51	58,48	46,31	43,76
P0m (1)	100	100	100	100	96,92	85,48	78,25	74,78	66,20	57,79	46,95	42,93
P0m (2)	100	100	100	100	96,90	84,90	77,70	74,21	65,65	57,22	47,59	42,84
P0m (3)	100	100	100	100	96,92	84,87	77,65	74,19	65,63	57,17	47,85	42,57
P1(1)	100	100	100	100	95,14	92,71	87,10	82,19	71,42	59,43	50,93	42,88
P1(2)	100	100	100	97,39	93,09	89,80	85,19	81,16	70,85	59,53	51,10	43,20
P1(3)	100	100	100	99,07	96,95	94,23	88,93	84,64	71,06	59,55	50,95	42,65
P1m (1)	100	100	100	97,45	86,37	80,48	72,46	68,39	59,46	51,78	46,35	42,55
P1m (2)	100	100	100	97,45	86,37	80,48	72,46	68,39	59,49	51,83	45,96	42,55
P1m (3)	100	100	100	97,45	86,37	80,48	72,46	68,39	59,46	51,78	46,05	42,66

PUNTO	Gran. % pasa 3"	Gran. % pasa 2 1/2"	Gran. % pasa 2"	Gran. % pasa 1 1/2"	Gran. % pasa 1"	Gran. % pasa 3/4"	Gran. % pasa 1/2"	Gran. % pasa 3/8"	Gran. % pasa N° 4	Gran. % pasa N° 10	Gran. % pasa N° 40	Gran. % pasa N° 200
P2(1)	100	100	100	96,85	90,20	83,05	74,35	70,43	60,81	52,92	46,51	42,49
P2 (2)	100	100	100	96,97	91,80	86,43	78,03	73,36	60,33	52,84	46,43	42,53
P2 (3)	100	100	100	97,18	90,67	86,36	77,65	72,56	60,04	51,67	46,40	42,69
P2m (2)	100	100	100	100	96,76	93,86	88,39	83,15	73,41	63,04	54,32	48,14
P2m (3)	100	100	100	100	96,72	93,87	88,39	83,14	73,35	62,92	54,40	47,60
P3 (1)	100	100	100	96,99	91,21	87,28	78,53	73,79	65,01	58,94	52,34	45,84
P3 (2)	100	100	100	95,49	90,39	86,08	79,57	74,48	64,96	58,65	52,25	45,60
P3 (3)	100	100	100	97,95	92,70	86,33	78,03	72,60	64,07	58,32	52,43	45,80
P3m (1)	100	100	100	97,86	86,77	83,37	76,51	72,30	62,82	55,20	48,95	42,93
P3m (2)	100	100	100	97,85	86,78	83,37	76,51	72,27	62,77	55,13	48,76	42,87
P3m (3)	100	100	100	97,85	86,78	83,38	76,52	72,31	62,85	55,20	48,77	42,72

Pto.	Gran. % pasa 3"	Gran. % pasa 2 1/2"	Gran. % pasa 2"	Gran. % pasa 1 1/2"	Gran. % pasa 1"	Gran. % pasa 3/4"	Gran. % pasa 1/2"	Gran. % pasa 3/8"	Gran. % pasa N° 4	Gran. % pasa N° 10	Gran. % pasa N° 40	Gran. % pasa N° 200
P4 (1)	100	100	96,08	93,29	87,49	83,59	78,77	76,04	70,59	65,67	58,84	52,36
P4 (2)	100	100	96,91	93,67	90,34	85,59	81,17	77,03	70,73	66,43	58,90	52,39
P4 (3)	100	100	97,07	94,76	87,09	81,01	78,66	76,06	70,41	66,63	59,24	52,16
P4m (1)	100	100	96,08	93,30	87,52	83,61	78,81	76,09	70,63	65,74	58,83	52,15
P4m (2)	100	100	96,91	93,67	90,30	85,55	81,13	77,01	70,72	66,41	58,79	52,37
P4m (3)	100	100	97,07	94,76	87,09	81,01	78,66	76,06	70,41	66,63	59,40	52,41
P5 (1)	100	100	100	95,24	92,68	90,56	87,17	85,00	79,22	72,41	65,96	52,43
P5 (2)	100	100	100	94,63	92,37	90,22	86,02	83,06	75,44	68,98	60,33	52,46
P5 (3)	100	100	97,15	94,93	92,15	89,24	85,76	82,70	75,78	69,09	61,92	52,30

Fuente: Elaboración propia

3.3.2 Límites de Atterberg

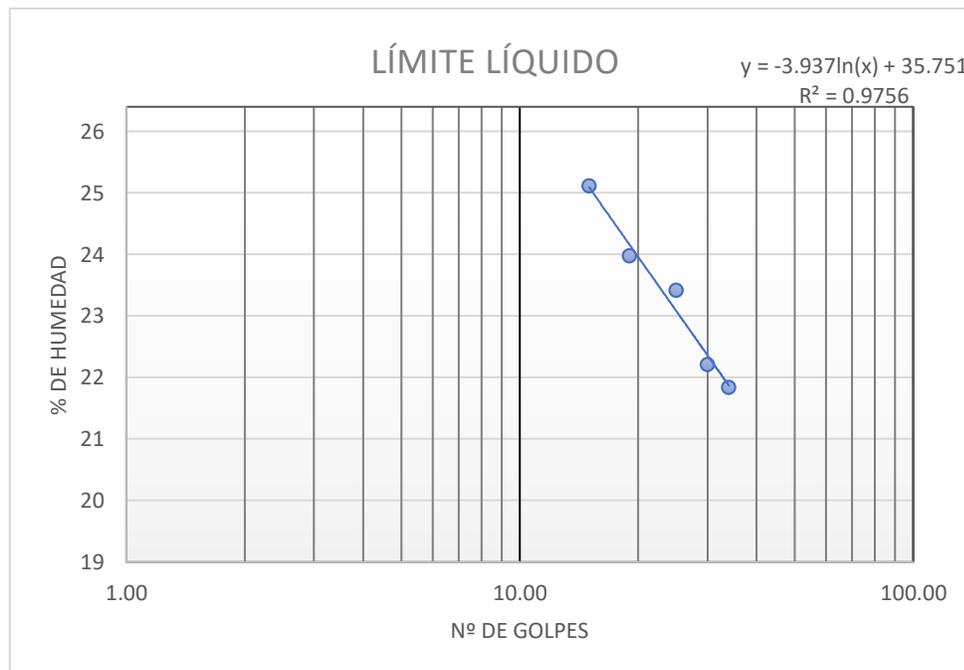
Los límites realizados en esta investigación se realizaron tres ensayos por punto de muestra obtenida. Se muestran los resultados del punto P1 como referencia las demás tablas de resultados se encuentran en Anexos 2.

Tabla 3.4. Límite Líquido

Capsula N.º	1	2	3	4	5
N.º de golpes	15,00	19,00	25	30,00	34,00
Masa suelo húmedo+ capsula (g)	77,58	71,14	79,84	76,35	84,99
Masa suelo seco + capsula (g)	64,6	60,3	67	64,84	72,41
Masa del agua (g)	12,98	10,84	12,84	11,51	12,58
Masa de capsula (g)	12,92	15,09	12,17	13,01	14,81
Masa de suelo seco (g)	51,68	45,21	54,83	51,83	57,6
Porcentaje de Humedad (%)	25,12	23,98	23,42	22,21	21,84

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.2 Gráfico de limite liquido



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.5. Límite Plástico

Determinación de Límite Plástico

Cápsula	1	2	3
Masa suelo húmedo+ capsula (g)	17,17	16,14	14,79
Masa suelo seco + capsula (g)	16,64	15,74	14,35
Masa de capsula (g)	13,70	13,50	11,85
Peso de suelo seco	2,94	2,24	2,50
Peso del agua	0,53	0,40	0,44
Contenido de humedad	18,03	17,86	17,60

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.6. Resultados de límites de Atterberg

Límite Líquido (LL)
23
Límite Plástico (LP)
18
Índice de plasticidad (IP)
5
Índice de Grupo (IG)
2

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.7. Tabla resumen de límites de consistencia

PUNTO	Límite Líquido	Límite Plástico	Índice de Plasticidad	Índice de Grupo
P0(1)	29	22	8	2
P0(2)	29	22	8	2
P0(3)	28	21	8	2
P0m (1)	24	19	6	2
P0m (2)	24	19	6	2
P0m (3)	24	19	6	2
P1(1)	23	18	5	2
P1(2)	23	18	5	2
P1(3)	23	18	5	2
P1m (1)	23	18	5	2
P1m (2)	23	18	5	2
P1m (3)	23	18	5	2
P2(1)	24	19	5	2

PUNTO	Límite Líquido	Límite Plástico	Índice de Plasticidad	Índice de Grupo
P2 (2)	25	20	5	2
P2 (3)	25	20	5	2
P2m (1)	25	20	5	3
P2m (2)	25	20	5	3
P2m (3)	25	20	5	3
P3 (1)	23	18	4	2
P3 (2)	23	18	4	2
P3 (3)	23	18	4	2
P3m (1)	23	17	6	2
P3m (2)	23	17	6	2
P3m (3)	23	17	6	2
P4 (1)	28	22	6	3
P4 (2)	28	22	6	3
P4 (3)	28	22	6	3
P4m (1)	27	22	5	3
P4m (2)	27	22	5	3
P4m (3)	27	22	5	3
P5 (1)	25	18	7	3
P5 (2)	25	18	7	3
P5 (3)	25	18	7	3

Fuente: Elaboración propia

3.3.3 Clasificación de suelos

La clasificación por del suelo por medio del método AASHTO se realizó en cada punto de muestreo a lo largo del tramo usando los resultados de granulometría, límites e índice de plasticidad ya obtenidos por medio de las pruebas de laboratorio de la caracterización del material ya mencionados en el apartado 3.3.1 y 3.3.2

En la clasificación de esta investigación se tomó en cuenta el porcentaje que pasa el tamiz N°. 10, N°. 40 y N°. 200 y de acuerdo a este tipo de material solo se tomó como parámetro principal el porcentaje que pasa el tamiz N°. 200 y de los ensayos de límites se tiene como parámetro de referencia el índice de plasticidad.

Tomando en cuenta todos estos datos se obtuvo en los resultados de clasificación que se trata de un suelo fino del tipo A-4(3) a lo largo del tramo de estudio en algunos segmentos

disminuye el contenido de arcilla, pero se encuentra dentro de la misma clasificación de tipo de suelo.

3.4 Caracterización del cemento

El cemento ya viene con sus parámetros de fábrica en nuestro caso estamos usando un cemento del tipo IP-40 que contiene una mayor finura y por ende resulta de mayor resistencia a la hora de hacer las mezclas de suelo-cemento.

3.4.1 Finura del cemento

Se pesó una muestra de 40 gr y se procedió a tamizar para obtener el retenido y así poder obtener por medio de la formula la finura con la que cuenta el cemento. Esta práctica se hizo solamente para comprobar las especificaciones con las que llega el cemento.

Tabla 3.8. Finura del cemento

Ensayo	Finura cemento
Ensayo 1	1,8 %
Ensayo 2	1,796 %
Ensayo 3	1,381 %
Promedio	1,659 %

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.15. Finura del cemento



Fuente: Elaboración propia

3.4.2 Peso específico del cemento

Figura 3.16. Proceso peso específico del cemento



Fuente: Elaboración propia

3.5 Ensayos de prueba y resultados

Para esta investigación nos basamos en la norma AASHTO T-99 Proctor modificado ya que se trata de un suelo fino y para medir la resistencia nos basamos en la norma AASHTO T-193, en la dosificación y parámetros tomados en cuenta para los porcentajes de cemento nos basamos en la norma INVEAS y ABC volumen IV

3.5.1 Compactación de suelo natural

La compactación de suelo se realizó dos ensayos en cada punto de variación en el porcentaje que pasa como se trata de un solo tipo de suelo (A-4) para verificar si entre estos segmentos del tramo hay variaciones en los resultados se obtuvo resultados próximos entre sí por lo que se determinó sacar un porcentaje en las dos variaciones de la granulometría para que con esto podamos obtener la humedad óptima y densidad en cada segmento del tramo. Trabajando con su promedio para el ensayo del CBR

Figura 3.17. Proceso de compactación



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.18. Medición y obtención de muestra de compactación



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.9. Resultados de compactación del suelo natural

Punto	H. Optima	Densidad Máxima
P0	12,00	1,94
P1	12,00	1,94
P4	12,25	1,93
P2m	12,24	1,93

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a la granulometría que se pudo obtener, se puede apreciar que solo existe un ligero cambio en el contenido de fino, en el porcentaje que pasa el tamiz N°. 200 y también existe una variación en el índice de grupo, en distintos puntos de muestreo a lo largo del tramo, sin cambiar la clasificación del tipo de suelo.

De acuerdo la clasificación realizada y las variaciones observadas se procedió a realizar ensayos de compactación de dos puntos al azar en cada grupo de puntos que tienen similitud en resultados. Con esto se determinó la humedad óptima y la densidad máxima del suelo natural.

Debido al cambio de porcentaje de suelo fino se pudo observar que existe cambios en los valores de humedad óptima y de la densidad, si bien no es mucha diferencia en estos dos grupos que se agruparon se optó por trabajar con estos dos valores para realizar el ensayo de CBR para con ello obtener sus resistencias y optar por el grupo de suelo más desfavorable.

La humedad óptima que se tomará en cuenta para la realización del CBR en los distintos tramos será como se muestra en la tabla 3.8

Tabla 3.10. Resultados de puntos de compactación

Punto	H. Optima	Densidad Máxima
P0, P0m, P1, P1m, P2, P3, P3m	12,00	1,94
P2m, P4, P4m, P5	12,25	1,93

Fuente: Elaboración propia

3.5.2 CBR con suelo natural

El ensayo CBR se realizó de acuerdo a la Norma AASHTO T-193, para obtener la resistencia del suelo a lo largo del tramo, como se cuenta con un solo tipo de suelo se obtuvo los ensayos de dos puntos al azar de acuerdo a la agrupación de puntos que se realizó con similares características en porcentajes en la granulometría y al ver que la variación era mínima del otro sector del tramo donde había variación en la granulometría solo se realizó un ensayo de CBR para cada agrupación de tramo.

Para la obtención de los distintos CBR se efectuaron tres moldes con distintas energías de compactación: la primera de 12 golpes, la segunda 25 golpes y por último con una energía de compactación de 56 golpes.

Las muestras elaboradas bajo este procedimiento se sumergieron en una piscina con agua, aplicando sus cargas respectivas del ensayo, para simular las condiciones de saturación a las cuales podría estar sometido el suelo como lo es en la subrasante de la carretera.

Se elaboro el ensayo de CBR según las dos humedades optimas ya mostradas en la tabla 3.8. de acuerdo para medir la resistencia del suelo y poder tomar como referencia la más desfavorable y con ellos realizar el análisis respectivo de mejora con las mezclas de suelo-cemento con los diferentes porcentajes de cemento.

Tabla 3.11. CBR de suelo natural

Punto	CBR al 95%	CBR al 100%
P1	4,09	5,36
P4	3,46%	5,05%

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a los resultados obtenidos del CBR natural se puede apreciar que en la muestra de los puntos P2m, P4, P4m y P5 que coincide sus parámetros de caracterización es el más desfavorable, por lo tanto, se tomara este valor de CBR como referencia para realizar la comparación de la resistencia con las mezclas de suelo-cemento.

3.5.3 Compactación de suelo con cemento

Para la compactación de suelo con cemento se determinó usar diferentes porcentajes de cemento para obtener la variación del contenido de humedad y densidad máxima, seguidamente con los resultados obtenidos de resistencia del CBR usar el contenido óptimo de cemento en la mezcla. Los porcentajes a usar fueron: 2%,3%, 4%,6% y 9%.

El porcentaje de cemento que se determinó usar en la mezcla de suelo-cemento, se definió reemplazarlo en porcentaje de peso del suelo natural, es decir, que por cada porcentaje de cemento con que se trabaje será suelo natural que se reduzca del peso inicial para los ensayos de compactación.

Los resultados obtenidos de la compactación realizada se muestran en la tabla 3.10.

Tabla 3.12. Compactación de suelo cemento diferentes porcentajes de cemento

Porcentaje de cemento	H. Optima	Densidad Máxima
2%	10	2,10
3%	10,16	2,11
4%	10,27	2,11
6%	10,41	2,13
9%	10,94	2,17

Fuente: Elaboración propia

Por cada porcentaje de cemento con el que se trabajó se obtuvo un contenido de humedad óptima y densidad máxima, valores que posteriormente se usaran para realizar los ensayos de CBR con la mezcla de suelos con cemento.

A continuación, se muestra el proceso de mezcla de suelo con cemento antes de realizar el compactado del suelo con cemento.

Figura 3.19. Mezclas de suelo-cemento para la compactación.



Fuente: Elaboración propia

3.6 CBR de las mezclas de suelos con cemento

El ensayo CBR se realizó de acuerdo a la Norma AASHTO T-193, para la mezcla de suelos con cemento por medio del ensayo de compactación T-99, se obtuvo la humedad óptima y la densidad máxima, adecuada para cada porcentaje de cemento a trabajar y obtener su resistencia del suelo mezclado con cemento.

Para la obtención de los distintos CBR con los distintos porcentajes de cemento, en cada ensayo se efectuaron tres moldes con distintas energías de compactación: la primera de 12 golpes, la segunda 25 golpes y por último con una energía de compactación de 56 golpes.

Las muestras elaboradas bajo este procedimiento se sumergieron en una piscina con agua para simular las condiciones de saturación a las cuales podría estar sometido el suelo como lo es en la subrasante de la carretera.

Se elaboró el ensayo de CBR con diferentes porcentajes de cemento (0%, 2%, 3%, 4%, 6% y 9%), de cada porcentaje ensayado se obtuvo su respectiva resistencia tanto al 95%

como lo es al 100%. Se puede observar que a mayor cantidad de cemento en las mezclas aumenta tanto la resistencia como la densidad del ensayo de CBR.

Tabla 3.13. CBR de suelo con diferentes porcentajes de cemento

Punto	CBR al 95%	CBR al 100%
2%	12,83%	16,76%
3%	14,13%	19,5%
4%	16,09%	19,72%
6%	21,84%	25,48%
9%	27,71%	30,32%

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.20. Procedimiento de ensayo CBR



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.21. Saturación y lectura de CBR



Fuente: Elaboración propia

CAPITULO IV

ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS

CAPITULO IV

ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS

En el análisis de resultados se realiza en la parte final y conclusiva de una investigación, en este análisis de resultados vamos a revisar los resultados obtenidos en cada uno de los ensayos realizados.

4.1 Análisis de resultados de clasificación de suelo

Para el análisis de resultados de la clasificación del suelo se toma en cuenta dos ensayos como referencia según la norma AASHTO, usamos la granulometría y los límites de consistencia, para determinar la clasificación del suelo.

4.1.1 Análisis granulométrico

Se realizó la granulometría del suelo como se muestra en la Tabla 4.1, esta granulometría se hizo en cada punto de muestreo en el que se realizó la muestra de suelo cada 500 metros de distancia para tener un mejor resultado en la clasificación del suelo para ver si existía alguna variación en algún punto del tramo de investigación.

Tabla 4.1. Resumen de granulometría y clasificación de suelo

Pto.	Gran. pasa Nº. 10	Gran. pasa Nº. 40	Gran. pasa Nº. 200	Limite Liquido	Limite Plástico	Índice de Plasticidad	Clasificación de suelo
P0	55,38	45,76	44,23	29	22	8	A-4(2)
P0m	57,39	47,46	42,78	24	19	6	A-4(2)
P1	59,50	50,99	42,91	23	18	5	A-4(2)
P1m	51,80	46,12	42,59	23	18	5	A-4(2)
P2	52,48	46,45	42,57	25	20	5	A-4(2)
P2m	62,98	54,36	47,87	25	20	5	A-4(3)
P3	58,64	52,34	45,75	23	18	4	A-4(2)
P3m	55,18	48,83	42,84	23	17	6	A-4(2)
P4	66,24	58,99	52,30	28	22	6	A-4(3)
P4m	66,26	59,01	52,31	27	20	5	A-4(3)
P5	70,16	62,74	52,40	25	18	7	A-4(3)

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a los resultados obtenidos del promedio de todos los ensayos de granulometría en cada uno de los puntos de muestreo, se observa que tomando como referencia los tamices N°. 10, N°. 40 y N°. 200. El tamaño de las partículas que pasa el tamiz N°. 10 es mayor al 50% por lo tanto se considera que tiene una gran cantidad de material fino como también cierto porcentaje de arena.

Las variaciones que se encuentran entre los resultados en los porcentajes, sobre todo en la variación de porcentajes que pasa en el tamiz N°. 200 sin salir del rango de clasificación del suelo que marca la normativa. Por lo cual se definió agrupar los resultados similares de granulometría para poder realizar el análisis respectivo. Se agrupó de la siguiente manera:

- En el primer grupo se encuentran con menor nivel de arcilla de porcentajes que pasa mayor a 42.84% y menor del 47.87% del tamiz N°. 200. (P0, P0m, P1, P1m, P2, P3, P3m).
- En el segundo grupo se encuentra con mayor porcentaje de arcilla entre un 52.30% a 52.40% que pasa el tamiz N°. 200. (P4, P4m, P5).

4.1.2 Límites de consistencia

Se realizó los límites de consistencia, tanto el límite líquido como el límite plástico del suelo como se muestra en la Tabla 4.1, estos límites se realizaron en cada punto de muestreo en el que se realizó la muestra de suelo cada 500 metros de distancia para tener un mejor resultado en la clasificación del suelo para ver si existía alguna variación en algún punto del tramo de investigación como se hizo en la granulometría.

Los límites de consistencia en cada punto de muestreo se proceden a usar la tabla de clasificación de la norma AASHTO tomando como referencia los porcentajes de límite líquido y plástico, para con ello definir el IP de cada punto de muestreo. Este índice de plasticidad indica que tan plástico puede llegar a ser el suelo.

4.1.3 Clasificación de suelo según norma AASHTO

De acuerdo a los resultados de granulometría y límites de consistencia obtenidos previamente y siguiendo los parámetros de la normativa AASHTO se define un índice de grupo y tomando en cuenta al más desfavorable, en este caso el más fino, se clasifica el

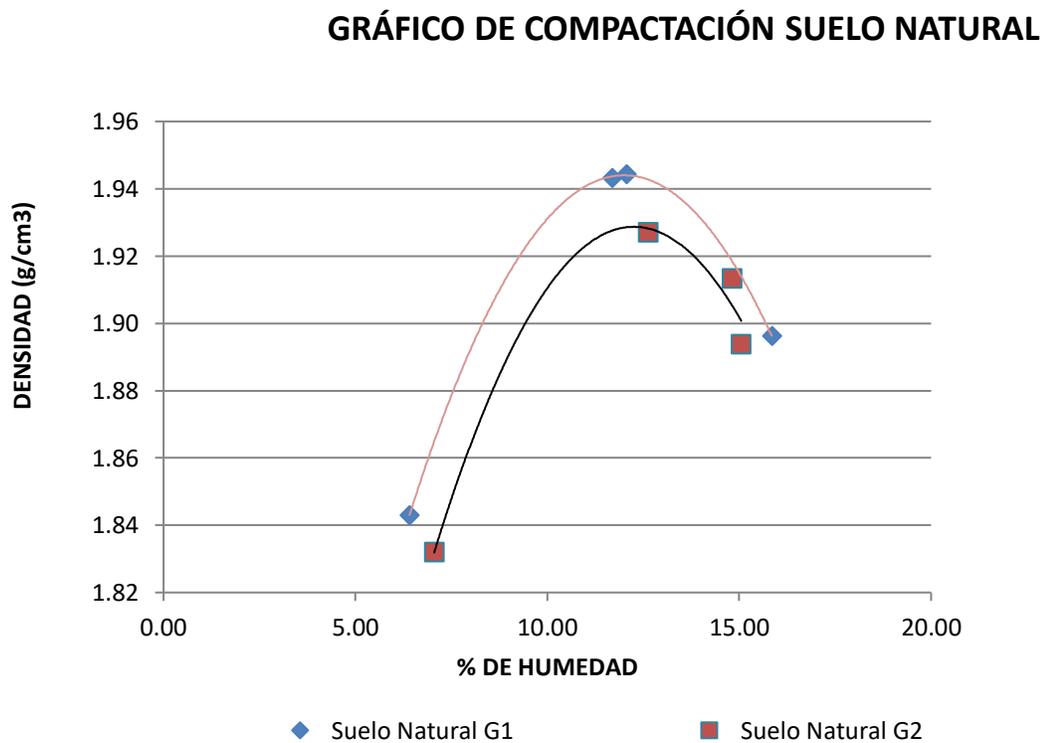
suelo como un tipo fino A-4(3). Que daría como resultado un suelo limoso con cierto porcentaje de arena.

4.2 Compactación de suelos (AASHTO T-99)

El objetivo de un ensayo de compactación es eliminar los espacios vacíos del suelo, al realizar este ensayo obtenemos la densidad máxima y su humedad óptima en la que el suelo con una compactación a una humedad óptima obtiene una mayor resistencia la corte y su densidad es mayor. Para un mejoramiento del suelo.

En la tabla 3.8 se pueden observar los valores de la humedad óptima en el suelo natural y en la tabla 3.10 la humedad óptima de suelo con cemento.

Gráfico 4.1. Curvas de compactación de suelo natural

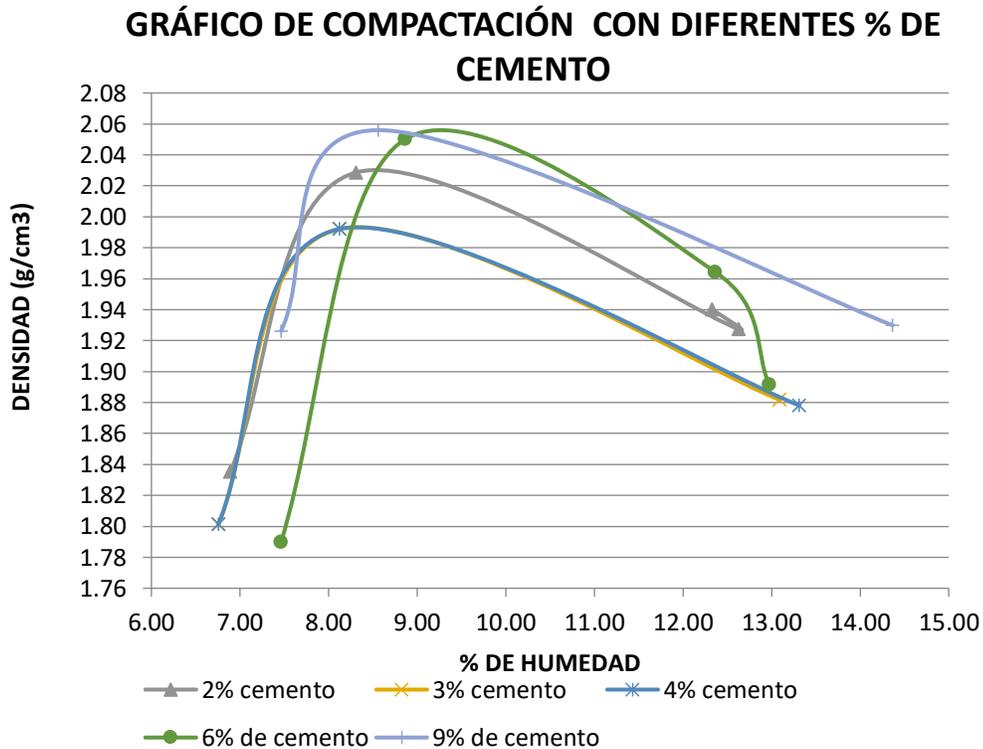


Fuente: Elaboración propia

El gráfico 4.1 muestra la variación de la compactación de suelo natural en base a los dos grupos en los que se agrupó el muestreo, de acuerdo a las gráficas mostradas se puede observar que no existe demasiada variación en los valores de compactación de un grupo a

otro agrupado. Por lo cual se optó por tomar como referencia los resultados del segundo grupo de agrupación de muestreo porque se consideró que es el más desfavorable por la mayor cantidad de suelo fino que contiene este tramo, para garantizar así una buena dosificación a lo largo del tramo de investigación.

Gráfico 4.2. Curvas de compactación de suelo-cemento con diferentes % de cemento



Fuente: Elaboración propia

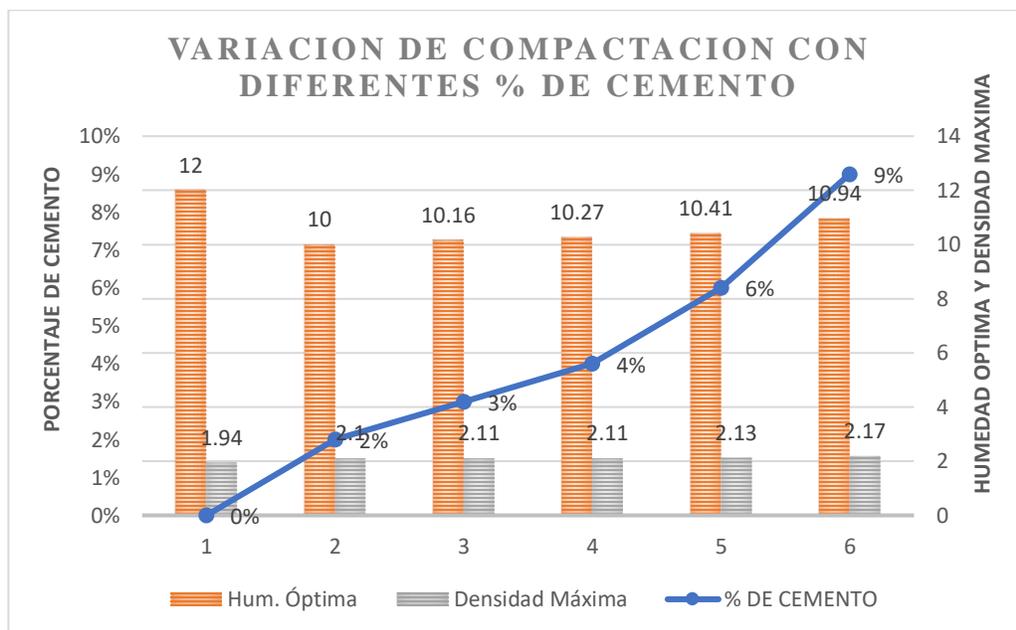
En base a las tablas 3.8 y 3.10 se pudo observar que tanto la humedad como la densidad aumentan

- La humedad varía entre el suelo natural en la agrupación 1 y el suelo-cemento en un porcentaje del 2% existe una variación de 16.67%, en un porcentaje de 3% existe una variación de 15.33%, en un porcentaje de 4% existe una variación de 14.42%, en un porcentaje de 6% existe una variación de 13.25%, en un porcentaje de 9% existe una variación de 8.83%. En la agrupación 2 y el suelo-cemento en un porcentaje del 2% existe una variación de 18.37%, en un porcentaje de 3% existe

una variación de 17.06%, en un porcentaje de 4% existe una variación de 16.16%, en un porcentaje de 6% existe una variación de 15.02%, en un porcentaje de 9% existe una variación de 10.69%.

- La densidad aumenta del suelo natural de la agrupación 1 y el suelo-cemento en un porcentaje del 2% existe una variación de 8.25%, en un porcentaje de 3% existe una variación de 8.76%, en un porcentaje de 4% existe una variación de 8.76%, en un porcentaje de 6% existe una variación de 9.79%, en un porcentaje de 9% existe una variación de 11.86%. En la agrupación 2 y el suelo-cemento en un porcentaje del 2% existe una variación de 8.81%, en un porcentaje de 3% existe una variación de 9.32%, en un porcentaje de 4% existe una variación de 9.32%, en un porcentaje de 6% existe una variación de 10.36%, en un porcentaje de 9% existe una variación de 12.43%.

Gráfico 4.3. Variación de la humedad y densidad con el cemento



Fuente: Elaboración propia

En el gráfico 4.3 se puede observar que mientras el porcentaje de cemento va aumentando la humedad y la densidad también tienen su variación, la densidad a manera que el porcentaje de cemento va aumentando también va subiendo su valor, en cambio el

porcentaje de humedad va variando entre elevaciones y decrementos, esto debido al ambiente en el que se realiza el ensayo que produce esta variación.

4.2.1 CBR (AASHTO T-193)

Se puede observar en la tabla 4.4 los resultados de CBR obtenidos con el suelo natural y que según la norma boliviana el CBR debe estar entre 8 a 10% en la sub rasante por lo cual es necesario aplicar un mejoramiento en este tramo.

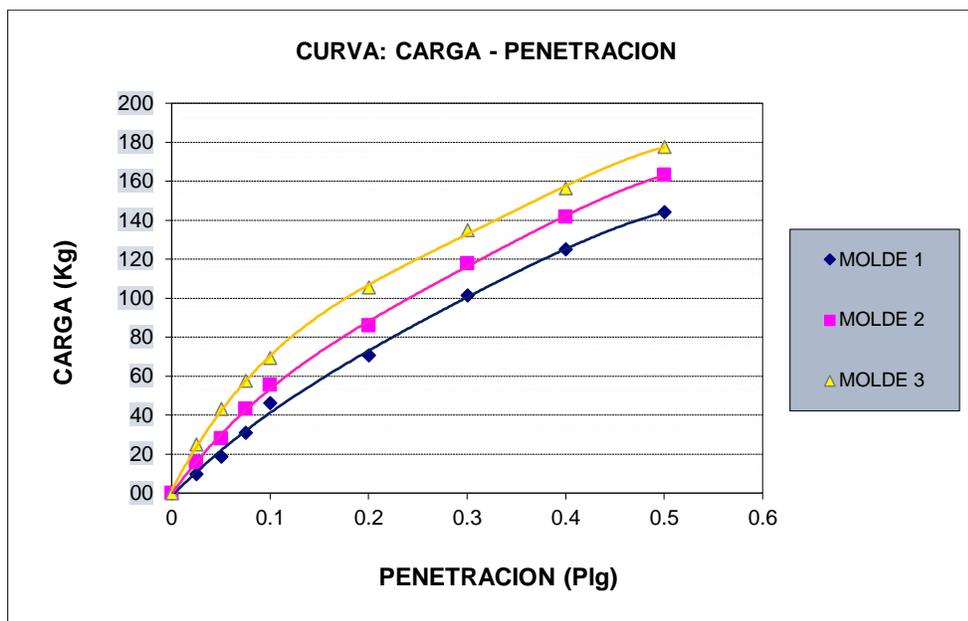
Se realizó los ensayos de CBR para ver la variación entre las dos agrupaciones que se mencionó anteriormente de acuerdo a la clasificación del suelo que se tuvo y la variación de porcentajes de suelo. Por los resultados que se obtuvo se procede a trabajar con la humedad óptima del CBR más desfavorable, como ya se había mencionado anteriormente se optó por realizar el análisis y los ensayos con el suelo más desfavorable en este caso la agrupación 2 de los puntos de muestreo. En suelo natural

Tabla 4.2. CBR de suelo natural

Punto	CBR al 95%	CBR al 100%
P1	4,09	5,36
P4	3,46%	5,05%

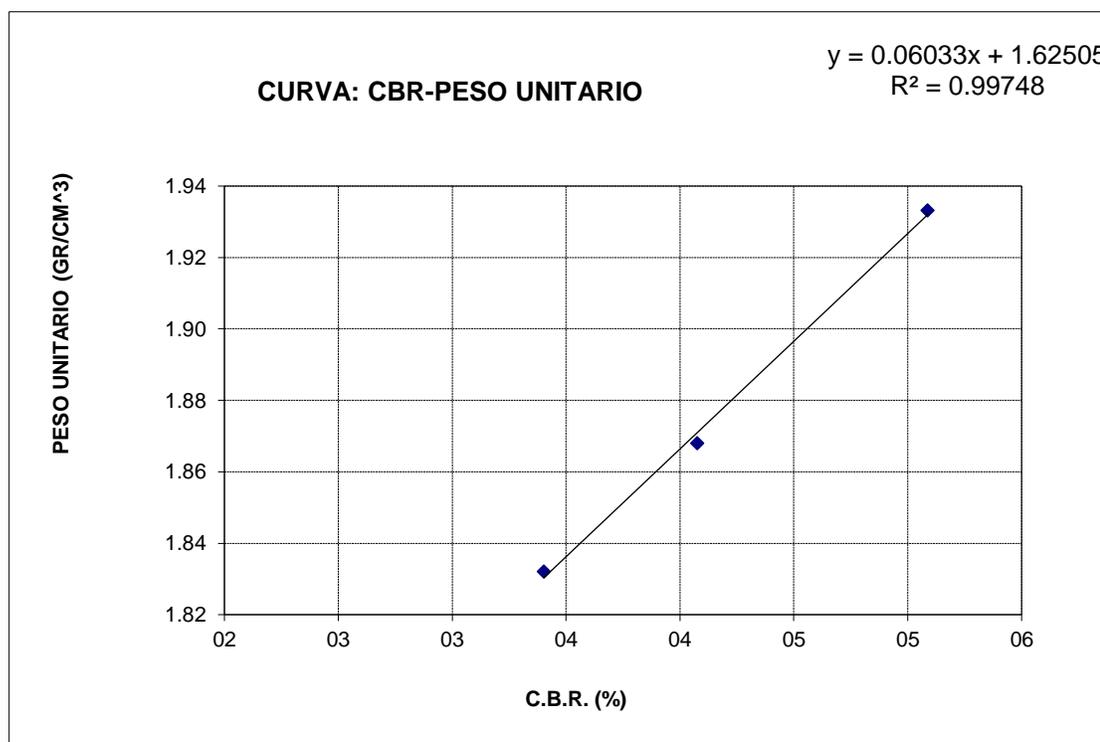
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 4.4. Curvas de CBR del suelo natural carga-penetración



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 4.5. Curva CBR-Peso unitario



Fuente: Elaboración propia

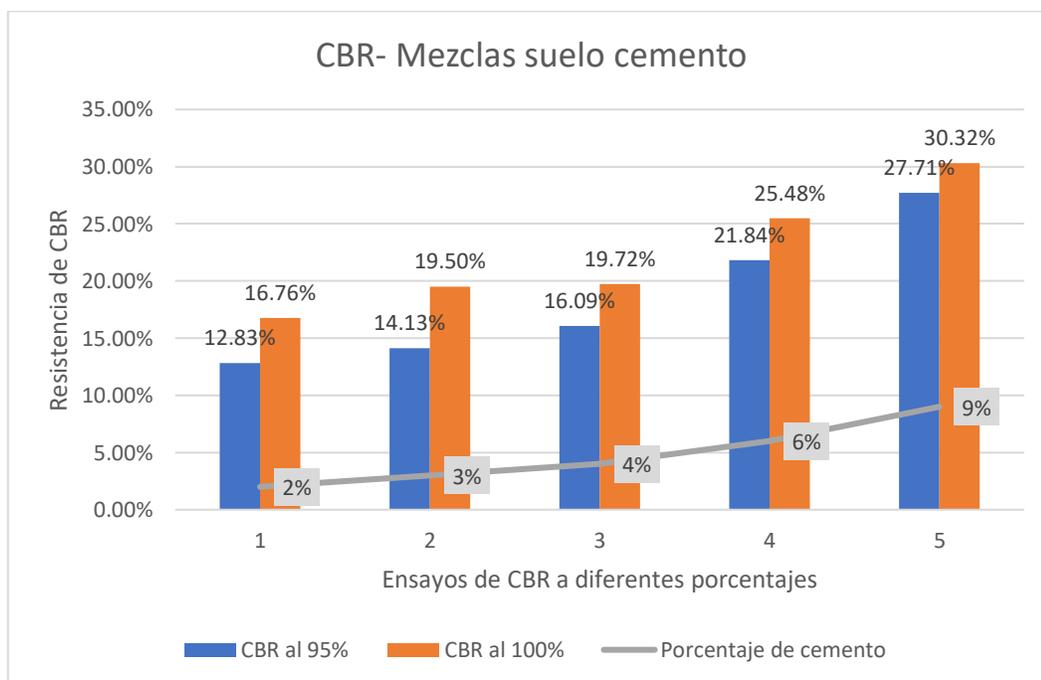
En la tabla 4.3 se muestra los resultados de CBR con diferentes porcentajes de cemento como se puede observar existe una mejora considerable en la resistencia del suelo al ir aumentando el porcentaje de cemento.

Tabla 4.3. CBR con distintos porcentajes de cemento

Porcentaje cemento	Humedad óptima %	Peso unitario gr/cm ³	CBR al 95%	CBR al 100%
2%	10	2,10	12,83%	16,76%
3%	10,16	2,11	14,13%	19,5%
4%	10,27	2,11	16,09%	19,72%
6%	10,41	2,13	21,84%	25,48%
9%	10,94	2,17	27,71%	30,32%

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 4.6. Variación de la resistencia de CBR de acuerdo a diferentes % de cemento



Fuente: Elaboración propia

Como se muestra en el gráfico 4.6 se puede observar que existe un aumento de la resistencia del suelo en el ensayo de CBR a medida que va aumentando el porcentaje de cemento, también se puede apreciar que con un porcentaje de cemento del 2% ya se cumple con lo especificado de en la Norma Boliviana del rango mínimo de CBR para que una subrasante se puede considerar de buena calidad.

4.2.2 Análisis de precios unitarios

El análisis de precios unitarios se realizó de acuerdo a los porcentajes de cemento con los que se realizó las mezclas para ver la variación en la resistencia, para ello se tomó en cuenta la cantidad de cemento de acuerdo a peso por dosificación de metro cubico de mejoramiento que se desea realizar. El análisis de precios unitarios se realizó con los siguientes porcentajes de cemento 0%, 2%, 3%, 6% 8% y 9%, como también se tomó en cuenta la mano de obra es necesario para dicho mejoramiento que se pretende aplicar en el tramo. De todos los porcentajes con los que se realizó dichos precios unitarios se procede a realizar el análisis respectivo y se opta por la opción más viable económicamente. La cual es la que se muestra en la tabla 4.4.

Tabla 4.4. Precios unitarios de cemento con 2% de cemento

ANALISIS DE PRECIOS UNITARIOS				
Item: Subrasante (Suelo A-4(3) mejorada con 2% de cemento).				
m³	MONEDA:	Bs.		
DESCRIPCION	UNID.	CANTIDAD	PRECIO PRODUCTIVO	COSTO PARCIAL
1. MATERIALES				
cemento	kg	42,00	0,90	37,80
TOTAL MATERIALES				37,80
2. MANO DE OBRA				
Peón	hr.	0,00	10,75	0,03
Ayudante de maquinaria y equipo	hr.	0,00	13,18	0,06
Capataz	hr.	0,00	18,02	0,06
Chofer	hr.	0,02	16,25	0,34
Operador equipo pesado	hr.	0,00	20,00	0,10
SUB TOTAL MANO DE OBRA				0,60
<i>CARGAS SOCIALES 60%</i>				0,36
<i>IMPUESTOS IVA MANO DE OBRA 14,94%</i>				0,14
TOTAL MANO DE OBRA				1,10
3. EQUIPO MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS				
Motoniveladora 120G	hr.	0,00	320,00	1,55
Camion aguatero 6000 lts	hr.	0,02	150,00	3,17
Rodillo Pata de Cabra	hr.	0,00	223,04	0,89
Compactador de neumático	hr.	0,00	153,34	0,61
<i>HERRAMIENTAS 5%</i>				0,06
TOTAL EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS				6,28
4. GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS				
<i>GASTOS GENERALES 10%</i>				4,52
TOTAL GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS				4,52
5. UTILIDAD				
<i>UTILIDAD 7%</i>				3,48
TOTAL UTILIDAD				3,48
6. IMPUESTOS				
<i>IMPUESTOS IT 3,09%</i>				1,64
TOTAL IMPUESTOS				1,64
COSTO TOTAL DEL ITEM EN BOLIVIANOS				54,82
COSTO TOTAL DEL ITEM EN DOLARES				7,91

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.5. Precios unitarios del cemento tanto en bolivianos como en dólares

Precios unitarios para diferentes % de cemento		
% de cemento	Costo en Bs por m ³	Costo en Sus por m ³
2%	54,82	7,91
3%	55,04	7,94
4%	55,05	7,94
6%	55,47	8
9%	56,35	8,13

Fuente: Elaboración propia

4.3 Comparación de resultados

La comparación de los resultados que se tiene en esta investigación se realiza entre los ensayos que se realizó en el suelo natural con la mezcla de cemento en los porcentajes de 0%, 2%, 3%, 6% 8% y 9%.

Como ya se mencionó anteriormente en la compactación no hubo variedad de entre un porcentaje y otro con cemento para obtener la humedad optima y la densidad máxima

Se analizo la resistencia del suelo natural por medio de ensayos de CBR obteniendo como resultado un CBR de nivel bajo según normativa una subrasante que contenga este porcentaje de CBR no es apto para una subrasante de carretera, por ende, se realizó la mezcla de suelo con cemento probando diferentes porcentajes tomando como mínimo un porcentaje del 2% según lo que indica la norma boliviana ABC.

Observando los resultados de los ensayos de CBR se opta por tomar el porcentaje de cemento del 2% porque con este porcentaje se cumple lo especificado según normativa ABC en su porcentaje mínimo, los demás porcentajes ensayos no se los considera porque al tener un mayor porcentaje de cemento la resistencia es mayor sin embargo el costo también llegaría a ser elevado.

Tomando como determinación final se opta por una mezcla de cemento del 2% con una humedad optima del 10% y una densidad máxima de 2.10 gr/cm³, considerando esto de acuerdo al punto más desfavorable a lo largo del tramo.

Tabla 4.6. Tabla resumen de mezclas de suelo-cemento al 2%

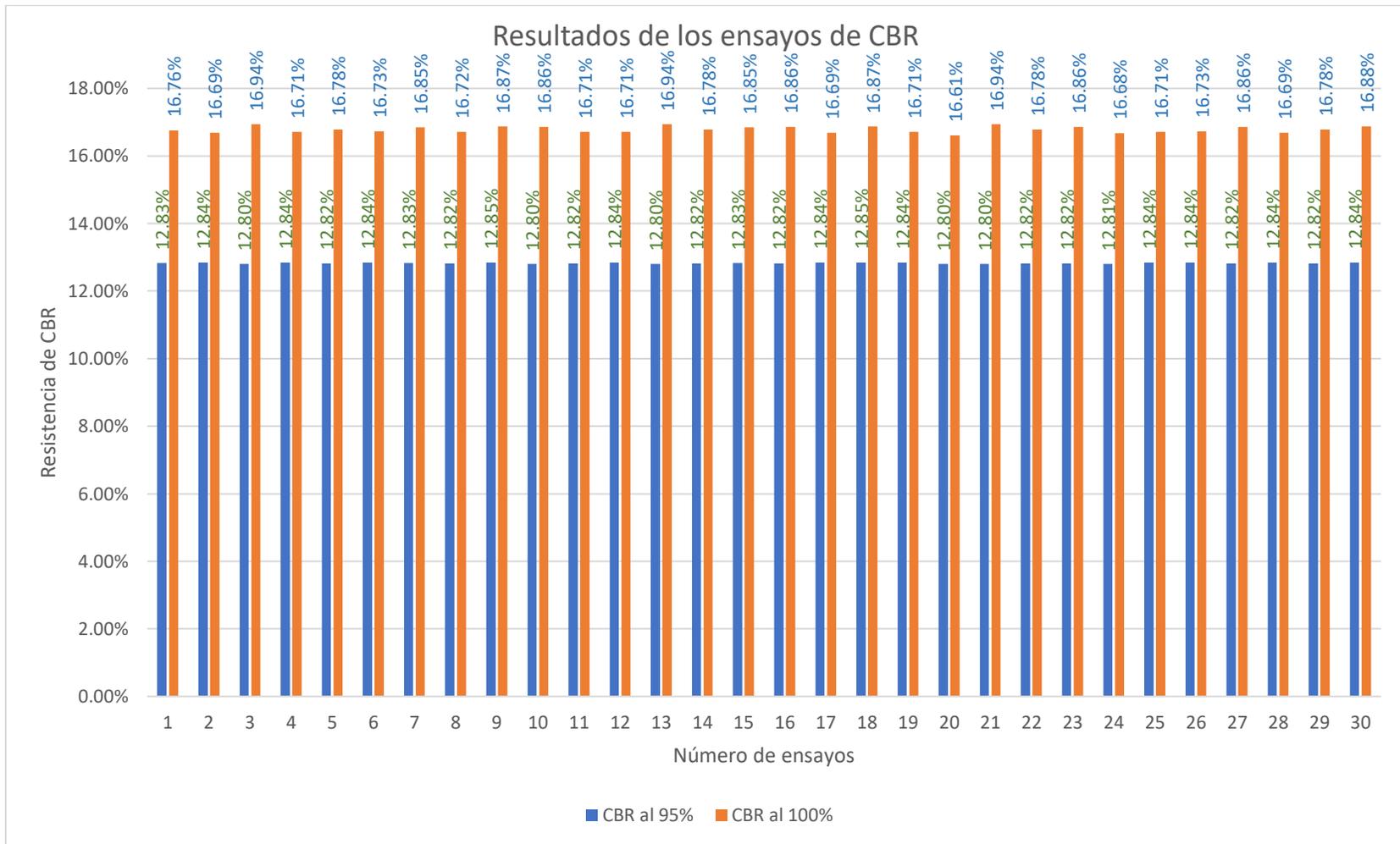
Ensayo	Clasificación de suelo	Humedad óptima %	Peso unitario gr/cm ³	CBR al 95%	CBR al 100%
1	A-4(3)	10	2,10	12,83%	16,76%
2	A-4(3)	10	2,10	12,84%	16,69%
3	A-4(3)	10	2,10	12,8%	16,94%
4	A-4(3)	10	2,10	12,84%	16,71%
5	A-4(3)	10	2,10	12,82%	16,78%
6	A-4(3)	10	2,10	12,84%	16,73%
7	A-4(3)	10	2,10	12,83%	16,85%
8	A-4(3)	10	2,10	12,82%	16,72%
9	A-4(3)	10	2,10	12,85%	16,87%
10	A-4(3)	10	2,10	12,80%	16,86%
11	A-4(3)	10	2,10	12,82%	16,71%
12	A-4(3)	10	2,10	12,84%	16,71%
13	A-4(3)	10	2,10	12,80%	16,94%
14	A-4(3)	10	2,10	12,82%	16,78%
15	A-4(3)	10	2,10	12,83%	16,85%
16	A-4(3)	10	2,10	12,82%	16,86%
17	A-4(3)	10	2,10	12,84%	16,69%
18	A-4(3)	10	2,10	12,85%	16,87%
19	A-4(3)	10	2,10	12,84%	16,71%
20	A-4(3)	10	2,10	12,80%	16,61%
21	A-4(3)	10	2,10	12,80%	16,94%
22	A-4(3)	10	2,10	12,82%	16,78%
23	A-4(3)	10	2,10	12,82%	16,86%
24	A-4(3)	10	2,10	12,81%	16,68%
25	A-4(3)	10	2,10	12,84%	16,71%
26	A-4(3)	10	2,10	12,84%	16,73%
27	A-4(3)	10	2,10	12,82%	16,86%

Ensayo	Clasificación de suelo	Humedad óptima %	Peso unitario gr/cm ³	CBR al 95%	CBR al 100%
28	A-4(3)	10	2,10	12,84%	16,69%
29	A-4(3)	10	2,10	12,82%	16,78%
30	A-4(3)	10	2,10	12,84%	16,88%

Fuente: Elaboración propia

Con el porcentaje óptimo de cemento que se definió se procede a realizar 30 ensayos con la humedad óptima ya definida para ver la variación de la resistencia del CBR en los diferentes puntos de muestreo. Si bien se redujo en algunos ensayos la resistencia de igual manera se encuentra dentro de los parámetros que especifica la norma por lo cual se llega a la conclusión de que el porcentaje óptimo de la mezcla de suelo con cemento es del 2% de cemento reemplazado en peso de suelo.

Gráfico 4.7. Resumen de las resistencias del CBR al 2% de cemento



Fuente: Elaboración propia

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIÓN

5.1 Conclusiones

- Se caracterizó el suelo a lo largo del tramo de investigación JUNACAS-SANTA ROSA DE POLLA, dando como resultado una clasificación por el método AASHTO, tomando como referencia los resultados de granulometría y los límites de consistencia según se especifica en la norma, dando como resultado un suelo del tipo fino en una clasificación de A-4(3).
- Se verifico las propiedades del cemento realizando la caracterización del mismo por medio del peso específico y la finura del cemento, dando como resultados ya establecidos en sus especificaciones técnicas de fabricante. Estos 8 ensayos de caracterización solo se realizaron para comprobar las especificaciones de fabricante y no para usarlas como un parámetro para algún calculo determinado.
- Al realizar las diferentes dosificaciones con los distintos porcentajes de cemento a analizar se pudo apreciar variación en los resultados de las mezclas de suelos como se detalla a continuación. En el ensayo de compactación T-99 modificado (con 56 golpes) al ir aumentando el porcentaje de cemento se pudo observar un aumento también en la densidad del suelo y en algunos porcentajes el contenido de humedad aumentaba y en otros disminuía.
- Al obtener los resultados de los ensayos de CBR tanto en los moldes que se realizaron de 12, 25 y 56 golpes se pueden observar que en los distintos moldes la resistencia va aumentando con la cantidad de golpes por ser más compactado, y al aumentar el porcentaje de cemento también existen variaciones en la resistencia por lo que se pudo observar que la resistencia del suelo aumenta al mismo tiempo que aumenta el % de cemento.
- Se comparo los resultados de mejoramiento en la resistencia de la mezcla de suelos con cemento con los diferentes porcentajes que se realizó la dosificación, encontrando una variación de la misma al incrementar el porcentaje de cemento en la mezcla realizada.

- Al concluir con la presente investigación podemos afirmar que se logró de manera satisfactoria el objetivo principal propuesto en la presente investigación el cual es mejorar la resistencia del suelo por medio de la mezcla de suelo con cemento.
- Se realizó los precios unitarios para saber el costo que llevaría al realizar este tipo de mejoramiento para saber que opción es la más viable económicamente y a la vez de manera técnica.
- Se llegó a tomar el porcentaje del 2% de cemento en relación a su peso del suelo para poder cumplir la resistencia de CBR necesario para una subrasante.

5.2 Recomendaciones

- se recomienda tener cuidado a la hora de extracción de la muestra del suelo para realizar los ensayos necesarios de caracterización del suelo y no haya un error posterior a la hora de realizar dicha clasificación del suelo del tramo de investigación.
- Se recomienda que el cemento a utilizar no pierda las propiedades de fábrica para un mejor rendimiento del mismo, cuidar de que no se encuentre en lugares húmedos ni que se haga con grumos.
- Se recomienda tener todo el equipo necesario a la hora de realizar los ensayos de laboratorio, tanto como los ensayos de caracterización del suelo como los ensayos de CBR y una piscina de saturación.
- Se debe tener en cuenta la cantidad de agua para la mezcla en cada variación de dosificación de acuerdo a su contenido de humedad óptimo para cada mezcla de suelo con cemento
- Se recomienda hacer una mezcla de suelo cemento con un porcentaje del 2% de cemento para el mejoramiento del tramo de investigación para dar una mejor transitabilidad a los comunarios de dicha zona.
- Tomar en cuenta el tramo más crítico para aplicar las propiedades del suelo para su mejora, de esta manera garantizar la mejora a lo largo de todo el tramo en sus condiciones más desfavorables.
- A la hora de realizar los pesos respectivos de las muestras tener el debido cuidado y usar una balanza que sea lo más precisa posible.