

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

Los suelos, en muchas ocasiones no presentan las mejores características para ser usados en los diferentes proyectos de ingeniería, ya que presentan una resistencia deficiente, sufren deformaciones, desgastes y al largo plazo se deterioran de manera negativa a causa de los agentes atmosféricos. De acuerdo a esto, se realizan estabilizaciones de suelos, es un proceso que mejora sustancialmente propiedades tales como estabilidad, durabilidad, resistencia y plasticidad. Cabe resaltar que existen varios tipos de estabilización, pero en este proyecto nos centralizaremos del tipo mecánico, donde se mezclan y compactan suelos de granulometría variada para generar cohesión entre partículas, y de tipo química, el tratamiento con sal es un método para estabilizar los suelos, aumenta el tiempo de evaporación, hace que no pierdan la humedad rápidamente y ayuda a transformar las características mecánicas de los suelos inestables en materiales utilizables y económica.

Son muchas las sales que se pueden utilizar para la estabilización de suelos, sin embargo, por razones económicas, el cloruro de sodio es el que más se ha empleado en carreteras, y en otros casos, se han utilizado con mayor o menor éxito en función de las condiciones de cada caso.

La estabilización física se remonta a la segunda década del presente siglo, ocurriendo en los E.U.A. los primeros trabajos en los que se usó con plena conciencia de sus objetivos. la granulometría suele ser el requisito más relevante, la mezcla adecuada de estos dos tipos de suelo puede dar como resultado un material estable en el que se puede aprovechar la gran fricción interna de uno y la cohesión del otro para que las partículas se mantengan unidas.

En nuestro país Actualmente se realizó una estabilización Química en el tramo PT05, UYUNI - HITO 60, en las progresivas 285+000-305+000 aproximadamente (Cruce San Cristóbal - Rio Grande). Donde se aplicó salmuera de bischofita en la capa de rodadura sin dosificar como supresor de polvo con riego superficial; Eso hace que se estabilice y se

una las partículas dándole consistencia. Sin embargo, no es resistente al agua, es por eso que se debe regar cada año y con preferencia 2 veces por año.

Actualmente la gran mayoría de carreteras rurales de nuestro país se encuentran estabilizadas con agregados, pero se tiene información limitada de materiales de canteras, se hace uso de los agregados sin tener en cuenta muchas veces sus propiedades físicas y mecánicas, las mismas que determinan el comportamiento del material en las diferentes obras de construcción de carreteras a nivel de afirmado.

El personal encargado de mantenimiento (SEDECA ENTRE RÍOS) informa que no cuentan con laboratorio en la zona y debido a eso el trabajo se desarrolla empíricamente, es por eso que realizan el mantenimiento de la carretera constantemente.

1.2. Situación problemática

La creciente importancia de mejorar e intervenir en las vías de comunicación de áreas rurales en nuestro país, hace que sea necesario la búsqueda de múltiples alternativas en el uso de estabilizantes de suelos para mejorar las propiedades físico - mecánicas del suelo. debido a que más del 50% son caminos de tierra.

Según INE(2021) nuestro país posee alrededor de 202.037 km de caminos; los cuales 31.080 km son caminos completamente pavimentados, otros 50.353 km aún son caminos de ripio, unos 113.068 km son todavía caminos de tierra y finalmente otros 1.018 km están empedrados.

Actualmente la gran mayoría de carreteras rurales de nuestro país se encuentran estabilizadas químicas, física y mecánicamente; además existen tramos que solo se hallan ripliadas con agregados de canteras o aluviales, donde se hace uso de los agregados sin tener en cuenta muchas veces sus propiedades físicas y mecánicas, y mucho menos de la subrasante las mismas que determinan el comportamiento del material en las diferentes obras de construcción de carreteras a nivel de afirmado.

En nuestro medio (Prov. O'Connor) se vienen realizando diversos tipos de obra civil usando materiales procedentes de las canteras, sin embargo, los constructores que

adquieren dicho material lo utilizan sin conocer sus propiedades debido a que no cuentan con un laboratorio en la zona y debido a eso el trabajo es empíricamente. Esto genera un alto grado de incertidumbre al momento de realizar un mejoramiento ya que al no conocer las propiedades de sus componentes, no se logra la resistencia esperada, como consecuencia genera un menor flujo vehicular, accidentes, deficiente comercialización, salud y presencia de enfermedades a consecuencia del polvo que se genera en el tramo; el mantenimiento de la zona se realiza frecuentemente y más aún en temporadas de lluvias debido que es un camino interprovincial y alterno que conecta a la red departamental.

La presente investigación pretende contribuir de manera técnica para dar solución a la baja capacidad portante de la subrasante en el tramo Canaletas-Entre Ríos (camino antiguo). Es por eso que se pretende encontrar una dosificación apropiada para realizar una estabilización, mejorando sus propiedades físicas y mecánicas de la subrasante usando canteras de la zona y sal existente en Saladito y Taquillos.

1.2.1. Problema

¿Cómo una estabilización de la subrasante usando canteras cercanas a la Zona y la sal, mejorara las condiciones físicas y mecánicas para el tramo antiguo Canaletas-Entre Ríos?

1.2.2. Relevancia y factibilidad del problema

El factor más importante es el mejoramiento de las propiedades físicas y mecánicas de la subrasante para la conservación de vías terrestres a través de distintas dosificaciones con canteras de la zona y adición de sal en el camino antiguo Canaletas – Entre Ríos.

La caracterización de los agregados de cantera, suelo natural y combinaciones correspondientes se realizó en los laboratorios de suelos y hormigón de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho. Y el estudio químico de la sal se ejecutó en CEANID (Centro de Análisis, Investigación y Desarrollo).

1.2.3. Delimitación temporal y espacial de la investigación

El presente trabajo de investigación se encuentra en el tramo antiguo Canaletas- Entre Ríos ubicado en la provincia O'Connor departamento de Tarija, donde se realizará la estabilización de la subrasante, cuyo objetivo es encontrar una dosificación óptima, los datos servirán de acuerdo al tiempo que perdure el trabajo investigativo.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Estabilizar la subrasante a través de una dosificación óptima incorporando canteras de la zona y adición de sal en el camino antiguo Canaletas – Entre Ríos para mejorar las características físicas y mecánicas del suelo.

1.3.2. Objetivos específicos

- Realizar un estudio de sus propiedades mecánicas del suelo natural de la carretera en estudio.
- Caracterizar la sal y los materiales de las canteras cercanas al tramo Canaletas - Entre Ríos.
- Determinar una dosificación óptima de la estabilización del suelo natural y la sal.
- Determinar la dosificación óptima de la estabilización mixta con los materiales suelo natural, canteras y la sal.

1.4. Hipótesis

Si, al estabilizar la subrasante con canteras de la zona y adición de sal en el tramo antiguo Canaletas- Entre Ríos con diferentes dosificaciones se podrá mejorar las características físicas y mecánicas del suelo, obteniendo propiedades superiores al suelo natural.

1.5. Justificación

La presente investigación permite contribuir de manera técnica para dar solución a la baja capacidad portante del suelo natural en el tramo Canaletas-Entre Ríos (camino antiguo) para mantener la conservación de vías terrestres o para la posible ejecución de proyectos de ingeniería en el futuro. realizando mejoras en sus propiedades físicas y mecánicas,

incorporando agregados de canteras existentes en la zona además la adición de sal natural que se encuentra en forma de roca en la comunidad de Saladito y Taquillos.

Este proyecto trae consigo beneficios económicos y sociales a su población se beneficiarán comunidades como ser: Canaletas, Narvárez, San Diego, San Josecito, La Vilca, Sivingal y Las Lomas quienes podrán transitar y sacar sus productos al mercado. Además, se beneficia el sector transporte debido a que es más transitable cuando la variante Canaleta - Entre Ríos se encuentra en malas condiciones o en mantenimiento especialmente en épocas de lluvia.

1.6. Operacionalización de las variables

1.6.1. Variable independiente

Suelos estabilizados con agregados de cantera y la adición de sal.

1.6.2. Variable dependiente

Combinación y dosificación óptima entre las diferentes posibilidades de combinación de materiales de canteras y porcentajes de sal.

Tabla 1. Cuadro diagnóstico de variables dependientes e independientes

Variable	Descripción	Medición	Unidad
Independientes. Suelos estabilizados con agregados de cantera y la adición de sal	Clasificación del material por el tamaño de sus partículas.	Granulometría	%
	Determinación de su consistencia para su clasificación	límites de consistencia	%
	Densidad en función del contenido de humedad.	Proctor	Kn-m/m ³
	Resistencia al corte de un suelo bajo condiciones de humedad y densidad controladas.	CBR.	%
Dependientes Combinación y dosificación óptima entre las diferentes posibilidades de combinación de materiales de canteras y porcentajes de sal	Dosificación en porcentajes de cloruro de sodio para la combinación con el material extraído de canteras.	Condiciones mecánicas CBR	%
	Es la cantidad de sustancia que se encuentran en la sal.	componentes químicos de la sal	%

Fuente: elaboración propia

1.7. Identificación del tipo de Investigación

La presente investigación es de tipo experimental y explicativa donde se basó en la observación percibiendo el comportamiento de los experimentos realizados con el suelo natural, incorporando diferentes porcentajes de agregados de cantera y sal.

1.8. Unidad de estudio y decisión muestral

1.8.1. Unidad de estudio

El presente proyecto se orienta principalmente en la estabilización de la subrasante, donde ésta se llega a convertir en la unidad de estudio y para poder realizarlo, se efectuará una estabilización mecánica y química con agregados de cantera y adición de sal con varias proporciones por medio de los ensayos correspondientes. Para finalmente llevar a cabo un

análisis de resultados, donde se determina todas las características físicas y mecánicas del tramo en estudio Canaletas – Entre Ríos.

1.8.2. Población

Para el desarrollo del presente proyecto se toma como población al tramo antiguo Canaletas Entre Ríos. donde se realizó ensayos con deferentes proporciones de sal y agregado de cantera con el suelo natural más desfavorable. Se evaluó: análisis granulométrico, límites de consistencia, proctor y CBR para su respectivo análisis del comportamiento en la subrasante.

1.8.3. Muestra

El presente proyecto de estabilización de la subrasante se realiza en el departamento de Tarija, provincia O'Connor con agregados de la zona y adición de sal donde las primeras muestras para caracterización se extrajeron de 5 calicatas cada 500 m. con el apoyo de una inspección visual del tamo en estudio, siendo del camino antiguo F1 (Puente Canaletas-Entre Ríos). Las segundas muestras se extrajeron de la cantera1(San Simón), cantera2 (San Diego), cantera 3(Moreta), cantera 4 (Los Naranjos), cantera 5 (Narváez). Y la tercera muestra siendo la sal rosada se extrajo de Exprosal. Ubicada en San Simon a 15km del pueblo de Entre Ríos.

1.8.4. Selección de las técnicas de muestreo

El tipo de muestreo a emplear en la siguiente investigación es el estratificado mediante el análisis de los conceptos sobre agregados de canteras y fundamentos de la estabilización química con sal, que estará basado en la toma de datos y la aplicación de ensayos, después de los ensayos se hará un análisis donde se examinará los resultados y se llegará a la conclusión sobre la investigación si fue factible realizarlo.

1.8.Métodos y técnicas empleadas

Los métodos y técnicas del presente proyecto se describen a continuación:

1.9.1. Métodos

El método que se utilizó en la presente investigación es el empírico, donde se basó en la observación percibiendo el comportamiento de los experimentos realizados con el suelo natural, incorporando diferentes porcentajes de sal y agregados de cantera.

1.9.2. Técnicas

Se basa en la investigación de campo, donde se realiza ensayos con diferentes proporciones de sal y agregados de cantera, donde se evaluará el análisis granulométrico, límites de consistencia, compactación y CBR; para su respectivo análisis del comportamiento en la subrasante.

1.10. Procesamiento de la información

Se realizará los ensayos de laboratorio para suelo natural, suelo sal, suelo grava y suelo grava sal, después de realizar la parte práctica de la investigación se realizará un estudio de gabinete, cuyos resultados un análisis.

1.11. Alcance de la investigación

El alcance a investigar es una estabilización de la subrasante a través de una dosificación óptima con agregados de canteras de la zona y adición de sal en el camino antiguo Canaletas – Entre Ríos.

Donde se trabajó con el suelo más desfavorable del tramo, perteneciente al grupo A-4₍₅₎ en el cual se realizó mezclas de suelo natural con porcentajes de 1,2,3,5,7, y 10% de sal rosada tanto granular y en forma de solución; suelo grava con porcentajes de 5,10,15,20 y 30% de la cantera más favorable y una combinación con el porcentaje óptimo de sal.

CAPÍTULO II

ESTABILIZACIÓN DE LA SUBRASANTE

CAPÍTULO II

ESTABILIZACIÓN DE LA SUBRASANTE

2.1. Carretera

Camino para el tránsito de vehículos motorizados de por lo menos dos ejes, cuyas características geométricas, tales como: pendiente longitudinal, pendiente transversal, sección transversal, superficie de rodadura y demás elementos de la misma, deben cumplir las normas técnicas vigentes del Ministerio de Transportes y Comunicaciones.¹

Carretera afirmada. Carretera cuya superficie de rodadura está constituida por una o más capas de afirmado.

Carretera sin afirmar. Carretera a nivel de subrasante o aquella donde la superficie de rodadura ha perdido el afirmado.

Carretera pavimentada. Carretera cuya superficie de rodadura, está conformada por mezcla bituminosa (flexible) o de concreto portland (rígida).

Trocha carrozable. Carretera sin afirmar a nivel de subrasante o aquella donde la superficie de rodadura ha perdido el afirmado.

Carretera no pavimentada. Carretera cuya superficie de rodadura está conformada por gravas o afirmado, suelos estabilizados o terreno natural.

Camino o pista de tierra. Pueden haber sido aplanadas con maquinaria o no. Al ser poco permeables, cuando llueve se forman charcos y profundas marcas de rodadas de vehículos pesados. La adherencia de la carretera es mala.

Camino de ripio. También denominado consolidado, es un camino de tierra, no asfaltado, al que se le agrega grava y posteriormente mediante maquinaria se aplanan y endurece. Es más permeable que la pista de tierra. La adherencia es mala.²

Los caminos de ripio o enripiados son caminos consolidados con ripio un relleno de cascajo, casquijo o grava utilizado para pavimentar. Al ser más permeables, los caminos de ripio dan una mayor transpirabilidad que los de tierra, pero al igual que estos últimos, requieren mucho más mantenimiento que los asfaltados y levantan mucha polvareda.

¹ (ABC., 2012)

² (Paul, 2018)

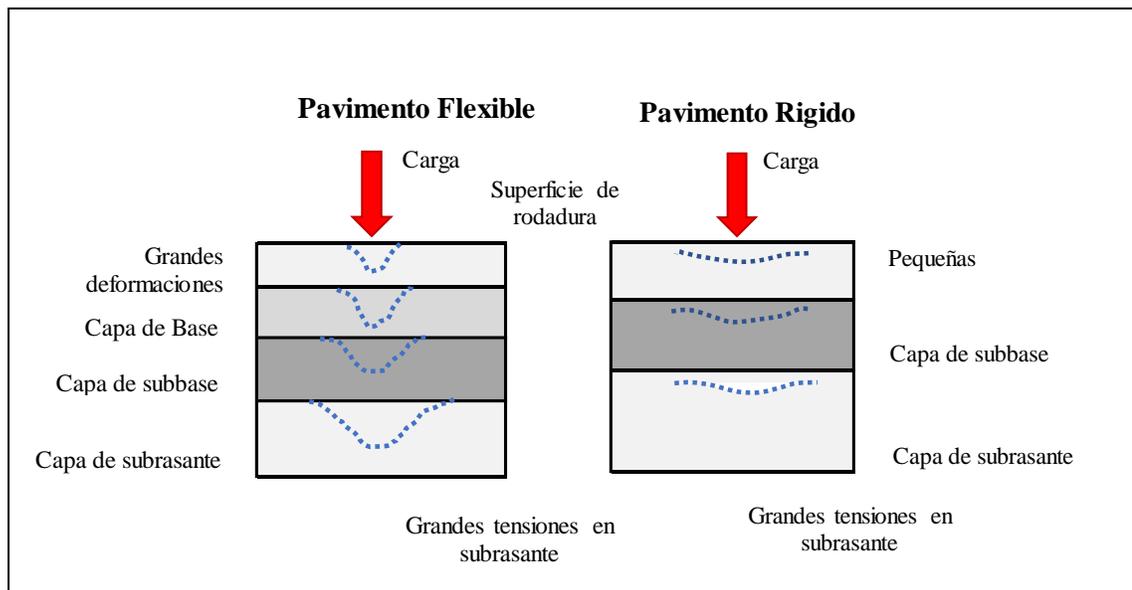
En los caminos de ripio, los vehículos tienen menor estabilidad y adherencia que en el asfalto.

Arena. Es la peor de todas las carreteras. No es plana, la adherencia es mala, hay frecuentes marcas de rodadas y bancos de arena que pueden hacer que el vehículo se quede clavado.³

2.1.1. Clasificación de carreteras según su rodadura

Según el tipo de rodadura las carreteras se clasifican en carreteras de pavimento flexible y carreteras de pavimento rígido.

Imagen 1. Tipo de pavimentos



Fuente: Iturbide (2002)

2.1.1.1. Pavimentos flexibles

La característica fundamental del pavimento flexible es que tiene una conformación de varias capas de pavimento y una capa de rodadura consistente en un tratamiento con cemento asfáltico denominado carpeta asfáltica que puede ser del tipo concreto asfáltico, macadam asfáltico, tratamientos superficiales o capas de sello dependiendo de las

³ (Paul, 2018)

necesidades de cada proyecto, todas ellas utilizan como elemento básico el cemento asfáltico cuya producción proviene de la destilación directa del petróleo crudo.⁴

2.1.1.2. Pavimentos rígidos

Los pavimentos rígidos o de concreto hidráulico consisten básicamente en una losa de concreto simple o armado, apoyada directamente sobre una base o sub base. La losa, debido a su rigidez y alto módulo de elasticidad, absorben gran parte de los esfuerzos que se ejercen sobre el pavimento lo que produce una buena distribución de las cargas de las ruedas, dando como resultado tensiones muy bajas en la subrasante. Difieren de los pavimentos flexibles, en que poseen una resistencia considerable a la flexión, además de que se ven considerablemente afectados por los cambios de temperatura.⁵

2.1.2. Definición de las capas de un pavimento

A continuación, se describe las diferentes capas del pavimento tanto flexible como rígido.

2.1.2.1. Capa de rodadura

La capa de rodadura es la capa superficial del pavimento por donde circulará el tráfico, colocada inmediatamente sobre la base. En el caso de pavimentos flexibles está constituida por una carpeta asfáltica y en el caso de pavimentos rígidos está constituida por una losa de hormigón.

Comúnmente su espesor varía entre 5-10 cm.

2.1.2.2. Capa base

Considerada la capa estructural del pavimento. Es la capa de material que se construye sobre la subbase, los materiales con los que se construye deben ser de mejor calidad que los de la subbase y su función es la de tener la resistencia estructural para soportar las presiones transmitidas por los vehículos, por lo tanto, las características físico mecánicas y valor soporte de su material deben ser de buena calidad, difícil de encontrar en bancos naturales por lo que comúnmente es preparado en plantas de material.

Comúnmente su espesor varía entre 10-30 cm.

⁴ (Chavez, 2020)

⁵ (Chavez, 2020)

La base estabilizada será ejecutada con materiales que cumplan los siguientes requisitos: Poseer una composición granulométrica encuadrada en una de las columnas de la siguiente tabla, recomendadas por la AASHTO M-147 de 1990.⁶

Tabla 2. Gradaciones para materiales base

Tamiz	Tipo de gradación			
	A	B	C	D
2"	100	100		
1"	-	75-95	100	100
3/8"	30-65	40-75	50-85	50-80
Nº4	25-55	30-60	35-65	35-65
Nº10	15-40	20-45	25-50	25-30
Nº40	8-20	15-30	15-30	10-30
Nº200	2-8	5-15	5-15	0-15

Fuente: ABC (2011)

- La fracción que pasa el tamiz Nº 40 deberá tener un límite líquido inferior o igual a 25% y un índice de plasticidad inferior o igual a 6%. Pasando de este límite, hasta 8 como máximo, el equivalente de arena deberá ser mayor que 30%.
- La fracción fina de la capa base será arena triturada o natural. La fracción que pasa el Tamiz Nº 200 de la serie U.S. Standard no debe ser mayor que dos tercios de la fracción que pasa el tamiz Nº 40 de la misma serie.
- El Índice Soporte de California (CBR) no deberá ser inferior a 90% para pavimentos flexibles y la expansión máxima será de 0,5%, cuando sean determinados con la energía de compactación del ensayo AASHTO T-180D.
- El agregado retenido en el tamiz Nº10 estará constituido de partículas duras y durables, exentas de fragmentos blandos, alargados o laminados y exentos de materia vegetal, terrones de arcilla y otras sustancias perjudiciales. Los agregados gruesos deberán tener un desgaste no superior a 40% a 500 revoluciones según lo determine el ensayo AASHTO T-96.

⁶ ((ABC), 2011)

El 50% de las partículas retenidas en el tamiz N° 4, de la serie U.S. Standard, para los agregados utilizados para capa base en pavimentos flexibles deben tener al menos una cara fracturada por trituración..⁷

2.1.2.3. Capa sub base

Es la capa de material que se construye directamente sobre la subrasante o subrasante mejorada. Es la capa drenante del pavimento que evita que los cambios de volumen producidos en las capas inferiores se transmitan hacia las capas superiores y produzca una fisuración, también es la capa que evita la ascensión capilar de corrientes subterráneas que están por debajo del pavimento. Su función también es reducir el costo de pavimento disminuyendo el espesor de la base..⁸

Comúnmente su espesor varía entre 10-30 cm.

Los materiales a ser empleados en la sub base deben presentar un índice de soporte de California (CBR) igual o mayor a 40% y una expansión máxima de 2%, siendo estos índices determinados por el ensayo AASHTO T-193 con la energía de compactación del ensayo AASHTOT-180-D y para la densidad seca correspondiente al 100 % de la máxima determinada en este ensayo.

Tabla 3. Gradaciones para materiales de sub base

Tamiz	Tipo de gradación		
	A	B	C
3"	100		
2"	-	100	
1 1/2"	-	-	100
1"	-	-	-
3/4"	-	-	-
3/8"	-	-	-
Nº4	15-45	20-50	25-55
Nº10	-	-	-
Nº40	-	-	-
Nº200	0-10	0-10	0-10

⁹Fuente: ABC (2011)

⁷ ((ABC), 2011)

⁸ (Chavez, 2020)

⁹ ((ABC), 2011)

2.1.2.4. Capa de fundación o subrasante

Generalmente es el terreno natural en la cual se apoya toda la estructura del pavimento, es decir, que no forma parte de la estructura en sí. Sin embargo, la capacidad soporte de la subrasante es un factor básico que afecta directamente la selección de los espesores totales de las capas de pavimento. Su finalidad es resistir las cargas que el tránsito transmite al pavimento, transmitir y distribuir las cargas al cuerpo de la carretera, evitar que los materiales finos plásticos del cuerpo de la carretera contaminen el pavimento y economizar los espesores de pavimento.

Su CBR debe ser $\geq 8\%$, no debe tratarse de materiales orgánicos, ni excesivamente cohesivos.

Trabajos que consisten en escarificar, homogenizar, mezclar, uniformizar, humedecer, conformar y compactar la subrasante de una vía a ser pavimentada, previamente construida para adecuar su superficie a la sección típica y elevaciones del proyecto, establecidas en los planos u ordenadas por el Supervisor, efectuando cortes y rellenos con un espesor no mayor de 200 mm con el objeto de regularizar y mejorar mediante estas operaciones las condiciones de la subrasante como cimiento de la estructura del pavimento. Se consideran materiales inadecuados para subrasante, los clasificados en el grupo A-8 A.A.S.H.T.O M 145 que son suelos altamente orgánicos, constituidos por materiales vegetales parcialmente carbonizados o fangosos. Su clasificación está basada en una inspección visual y ni depende del porcentaje que pasa el tamiz 0,075 mm (Nº.200), del límite líquido, ni del índice de plasticidad. Están compuestos principalmente de materia orgánica parcialmente podrida y generalmente tienen una textura fibrosa de color café oscuro o negro y olor a podredumbre. Son altamente compresibles y tienen baja resistencia. Además, basuras o impurezas que puedan ser perjudiciales para la estructura del pavimento. Materiales adecuados para subrasante, son suelos de preferencia granulares con menos de 3% de hinchamiento de acuerdo con el ensayo A.A.S.H.T.O T 193 (CBR), que no tengan características inferiores a los suelos que se encuentren en el tramo o sección que se esté reacondicionando y que, no sean inadecuados según el literal anterior.

La subrasante reacondicionada debe ser compactada en su totalidad con un contenido de humedad dentro de +/- 3% de la humedad óptima hasta lograr el 90% de compactación respecto a la densidad máxima, A.A.S.H.T.O T 180.¹⁰

Tabla 4. Clasificación y uso del suelo según el valor del CBR

CBR	Clasificación cualitativa del suelo	Uso
2-5	Muy mala	Sub- rasante
5-8	Mala	Sub- rasante
8-20	Regular- Buena	Sub- rasante
20-30	Excelente	Sub- rasante
30-60	Buena	sub-base
60-80	Buena	base
80-100	Excelente	base

Fuente: Assis A. (1988)

2.2. Estabilización de suelos

Llamamos estabilización de suelos al proceso mediante el cual se someten los suelos naturales a cierta manipulación o tratamiento de modo que podamos aprovechar sus mejores cualidades, obteniéndose un firme estable, capaz de soportar los efectos del tránsito y las condiciones de clima más severas.¹¹

El propósito de estabilizar suelos es alterar sus propiedades físicas y mecánicas, incrementar su resistencia y su durabilidad con el fin de obtener un material de fundación satisfactorio a través de procedimientos mecánicos y/o físico-químicos.¹²

Modificar las propiedades del material existente para hacerlo capaz de cumplir en mejor forma los requisitos deseados o, cuando menos, que la calidad obtenida sea adecuada. Las propiedades de los suelos que deben ser tenidas en cuenta por el ingeniero, son las siguientes:

Estabilidad volumétrica. La expansión y contracción de muchos suelos, originadas por los cambios de humedad, se pueden presentar en forma rápida o acompañando a las

¹⁰ ((ABC), 2011)

¹¹ (Arriola, 2014)

¹² (ABC, 2011)

variaciones estacionales o con la actividad del ingeniero. Por tanto, si las expansiones que se desarrollan debido a un incremento de humedad no se controlan en alguna forma, estas presiones pueden ocasionar graves deformaciones y rupturas en el pavimento y, en general, en cualquier obra. Es por ello que resulta necesario detectar los suelos expansivos, su composición y el tratamiento más adecuado.

Resistencia. La resistencia de los suelos, con algunas excepciones, es en general más baja cuanto mayor sea su contenido de humedad.

Los suelos arcillosos al secarse, alcanzan grandes resistencias teniéndose inclusive la condición más alta de resistencia cuando se calientan a temperaturas muy elevadas como sucede en la fabricación de tabiques y ladrillos. Existen casos en donde la disminución de la humedad puede significar reducción en la resistencia, pues se han presentado casos de deslizamientos de tierra provocados por arcillas que se secaron y se agrietaron.

Por otro lado, dependiendo de la humedad y energía de compactación, se pueden lograr diferentes características de resistencia

Permeabilidad. En los suelos la permeabilidad se plantea, en términos generales, en dos problemas básicos, como lo son el relacionado con la disipación de las presiones de poro y el relacionado con el flujo del agua a través del suelo.

Compresibilidad. Los cambios en volumen o compresibilidad, tienen una importante influencia en las propiedades de los suelos, pues se modifica la permeabilidad, se alteran las fuerzas existentes entre las partículas tanto en magnitud como en sentido, lo que tiene una importancia decisiva en la modificación de la resistencia del suelo al esfuerzo cortante y se provocan desplazamientos.

Durabilidad. Se involucran en este concepto aquellos factores que se refieren a la resistencia al intemperismo, a la erosión o a la abrasión del tráfico; de esta manera, los problemas de durabilidad en las vías terrestres suelen estar muy asociados a suelos situados relativamente cerca de la superficie de rodamiento.¹³

¹³ (Fonseca I. A., 2002)

2.2.1. Estabilización mecánica

Cuando se diseñan mezclas de suelos, para lograr con ellas unas determinadas propiedades deseables, la granulometría suele ser el requisito más relevante en la fracción gruesa, en tanto que la plasticidad lo es, naturalmente, en la fina. El tamaño máximo de las partículas de la mezcla tiene importancia, puesto que tamaños demasiado grandes son difíciles de trabajar y producen superficies muy rugosas; una proporción demasiado grande de tamaños gruesos conduce a mezclas muy segregables. La presencia de contenidos importantes de materiales finos, menores que la malla 40, hace difícil lograr buenas características de resistencia y de deformabilidad, además de que puede conducir a superficies demasiado lisas y fangosas, cuando están húmedas y pulverulentas, cuando están secas.¹⁴

Imagen 2. Estabilización mecánica, sustitución de suelos



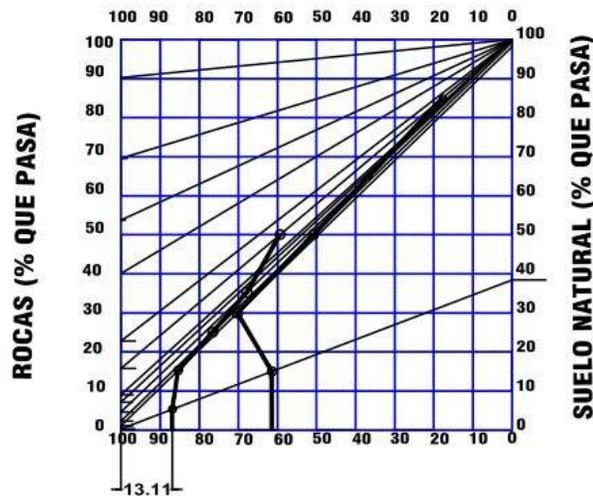
Fuente: Aguirre (2020)

En caso de disponerse de dos materiales, en que han de mezclarse para obtener un tercero de características especificadas, consiste en el método analítico y el gráfico.

¹⁴ (Fonseca I. A., 2002)

Método gráfico. En la parte superior e inferior se marcan los porcentajes a usar de cada agregado y a la derecha e izquierda los porcentajes que pasan, se marcan los rangos que delimita la norma para el porcentaje que pasa para cada tamiz.¹⁵

Imagen 3. Combinación grafica de agregados



Fuente: Elaboración propia

2.2.2. Estabilización química

Se refiere principalmente a la utilización de ciertas sustancias químicas y cuyo uso involucra la sustitución de iones metálicos y cambios en la constitución de los suelos involucrados en el proceso. Dentro de este grupo de estabilización, las sustancias químicas más comunes son:

2.2.2.1. Estabilización con cal

La cal generalmente produce una disminución en la densidad de los suelos, modifica la plasticidad, y aumenta la capacidad soporte y resistencia al corte del material y reduce su hinchamiento. La acción de la cal suele explicarse como efectuada por tres reacciones básicas: La primera es la alteración de la película de agua que rodea los minerales de arcilla. El segundo proceso es el de coagulación o floculación de las partículas del suelo.

¹⁵ (BLOGGER, s.f.)

El tercer proceso a través del cual la cal afecta el suelo, es su reacción con los componentes del mismo para formar nuevos productos químicos.¹⁶

Imagen 4. Estabilización con cal



Fuente: Calco (2019)

2.2.2.2. Estabilización con productos asfálticos

En la estabilización con productos bituminosos tales como asfaltos líquidos, emulsiones asfálticas y alquitrán. La estabilización con estos productos persigue uno o ambos de los siguientes fines: En suelos no plásticos o arenosos, se trata de que ejerza una acción ligante que unida a la fricción propia del suelo, evite deformaciones de la capa mejorada bajo la acción del tránsito. En suelos cohesivos, se busca que el estabilizante aglomere las partículas de arcilla y obture los vacíos, impermeabilizando al suelo y protegiéndolo contra la acción del agua.¹⁷

¹⁶ (Fonseca I. A., 2002)

¹⁷ (Fonseca I. A., 2002)

Imagen 5. Estabilización de suelos con asfalto



Fuente: Rojas. J. (2010)

2.2.2.3. Estabilización con polímeros y resinas

Las resinas sintéticas empleadas para la fabricación de plásticos y las naturales como el Vinsol pueden utilizarse como impermeabilizantes de suelos en cantidades relativamente pequeñas (1 a 2%) porque, para contenidos mayores, la absorción de agua, medida por cualquier ensayo, aumenta.¹⁸

Imagen 6. Estabilización de suelos con polímeros



Fuente: Castro M. (2018)

¹⁸ (Fonseca I. A., 2002)

2.2.2.4. Estabilización con caucho de neumáticos

Este se utiliza comúnmente en carpetas asfálticas para darle mayor resistencia, impermeabilizarla y prolongar su vida útil.¹⁹

Imagen 7. Estabilización con caucho de neumático



Fuente: Duran J. (2019)

2.2.2.5. Estabilización con sal

Las sales se forman a partir de la neutralización de un ácido con una base. Las sales normales tales como el cloruro de sodio (NaCl), cloruro de calcio (CaCl₂) o cloruro de potasio (KCl) son sales completamente neutralizadas, es decir que no contienen exceso de iones ácidos de hidrógeno (H⁺) ni básicos de hidroxilo (OH⁻). Se designan como sales ácidas aquellas que contienen exceso de iones de hidrógeno, como el bicarbonato de sodio (NaHCO₃) y a las que contienen exceso de iones hidroxilo se les designa como sales básicas. En el laboratorio, se han estudiado, un gran número de sales (NaCl, CaCl₂, NaNO₃, Na₂CO₃, BaCl₂, MgCl₂, KCl) pero tanto la economía como su disponibilidad han hecho que solamente se utilicen algunas, siendo las más utilizadas el cloruro de sodio y el cloruro de calcio.²⁰

¹⁹ (Fonseca I. A., 2002)

²⁰ (Veiza, 2021)

A. Estabilización con cloruro de calcio

Impermeabilizan y disminuyen los polvos en el suelo, principalmente para arcillas y limos. Se ha demostrado que con la adición de cloruro de calcio disminuyen las fuerzas de repulsión entre las arcillas, Se ha encontrado un incremento en los pesos volumétricos, también ayuda a mantener constante la humedad en un suelo.

El cloruro de calcio se obtiene como un subproducto en forma de salmuera en algunos procesos industriales, aunque también se puede obtener de algunos arroyos y pozos naturales siendo la fuente más común el obtenido en la elaboración de carbonato de sodio mediante procedimientos químicos.²¹

B. Estabilización con cloruro de sodio

Impermeabilizan y disminuyen los polvos en el suelo, principalmente para arcillas y limos. El cloruro de sodio (NaCl) se presenta en forma de cristales fácilmente solubles en agua, los cuales son higroscópicos y fáciles de conseguir. Al agregar sal a los suelos se considera que se reduce el punto de evaporación del agua, debido al incremento en la tensión superficial. Sin embargo, cuando la superficie expuesta es menor que la evaporación, ésta se empieza a secar y el cloruro de sodio se cristaliza en la superficie y en los vacíos, lo que puede ayudar a formar una barrera que impedirá posteriores evaporaciones. La adición de cloruro de sodio en una arcilla produce decremento en la contracción volumétrica, la formación de costra superficial y la reducción de la variación en la humedad; además, mantienen unidas las partículas no arcillosas y que se encuentran en la superficie, se desprenden con menor facilidad cuando sufren los ataques abrasivos del tránsito.²²

Al igual que en la mayoría de las estabilizaciones, el cloruro de sodio puede aplicarse directamente al suelo a tratar y encontrar una relación en porcentaje que permita estabilizar adecuadamente el suelo.

²¹ (Fonseca I. A., 2002)

²² (Sandino, 2015)

Imagen 8. Riego con salmuera para disminuir el polvo



Fuente: Gutiérrez C. (2021)

formas de aplicación del cloruro de sodio.

B1. Aplicación por grano

Esta forma de emplear consiste en aplicar un porcentaje de cloruro de sodio directamente al suelo, que homogenice de forma uniforme.

La sal rosada de roca se extrae de rocas seleccionadas y extraídas de la cordillera de los Andes bolivianos, donde se originó debido a evaporaciones de antiguas lagunas y los efectos de la lenta meteorización, que grabaron en las rocas los minerales solubles de la corteza terrestre. Estas concentraciones de sal rosada de roca sólo se encuentran en los Andes y el Himalaya.

Su color rosa prueba su gran contenido de hierro y también identifica su procedencia: las profundas capas alimentadas por las infiltraciones minerales de la corteza terrestre, Tiene un 85% de sodio, a diferencia del 99% existente en la sal que consumimos a diario en el país, además de una mayor carga de minerales, entre ellos magnesio, calcio, potasio y yodo natural, no adicionado.²³

²³ (EMI, 2010)

B2. Aplicación por salmuera

El emplear este método de dilución en agua se crea salmuera, la cual es aplicada al suelo controladamente. La salmuera llena los espacios entre las partículas de suelo y establece un método eficiente al mismo tiempo que se agrega la humedad óptima al suelo. Sin embargo, al crear salmuera se corre el riesgo de afectar la maquinaria empleada para su realización, ya que la sal es un agente oxidante.

2.3. Definición de canteras

Las canteras son explotaciones mineras a cielo abierto, generalmente de pequeño tamaño. Los materiales de cantera que se extraen de estos lugares se utilizan en el ámbito de la construcción, ejemplo de esos materiales son los agregados y los pétreos.

A diferencia de otro tipo de explotación minera, los materiales extraídos de las canteras no se someten a concentración.

Las rocas, que por lo general se obtienen en las canteras, son las siguientes: granito, piedra, caliza, travertinos, mármol, pizarra.²⁴

2.3.1. Clasificación de cantera

2.3.1.1. Según su origen

Existen dos tipos fundamentales de canteras:

A. Aluvión o fluvial

Llamadas también canteras fluviales, en las cuales los ríos como agentes naturales de erosión, transportan durante grandes recorridos las rocas aprovechando su energía cinética para depositarlas en zonas de menor potencialidad formando grandes depósitos de éstos materiales entre los cuales se encuentran desde cantos rodados y gravas hasta arena, limos y arcillas; la dinámica propia de las corrientes de agua permite que aparentemente estas canteras tengan ciclos de autoabastecimiento, lo cual implica una explotación económica, pero de gran afectación a los cuerpos de agua y a su dinámica natural.

²⁴ (construvaling, 2020)

B. Roca o peña

Más conocidas como canteras de peña, las cuales tienen su origen en la formación geológica de una zona determinada, donde pueden ser sedimentarias, ígneas o metamórficas; estas canteras por su condición estática, no presentan esa característica de autoabastecimiento lo cual las hace fuentes limitadas de materiales. Están ubicadas en formaciones rocosas, montañas, con materiales de menor dureza, generalmente, que los materiales de ríos debido a que no sufren ningún proceso de clasificación; sus características físicas dependen de la historia geológica de la región, permitiendo producir agregados susceptibles para su utilización industrial; estas canteras se explotan haciendo cortes o excavaciones en los depósitos.²⁵

2.3.1.2. Según el tipo de explotación

a. Canteras a Cielo Abierto. En laderas, cuando la roca se arranca en la falda de un cerro. Su proceso de extracción (explotación) de minerales se ejecuta en la superficie de terreno con maquinarias de gran tamaño.

b. Canteras Subterráneas. Su actividad por debajo de la superficie a través de labores subterráneas. En términos comparativos, la maquinaria que se usa en la minera subterránea es mucho más pequeña que la que se utiliza a cielo abierto, debido a las limitaciones que impone el tamaño de las galerías y labores.²⁶

2.3.2. Procesos realizados en las canteras

El material de cantera no suele tener las propiedades que se le exigen en obra como son una granulometría definida, un tamaño máximo o estar libres de finos por lo que deben ser sometidos a varios procesos para su puesta en obra.

a. Limpieza. Se les quitan las ramas, los finos y otros restos que puedan tener. Suele implicar humedecerlos por lo que al final también tendrán un secado posterior si se requieren secos.

²⁵ (Estrada, 2019)

²⁶ (Estrada, 2019)

b. Triturado. Para conseguir el diámetro máximo necesario se deben romper con las trituradoras. La trituración tiene tres fases. La primaria en la que sale un árido de 2 cm, la secundaria en la que el tamaño oscila entre 1,5 y 0,5 cm y la terciaria que produce arenas.

c. Clasificación. Dependiendo del diámetro se puede hacer con un cribado, aunque si el diámetro es menor de 2 mm resulta más rentable usar separación hidráulica y neumática.

2.3.3. Usos del material extraídos de las canteras

Los materiales extraídos de las canteras de agregados se utilizan para:

- ✓ Confección de concreto y morteros.
- ✓ Rellenos.
- ✓ Escolleras.
- ✓ Balastos de vías férreas.
- ✓ Bases y sub bases de carreteras.
- ✓ Firmes de aglomerados asfáltico.

2.4. Rocas

Las rocas son agregados naturales duros y compactos de partículas minerales con fuertes uniones cohesivas permanentes que habitualmente se consideran un sistema continuo. La proporción de diferentes minerales, la estructura granular, la textura y el origen de la roca sirven para su clasificación geológica.²⁷

Tabla 5. Clasificación geológica general de las rocas

Clasificación de las rocas por su origen.		
Rocas sedimentarias	Dendríticas:	cuarcita, arenisca, lutita, limolita, conglomerado.
	Químicas:	evaporitas, caliza domítica.
	Orgánicas:	caliza, carbón, rocas coralíferas.
Rocas Ígneas	Plutónicas:	granito, gabro, diorita.
	Volcánicas:	basalto, andesita, riolita.
Rocas metamórficas	Masivas:	cuarcita, mármol.
	Foliadas o con esquistosidad:	pizarra, ftita, esquistos, gneiss.

Fuente: Vallejo, L. (2002)

²⁷ (Vallejo, 2002)

2.4.1. Tipos de rocas

2.4.1.1. Las rocas Ígneas

Las rocas Ígneas cristalizan a partir de magmas y lavas fundidos. Tanto la composición inicial del magma como la forma en la cual viaja a través de la corteza terrestre y la velocidad de enfriamiento determinan su composición y características finales. Estas características incluyen el tamaño de grano, la forma de cristal, el contenido en minerales y el color, el color es generalmente un indicador preciso de la química y refleja el contenido mineral.²⁸

Imagen 9. Características de las rocas Ígneas según su color

		
Color claro: La riolita una lava ácida tiene más del 65% de sílice y más del 10% de cuarzo.	Color intermedio: La andesita una roca intermedia con un contenido total en sílice del 55 - 65%.	Color Oscuro: El basalto una roca básica con un contenido en sílice del 45 -5%

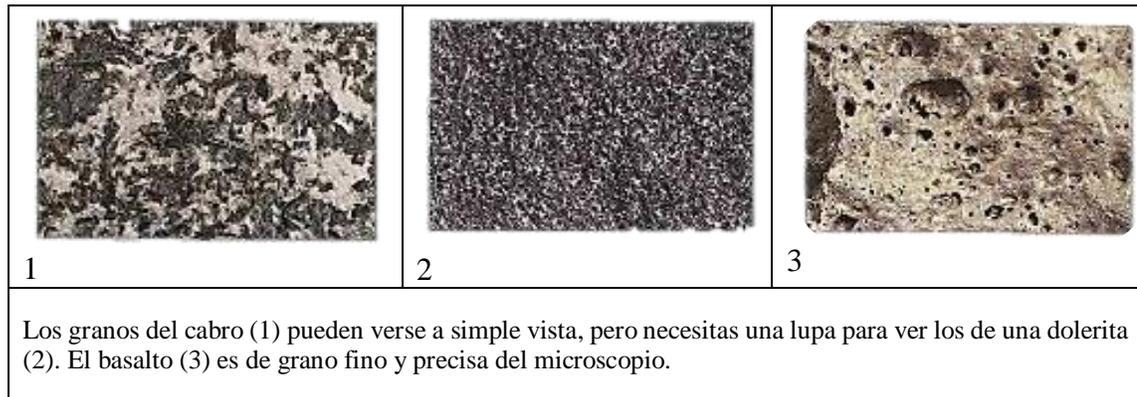
Fuente: Pellant C. (2020)

El tamaño de grano indica si una roca es plutónica (grano grueso) o extrusiva (grano fino). Las rocas ígneas, de grano fino, tales como el gabro tienen cristales con diámetros superiores a 5mm. Las rocas de grano medio como la dolerita tienen cristales de 0.5-5mm y las rocas de grano fino como el basalto tienen cristales inferiores a 0.5mm²⁹

²⁸ (Pellant, 2018)

²⁹ (Pellant, 2018)

Imagen 10. Características de las rocas Ígneas según su color



Fuente: Pellant C. (2020)

2.4.1.2. Rocas Metamórficas

Las rocas metamórficas son rocas que han cambiado considerablemente, a partir de unas estructuras y composiciones de origen ígneo, sedimentario metamórfico temprano. Las rocas se han formado por aumento de calor y presión sobre las rocas preexistentes. Las rocas metamórficas presentan ciertas características típicas. Los minerales con los cuales están hechas se dan generalmente en forma de cristales. La orientación de los cristales es debida a si la roca se ha formado como resultado del calor y de la presión o solo del calor. Su tamaño refleja el grado de calor y presión al que han sido sometidas.³⁰

Las rocas con metamorfismo de contacto tienen una estructura cristalina; generalmente los minerales están dispuestos al azar. Sin embargo, las rocas con metamorfismo regional son foliadas: la presión obliga a ciertos minerales a alinearse.

³⁰ (Pellant, 2018)

Imagen 11. Características de las rocas metamórficas según su tamaño de grano

Grano grueso	Grano medio	Grano fino
		
<p>Alta presión: a las mayores presiones y temperaturas, y los fluidos activos pueden circular a través de las rocas, se forma el gneis, una roca de grano grueso.</p>	<p>Presión moderada: la pizarra al igual que otras muchas rocas forma esquistos de grano medio cuando está sometida a un incremento moderado de temperatura y presión</p>	<p>Baja presión: cuando la arcillita fosilífera está sometida a baja presión los fósiles pueden distorsionarse o destruirse. la roca resultante es la pizarra</p>

Fuente: Pellant C. (2020)

Imagen 12. Características de las rocas metamórficas según su estructura

Foliado	Cristalino
	
<p>El esquistos de cianita tiene una estructura foliada pero la alineación es menos evidente que en el gneis</p>	<p>Masa de cristales fusionados, dispuestos al azar en un mármol azul vetado</p>

Fuente: Pellant C. (2020)

2.4.1.3. Rocas Sedimentarias

Las rocas sedimentarias se pueden distinguir de las rocas ígneas y metamórficas en el campo ya que se dan en capas o estratos. Generalmente una muestra de mano se rompe a lo largo de las superficies de capa. Otra característica es su contenido en fósiles, los fósiles no se encuentran jamás en rocas ígneas cristalinas y solo raramente en rocas metamórficas.

El origen de las partículas que constituyen las rocas sedimentarias determina su aspecto y proporciona indicios para identificarlas.

Se forman en o cerca de la superficie terrestre donde las partículas de roca son transportadas por el viento, el agua y el hielo y son depositadas en tierra seca, en los lechos de ríos y lagos y en el mar. Aunque la clasificación del tamaño de grano en las rocas sedimentarias puede ser compleja.³¹

Imagen 13. Características de las rocas sedimentarias según su tamaño de grano

Grano grueso	Grano medio	Grano fino
		
<p>Entre las rocas de grano grueso pueden ser observados a simple vista hay los conglomerados, las brechas, algunas areniscas el de la imagen es un Conglomerado de cuarzo</p>	<p>Las rocas de grano medio cuyos granos pueden verse con lupa, incluyen otras areniscas</p>	<p>Las rocas de grano fino incluyen la arcilla arcillita y lutita</p>

Fuente: Pellant C. (2020)

La forma en que los granos que constituyen las rocas sedimentarias son transportados influye en su forma. La erosión del viento crea partículas de arena redondeadas y, en cambio, cantos angulosos. La erosión por parte del agua da origen a partículas de tamaño arena angulosas y además a cantos redondeados lisos.³²

³¹ (Pellant, 2018)

³² (Pellant, 2018)

Imagen 14. Características de las rocas sedimentarias según su forma de grano



Fuente: Pellant C. (2020)

2.4.2. Propiedades físicas de las rocas

Las propiedades físicas o propiedades índice de las rocas se determinan en laboratorio; las más importantes a nivel de influencia en el comportamiento mecánico son la porosidad, el peso específico, la permeabilidad, la alterabilidad, la resistencia y la velocidad de propagación de las ondas sísmicas. Algunas de estas propiedades, además de servir para su clasificación, están directamente relacionadas con las características resistentes y deformaciones de las rocas.³³

³³ (Vallejo, 2002)

Tabla 6. Propiedades de la matriz rocosa y métodos para su determinación

	Propiedades	Método de determinación
Propiedades de identificación y clasificación	Composición mineralógica. Fabrica y textura Tamaño de grano Color	Descripción visual Microscopía óptica y electrónica. Difracción de rayos X.
	Porosidad (n)	Técnicas de laboratorio.
	Peso específico (γ)	
	Contenido de humedad	
	Permeabilidad (coeficiente de permeabilidad k)	Ensayo de permeabilidad.
	Durabilidad Alterabilidad (índice de alterabilidad)	Ensayos de alterabilidad.
	Propiedades mecánicas	Resistencia a compresión simple (σ_c)	Ensayo de compresión uniaxial. Ensayo de carga puntual. Martillo Schmidt
resistencia a tracción (σ_t)		Ensayo de tracción directa. Ensayo de tracción indirecta.
Velocidad de ondas sísmicas (V_p , V_s)		Medida de velocidad de ondas elásticas en laboratorio.
Resistencia (parámetros c y ϕ)		Ensayo de compresión triaxial.
Deformabilidad (módulos de deformación elástica elásticos o dinámicos: E,v)		Ensayo de compresión uniaxial. Ensayo de velocidad sísmica.

Fuente: Vallejo, L. (2002)

2.4.2.1. La porosidad

Es la relación entre el volumen ocupado por los huecos o poros en la roca, y el volumen total. Es la propiedad que más afecta a las características resistentes y mecánicas, siendo inversamente proporcional a la resistencia y a la densidad y directamente proporcional a la deformabilidad, ya que la existencia de huecos puede dar lugar a zonas de debilidad. Los poros, en el caso de rocas cristalinas, ígneas o metamórficas, pueden ser micro fisuras o grietas en la matriz rocosa. La porosidad, en general, decrece con la profundidad y con la edad de las rocas.³⁴

³⁴ (Vallejo, 2002)

Tabla 7. Valores típicos del peso específico y porosidad de las rocas

Roca	Peso específico (g/cm³)	Porosidad (%)
Andesita	2,2-2,35	10-15
Anfibolita	2,9-3,0	—
Arenisca	2,3-2,6	5-25 (16,0)
Basalto	2,7-2,9	0,1-2
Caliza	2,3-2,6	5-20(11,0)
Carbón	1,0-2,0	10
Cuarcita	2,6-2,7	0,1-03
Greta	1,7-23	30
Diabasa	2,9	0,1
Diorita	2,7-2,85	— 0,5-10
Dolomía	2,3-2,6	
Esquisto	2,5-2,8	3
Gabro	3,0-3,1	0,1-0,2
Gneis	2,7-3,0	0,5-1,5
Granito	2,6-2,7	0,5-1,5(0,9)
Grauvaca	2,8	3
Marmol	2,6-2,8	0,3-2(0,6)
Lutita	2,2-2,6	2- 15
Pizarra	2,5-2,7	0,1-1
Riolita	2,4-2,6	4-6
Sal	2,1-2,2	5
Toba	1,9-2,3	14-40
Yeso	2,3	5

Fuente: Vallejo, L. (2002)

2.4.2.2. Peso específico

El peso específico o peso unitario de la roca depende de sus componentes, y se define como el peso por unidad de volumen. Las rocas, a diferencia de los suelos, presentan una gran variación de valores de peso específico.

2.4.2.3. La permeabilidad

La permeabilidad es la capacidad de transmitir agua de una roca. La mayoría de las rocas presentan permeabilidades bajas o muy bajas. La filtración y el flujo del agua a través de la matriz rocosa se produce a favor de los poros y fisuras, dependiendo la permeabilidad

de la interconexión entre ellos y de otros factores como el grado de meteorización, la anisotropía o el estado de esfuerzos a que está sometido el material. La permeabilidad de una roca se mide por el coeficiente de permeabilidad o de conductividad hidráulica.³⁵

$$k = K \frac{\gamma_w}{\mu}$$

Donde K es la permeabilidad intrínseca (dependiente únicamente de las características del medio físico), γ_w es el peso específico del agua y μ es la viscosidad del agua.

2.4.2.4. La durabilidad

La durabilidad es la resistencia que la roca presenta ante los procesos de alteración y desintegración, propiedad a la que también se alude como alterabilidad, definiéndose en este caso como la tendencia a la rotura de los componentes o de las estructuras de la roca. Diversos procesos como la hidratación, disolución, oxidación, etc., cambian las propiedades del material rocoso.

2.4.2.5. La resistencia a compresión simple

Llamada también resistencia uniaxial, es el máximo esfuerzo que soporta la roca sometida a compresión uniaxial, determinada sobre una probeta sin confinar en el laboratorio. El valor de la resistencia aporta información sobre las propiedades ingenieriles de las rocas. En el Cuadro 3.6 se incluyen valores de resistencia a compresión simple para diferentes tipos de rocas³⁶

³⁵ (Vallejo, 2002)

³⁶ (Vallejo, 2002)

Tabla 8. Valores de resistencia de la matriz rocosa sana.

Roca	Resistencia a compresión simple (kp/cm ²)		Resistencia a la tracción (kp/cm ²)
	Valores medios	Rango de valores	
Andesita	2100-3.200	1000-5000	70
Anfibolita	2800	2100-5300	230
Anhidrita	900	800-1300	60-120
Arenisca	550-1400	300-2350	50-200
Basalto	800-2000	600-3500	50-250
Caliza	600-1400	500-2000	40-300
Cuarcita	2000-3200	1000-5000	100-300
Diabasa	2400-3500	1300-3650	550
Diorita	1800-2450	1200-3350	80-300
Dolerita	2000-3000	1000-3500	150-350
Dolomia	600-2000	500-3500	50-250
Esquisto	300-600	200-1600	20-55
Gabro	200-2800	1800-3000	140-300
Gneis	600-2000	500-2500	50-200
Granito	700-2000	500-3000	70-250
Grauvaca	1000-1500	800-2200	55-150
Limolita		350-2500	27
Lutita	200-400	100-900	15-100
Marga	300-700	200-900	5-10*
Marmol	1200-2000	600-2500	65-200
Pizarra	400-1500	300-2000	70-200
Sal	120	50-300	
Toba		100-460	10-40
Yeso	250	100-400	10-25

Fuente: Vallejo, L. (2002)

2.4.2.6. La resistencia a tracción.

La resistencia a tracción es el máximo esfuerzo que soporta el material ante la rotura por tracción. Se obtiene aplicando fuerzas traccionales o distensivas a una probeta de roca en laboratorio ³⁷

$$\sigma_t = \frac{F_t}{A} = \frac{\text{Fuerza de tracción aplicada}}{\text{Área – sección de la probeta}}$$

³⁷ (Vallejo, 2002)

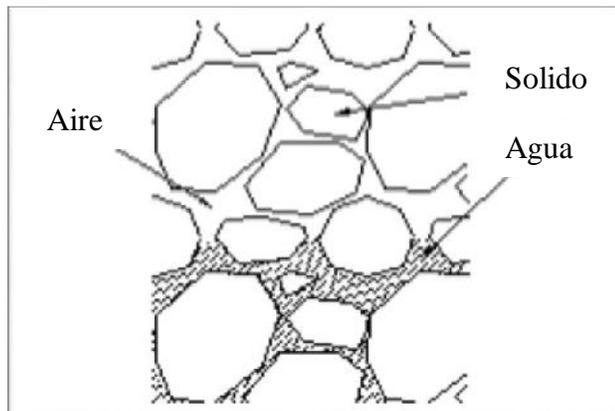
2.4.2.7. La velocidad de propagación de las ondas

La velocidad de propagación de las ondas elásticas al atravesar la roca depende de la densidad y de las propiedades elásticas del material, y su medida aporta información sobre algunas características como la porosidad.

2.5. Definición de suelos

En el sentido general de la ingeniería, suelo se define como el agregado no cementado de granos minerales y materia orgánica descompuesta (partículas sólidas) junto con el líquido y gas que ocupan los espacios vacíos entre las partículas sólidas. El suelo se usa como material de construcción en diversos proyectos de ingeniería civil y sirve para soportar las cimentaciones estructurales. Por esto, los ingenieros civiles deben estudiar las propiedades del suelo, tales como origen, distribución granulométrica, capacidad para drenar agua, compresibilidad, resistencia cortante, capacidad de carga, y otras más.³⁸

Imagen 15. Composición del Suelo



Fuente: Duran J.(2019).

³⁸ (Das Braja M , 2001)

2.5.1. Características de los suelos

Según su granulometría y límites de consistencia del suelo se podrá identificar el tipo de suelo.

2.5.1.1. Tamaño de las partículas del suelo

De acuerdo al tamaño predominante de partículas que contenga el suelo, los suelos generalmente son llamados: grava, arena, limo, arcilla o una mezcla de ellos, según como se demuestra en la Tabla N° 1.

Tabla 9. Sistema para identificar el tamaño de partículas del suelo

Nombre de la organización	Tamaño de partículas en mm			
	Grava	Arena	Limo	Arcilla
Massachusetts Institute of Technology (MIT)	> 2	2 a 0,06	0,06 a 0,002	< 0,002
U.S. Department of Agriculture (USDA)	> 2	2 a 0,05	0,05 a 0,002	< 0,003
American Association of Highway and Transportation (AASHTO)	76,2 a 2	2 a 0,075	0,075 a 0,002	< 0,004
Unifield Soil Classification System (Us)	75 a 4,75	4,75 a 0,075	Finos (limos y arcillas) < 0,075	

Fuente: Das Braja M , (2001)

2.5.1.2. Clasificación de los suelos

Los dos sistemas principales de clasificación científica de suelos actualmente en uso son el sistema AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) y el USCS o S.U.C.S (Unified Soil Classification System). El primero se usa principalmente para la evaluación cualitativa de la conveniencia de un suelo como material para la construcción cualitativa de explanadas de carreteras y el segundo es de uso general en cualquier estudio geotécnico.³⁹

2.5.1.2.1. Sistema de clasificación AASHTO

De acuerdo con este sistema y con base en su comportamiento, los suelos están clasificados en ocho grupos designados por los símbolos del A-1 al A-B. En este sistema de clasificación los suelos inorgánicos se clasifican en 7 grupos que van del A-1 al A-7.

³⁹ (Salgado, 2015)

Estos a su vez se dividen en un total de 12 subgrupos. Los suelos con elevada proporción de materia orgánica se clasifican como A-B.⁴⁰

Descripción de los grupos de clasificación:

a). Suelos granulares. Son aquellos que tienen 35% o menos, del material fino que pasa el tamiz No. 200. Estos suelos forman los grupos A-1, A-2 Y A-3.

b) Suelos finos limo arcillosos. Contienen más de 135% del material fino que pasa el tamiz número 200. Estos suelos constituyen los grupos A-4, A-S, A-6 y A-7.

Índice de grupo

Aquellos suelos que tienen un comportamiento similar se hallan dentro de un mismo grupo, y están representados por un determinado índice. La clasificación de un suelo en un determinado grupo se basa en su límite de líquido, grado de plasticidad y porcentaje de material fino que pasa el tamiz número 200. Los índices de grupo de los suelos granulares están generalmente comprendidos entre 0 y 4; los correspondientes a los suelos limosos, entre 8 y 12 Y los de suelos arcillosos, entre 11 y 20, o más.

La clasificación realizada de esta manera se complementa con el índice de grupo, que permita caracterizar mejor cada suelo dentro de los grupos, ya que estos admiten suelos con porcentajes de finos y plasticidad muy diferentes. El índice de grupo se obtiene mediante la siguiente expresión: ⁴¹

$$IG = (F - 35) [0,2 + 0,005 (LL - 40)] + 0,01 (F - 15) (IP - 10)$$

Donde:

F = Porcentaje en peso que pasa por el tamiz N° 200 del material inferior a 75 mm

LL = Límite líquido

IP = Índice de plasticidad

⁴⁰ (Fonseca, 2002)

⁴¹ (ABC., 2012)

Tabla 10. Sistema de clasificación AASHTO

Clasificación General	Materiales granulares (35% o menos, pasa tamiz n° 200)							Materiales Limo-arcillosos (más del 35 % pasa tamiz n° 200)			
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
Grupos y Subgrupos	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7					A-7-5 A-7-6
% pasa el tamiz: N° 10 - 2,00 mm N° 40 - 0,425 mm N° 200 -0,075 mm	50 máx. 30 máx. 15 máx.	..... 50máx. 25 máx.	..... 51 mín. 10 máx.	..... 35 máx.	..... 35 máx.	..... 35 máx.	..... 35m áx	..... 36 mín.	..... 36 mín.	..... 36 mín.	36 mín
Fración que pasa tamiz N° 40: Límite líquido Índice Plasticidad	..... 6 máx.		..... N.P.	40 mín. 10 máx.	41 mín. 10 máx.	40 máx. 11 mín.	41 mín. 11 mín.	40 máx. 10 máx.	41 mín. 10 máx.	40 máx. 11 mín.	(a) 41 mín 11 mín
Índice Grupo (b)	0	0	0	0	0	4 máx.	4 máx.	8 máx.	12 máx.	16 máx.	20 máx
Tipos de material	Fragmentos de piedra, grava y arena		Arena fina	Gravas y arenas limosas y arcillosas				Suelos limosos		Suelos arcillosos	
Valoración, terreno para fundación	De excelente a bueno							Regular a malo			
<p>Forma de clasificación. - Con el resultado de los ensayos se opera de izquierda a derecha y el grupo correcto se hallará mediante eliminación. El primer grupo a partir de la izquierda con el que coincidan los resultados de los ensayos será el correcto.</p> <p>a) El Índice de Plasticidad del subsuelo A-7-5 es igual o menor al Límite líquido 30 El Índice de Plasticidad del subsuelo A-7-6 es mayor que Límite líquido 30. b) Se indicará el Índice de grupo entre paréntesis, después del símbolo de grupo.</p>											

Fuente: ABC (2011)

2.5.1.2.2. Sistema de clasificación SUCS

Fue Casagrande quien en 1942 ideó este sistema genérico de clasificación de suelos, que fue empleado por el Cuerpo de Ingenieros del ejército de los EE.UU. para la construcción de pistas de aterrizaje durante la II Guerra Mundial.

Diez años más tarde, y vista la gran utilidad de este sistema en Ingeniería Civil, fue ligeramente modificado por el Bureau of Reclamation, naciendo el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS); este sistema fue adoptado por la ASTM (American Society of Testing Materials) como parte de sus métodos normalizados. 0

Dicha clasificación se vale de unos símbolos de grupo, consistentes en un prefijo que designa la composición del suelo y un sufijo que matiza sus propiedades.

En el siguiente esquema se muestran dichos símbolos y su significación:⁴²

⁴² (ABC., 2012)

Tabla 11. Prefijos y sufijos del suelo.

Tipo de suelo	Prefijo	Subgrupo	Sufijo
Grava	G	Bien Gradada	W
Arena	S	Mal gradada	P
Limo	M	Limoso	M
Arcilla	C	Arcilloso	C
Orgánico	O	Limite Líquido alto (>50)	L
Turba	Pt	Limite Líquido bajo (<50)	H

Fuente: ABC. (2012)

En función de estos símbolos, pueden establecerse diferentes combinaciones que definen uno y otro tipo de suelo:

Tabla 12. Combinaciones en función de los prefijos y sufijos del suelo

Símbolo	Características generales		
GW	Gravas (>50% en tamiz N°4 ASTM)	Limpias (Fino < 5%)	Bien gradada
GP			Mal gradada
GM		Con finos (Finos > 12%)	Componente Limoso
GC			Componente arcilloso
SW	Arenas (<50% en tamiz N°4 ASTM)	Limpias (Finos <5%)	Bien gradada
SP			Mal gradada
SM		Con finos (Finos > 12%)	Componente Limoso
SC			Componente arcilloso
ML	Limos	Baja plasticidad (LL < 50)	
MH		Alta plasticidad (LL > 50)	
CL	Arcillas	Baja plasticidad (LL < 50)	
CH		Alta plasticidad (LL > 50)	
OL	Suelos orgánicos	Baja plasticidad (LL < 50)	
OH		Alta plasticidad (LL > 50)	
Pt	Turva	Suelos altamente orgánicos	

Fuente: ABC. (2012)

Como puede deducirse de la anterior Tabla, existe una clara distinción entre tres grandes grupos de suelos:

Suelos de grano grueso (G y S). Formados por gravas y arenas con menos del 50% de contenido en finos, empleando el tamiz N° 200 ASTM ⁴³

Clasificación de las gravas

Para el caso en que el contenido de finos sea menor al 5% y mayor al 12%, se pueden tener 4 posibles dobles símbolos:

GW-GM. Grava bien gradada con limo

GW-GC. Grava bien gradada con arcilla

GP-GM. Grava mal gradada con limo

GP-GC. Grava mal gradada con arcilla

Clasificación de las arenas

Se sigue un procedimiento análogo al de las gravas. Así, si la fracción fina es del 5% o menos, ésta ya no tiene influencia, pero si es mayor al 12%, la influencia es decisiva. Nacen los grupos de arenas limpias y arenas sucias. ⁴⁴

SW-SM. Arena bien gradada con limo

SW-SC. Arena bien gradada con arcilla

SP-SM. Arena mal gradada con limo

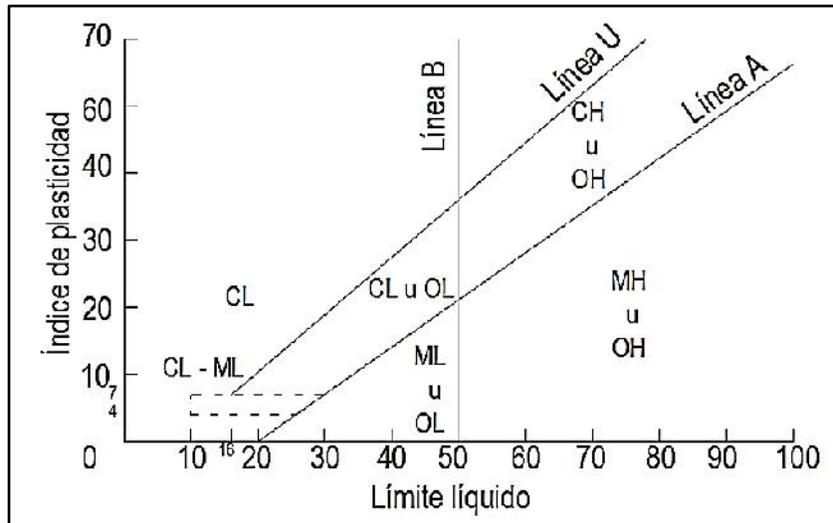
SP-SC. Arena mal grada con arcilla

⁴³ (ABC., 2012)

⁴⁴ (ABC., 2012)

Clasificación de los suelos finos. La carta de plasticidad de Casagrande tras un estudio experimental de diferentes muestras de suelos de grano fino, Casagrande consigue ubicarlos en un diagrama que relaciona el límite líquido (LL) con el índice de plasticidad (IP). En este diagrama, conocido como la carta de Casagrande de los suelos cohesivos, destacan dos grandes líneas que actúan a modo de límites:⁴⁵

Imagen 17. Carta de plasticidad Casagrande



Fuente: ABC. (2012)

⁴⁵ (Sandino, 2015)

CAPÍTULO III

APLICACIÓN PRÁCTICA

CAPITULO III

APLICACIÓN PRÁCTICA

3.1. Materiales empleados en el estudio

La zona de estudio para realizar el presente proyecto geográficamente se encuentra ubicado en el departamento de Tarija, provincia O'Connor, municipio de Entre Rios, entre las siguientes coordenadas:

Imagen 18. Coordenadas del tramo Canaletas

Lugar	Latitud	Longitud
Canaletas	21°27'21,33"S	64°19'54,70"O
Entre Rios	21°31'25,30"S	64°10'49,31"O

Fuente: Elaboracion propia

Imagen 19. Tramo antiguo Canaletas – Entre Ríos

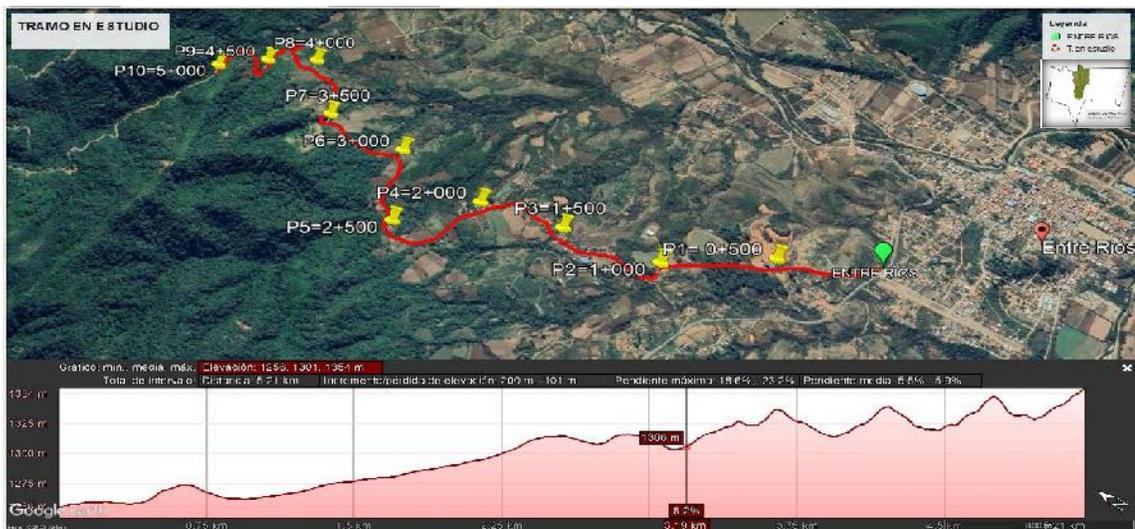


Fuente: Elaboracion propia

3.1.1. Ubicación de calicatas

El área de trabajo se encuentra en el tramo antiguo Canaletas Entre Ríos que tiene una longitud de 42,7 Km específicamente se trabajara hasta el km 10, el cual se encuentra en problemas de la subrasante, donde se realizo un estudio de calicatas y una extracción de muestras cada 500 m según la norma AASTHO, aplicando la metodología de tres bolillos, que consiste en sacar una muestra al carril derecho de la carretera, luego en el eje y posteriormente al borde izquierdo de la carretera para luego volver al mismo sentido; del borde izquierdo, al eje y al borde derecho para luego realizar el mismo ciclo.

Imagen 20. Ubicación satelital de calicatas



Fuente: Elaboracion propia

Tabla 13. Ubicación de calicatas

Punto	Ubicación	Coordenadas	
		Latitud	Longitud
P1	0+500	21°31'13,07"S	64°11'0,46"O
P2	1+000	21°31'0,43"S	64°11'12,63"O
P3	1+500	21°30'45,22"S	64°11'16,63"O
P4	2+000	21°30'32,28"S	64°11'20,71"O
P5	2+500	21°30'24,60"S	64°11'32,76"O
P6	3+000	21°30'15,40"S	64°11'20,04"O
P7	3+500	21°30'0,53"S	64°11'21,61"O
P8	4+000	21°29'49,24"S	64°11'13,40"O
P9	4+500	21°29'42,81"S	64°11'18,85"O
P10	5+000	21°29'37,42"S	64°11'25,37"O

Fuente: Elaboración propia

3.1.1.1 Proceso de extracción de muestras del tramo Canaletas Entre Rios

Se realizó una extracción de suelo abierto o calicatas, donde se realizó un cuarteo del conjunto de los materiales.

Primeramente, se procedió a soltar un poco la tierra con la pala excavadora, a continuación, se procedió a extraer la tierra suelta, echándolo sobre una bolsa plástica extendida en la superficie formando así un camellón. Se aplastó la parte superior del camellón, de tal manera que quede plana, para luego cuartearlo. Se guardó en la bolsa los dos extremos opuestos más parecidos y los otros dos se descartaron, se repitió el proceso hasta completar los 60kg.

Por último, se tomó aproximadamente 500 gr. de suelo en un táper de la parte inferior del excavado, para sacar el contenido de humedad del suelo natural.

Imagen 21. Muestreo de calicatas



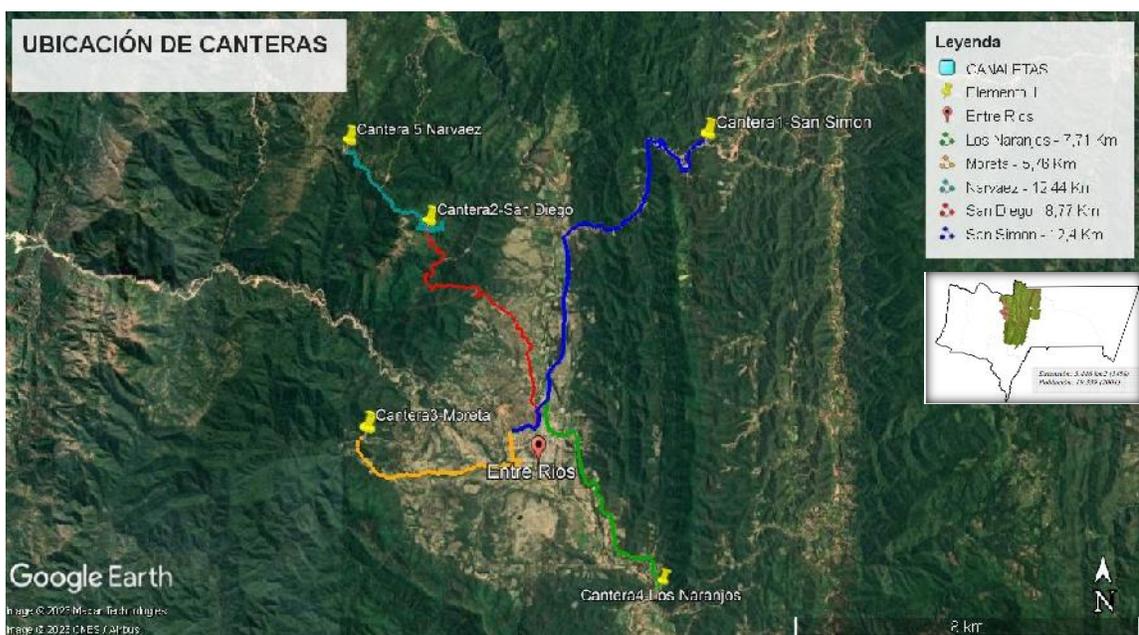
Fuente: Elaboración propia

3.1.2. Ubicación de canteras de rocas

Las canteras de rocas a estudiar se encuentran en la provincia O'Connor cercanas al municipio de Entre Ríos y zonas aledañas al tramo a estabilizar.

En la siguiente imagen y tabla 14 se puede apreciar la ubicación y distancias de las canteras con referencia al km 0 entre las coordenadas (21°31'25.30"S y 64°10'49.31"O) del tramo antiguo Canaletas - Entre Ríos.

Imagen 22. Ubicación satelital de las canteras de rocas



Fuente: Elaboracion propia

Tabla 14. Ubicación de canteras

Cantera	Coordenadas		Distancia (Km)
	Latitud	Longitud	
Cantera1-San Simón	21°27'46,37"S	64° 8'9,44"O	12,4
Cantera2-San Diego	21°28'53,48"S	64°12'2,28"O	8,77
Cantera3-Moreta	21°31'32,35"S	64°12'51,11"O	5,76
Cantera4-Los Naranjos	21°33'22,28"S	64° 8'49,33"O	7,71
Cantera5-Narvaez	21°27'50,45"S	64°13'10,75"O	12,44

Fuente: Elaboracion propia

Imagen 23. Zonificación de los agregados de cantera



Fuente: Elaboración propia

Imagen 24. Cantera 1 San Simon satelital



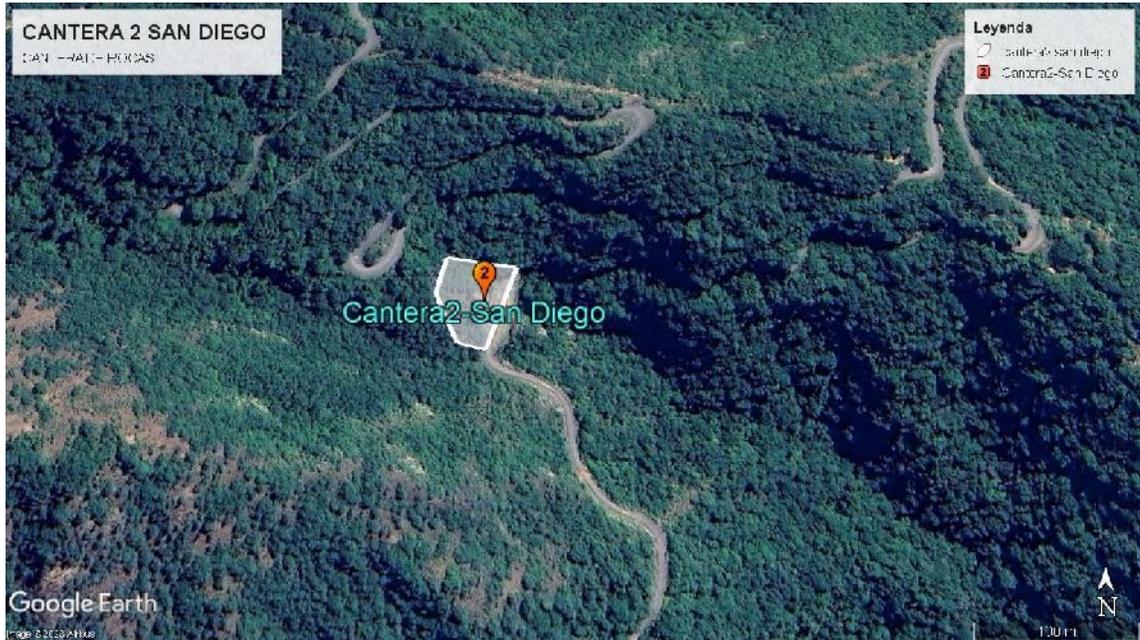
Fuente: Elaboración propia

Imagen 25. Cantera 1 San Simón



Fuente: Elaboración propia

Imagen 26. Cantera 2 San Diego satelital



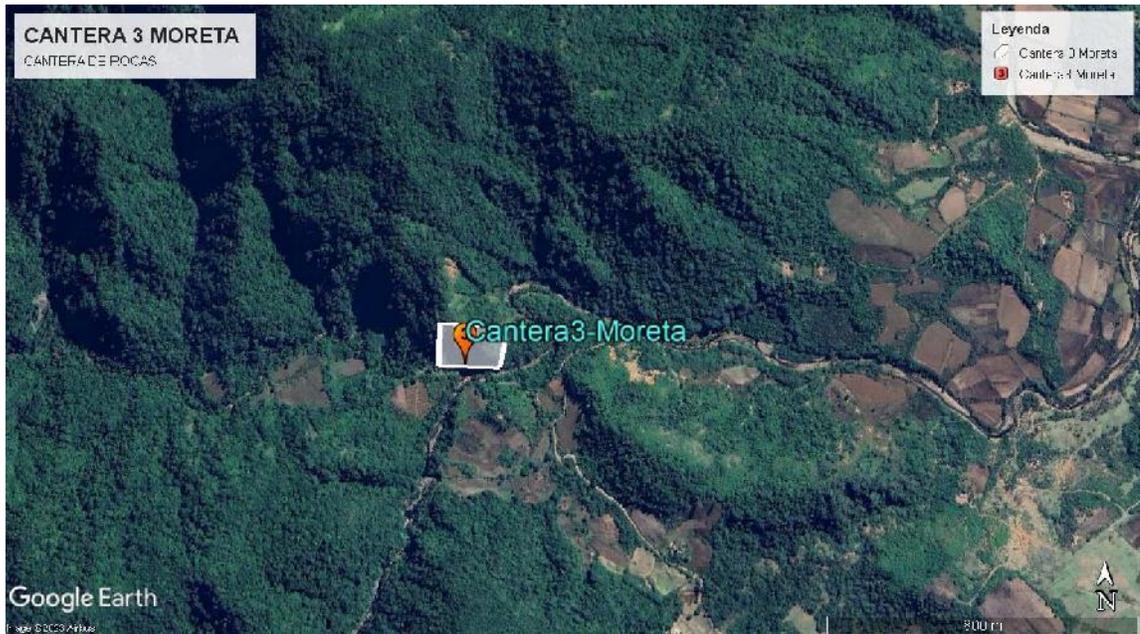
Fuente: Elaboración propia

Imagen 27. Cantera 2 San Diego



Fuente: Elaboración propia

Imagen 28. Cantera 3 Moreta satelital



Fuente: Elaboración propia

Imagen 29. Cantera 3 Moreta



Fuente: Elaboración propia

Imagen 30. Cantera 4 Los Naranjos



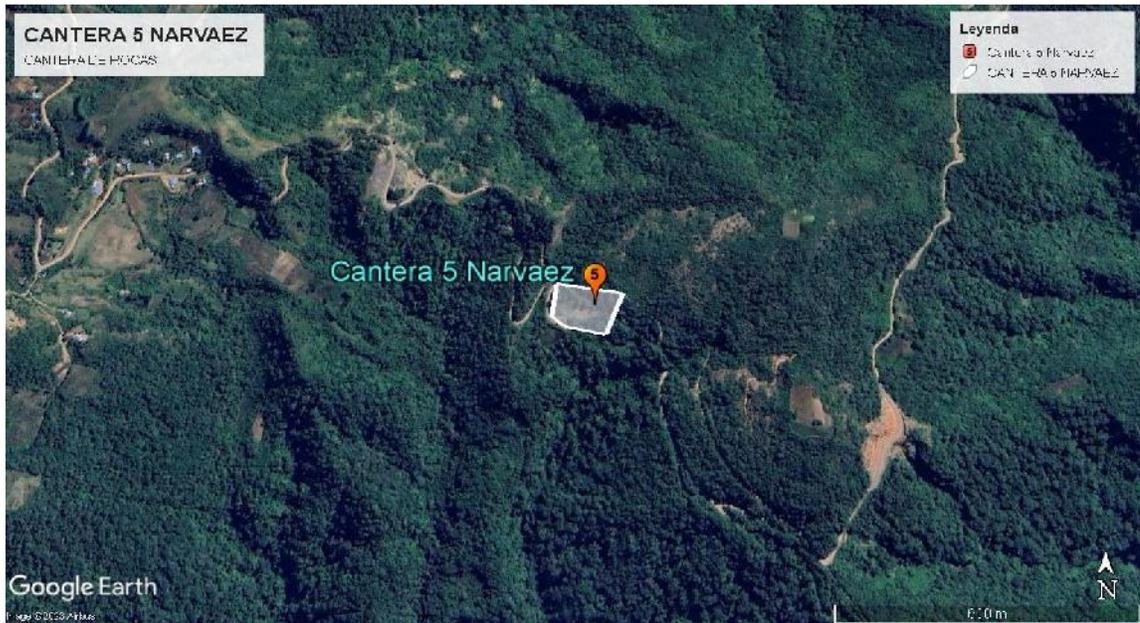
Fuente: Elaboración propia

Imagen 31. Cantera 4 Los Naranjos



Fuente: Elaboración propia

Imagen 32. Cantera 5 Narváez satelital



Fuente: Elaboración propia

Imagen 33. Cantera 5 Narváez



Fuente: Elaboración propia

3.1.2.1. Proceso de extracción de muestras de los agregados de canteras

Cuando una cantera esta en explotacion, el muestreo se procede a tomar muestras representativas del material almacenado, en caso de que se trate de canteras abandonada debe removerse la capa intemperizada.

Para la extraccion de agregados de canteras se realizó el muestreo en la parte central de los agregados sueltos que fueron explotados con voladuras, donde se hizo un corte vertical y se extrajo todo el material compuesto, donde posteriormente se hizo una reduccion del material llevandolo a una malla de 3 pulg.para clasificarla.

Tambien se extrajo una muestra separada de un bloque de roca sana, que no presentaba grietas ni fracturas insipientes que sea representativa a la roca madre para su posterior ensayo de compresion.

Imagen 34. Procesos de extracción de los agregados de canteras



Fuente: Elaboración propia

3.1.3. Ubicación de las canteras de sal

En cuanto a la obtención de la sal utilizada en la investigación se realizó la adquisición de exprosal ubicada en Sansimon entre las coordenadas $21^{\circ}27'54,43''S$ y $64^{\circ}7'44,73''O$ en la ruta nacional 11. Lugar de venta al por mayor y menor de sal obtenidas de las vetas de saladito y taquillos donde son detonadas con explosivos y acarreadas en volquetas.

Imagen 35. Ubicación de la Beta de sal



Fuente: Elaboración propia

A continuación se puede apreciar la ubicación geográfica y las distancias de las canteras de sal, con referencia al pueblo de Entre Ríos.

Imagen 36. Distancia de las canteras de sal



Fuente: Elaboración propia

Tabla 15. Ubicación geográfica de las canteras se sal

Cantera	Coordenadas		Distancia (Km)
	Latitud	Longitud	
Cantera 1-Taquillos	21°23'41.66"S	64° 7'52.94"O	22,90
Cantera 2-Taquillos	21°22'46.23"S	64° 8'13.54"O	24,60
Cantera 3- Saladito	21°20'26.68"S	64° 9'20.89"O	31,00

Fuente: Elaboración propia

Imagen 37. Zonificación de las canteras de sal



Fuente: Elaboración propia

Imagen 38. Cantera1 Taquillos de sal



Fuente: Elaboración propia

Imagen 39. Cantera 2 taquillos de sal



Fuente: Elaboración propia

Imagen 40. Cantera 3 Saladito de sal



Fuente: Elaboración propia

3.1.3.1. Proceso de extracción de Sal

Primeramente, se realizó una examinación visual de la cantera para determinar si hay variación en los distintos estratos.

Posteriormente se obtuvo bloques de muestras separadas de la roca de todos los estratos que visualmente parecían variar en color y estructura; se identificó la sal rosada, blanca y mixta.

Imagen 41. Proceso de extracción de sal



Fuente: Elaboración propia

Imagen 42. Identificación de tres tipos de sal



Fuente: Elaboración propia

3.2. Caracterización de los materiales usados en el estudio

A continuación, se desarrollará la caracterización del tramo en estudio, la sal natural y los agregados de canteras.

3.2.1. Caracterización del suelo del tramo Canaletas Entre Ríos

Se realizará la caracterización del suelo de las diferentes calicatas del tramo con el propósito de encontrar el suelo más desfavorable.

3.2.1.1. Contenido de humedad

Para muchos tipos de suelo, el contenido de agua es una de las propiedades más significativas, que se emplea para establecer una correlación entre el comportamiento de dicho suelo y otras propiedades índices.

Al momento de realizar la extracción del suelo, se separó una pequeña muestra para realizar el contenido de humedad del suelo, ésta muestra se colocó en un táper herméticamente cerrado para evitar la pérdida de humedad.

Imagen 43. Determinación del contenido de humedad



Fuente: Elaboración propia

Tabla 16. Resultado de contenido de humedad de las diferentes calicatas

Procedencia		% de Humedad natural
Progresiva	Calicata	
0+500	P1	8,12
1+000	P2	11,08
1+500	P3	10,35
2+000	P4	8,40
2+500	P5	11,01
3+000	P6	10,12
3+500	P7	7,98
4+000	P8	5,98
4+500	P9	12,70
5+000	P10	6,75

Fuente: Elaboración propia

3.2.1.2. Granulometría de suelos (ASTM D422; AASHTO T88)

Método mecánico. Consiste en dividir y separar el material mediante una serie de tamices en varias fracciones granulométricas de tamaño decreciente, en caso de existir grumos hay que buscar la forma de desintegrarlos, pero sin triturar, las partículas verdaderas del suelo.

Imagen 44. Método mecánico para determinar la granulometría



Fuente: Elaboración propia

Método del Lavado. Generalmente se realiza para suelos finos, pero también se realizó para suelos granulares porque tenía una apariencia de terrones y una masa de lodo por la presencia de humedad, también se procedió a lavarlo cuidadosamente por la malla N° 200 para luego secarla en el horno y su posterior tamizado.

Imagen 45. Método del lavado para determinar la granulometría



Fuente: Elaboración propia

Tabla 17. Resultado de granulometría de las diferentes calicatas

Procedencia		Granulometría							
Progresiva	Calicata	3/4"	1/2"	3/8"	N°4	N°10	N°40	N°100	N°200
0+500	P1	100	100	100	100	99	98	80	58
1+000	P2	100	100	100	100	99	98	80	58
1+500	P3	100	100	100	100	99	98	80	58
2+000	P4	100	100	100	100	99	98	80	58
2+500	P5	100	100	99	98	98	96	-	27
3+000	P6	100	100	99	98	98	96	-	27
3+500	P7	98	96	95	92	89	74	48	35
4+000	P8	97	95	94	92	90	73	-	23
4+500	P9	100	100	99	98	96	87	-	28
5+000	P10	100	100	99	98	98	96	-	27

Fuente: Elaboración propia

3.2.1.3. Determinación de consistencia de los suelos

Establecen los contenidos de humedad en los que los suelos de arcilla y limo de grano fino hacen la transición entre los estados sólido, semisólido, plástico y líquido.

Límite líquido de los suelos (ASTM D4318; AASHTO T89)

Porcentaje de contenido de humedad con que un suelo cambia, al disminuir su humedad, de la consistencia líquida a la plástica, o, al aumentar su humedad, de la consistencia plástica a la líquida.

Imagen 46. Límite líquido de los suelos



Fuente: Elaboración propia

Límite líquido e índice de plasticidad (ASTM D4318; AASHTO T90)

Porcentaje de contenido de humedad con que un suelo cambia al disminuir su humedad de la consistencia plástica a la semisólida, o, al aumentar su humedad, de la consistencia semisólida a la plástica.

Imagen 47. Límite plástico



Fuente: Elaboración propia

Tabla 18. Resultado de límite líquido y plástico de las diferentes calicatas

Procedencia		Límites		
Progresiva	Calicata	LL	LP	IP
0+500	P1	25	21	3
1+000	P2	25	21	5
1+500	P3	26	20	6
2+000	P4	25	0	0
2+500	P5	25	0	0
3+000	P6	0	0	0
3+500	P7	0	0	0
4+000	P8	0	0	0
4+500	P9	0	0	0
5+000	P10	0	0	0

Fuente: Elaboración propia

3.2.1.4. Ensayo de compactación (AASHTO T272)

Este método establece el procedimiento para determinar la relación entre la humedad y la densidad máxima de un suelo compactado.

Imagen 48. Proctor modificado



Fuente: Elaboración propia

Tabla 19. Resultado de densidad máxima y humedad óptima de las diferentes calicatas

Procedencia		Proctor	
Progresiva	Calicata	D.max (gr/cm ³)	H.Op (%)
0+500	P1	1,97	12,64
1+000	P2	1,96	11,75
1+500	P3	2,02	10,46
2+000	P4	2,03	10,89
2+500	P5	2,12	10,13
3+000	P6	2,13	10,09
3+500	P7	2,15	10,39
4+000	P8	2,10	10,58
4+500	P9	2,09	10,10
5+000	P10	2,01	10,07

Fuente: Elaboración propia

3.2.1.5. Determinación de la relación de soporte del suelo en el laboratorio (CBR de laboratorio) (ASTM D1883; AASHTO T193)

Es un método que sirve para evaluar la calidad relativa del suelo para subrasante, subbase y base de pavimentos. El ensayo mide la resistencia al corte de un suelo bajo condiciones de humedad y densidad controladas, permitiendo obtener un (%) de la relación de soporte.

Imagen 49. Determinación de la relación de soporte del suelo en el laboratorio



Fuente: Elaboración propia

Tabla 20. Resultados del CBR de las diferentes calicatas

Procedencia		CBR	
Progresiva	Calicata	95 (%)	Exp (%)
0+500	P1	3,41	0,25
1+000	P2	2,96	0,95
1+500	P3	3,18	0,52
2+000	P4	3,08	0,82
2+500	P5	4,93	0,79
3+000	P6	4,18	0,66
3+500	P7	4,6	0,39
4+000	P8	4,81	0,45
4+500	P9	5,11	0,77
5+000	P10	5,14	0,53

Fuente: Elaboración propia

3.2.1.6. Clasificación de suelos

La clasificación se realizó según la tabla en anexos sistema de clasificación AASHTO

Tabla 21. Clasificación de suelos según AASHTO

Procedencia		Clasificación
Progresiva	Calicata	AASHTO
0+500	P1	A-4 ₍₅₎
1+000	P2	A-4 ₍₅₎
1+500	P3	A-4 ₍₆₎
2+000	P4	A-4 ₍₇₎
2+500	P5	A-2-6 ₍₂₎
3+000	P6	A-2-6 ₍₂₎
3+500	P7	A-2-4
4+000	P8	A-2-4
4+500	P9	A-2-4 ₍₀₎
5+000	P10	A-2-4 ₍₂₎

Fuente: Elaboración propia

3.2.2. Caracterización de sal

3.2.2.1. Análisis de laboratorio

Para la información mostrada de la composición química de la sal se realizó en el laboratorio de centro de análisis, investigación y desarrollo (CEANID) con el objetivo de conocer el tipo de sal, las diferencias de ambas sales y la cantidad de sus componentes. Donde se efectuó estudios de hierro, magnesio, potasio y pureza del cloruro de sodio.

Tabla 22. Componentes de la sal blanca y rosada

Parámetro	Método de ensayo	Unidad	Resultado sal blanca	Resultado sal rosada	Resultado de sal combinada
Hiero total	Absorción Atómica	mg/100g	2,6	2,7	2,7
Magnesio total	Absorción Atómica	mg/100g	2,4	9,5	5,4
Potasio	Absorción Atómica	mg/100g	16,4	152	40,87
Pureza (NaCl)	NB 328008:06	%	97,27	98,28	97,78

Fuente: CEANID (2022)

3.2.2.2. Visualización microscópica

La estructura se estudia con ayuda de un microscopio digital que tiene 30fps, una resolución de imagen de 1920x1080 con interfase, donde se pueden observar que las partículas observadas su composición es diferente a la del cloruro de sodio, que se encuentran de manera separada según su composición.

Blanco. Cloruro de magnesio

Rojizo. Hierro oxidado.

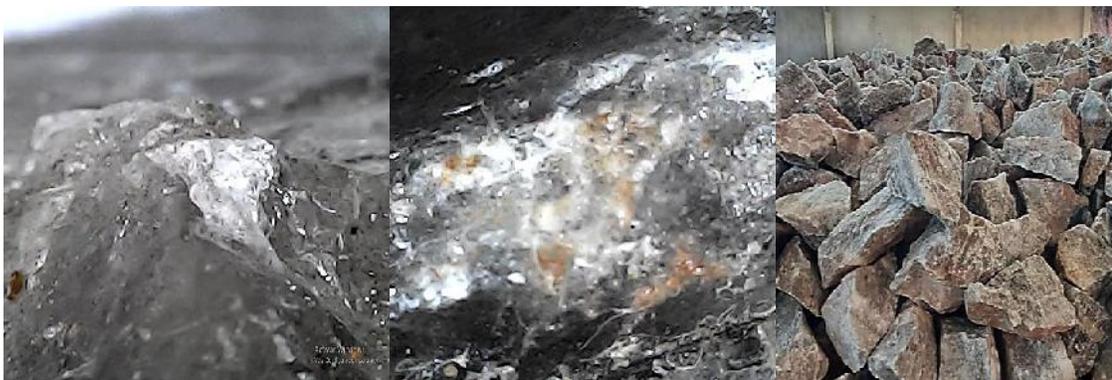
Negro. Óxidos.

Imagen 50. Visualización microscópica de sal rosada



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 51. Visualización microscópica de sal blanca



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 52 Visualización microscópica de la sal combinada



Fuente: Elaboración Propia

3.2.3. Caracterización de rocas

Para caracterizar las rocas, se determinará el peso específico, cantidad de absorción, resistencia a compresión, y una visualización microscópica de las diferentes canteras.

3.2.3.1. Peso Específico y absorción del agregado (ASTM E127; AASHTO 785-91)

Este ensayo tiene por objeto la determinación del peso específico aparente y del peso específico a granel, lo mismo que cantidad de agua expresada como porcentaje que absorbe el agregado grueso cuando se sumerge en agua por periodo de 24 hrs.

Imagen 53. Ensayo de peso específico y absorción



Fuente: Elaboración propia

Tabla 23 Peso específico y absorción de rocas

Propiedades	Cantera 1 San simón	Cantera 2 San Diego	Cantera 3 Moreta	Cantera 4 Los Naranjos	Cantera 5 Narváez
Peso específico a Granel	2,78	2,85	2,75	2,65	2,51
Peso específico Aparente	2,92	3,00	2,89	2,78	2,69
% de Absorción	1,75	1,73	1,76	1,70	2,66

Fuente: Elaboración propia

3.2.3.2. Resistencia a compresión simple de rocas

Es esfuerzo medido de una manera técnica, La resistencia a la compresión simple de las rocas es el parámetro más común para definir los criterios de rotura y el comportamiento geomecánica de un macizo rocoso.

Imagen 54. Ensayo de resistencia a compresión simple de rocas



Fuente: Elaboración propia

Tabla 24. Resistencia a compresión de las diferentes canteras

Cantera	Resistencia máximo Mpa	Grado de resistencia ISRM (1981)
Cantera1-San Simón	79,54	Roca dura
Cantera2-San Diego	78,82	Roca dura
Cantera3-Moreta	80,43	Roca dura
Cantera4-Los Naranjos	76,15	Roca dura

Cantera5-Narvaez	4,55	Roca muy blanda
------------------	------	-----------------

Fuente: Elaboración propia

3.2.3.3. Visualización microscópica de rocas

La estructura fue visualizada con ayuda de un microscopio digital que tiene una resolución de imagen de 1920x1080 con interfase

Tabla 25. Visualización microscópica de las diferentes canteras de rocas

Microscópica	Descripción	Visual
	Cantera1-San Simon Mineralogía: cuarcita, olivino	
	Cantera2-San Diego Mineralogía: cuarcita, olivino, cuarzo, fluorita	
	Cantera3-Moreta Mineralogía: cuarcita, olivino, cuarzo, Hierro oxidado	
	Cantera4-Los Naranjos Mineralogía: cuarcita, olivino, cuarzo, fluorita	

	<p>Cantera5- Narváz</p> <p>Mineralogía: Cuarzo cantidad pequeña, dióxido de silicio</p>	
---	---	---

Fuente: Elaboración propia

3.2.3.4. Clasificación de Rocas

Las rocas están compuestas de minerales, a su vez, los minerales se componen de elementos químicos en estado sólido. No todas las rocas son iguales, pero siguen un patrón de acuerdo con determinadas características, las cuales nos permiten clasificarlas.

De acuerdo a sus características físicas y mecánicas se clasifican a las rocas de la siguiente manera.

Tabla 26. Clasificación de rocas

Textura	Características	Clasificación
	<p>Cantera: 1-San Simón</p> <p>Resistencia: 79,54</p> <p>Peso esp. Aparente: 2,92</p> <p>Absorción: 1,75</p> <p>Mineralogía: cuarcita, olivino</p>	<p>Ígnea → Plutónicas (Diorita → gabro)</p>
	<p>Cantera: 2-San Diego</p> <p>Resistencia: 78,82</p> <p>Peso específico Aparente: 3,00</p> <p>Absorción: 1,73</p> <p>Mineralogía: cuarcita, cuarzo, olivino</p>	
	<p>Cantera: 3-Moreta</p> <p>Resistencia: 80,43</p> <p>Peso específico Aparente: 2,89</p> <p>Absorción: 1,76</p> <p>Mineralogía: cuarcita, cuarzo, olivino, fluorita</p>	

	<p>Cantera: 4-Los Naranjos Resistencia: 76,15 Peso específico Aparente: 2,78 Absorción: 1,70 Mineralogía: cuarcita, cuarzo, olivino</p>	
	<p>Cantera: 5 Resistencia: 4,55 Peso específico Aparente: 2,69 Absorción: 2,66 Mineralogía: cuarzo,</p>	<p>Sedimentaria→detrica (Pizarra→lutita)</p>

Fuente: Elaboración propia

3.2.3.5. Granulometría de la Cantera más favorable

Imagen 55. Granulometría de rocas



Fuente: Elaboración propia

Tabla 27. Granulometría de la cantera 3 de Moreta.

Peso Total (gr.)			5000	A.S.T.M.	
Tamices	Tamaño	Peso Ret.	Ret. Acum	% Ret	% Que Pasa del Total
	(mm)	(gr)	(gr)		
3"	75	0,00	0,00	0,00	100,00
2 1/2"	63	1519,10	1519,10	30,38	69,62
2"	50	791,90	2311,00	46,22	53,78
1 1/2"	37,50	683,33	2994,33	59,89	40,11
1"	25,00	866,67	3861,00	77,22	22,78
3/4"	19,00	380,56	4241,55	84,83	15,17
1/2"	12,50	305,56	4547,11	90,94	9,06

3/8"	9,50	94,44	4641,55	92,83	7,17
N°4	4,75	127,78	4769,33	95,39	4,61
N°10	2,00	116,67	4886,00	97,72	2,28
N°40	0,425	58,33	4944,33	98,89	1,11
N°200	0,075	41,67	4986,00	99,72	0,28
Base		13,89	4999,89	100,00	0,00

D10=	13,50
D30=	30,21
D60=	55,11

Cu=	4,08
Cc=	1,23

Bien gradada

Fuente: Elaboración propia

3.3. Elección del suelo más desfavorable para la estabilización

De acuerdo a los resultados de granulometría, límites de consistencia y C.B.R. de las diferentes calicatas y evaluación visual se escogió al suelo más desfavorable existente en el tramo antiguo Canaletas- Entre Ríos. Siendo C1-E1. (Calicata1 -Estrato1) perteneciente al grupo A-4₍₅₎ según la clasificación AASHTO. Se trata de un suelo limo arcilloso de baja compresibilidad con material orgánico pobre; materia orgánica medida mediante pérdida por ignición (AASHTO T267).

Imagen 56. Situación actual del tramo a estabilizar



Fuente: Elaboración propia

3.3.1. Determinación del contenido orgánico en suelos mediante pérdida por ignición (AASTHO T267)

Este método sirve para determinar la oxidación cuantitativa de materia orgánica en tales materiales y proporciona una estimación válida del contenido orgánico.

Imagen 57. Determinación del contenido orgánico por ignición



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 28. Contenido de materia orgánica del suelo a estabilizar

Contenido de materia orgánica (%)	Detalle
1,77	Suelo medianamente pobre

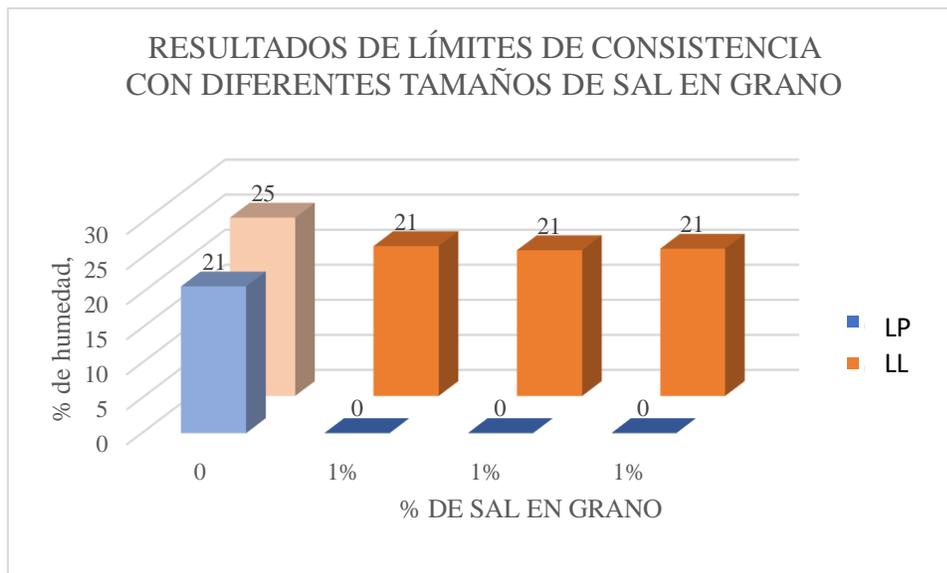
Fuente: Elaboración propia

3.4. Aplicación de diferentes tamaños de sal en grano en el suelo natural

Se aplicó diferentes tamaños de sal en grano al 1% para escoger el más óptimo para posteriormente aplicarlo en diferentes porcentajes.

3.4.1. Consistencia del suelo incorporando diferente tamaño de sal en grano

Imagen 58. Límites de consistencia con diferente tamaño de sal en grano



Fuente: Elaboración propia

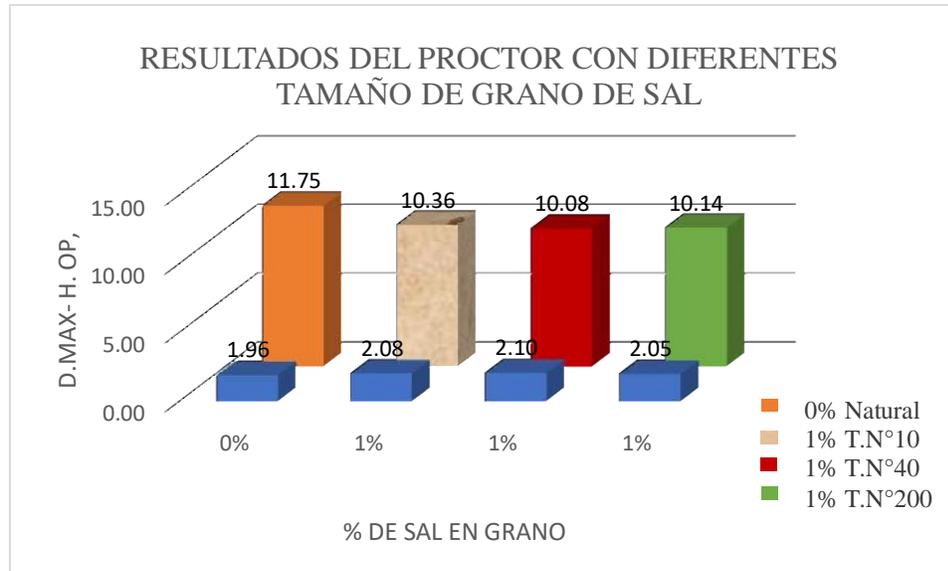
Tabla 29. Resultado de los límites de consistencia aplicando diferente tamaño de sal

Sal		Límites			Detalles
%	Tamaño (mm)	LL	LP	IP	
0%	-	25	21	5	P2, Suelo natural
1%	2,000	21	0	0	Lo que pasa el tamiz N°10
1%	0,425	21	0	0	Lo que pasa el tamiz N°40
1%	0,075	21	0	0	Lo que pasa el tamiz N°200

Fuente: Elaboración propia

3.4.2. Compactación del suelo incorporando diferentes tamaños de sal en grano

Imagen 59. Densidad máxima y humedad óptima aplicando diferentes tamaños de sal



Fuente: Elaboración propia

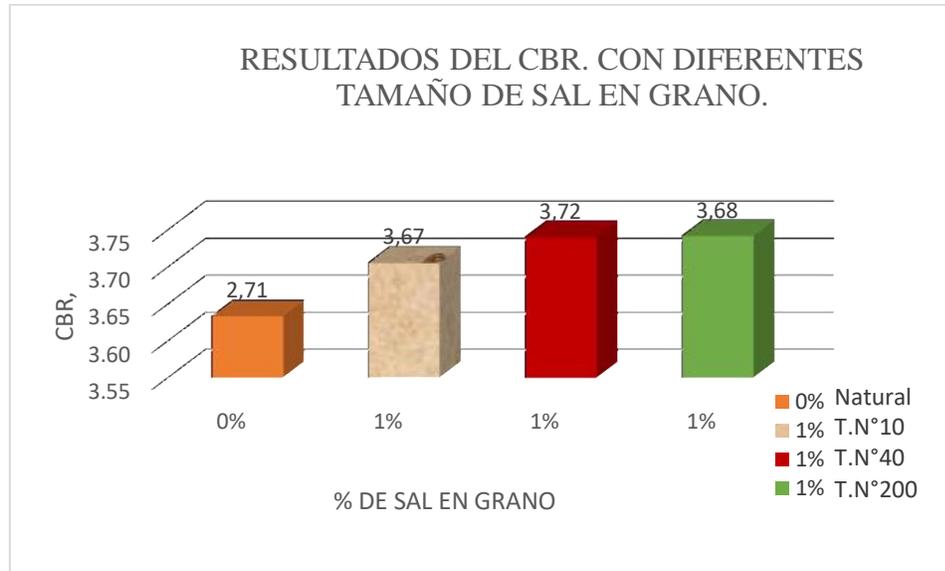
Tabla 30. Resultado de la compactación aplicando diferente tamaño de sal

Sal (%)	Tamaño (mm)	Densidad M. (gr/cm ³)	Humedad Op. (%)	Detalles
0%	-	1,96	11,75	P2, Suelo natural
1%	2,000	2,08	10,36	Lo que pasa el tamiz N°10
1%	0,425	2,10	10,08	Lo que pasa el tamiz N°40
1%	0,075	2,05	10,14	Lo que pasa el tamiz N°200

Fuente: Elaboración propia

3.4.3. CBR del suelo incorporando diferentes tamaños de sal en grano

Imagen 60. Grafica CBR aplicando diferentes tamaños de sal en grano



Fuente: Elaboración propia

Tabla 31. Resultado del CBR aplicando diferentes tamaños de sal en grano

Sal		CBR		Detalles
%	Tamaño (mm)	95(%)	Expansión (%)	
0%	-	1,96	0,95	P2, Suelo natural
1%	2	3,67	0,95	Lo que pasa el tamiz N°10
1%	0,425	3,72	0,95	Lo que pasa el tamiz N°40
1%	0,075	3,68	0,95	Lo que pasa el tamiz N°200

Fuente: Elaboración propia

3.5. Aplicación de sal en grano en diferentes porcentajes para la estabilización

Se aplico porcentajes del 1,2,3,5,7 y 10% de sal en grano para su posterior análisis en sus propiedades en el suelo.

Los porcentajes incorporados se basó en la salinidad o saturación del suelo, se buscó cuanto acepta el suelo de la cantidad de cloruro de sodio; se encontró el porcentaje máximo de aplicación de sal y por encima de este valor el suelo comienza a rechazar la incorporación de sal por desorción iónica y expulsa de la estructura compacta.

3.5.1. Determinación de consistencia de los suelos

Imagen 61. Consistencia de suelos incorporando sal en grano



Fuente: Elaboración propia

Tabla 32. Resultado de la consistencia del suelo, aplicando porcentajes de sal en grano

Sal		Límites			Detalle
%	Tamaño (mm)	LL	LP	IP	
0%	-	25	21	5	P2, suelo natural
1%	0,425	21	0	0	Lo que pasa el tamiz N°40
2%	0,425	20	0	0	Lo que pasa el tamiz N°40
3%	0,425	19	0	0	Lo que pasa el tamiz N°40
5%	0,425	18	0	0	Lo que pasa el tamiz N°40
7%	0,425	17	0	0	Lo que pasa el tamiz N°40
10%	0.425	16	0	0	Lo que pasa el tamiz N°40

Fuente: Elaboración propia

3.5.2. Ensayo de compactación (AASHTO T272)

Imagen 62. Ensayo de compactación incorporando sal en grano



Fuente: Elaboración propia

Tabla 33. Resultado de la compactación incorporando porcentajes de sal en grano

% de sal	Tamaño (mm)	D.max (gr/cm ³)	H.Op (%)	Detalles
0%	-	1,96	11,75	C1-E1, suelo natural
1%	0,425	2,10	10,08	Lo que pasa el tamiz N°40
2%	0,425	2,11	9,58	Lo que pasa el tamiz N°40
3%	0,425	2,11	9,50	Lo que pasa el tamiz N°40
5%	0,425	2,12	9,74	Lo que pasa el tamiz N°40
7%	0,425	2,09	9,54	Lo que pasa el tamiz N°40
10%	0,425	2,01	11,57	Lo que pasa el tamiz N°40

Fuente: Elaboración propia

3.5.3. Determinación del CBR de laboratorio (ASTM D1883; AASHTO T193)

Imagen 63. Ensayo del CBR. Incorporando sal en grano



Fuente: Elaboración propia

Tabla 34. Resultados del CBR. Incorporando porcentajes de sal en grano

% De sal	Tamaño (mm)	CBR		Detalles
		95(%)	Exp(%)	
0%	-	2,96	0,95	P2, suelo natural
1%	0,425	3,71	0,95	Lo que pasa el tamiz N°40
2%	0,425	3,83	0,76	Lo que pasa el tamiz N°40
3%	0,425	3,96	0,55	Lo que pasa el tamiz N°40
5%	0,425	4,13	0,40	Lo que pasa el tamiz N°40
7%	0,425	3,71	0,25	Lo que pasa el tamiz N°40
10%	0,425	3,10	0,95	Lo que pasa el tamiz N°40

Fuente: Elaboración propia

3.6. Aplicación de la solución de salmuera para la estabilización

Se aplicó porcentajes del 1,2,3,5,7 y 10% de la solución de salmuera para su posterior análisis en sus propiedades en el suelo.

3.6.1. Determinación de consistencia de los suelos

Imagen 64. Ensayo de consistencia de suelos incorporando solución de salmuera



Fuente: Elaboración propia

Tabla 35. Consistencia del suelo aplicando solución de sal

% De sal	Límites		
	LL	LP	IP
0%	25	21	5
1%	21	21	0
2%	19	19	0
3%	19	18	1
5%	17	16	1
7%	17	16	1
10%	16	15	1

Fuente: Elaboración propia

3.6.2. Ensayo de compactación (AASHTO T272)

Imagen 65. Ensayo de compactación incorporando solución de salmuera



Fuente: Elaboración propia

Tabla 36. Resultados de la compactación incorporando porcentajes de salmuera.

% de sal	Tamaño (mm)	D.max (gr/cm³)	H.Op (%)	Detalle
0%	-	1,96	11,75	P2, suelo natural
1%	Líquido	2,10	10,01	Solución de sal
2%	Líquido	2,11	9,31	Solución de sal
3%	Líquido	2,12	8,79	Solución de sal
5%	Líquido	2,15	7,96	Solución de sal
7%	Líquido	2,10	8,43	Solución de sal
10%	Líquido	2,06	10,76	Solución de sal

Fuente: Elaboración propia

3.6.3. Determinación del CBR de laboratorio (ASTM D1883; AASHTO T193)

Imagen 66. Ensayo del CBR incorporando solución de salmuera



Fuente: Elaboración propia

Tabla 37. Resultados del CBR. incorporando porcentajes de solución de salmuera

%De sal	CBR		Detalle
	95 (%)	Exp (%)	
0%	2,96	0,95	P2, suelo natural
1%	3,72	0,73	Solución de sal
2%	3,86	0,60	Solución de sal
3%	3,98	0,55	Solución de sal
5%	4,25	0,19	Solución de sal
7%	3,98	0,19	Solución de sal
10%	3,30	0,80	Solución de sal

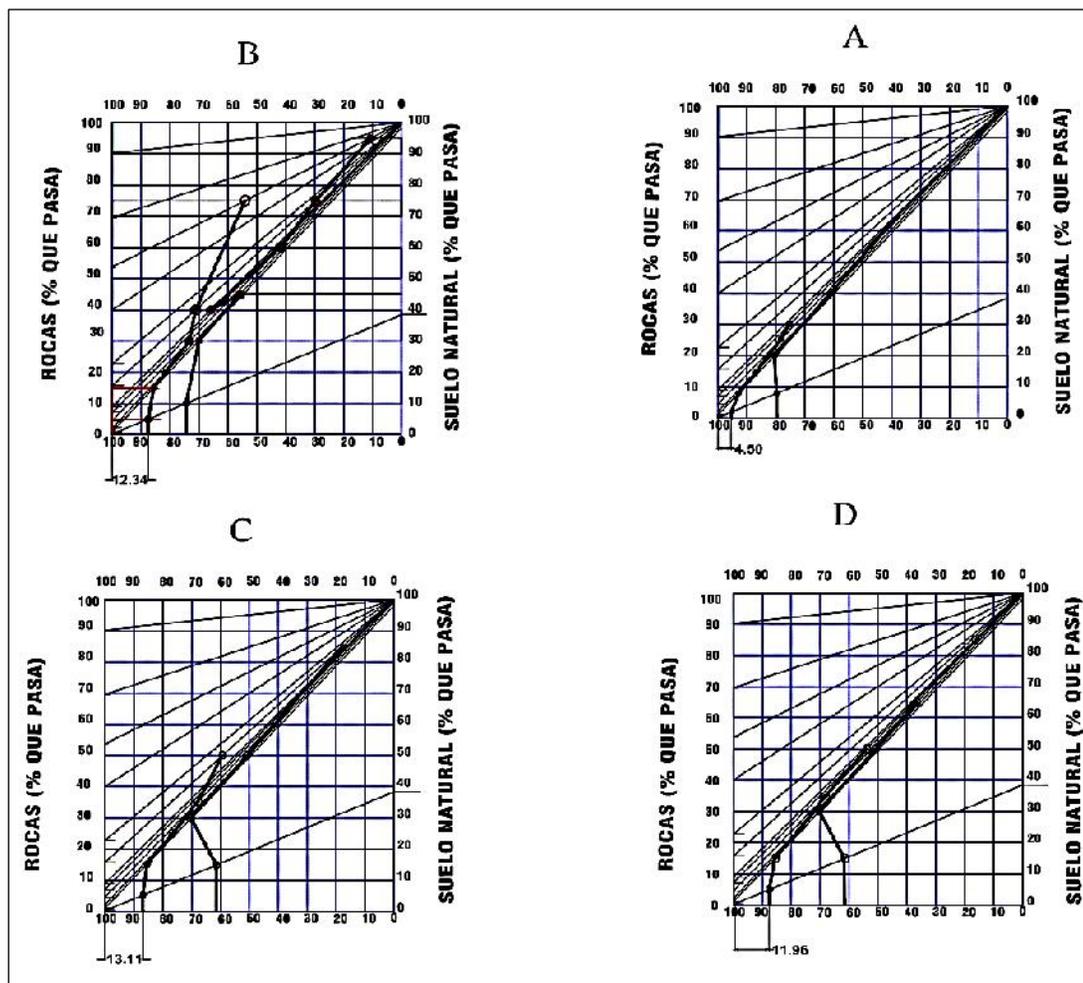
Fuente: Elaboración propia

3.7. Método gráfico para la combinación de agregados

En la combinación mixta, se determinó el porcentaje de la grava y el suelo natural realizando el método gráfico, tomando como apoyo las especificaciones de la capa subbase; donde se graficó para cada especificación de la siguiente manera.

- Primeramente, se une una recta los correspondientes porcentajes que pasan de ambos agregados, "suelo natural" a la izquierda del gráfico, con el porcentaje que pasa de "rocas", a la derecha y anótase sobre esas rectas el número del tamiz respectivo. Las intersecciones de cada línea de tamiz con cualquier línea vertical de la gráfica de la figura 4.1 definirán la gradación compuesta de los agregados de los materiales A y B, para las proporciones de mezcla indicadas en las escalas horizontales (arriba y abajo).
- Posteriormente se marca las intersecciones que representarán los límites de la especificación. Las intersecciones para cualquier línea de tamiz dada, representan el intervalo de las proporciones que cumplirá con los límites de la especificación.
- Elíjase una línea vertical que corresponda al mejor promedio a través de todas las intersecciones de la especificación mostrada. La marca con el límite inferior más a la derecha y la marca con el límite superior más a la izquierda, darán los valores para calcular las proporciones, en porcentaje, de cada agregado.
- Estas dos marcas se prolongan hasta la parte superior e inferior de la gráfica, obteniéndose dos valores, que se promedian, para obtener el porcentaje a usar de cada agregado.

Imagen 67. Método gráfico para definir porcentajes de agregados



Fuente: Elaboración propia

Tabla 38. Porcentaje de agregados para la estabilización

Tipo de gradación	(%) grava	(%) suelo natural
A	4,5	95
B	12	88
C	13	87
D	12	97
Redondeando	15	85

Fuente: Elaboración propia

3.8. Aplicación de grava a la subrasante

Con el porcentaje determinado en el método grafico se procedió a incorporarlo al suelo de la calicata P2 porcentajes inferiores y mayores al 15% de grava. De acuerdo a la reacción que tuvo con el suelo de la calicata P2, solo se incrementó el 15% y 30% de grava a las calicatas P6 y P7 en representación de los suelos de igual parentesco.

3.8.1. Ensayo de compactación (AASHTO T272)

Tabla 39. Resultados del Proctor con porcentajes de grava incorporados a la calicata P2

%	Proctor		Detalles
	D. Max (gr/cm ³)	H. Óp. (%)	
0	1,96	11,75	Suelo natural P2
5	2,01	10,83	95% de suelo natural, 5% de grava
10	2,05	9,73	90% de suelo natural, 10% de grava
15	2,10	9,10	85% de suelo natural, 15% de grava
20	2,16	8,82	95% de suelo natural, 5% de grava
30	2,36	8,42	95% de suelo natural, 5% de grava

Fuente: Elaboración propia

Tabla 40. Resultados del Proctor con porcentajes de grava incorporados a la calicata P6

%	Proctor		Detalles
	D. Max (gr/cm ³)	H. Óp. (%)	
0	2,13	10,09	Suelo natural P6
15	2,18	10,09	85% de suelo natural P6, 15% de grava
30	2,20	10,02	95% de suelo natural P6, 5% de grava

Fuente: Elaboración propia

Tabla 41. Resultados del Proctor con porcentajes de grava incorporados a la calicata P7

%	Proctor		Detalles
	D. Max (gr/cm ³)	H. Óp. (%)	
0	2,15	10,39	Suelo natural P7
15	2,20	9,90	85% de suelo natural P7, 15% de grava
30	2,24	9,92	95% de suelo natural P7, 5% de grava

Fuente: Elaboración propia

3.8.2. Determinación del CBR de laboratorio (ASTM D1883; AASHTO T193)

Después de la realización del ensayo del Proctor modificado se realizó el ensayo del CBR con los incrementos de porcentajes de gravas para la calicata P2, P6 y p7.

Tabla 42. Resultados del CBR con porcentajes de grava incorporados a la calicata P2

%	CBR		Detalles
	95(%)	Expansión (%)	
0	2,96	0,95	Suelo natural P2
5	3,90	0,69	95% de suelo natural, 5% de grava
10	6,48	0,50	90% de suelo natural, 10% de grava
15	8,90	0,25	85% de suelo natural, 15% de grava
20	12,50	0,13	95% de suelo natural, 5% de grava
30	21,77	0,09	95% de suelo natural, 5% de grava

Fuente: Elaboración propia

Tabla 43. Resultados del CBR Con porcentajes de grava incorporados a la calicata P6

%	CBR		Detalles
	95(%)	Expansión (%)	
0	4,18	0,66	Suelo natural P6
15	9,38	0,25	85% de suelo natural P6, 15% de grava
30	22,18	0,13	95% de suelo natural P6, 5% de grava

Fuente: Elaboración propia

Tabla 44. Resultados del CBR Con porcentajes de grava incorporados a la calicata P7

%	CBR		Detalles
	95(%)	Expansión (%)	
0	4,56	0,39	Suelo natural P7
15	9,91	9,91	85% de suelo natural P7, 15% de grava
30	24,27	0,11	95% de suelo natural P7, 5% de grava

Fuente: Elaboración propia

3.9. Combinación Mixta para la estabilización

A continuación, se muestra los resultados de la combinación mixta, donde se incorporó al suelo natural, 15% de grava y 5% de sal rosada.

3.9.1. Ensayo de compactación (AASHTO T272)

Tabla 45. Resultado de la compactación mixta

%	Proctor		Detalles
	D. Max (gr/cm ³)	H. Óp. (%)	
0%	1,96	11,75	P2, Suelo natural
85%-15%	2,10	9,10	85% de suelo natural, 15% de grava
80%-15%-5% gran.	2,16	8,11	80% de suelo natural, 15% de grava y 5% de sal granulada
80%-15%-5% salm.	2,19	7,40	80% de suelo natural, 15% de grava y 5% de salmuera

Fuente: Elaboración propia

3.9.2. Determinación del CBR de laboratorio (ASTM D1883; AASHTO T193)

Tabla 46. Resultado del CBR mixto

%	CBR		Detalles
	95(%)	Expansión (%)	
0%	2,96	0,95	P2, Suelo natural
85%-15%	8,90	0,25	85% de suelo natural, 15% de grava
80%-15%-5% gran.	9,43	0,17	80% de suelo natural, 15% de grava y 5% de sal granulada
80%-15%-5% salm.	9,92	0,13	80% de suelo natural, 15% de grava y 5% de salmuera

Fuente: Elaboración propia

3.10. Diseño de espesores método AASTHO 93

Se diseñó los espesores de toda la carpeta estructural de un pavimento flexible (capa sub base, capa base y capa asfáltica) de acuerdo al método AASTHO 93.

El estudio del tráfico fue adquirido de la microempresa Gareca perteneciente a la Administradora Boliviana de Carreteras.

Se realizó el diseño del paquete estructural con suelo natural de cada tramo; también con el incremento de gravas con porcentaje del 15%, 20%, 30% de grava para la calicata P2, y porcentajes del 15% y 30% de grava para las calicatas P6 y P7.

Imagen 68. Paquete estructural



Fuente: Elaboración propia

Tabla 47. Diseño de espesores de cada progresiva del suelo natural

Calicatas	CBR (%)	Diseño de espesores (cm)			Observaciones
		Capa subbase	Capa base	Capa asfáltica	
P1	3,41	49,00	15,00	15,00	Suelo Natural de la calicata P1
P2	2,96	56,00	15,00	15,00	Suelo Natural de la calicata P2
P3	3,18	52,00	15,00	15,00	Suelo Natural de la calicata P3
P4	3,08	53,00	15,00	15,00	Suelo Natural de la calicata P4
P5	4,93	33,00	15,00	15,00	Suelo Natural de la calicata P5
P6	4,18	40,00	15,00	15,00	Suelo Natural de la calicata P6
P7	4,60	36,00	15,00	15,00	Suelo Natural de la calicata P7
P8	4,81	34,00	15,00	15,00	Suelo Natural de la calicata P8
P9	5,11	31,00	15,00	15,00	Suelo Natural de la calicata P9
P10	5,14	31,00	15,00	15,00	Suelo Natural de la calicata P10

Fuente: Elaboración propia

Tabla 48. Diseño de espesores para la calicata P2

CBR (%)	Diseño de espesores (cm)			Observaciones
	Capa subbase	Capa base	Capa asfáltica	
2,96	55,00	15,00	15,00	Suelo Natural
8,90	12,00	15,00	15,00	Suelo mejorado con 15% de grava
12,50	3,00	15,00	15,00	Suelo mejorado con 20% de grava
21,77	8,00	15,00	15,00	Suelo mejorado con 30% de grava

Fuente: Elaboración propia

Tabla 49. Diseño de espesores para la calicata P6

CBR (%)	Diseño de espesores (cm)			Observaciones
	Capa subbase	Capa base	Capa asfáltica	
4,18	40,00	15,00	15,00	Suelo Natural
9,38	10,00	15,00	15,00	Suelo mejorado con 15% de grava
22,18	8,00	15,00	15,00	Suelo mejorado con 30% de grava

Fuente: Elaboración propia

Tabla 50 Diseño de espesores para la calicata P7

CBR (%)	Diseño de espesores (cm)			Observaciones
	Capa subbase	Capa base	Capa asfáltica	
4,6	36,00	15,00	15,00	Suelo Natural
9,91	9,00	15,00	15,00	Suelo mejorado con 15% de grava
24,27	7,00	15,00	15,00	Suelo mejorado con 30% de grava

Fuente: Elaboración propia

3.11. Análisis de costos

La elaboración de costos tiene la finalidad de saber el precio total de una obra, el cual es producto de la sumatoria de distintos ítems componentes del presupuesto total de obra.

3.11.1. Costos con subrasante mejorada y no mejorada del paquete estructural

Se realizó la elaboración de los costos donde, primeramente, se identificó los ítems del presente proyecto, a continuación, se determinó los precios unitarios de cada ítem con ayuda de la revista CADECO, posteriormente se realizó los cómputos métricos para 500m de longitud y 4cm del ancho de calzada, para finalmente obtener el costo total tomando en cuenta los espesores de capas realizado en el diseño estructural.

3.11.1.1. Costos por progresiva con subrasante sin mejorar

Con el CBR natural de cada tramo se realizó el diseño de espesores del paquete estructural para determinar el costo total sin mejorar la subrasante considerando los siguientes ítems.

Tabla 51. Ítems usados para el costo del paquete estructural sin mejorar la subrasante

Ítem	Descripción	Unidad	P.U
1	Cierre perimetral de protección	glb	41,34
2	Letrero de obra	Pza	565,55
3	Replanteo y control topográfico	m ²	120,00
7	Perfilado, nivelado y compactado de subrasante	m ²	44,54
8	Prov. y coloc. capa subbase	m ³	149,54
9	Prov. y coloc. Capa base	m ²	108,97
10	Imprimación bituminosa	m ²	14,10
11	Carpeta asfáltica convencional	m ³	2451,11

Fuente: Elaboración propia

Tabla 52. Costo del paquete estructural con suelo no mejorado

Calicatas	CBR (%)	Diseño de espesores (cm)			Costo Total (Bs.)
		Capa subbase	Capa base	Capa asfáltica	
P1	3,41	49,00	15,00	15,00	1.468.131,11
P2	2,96	56,00	15,00	15,00	1.489.067,05
P3	3,18	52,00	15,00	15,00	1.477.103,66
P4	3,08	53,00	15,00	15,00	1.480.094,51
P5	4,93	33,00	15,00	15,00	1.420.277,54
P6	4,18	40,00	15,00	15,00	1.441.213,48
P7	4,60	36,00	15,00	15,00	1.441.213,48
P8	4,81	34,00	15,00	15,00	1.423.268,39
P9	5,11	31,00	15,00	15,00	1.414.295,84
P10	5,14	31,00	15,00	15,00	1.414.295,84
				Total	14.468.960,90

Fuente: Elaboración propia

3.11.1.2. Costos por progresiva con subrasante mejorado

Se realizó la determinación de costos con la subrasante mejorada; incrementando gravas con porcentajes del 15% y 30% de grava para las calicatas P2, P6 y P7.

Por estrategia se decidió agrupar los suelos de igual parentesco de la siguiente manera.

Tabla 53. Agrupación de suelos de igual parentesco

Procedencia		Clasificación AASHTO	Grupo
Progresiva	Calicata		
0+500	P1	A-4 ₍₅₎	1
1+000	P2	A-4 ₍₅₎	
1+500	P3	A-4 ₍₆₎	
2+000	P4	A-4 ₍₇₎	
2+500	P5	A-2-6 ₍₂₎	2
3+000	P6	A-2-6 ₍₂₎	
3+500	P7	A-2-4	3
4+000	P8	A-2-4	
4+500	P9	A-2-4 ₍₀₎	
5+000	P10	A-2-4 ₍₂₎	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 54. Ítems usados para el costo del paquete estructural mejorando la subrasante

Ítem	Descripción	Unidad	P. U.
1	Cierre perimetral de protección	glb	41,34
2	Letrero de obra	Pza	565,55
3	Replanteo y control topográfico	m ²	120,00
4	Explotación de agregados con voladura	m ³	130,90
5	Provisión de grava triturada y clasificada	m ³	138,82
6	Sobre acarreo	m ³ -Km	4,09
7	Mejoramiento de subrasante con grava	m ²	44,54
8	Prov. y coloc. capa subbase	m ³	149,54
9	Prov. y coloc. Capa base	m ²	108,97
10	Imprimación bituminosa	m ²	14,10
11	Carpeta asfáltica convencional	m ³	2.451,11
12	Limpieza general	ml	20,81

Fuente: Elaboración propia

Tabla 55 Costo del paquete estructural con subrasante mejorada con 15% de grava

Calicatas	CBR con 15% de grava	Diseño de espesores (cm)			Costo Total (Bs.)
		Capa subbase	Capa base	Capa asfáltica	
P1	8,90	12,00	15,00	15,00	1.255.065,89
P2	8,90	12,00	15,00	15,00	1.255.065,89
P3	8,90	12,00	15,00	15,00	1.255.065,89
P4	8,90	12,00	15,00	15,00	1.255.065,89
P5	9,38	10,00	15,00	15,00	1.249.084,20
P6	9,38	10,00	15,00	15,00	1.249.084,20
P7	9,91	9,00	15,00	15,00	1.246.093,35
P8	9,91	9,00	15,00	15,00	1.246.093,35
P9	9,91	9,00	15,00	15,00	1.246.093,35
P10	9,91	9,00	15,00	15,00	1.246.093,35
Total					12.502.805,34

Fuente: Elaboración propia

Tabla 56. Costo del paquete estructural con subrasante mejorada con 30% de grava

Calicatas	CBR con 30% de grava	Diseño de espesores (cm)			Costo Total (Bs.)
		Capa subbase	Capa base	Capa asfáltica	
P1	21,77	8,00	15,00	15,00	1.380.698,66
P2	21,77	8,00	15,00	15,00	1.380.698,66
P3	21,77	8,00	15,00	15,00	1.380.698,66
P4	21,77	8,00	15,00	15,00	1.380.698,66
P5	22,18	8,00	15,00	15,00	1.380.698,66
P6	22,18	8,00	15,00	15,00	1.380.698,66
P7	24,27	7,00	15,00	15,00	1.377.707,82
P8	24,27	7,00	15,00	15,00	1.377.707,82
P9	24,27	7,00	15,00	15,00	1.377.707,82
P10	24,27	7,00	15,00	15,00	1.377.707,82
Total					13.795.023,24

Fuente: Elaboración propia

3.11.2. Costos de subrasante mejorada

Se realizó la determinación de costos de la subrasante incrementando porcentajes de 15% y 30% de grava.

Tabla 57. Ítems usados para el costo de la subrasante

Ítem	Descripción	Unidad	P. U.
1	Cierre perimetral de protección	glb	41,34
2	Letrero de obra	Pza	565,55
3	Replanteo y control topográfico	m ²	120,00
4	Explotación de agregados con voladura	m ³	130,90
5	Provisión de grava triturada y clasificada	m ³	138,82
6	Sobre acarreo	m ³ -Km	4,09
7	Mejoramiento de subrasante con grava	m ²	44,54
8	Limpieza general	ml	20,81

Fuente: Elaboración propia

Tabla 58. Costos de subrasante incrementando el 15% de grava

Calicatas	CBR con 15% de grava	Costo Total (Bs.)	% de grava
P1	8,90	237.699,08	15%
P2	8,90	237.699,08	15%
P3	8,90	237.699,08	15%
P4	8,90	237.699,08	15%
P5	9,38	237.699,08	15%
P6	9,38	237.699,08	15%
P7	9,91	237.699,08	15%
P8	9,91	237.699,08	15%
P9	9,91	237.699,08	15%
P10	9,91	237.699,08	15%
Total		2.376.990,82	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 59. Costos de subrasante incrementando el 30% de grava

Calicatas	CBR con 30% de grava	Costo Total (Bs.)	% de grava
P1	21,77	375.295,25	30%
P2	21,77	375.295,25	30%
P3	21,77	375.295,25	30%
P4	21,77	375.295,25	30%
P5	22,18	375.295,25	30%
P6	22,18	375.295,25	30%
P7	24,27	375.295,25	30%
P8	24,27	375.295,25	30%
P9	24,27	375.295,25	30%
P10	24,27	375.295,25	30%
Total		3.752.952,47	

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS

CAPÍTULO IV
ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. Resumen de resultados

Tabla 60. Resumen de resultado de la caracterización de las calicatas del tramo en estudio

Procedencia		Granulometría								Límites			Clasificación	Proctor		CBR	
Progresiva	Calicata	3/4"	1/2"	3/8"	Nº4	Nº10	Nº40	Nº100	Nº200	LL	LP	IP	AASHTO	D.max (gr/cm ³)	H.Op (%)	95 (%)	Exp (%)
0+500	P1	100	100	100	100	99	98	80	58	25	21	3	A-4 ₍₅₎	1,97	12,64	3,41	0,25
1+000	P2	100	100	100	100	99	98	80	58	25	21	5	A-4 ₍₅₎	1,96	11,75	2,96	0,95
1+500	P3	100	100	100	100	99	98	80	58	26	20	6	A-4 ₍₆₎	2,02	10,46	3,18	0,52
2+000	P4	100	100	100	100	99	98	80	58	25	0	0	A-4 ₍₇₎	2,03	10,89	3,08	0,82
2+500	P5	100	100	99	98	98	96	-	27	25	0	0	A-2-6 ₍₂₎	2,12	10,13	4,93	0,79
3+000	P6	100	100	99	98	98	96	-	27	0	0	0	A-2-6 ₍₂₎	2,13	10,09	4,18	0,66
3+500	P7	98	96	95	92	89	74	48	35	0	0	0	A-2-4	2,15	10,39	4,6	0,39
4+000	P8	97	95	94	92	90	73	-	23	0	0	0	A-2-4	2,10	10,58	4,81	0,45
4+500	P9	100	100	99	98	96	87	-	28	0	0	0	A-2-4 ₍₀₎	2,09	10,10	5,11	0,77
5+000	P10	100	100	99	98	98	96	-	27	0	0	0	A-2-4 ₍₂₎	2,01	10,07	5,14	0,53

Fuente: Elaboración propia

Tabla 61. Resumen de resultados aplicando diferentes tamaños de sal en grano

% De sal		Límites			Proctor		CBR		Detalles
%	Tamaño (mm)	LL	LP	IP	D.max (g/cm ³)	H.Op (%)	95 (%)	Expansión (%)	

Diferentes tamaños de sal en grano.

0%	-	25	21	5	1,96	11,75	2,76	0,95	P2 suelo natural
1%	2.000	21	0	0	2,08	10,36	3,67	0,95	Lo que pasa el tamiz N°10
1%	0,425	21	0	0	2,10	10,08	3,71	0,95	Lo que pasa el tamiz N°40
1%	0,075	21	0	0	2,05	10,14	3,68	0,95	Lo que pasa el tamiz N°200

Fuente: Elaboración propia

Tabla 39. Resumen de resultados, aplicando diferentes porcentajes de sal

sal		Límites			Proctor		CBR		Detalles
%	Tamaño (mm)	LL	LP	IP	D.max (gr/cm ³)	H.Op (%)	95 (%)	Expansión (%)	

Granular

0%	-	25	21	5	1,96	11,75	2,96	0,95	P2 suelo natural
1%	0,425	21	0	0	2,10	10,08	3,71	0,95	Lo que pasa el tamiz N°40
2%	0,425	20	0	0	2,11	9,58	3,83	0,76	Lo que pasa el tamiz N°40
3%	0,425	19	0	0	2,11	9,50	3,96	0,55	Lo que pasa el tamiz N°40
5%	0,425	18	0	0	2,12	9,74	4,13	0,40	Lo que pasa el tamiz N°40
7%	0,425	17	0	0	2,09	9,54	3,71	0,25	Lo que pasa el tamiz N°40
10%	0,425	16	0	0	2,01	11,57	3,10	0,72	Lo que pasa el tamiz N°40

Salmuera

0%	-	25	21	5	1,96	11,75	2,96	0,95	P2 Suelo Natural
1%	Líquido	21	21	0	2,10	10,01	3,72	0,73	Sal diluida lo que pasa el tamiz N°200
2%	Líquido	19	19	0	2,11	9,31	3,86	0,55	Sal diluida lo que pasa el tamiz N°200
3%	Líquido	19	18	1	2,12	8,79	3,98	0,25	Sal diluida lo que pasa el tamiz N°200
5%	Líquido	17	16	1	2,15	7,96	4,25	0,19	Sal diluida lo que pasa el tamiz N°200
7%	Líquido	17	16	1	2,10	8,43	3,98	0,19	Sal diluida lo que pasa el tamiz N°200
10%	Líquido	16	15	1	2,06	10,76	3,5	0,69	Sal diluida lo que pasa el tamiz N°200

Fuente: Elaboración propia

Tabla 62. Resumen de resultados de la combinación mixta

%	Proctor		CBR		Detalles
	D. Max (gr/cm ³)	H. Óp. (%)	95(%)	Expansión (%)	
0%	1,96	11,75	2,96	0,95	P2, Suelo natural
85%-15%	2,10	9,10	8,90	0,25	85% de suelo natural P2,15% de grava
80%-15%-5% gran.	2,16	8,11	9,43	0,17	80% de suelo natural P2,15% de grava y 5% de sal granulada
80%-15%-5% salm.	2,19	7.40	9.92	0,13	80% de suelo natural P2,15% de grava y 5% de salmuera

Fuente: Elaboración propia

Tabla 63. Resumen de resultados de suelo natural P2 con porcentajes de grava

%	PROCTOR		CBR		Detalles
	D. Max (gr/cm ³)	H. Óp. (%)	95(%)	Expansión (%)	
0	1,96	11,75	2,96	0,95	Suelo natural P2
5	2,01	10,83	3,90	0,69	95% de suelo natural P2, 5% de grava
10	2,05	9,73	6,48	0,50	90% de suelo natural P2, 10% de grava
15	2,10	9,10	8,90	0,25	85% de suelo natural P2, 15% de grava
20	2,14	8,82	12,50	0,13	95% de suelo natural P2, 5% de grava
30	2,18	8,42	21,77	0,09	95% de suelo natural P2, 5% de grava

Fuente: Elaboración propia

Tabla 64. Resumen de resultados del proctor modificado y CBR de suelos agrupados con porcentajes de grava

Procedencia		Clasificación AASHTO	Suelo Natural				15% de grava				30% de grava				Detalles con el incremento de grava
Progresiva	Calicata		Proctor		CBR		Proctor		CBR		Proctor		CBR		
			D.max (gr/cm3)	H.Op (%)	95 (%)	Exp (%)	D.max (gr/cm3)	H.Op (%)	95 (%)	Exp (%)	D.max (gr/cm3)	H.Op (%)	95 (%)	Exp (%)	
0+500	P1	A-4 ₍₅₎	1,97	12,64	3,41	0,25	2,10	9,10	8,90	0,25	2,18	8,4	21,77	0,09	Agrupados a un solo tipo de suelo y calculado para P2
1+000	P2	A-4 ₍₅₎	1,96	11,75	2,96	0,95	2,10	9,10	8,90	0,25	2,18	8,4	21,77	0,09	Agrupados a un solo tipo de suelo y calculado para P2
1+500	P3	A-4 ₍₆₎	2,02	10,46	3,18	0,52	2,10	9,10	8,90	0,25	2,18	8,4	21,77	0,09	Agrupados a un solo tipo de suelo y calculado para P2
2+000	P4	A-4 ₍₇₎	2,03	10,89	3,08	0,82	2,10	9,10	8,90	0,25	2,18	8,4	21,77	0,09	Agrupados a un solo tipo de suelo y calculado para P2
2+500	P5	A-2-6 ₍₂₎	2,12	10,12	4,93	0,79	2,18	10,09	9,38	0,25	2,20	10,02	22,18	0,13	Agrupados a un solo tipo de suelo y calculado para P6
3+000	P6	A-2-6 ₍₂₎	2,13	10,09	4,18	0,66	2,18	10,09	9,38	0,25	2,20	10,02	22,18	0,13	Agrupados a un solo tipo de suelo y calculado para P6
3+500	P7	A-2-4	2,15	10,39	4,56	0,39	2,20	9,90	9,91	9,9	2,24	9,92	24,27	0,11	Agrupados a un solo tipo de suelo y calculado para P7
4+000	P8	A-2-4	2,10	10,58	4,81	0,45	2,20	9,90	9,91	9,9	2,24	9,92	24,27	0,11	Agrupados a un solo tipo de suelo y calculado para P7
4+500	P9	A-2-4 ₍₀₎	2,09	10,10	5,11	0,77	2,20	9,90	9,91	9,9	2,24	9,92	24,27	0,11	Agrupados a un solo tipo de suelo y calculado para P7
5+000	P10	A-2-4 ₍₂₎	2,01	10,07	5,14	0,53	2,20	9,90	9,91	9,9	2,24	9,92	24,27	0,11	Agrupados a un solo tipo de suelo y calculado para P7

Fuente: Elaboración propia

Tabla 65. Resumen de cálculos del suelo natural y mejorado con el 15% y 30% de grava

Calicata	Grupo	Suelo natural				Suelo con 15% de grava				Suelo con 30% de grava			
		CBR (%)	Diseño de espesores (cm)			CBR (%)	Diseño de espesores (cm)			CBR (%)	Diseño de espesores (cm)		
			Capa subbase	Capa base	Capa asfáltica		Capa subbase	Capa base	Capa asfáltica		Capa subbase	Capa base	Capa asfáltica
P1	1	3,41	49,00	15,00	15,00	8,90	12,00	15,00	15,00	21,77	8,00	15,00	15,00
P2		2,96	56,00	15,00	15,00	8,90	12,00	15,00	15,00	21,77	8,00	15,00	15,00
P3		3,18	52,00	15,00	15,00	8,90	12,00	15,00	15,00	21,77	8,00	15,00	15,00
P4		3,08	53,00	15,00	15,00	8,90	12,00	15,00	15,00	21,77	8,00	15,00	15,00
P5	2	4,93	33,00	15,00	15,00	9,38	10,00	15,00	15,00	22,18	8,00	15,00	15,00
P6		4,18	40,00	15,00	15,00	9,38	10,00	15,00	15,00	22,18	8,00	15,00	15,00
P7	3	4,60	36,00	15,00	15,00	9,91	9,00	15,00	15,00	24,27	7,00	15,00	15,00
P8		4,81	34,00	15,00	15,00	9,91	9,00	15,00	15,00	24,27	7,00	15,00	15,00
P9		5,11	31,00	15,00	15,00	9,91	9,00	15,00	15,00	24,27	7,00	15,00	15,00
P10		5,14	31,00	15,00	15,00	9,91	9,00	15,00	15,00	24,27	7,00	15,00	15,00

Fuente: Elaboración propia

Tabla 66. Cuadro resumen de costos del suelo natural y suelo mejorado

Calicatas	Suelo natural		Suelo con 15% de grava		Suelo con 30% de grava	
	CBR Natural (%)	Costo Total (Bs.)	CBR Natural (%)	Costo Total (Bs.)	CBR Natural (%)	Costo Total (Bs.)
P1	3,41	1.468.131,11	8,90	1.255.065,89	21,77	1.380.698,66
P2	2,96	1.489.067,05	8,90	1.255.065,89	21,77	1.380.698,66
P3	3,18	1.477.103,66	8,90	1.255.065,89	21,77	1.380.698,66
P4	3,08	1.480.094,51	8,90	1.255.065,89	21,77	1.380.698,66
P5	4,93	1.420.277,54	9,38	1.249.084,20	22,18	1.380.698,66
P6	4,18	1.441.213,48	9,38	1.249.084,20	22,18	1.380.698,66
P7	4,60	1.441.213,48	9,91	1.246.093,35	24,27	1.377.707,82
P8	4,81	1.423.268,39	9,91	1.246.093,35	24,27	1.377.707,82
P9	5,11	1.414.295,84	9,91	1.246.093,35	24,27	1.377.707,82
P10	5,14	1.414.295,84	9,91	1.246.093,35	24,27	1.377.707,82
Total		14.468.960,90		12.502.805,34		13.795.023,24

Fuente: Elaboración propia

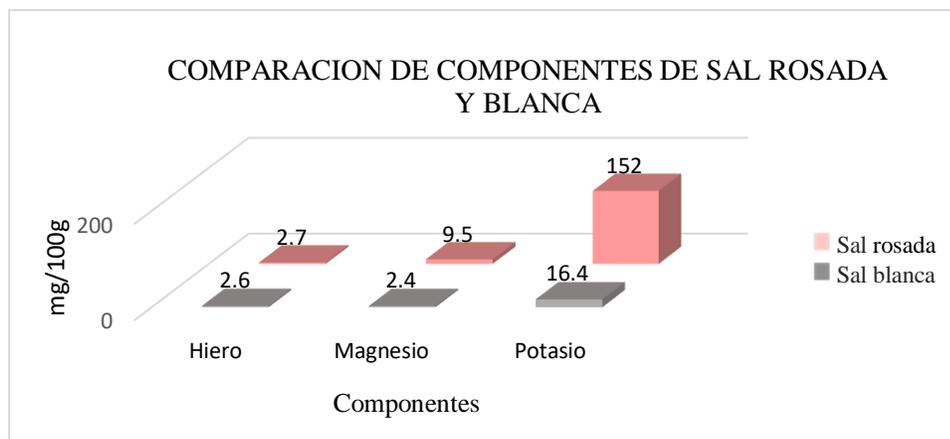
Tabla 67. Cuadro resumen de costos de subrasante mejorada

Calicatas	Suelo con 15% de grava			Suelo con 30% de grava		
	CBR (%)	Costo Total (Bs.)	% de grava	CBR (%)	Costo Total (Bs.)	% de grava
P1	8,9	237699,0825	15%	21,77	375295,25	30%
P2	8,9	237699,0825	15%	21,77	375295,25	30%
P3	8,9	237699,0825	15%	21,77	375295,25	30%
P4	8,9	237699,0825	15%	21,77	375295,25	30%
P5	9,38	237699,0825	15%	22,18	375295,25	30%
P6	9,38	237699,0825	15%	22,18	375295,25	30%
P7	9,91	237699,0825	15%	24,27	375295,25	30%
P8	9,91	237699,0825	15%	24,27	375295,25	30%
P9	9,91	237699,0825	15%	24,27	375295,25	30%
P10	9,91	237699,0825	15%	24,27	375295,25	30%
	Total	2376990,825		Total	3752952,47	

Fuente: Elaboración propia

4.1. Análisis de resultados de la composición química de la sal

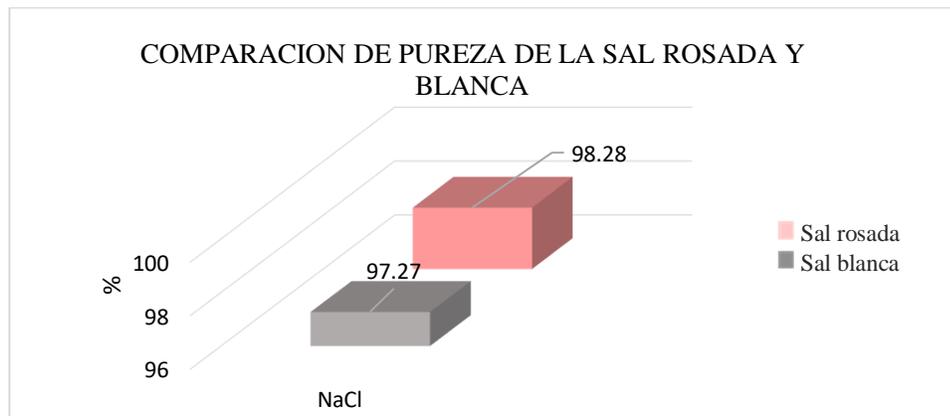
Gráfico 1. Grafica comparativa de sal blanca y rosada



Fuente: Elaboración propia

En la Imagen 46, se puede observar una gráfica comparativa entre los componentes de hierro, magnesio y potasio, donde la sal rosada presenta mayor contenido de estos elementos, sobresaliendo el potasio con un 152mg en 100g de muestra mientras que la sal blanca contiene 16,4 mg en 100g de muestra.

Gráfico 2 Grafica comparativa de pureza de la sal rosada y blanca

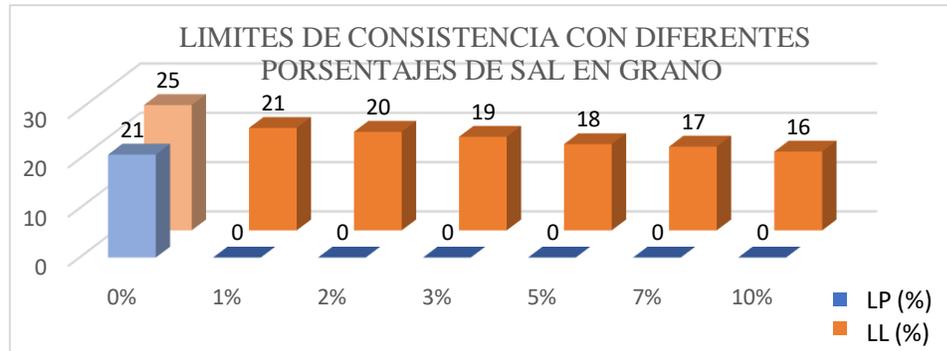


Fuente: Elaboración propia

En la Imagen 47, se observa una gráfica comparativa de pureza de la sal, donde el 98,28% de la sal rosada es cloruro de sodio, mientras que el 97,27% de la sal blanca es cloruro de sodio. 1 gramo de cloruro de sodio (cuya fórmula química es ClNa) contiene 400 mg de sodio y 600 mg de cloruro.

4.2. Análisis de resultados en los límites de consistencia incorporando sal

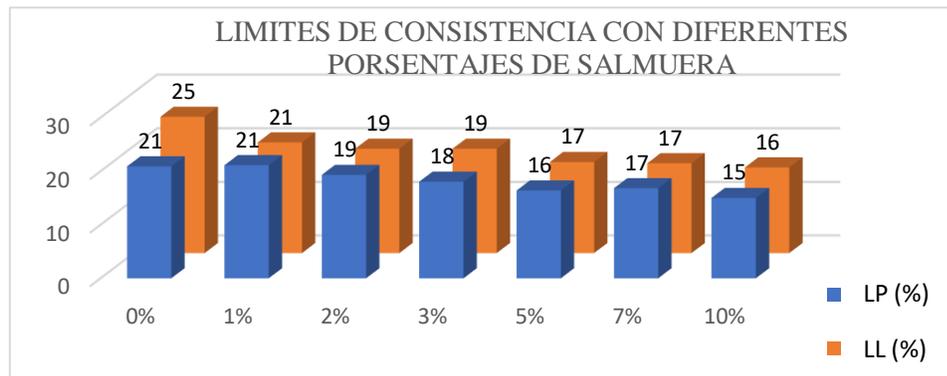
Gráfico 3. Gráfico de límites de consistencia con diferentes porcentajes de sal en grano



Fuente: Elaboración propia

En la gráfica se puede apreciar, que, con la acción de la sal granulada el límite líquido (color naranja) va en descenso en comparación con el suelo natural. Mientras que el límite plástico (color azul) disminuye de manera significativa del 21% al 0% esto es a consecuencia de que el suelo natural no tiene mucha plasticidad y al incrementar sal granulada, se hizo difícil formar los rollitos de 3mm.

Gráfico 4. Gráfico de límites de consistencia con diferentes porcentajes de salmuera



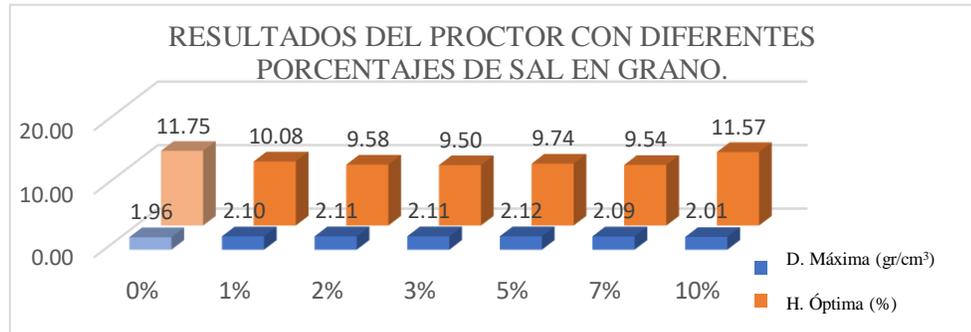
Fuente: Elaboración propia

En el gráfico se puede observar, que, al incrementar diferentes porcentajes de salmuera, el límite líquido y el límite plástico va en descenso. Para el LL con el 0% de sal se tiene un 25% de humedad y aplicando un 10% de salmuera reduce a un 16% de humedad. De

igual manera el LP con el 0% de salmuera contiene un 21% de humedad y con la adición del 10% de salmuera, desciende a un 15% su humedad.

4.4. Análisis de resultados en la compactación incorporando sal

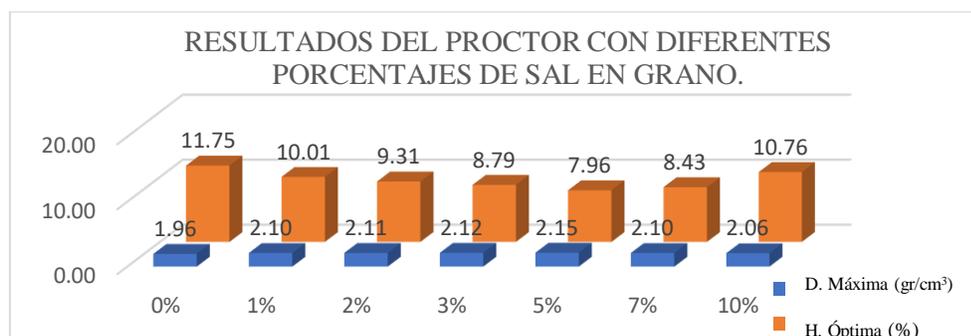
Gráfico 5. Gráficos del Proctor con diferentes porcentajes de sal en grano



Fuente: Elaboración propia

En la gráfica se puede ver la influencia que tiene diferentes porcentajes de sal granulada, se puede observar que al incrementar el 5% de sal granulada existe un aumento considerable en la densidad, del 1,96g/cm³ al 2,12 g/cm³ y una reducción de la humedad óptima del 11,75% al 9,74% y con el 7% se percibe que sigue reduciendo la humedad óptima, pero también reduce la densidad, por tanto, porcentajes mayores al 5% son desfavorables.

Gráfico 6. Gráficos del Proctor con diferentes porcentajes de salmuera



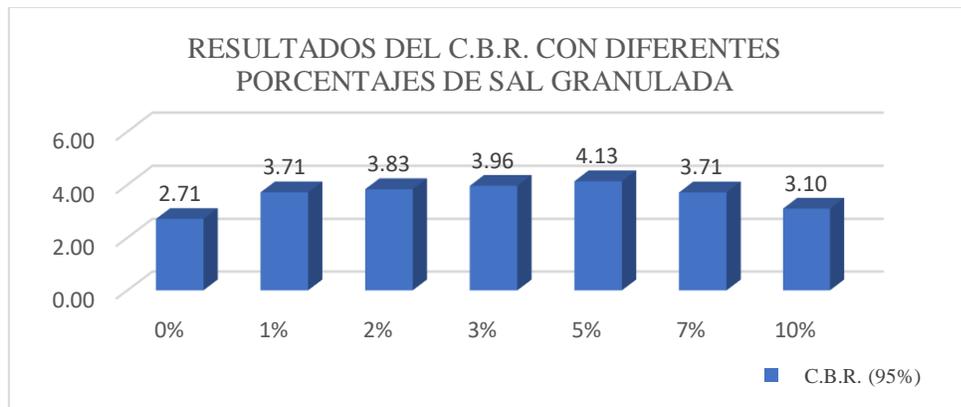
Fuente: Elaboración propia

En la imagen 51 se puede percibir un incremento de la densidad de 1,96 g/cm³ a 2,15 g/cm³ con la adición del 5% de salmuera. Y un descenso de la humedad óptima del 11,74% al 7,96%. También se observa que, al incrementar un 7% de salmuera, la humedad sigue

descendiendo, pero la densidad baja, por esta razón el porcentaje óptimo de salmuera también es el 5% además, se aprecia que al incrementar salmuera se tiene mayores resultados que aplicando sal en grano.

4.5. Análisis de resultados en el CBR incorporando sal

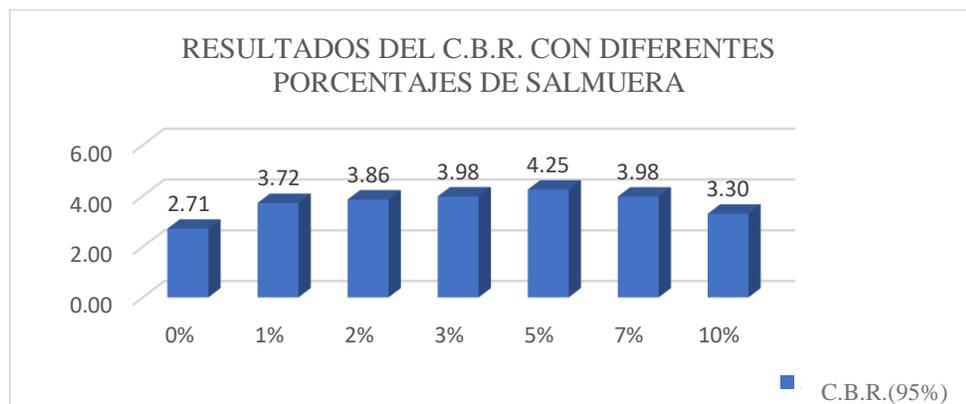
Gráfico 7. Gráficos del CBR con diferentes porcentajes de sal en grano



Fuente: Elaboración propia

Cómo se puede apreciar en la gráfica se presentan los valores del CBR al 95%, con diferentes porcentajes de sal en grano, donde se puede observar un aumento del 1,42% incrementando un 5% de sal en grano, haciendo una comparación entre el suelo natural que tiene un CBR del 2,71% y agregando sal al 5% un C.B.R. de 4,13%. También presenta un descenso si continuamos incrementando sal porcentajes mayores al 5%.

Gráfico 8. Gráficos del CBR con diferentes porcentajes de salmuera

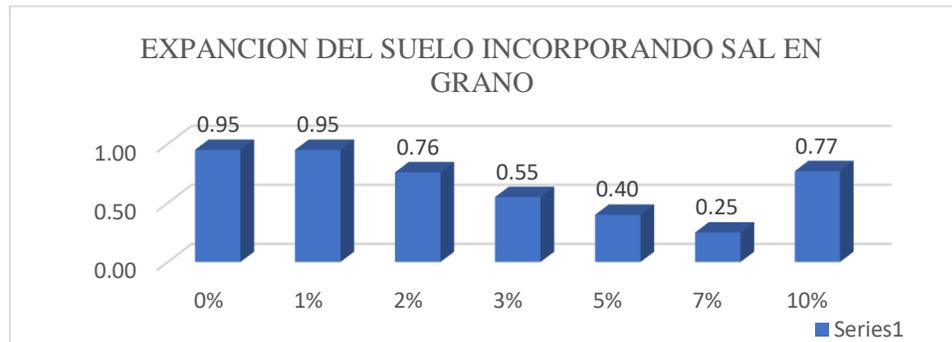


Fuente: Elaboración propia

En la gráfica de la imagen 54 se presenta el CBR. al 95% con diferentes porcentajes de salmuera, donde se percibe que el suelo natural tiene un CBR del 2,71% y con la adición del 5% de salmuera asciende al 4,25% incrementando un 1,54% en el CBR y también se percibe que porcentajes mayores al 5% de salmuera el CBR desciende, por tanto, ya no aporta en su resistencia

4.6. Análisis de la expansión, incorporando sal

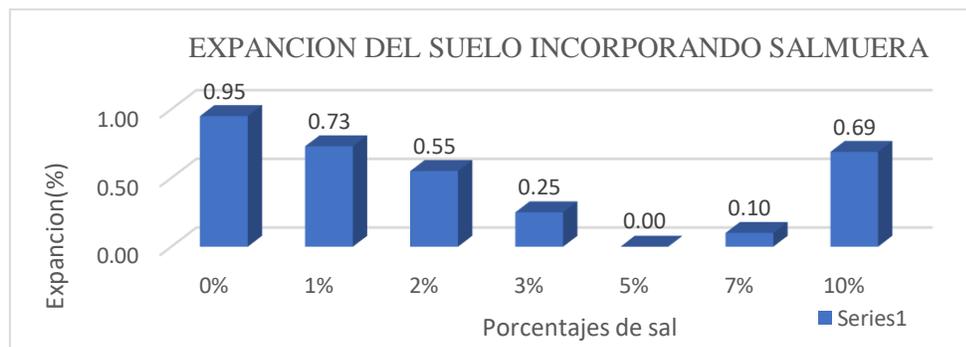
Gráfico 9. Expansión del suelo incorporando sal en grano



Fuente: Elaboración propia

En el gráfico 9 se puede observar que a medida que se va incorporando diferentes porcentajes de sal al suelo natural, la expansión va disminuyendo, el suelo natural tiene una expansión del 0,95% y con la incorporación del 5% de sal granulada reduce a 0,4% y con el 7% reduce hasta 0.25% pero la resistencia y la densidad desciende porque a medida que seguimos aumentando sal en el suelo, este se vuelve más ácido. Por tanto, descartamos porcentajes mayores al 5%.

Gráfico 10. Expansión del suelo incorporando salmuera



Fuente: Elaboración propia

En el grafico 10 se puede observar las expansiones incorporando diferentes porcentajes de salmuera, el suelo natural tiene una expansión del 0,95% y va reduciendo a medida que se va incorporando más porcentajes de sal, reduciendo en su totalidad la expansión con el 5% de salmuera.

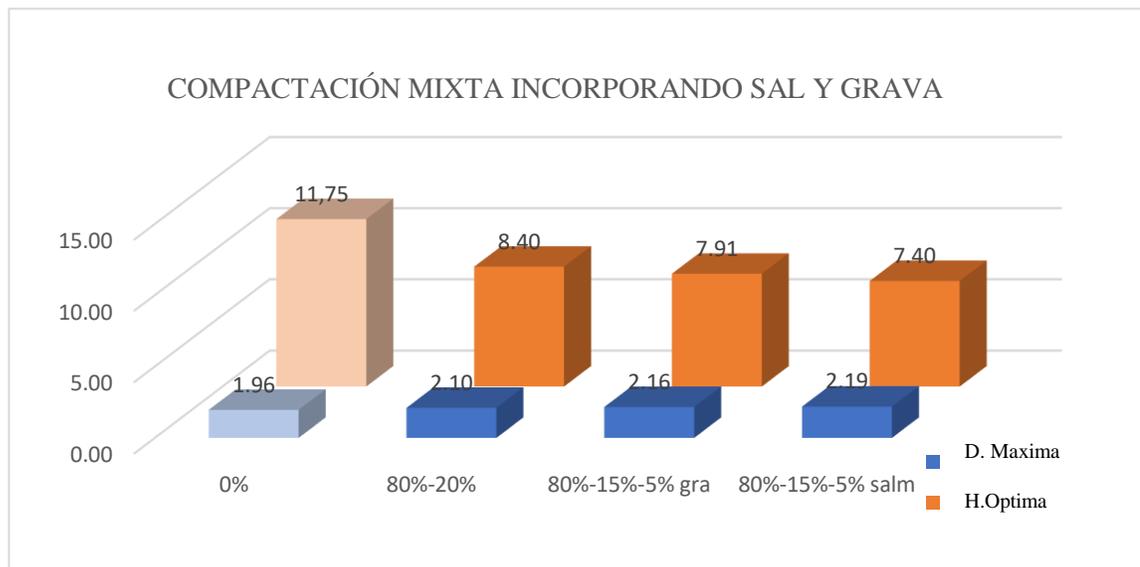
4.7. Análisis general en la estabilización Química

El criterio para escoger las dosificaciones se basó en la salinidad o saturación del suelo Donde se buscó cuánto acepta el suelo la cantidad de cloruro de sodio y se pudo apreciar que por encima del 5% de sal, el suelo A4₍₅₎ comienza a rechazarlo por desorción iónica y expulsa de la estructura compacta.

4.5. Análisis de resultados de la combinación mixta

4.5.1. Análisis de resultados en la compactación incorporando sal y grava

Gráfico 11. Gráfica de compactación incorporando sal y grava



Fuente: Elaboración propia.

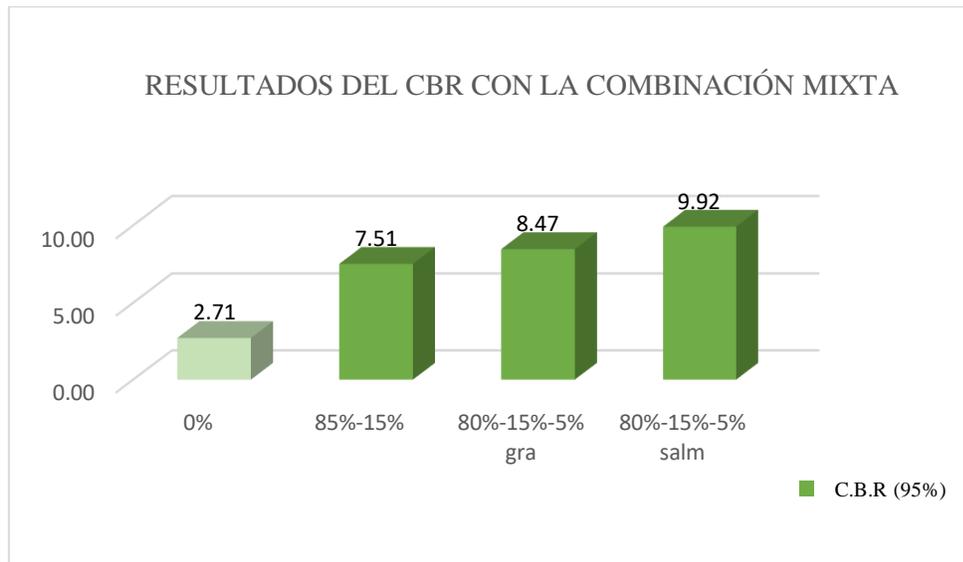
En el grafico se puede apreciar cómo incide una combinación mixta en el suelo natural, observando su densidad máxima, el suelo natural presenta 1,96 g/cm³ y una humedad óptima del 11,75% mientras que al adicionar 5% de salmuera, 15% de grava además un 80% de suelo natural se ve un incremento de su densidad al 2,19 g/cm³ y una reducción de humedad del 7,40%. Si hacemos una comparación cuando se incorpora 5% de sal

granulada, 15% grava y el 80% de suelo natural tiene una densidad mayor y una humedad mayor al suelo natural pero una densidad menor y una humedad menor si le adicionamos salmuera, al suelo natural con grava, así llegamos a la conclusión de que la salmuera es más eficiente que la sal granulada.

Para esta combinación mixta se trabajó con los porcentajes óptimos de sal (5%).

4.5.2. Análisis de resultados en la compactación incorporando sal y agregado.

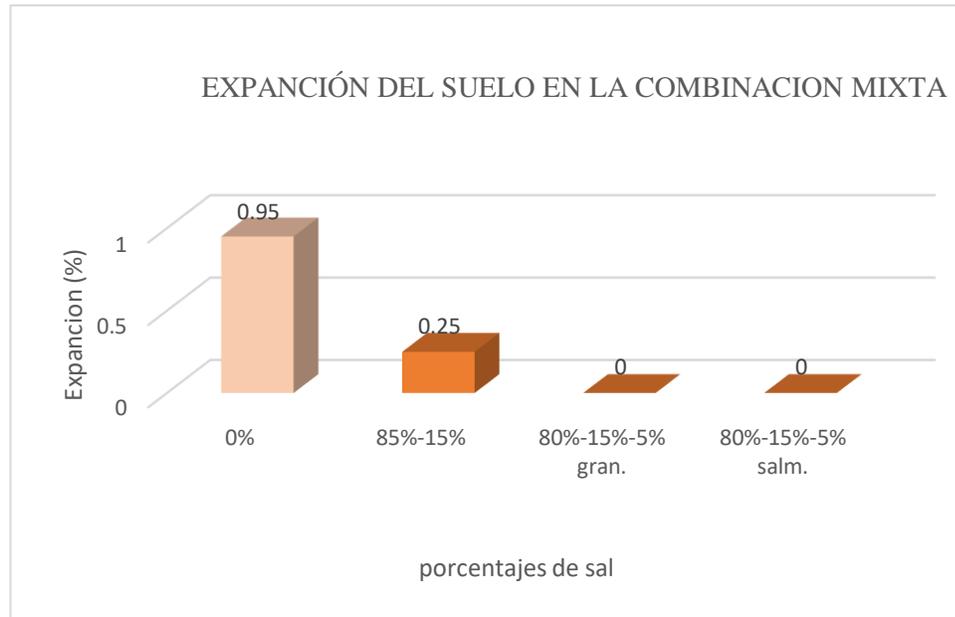
Gráfico 12. Gráfica de compactación incorporando sal y agregado de rocas



Fuente: Elaboración propia

En el gráfico se puede observar que existe un incremento considerable en el CBR. En su estado natural del suelo se tiene un CBR del 2,71% mientras que, en la combinación mixta, incorporando el 5% de salmuera, 15% de grava, además el 80% de suelo natural se tiene un CBR del 9,92% incrementando un 7,21% en el CBR. Y en la otra combinación mixta incorporando el 5% de sal en grano, 15% de grava, 80% de suelo natural se tiene un incremento del 5,76% en comparación con el suelo natural, En esta comparación se observa que aplicando salmuera y grava se tiene mayor resistencia.

Gráfico 13. Análisis de la expansión de la combinación mixta

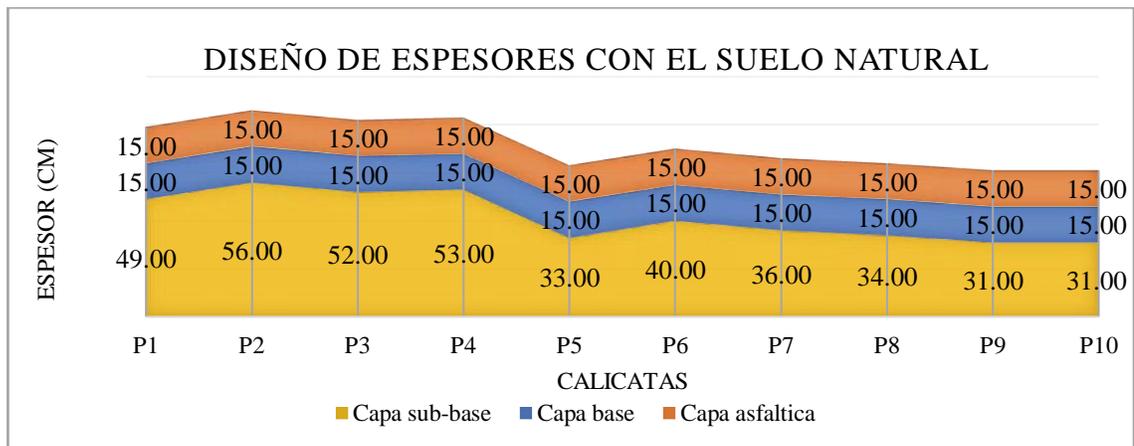


Fuente: Elaboración propia

En el gráfico se puede apreciar la reducción total de la expansión en la combinación mixta, donde se puede observar que el suelo natural tiene una expansión del 0.95% pero aplicando el 5% de sal granulada con el 15% de grava en el suelo natural como así también incorporando 5% de salmuera y grava en el suelo natural. reduce de manera total su expansión.

4.7. Análisis de resultados de espesores

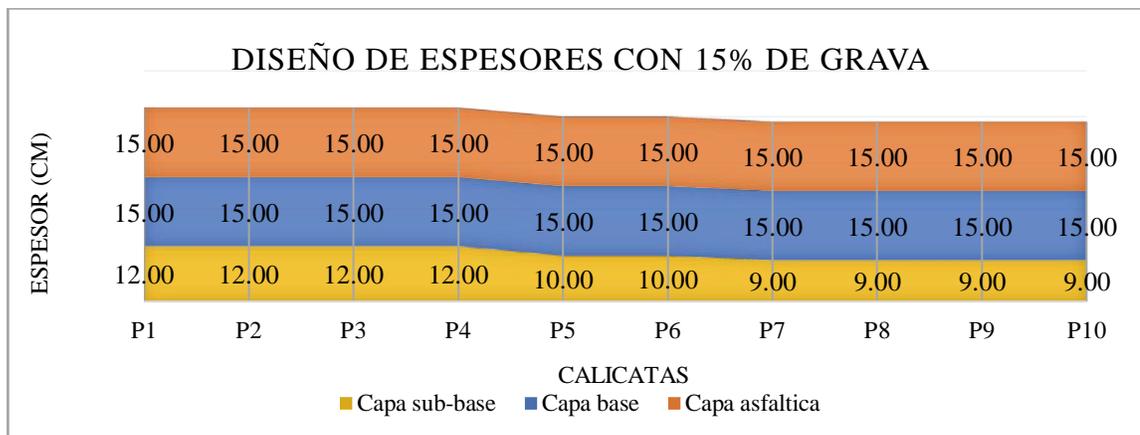
Gráfico 14. Diseño de espesores con el suelo natural



Fuente: Elaboración propia

Como se puede apreciar en el gráfico 14 tenemos espesores con la subrasante natural de cada calicata, donde la capa subbase presenta espesores grandes como máximo de 56 cm en la calicata P2 y como mínimo de 31cm en la calicata P9. Los espesores de la capa base y asfáltica son de 15cm y se mantiene constantes, debido al alto tráfico que hay en el tramo cuando la variante Canaletas – Entre Ríos se encuentra en problemas.

Gráfico 15. Diseño de espesores con el 15% de grava

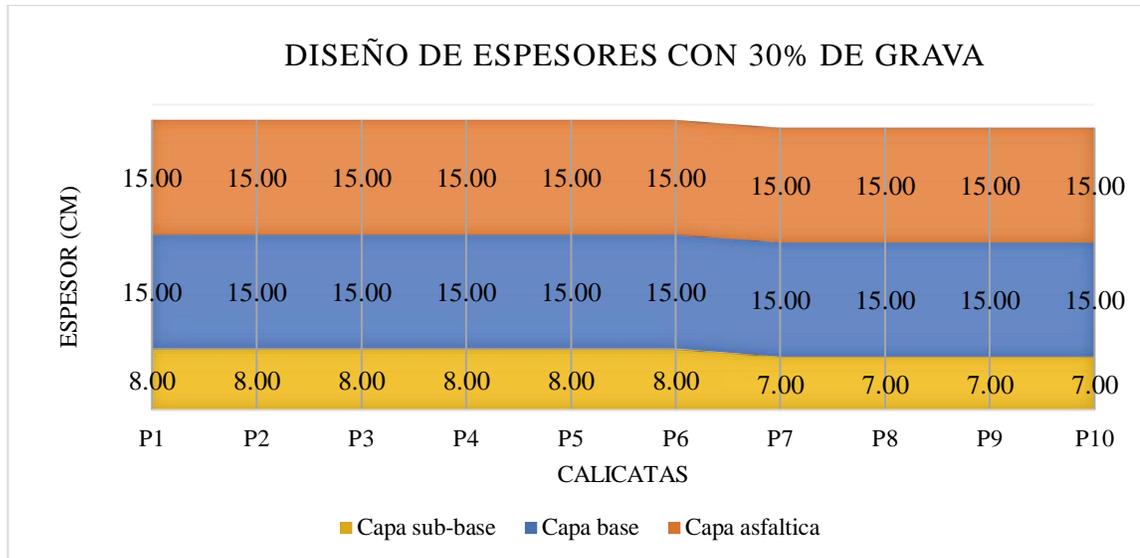


Fuente: Elaboración propia

En el gráfico 15 se puede observar los espesores del paquete estructural donde se mejoró con el 15% de grava a la subrasante; se puede apreciar una reducción de espesores en la

capa subbase en comparación de la imagen 14 y se puede apreciar un nivel más estable de espesores teniendo como máximo un espesor de 12cm y como mínimo de 9cm.

Gráfico 16. Diseño de espesores con el 30 % de grava

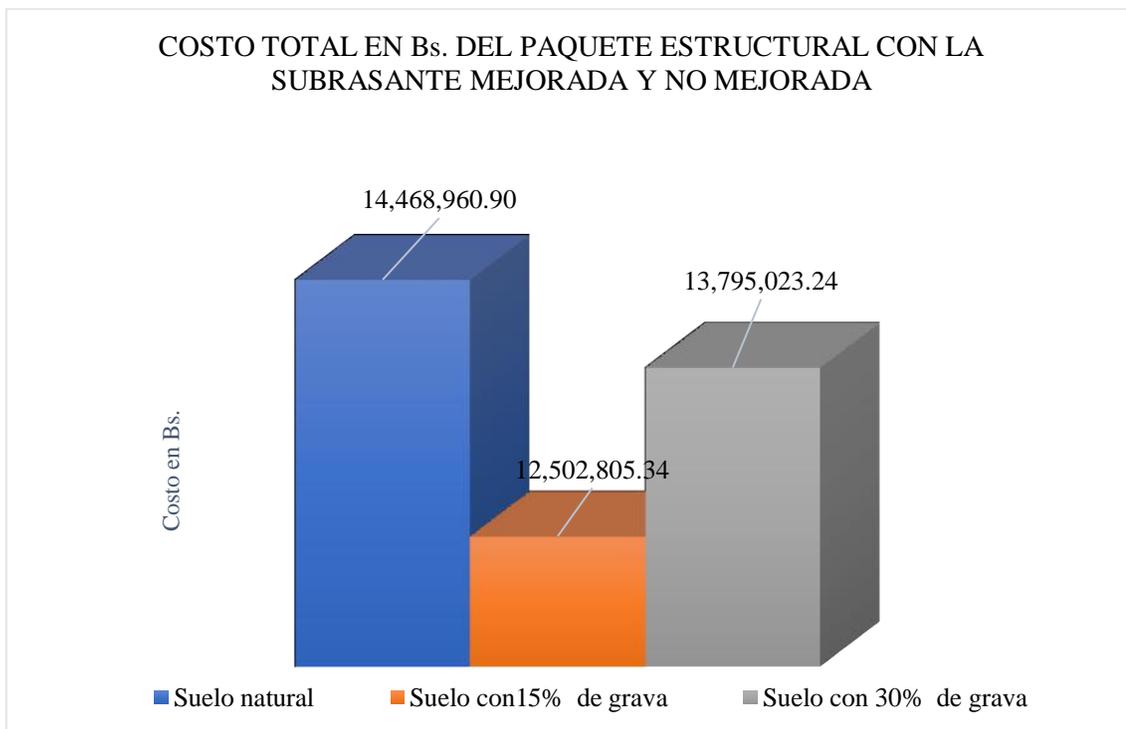


Fuente: Elaboración propia

En el gráfico 16 se puede apreciar los espesores del paquete estructural donde se mejoró con el 30% de grava a la subrasante; se puede apreciar una reducción de espesores en la capa subbase en comparación de la imagen 14 y 15 teniendo como máximo un espesor de 8cm y como mínimo de 7cm.

4.8. Análisis de resultados de costos

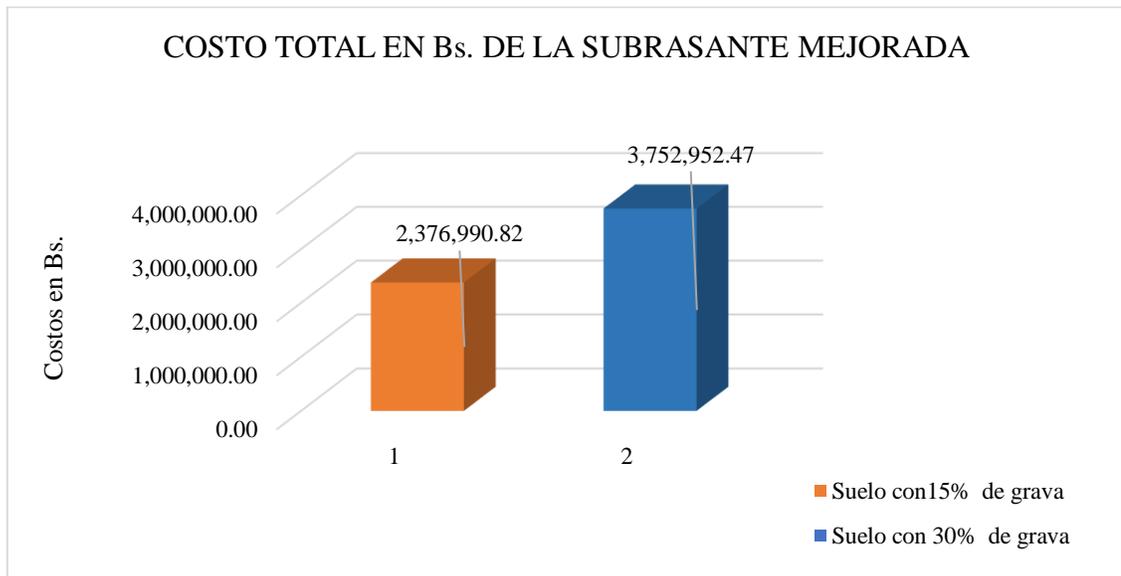
Gráfico 17. Costo del paquete estructural con subrasante mejorada y sin mejoramiento



Fuente: Elaboración propia

En el gráfico 18 se observa el costo del paquete estructural con la subrasante mejorada y sin mejoramiento, donde se puede observar un costo de 14.468.960,90 Bs en un tramo de 5 Km sin mejorar la subrasante, y también se observa una reducción de 1.966.155,56 Bs. Si mejoramos la subrasante con el 15% de grava presentando un costo de 12.502.805,34 Bs. Y mejorando a la subrasante con el 30% de grava, se tiene un costo de 13.795.023,24 Bs. Menos que el diseño del suelo natural existiendo una diferencia del 673.937,66 Bs y un incremento de 1.292.217,90 Bs comparando con la subrasante mejorada con el 15% de grava. la variación de los costos es porque depende del espesor de las diferentes capas del paquete estructural, con el mejoramiento de la subrasante se reducen espesores de la capa subbase y así mismo reducen la cantidad de los materiales empleados, mano de obra, y equipos utilizados.

Gráfico 18. Costo de la subrasante mejorada



Fuente: Elaboración propia

En el gráfico 19 se observa el costo de la subrasante mejorada en un tramo de 5 Km con 15% y 30% de grava donde se tiene un costo de 2.376.990,90 Bs incrementando un 15% de grava, y un costo de 3.752.952.47 Bs incrementando un 30% de grava. El costo incrementa debido al volumen de extracción, acarreo y colocación de grava.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

Al finalizar este trabajo, se concluyó que el cloruro de sodio influyó significativamente en aumentar la densidad máxima y disminuir la humedad óptima del suelo, siendo el 5% el porcentaje de sal óptimo incorporando al suelo natural A-4₍₅₎, no es un aditivo que aporte cambios significativos en cuanto a resistencia, dado que no cumple con los requisitos mínimos requeridos para trabajar como subrasante; al realizar una combinación mixta, incorporando 5% sal, 15% grava y el 80% de suelo natural se tiene valores aceptables, como así también al incorporar el 15%, 20%, 30% de solo grava cumpliendo lo requerido para obtener una subrasante mejorada en el camino antiguo Canaletas-Entre Ríos.

- Se realizó la caracterización de tres muestras diferentes de sal ubicadas en la zona (sal blanca, rosada y combinada), donde se decidió trabajar con la sal rosada, por tener una pureza del 98,28% del cloruro de sodio, mayor contenido de minerales como calcio, magnesio, hierro y potasio ya que este último es un metal de transición y puede formar ligantes adicionales que permiten estabilidad.
- De acuerdo a sus características; la cantera1, cantera2, cantera3 y cantera4, son rocas gabro, perteneciente a la familia plutónica de las rocas ígneas. Contienen pequeñas cantidades de ovino, anfíbol y otros minerales como bajo contenido de cuarzo cuarcita y feldespatos; variando la cantidad de minerales entre canteras. Esta coincidencia es debido a que las 4 canteras se encuentran ubicadas en una sola cordillera. De acuerdo al macizo rocoso que se tiene en la zona se escogió la cantera más cercana para el estudio siendo la cantera3, ya que muestra mayor resistencia y presenta mayor contenido de minerales presentándose de manera dispersa e incrustados.
- En los ensayos de compactación al adicionar los porcentajes de las sal, se observó que la humedad óptima disminuye y la densidad máxima seca aumenta, esto sucede porque las sales convierten al suelo en un suelo básico aglomerante favoreciendo en su compactación, pero al aumentar porcentajes mayores al 5% de sal se pudo apreciar que por encima de este valor el suelo comienza a rechazar la incorporación de sal por

desorción iónica y expulsa de la estructura compacta., esto sucede porque las sales convierten al suelo en un medio ácido, siendo un material disgregante lo cual no favorece a la compactación del suelo.

- A pesar de que el cloruro de sodio no fue eficiente al momento de incrementar la resistencia del suelo, se observa que tuvo una influencia positiva aplicando más salmuera que sal en grano en su límite de consistencia, humedad óptima, densidad, y un incremento leve en el CBR como así una reducción en su expansión, esto es por el efecto del tamaño de partículas, cuando se trabaja de forma granular la sal tarda en difundirse, y cuando aplicamos salmuera se difunde rápido además es más fácil homogenizarlo al entrar en contacto con el suelo actuando como una nanopartícula.
- Se determinó tres alternativas de costos en un tramo de 5km, la primera sin mejorar la subrasante presentando un costo de 14.468.960,90 Bs; la segunda alternativa mejorando la subrasante con el 15% de grava con un costo de 12.502.805,34 Bs mejorando a la subrasante con el 30% de grava, con un costo de 13.795.023,24 Bs. Los resultados hacen evidente que el mejoramiento de la subrasante incide en el costo del paquete estructural del pavimento por la relación material de subrasante y el espesor de las capas donde menor calidad de subrasante (mayores espesores de las capas superiores); mayor calidad de subrasante (menores espesores de las capas superiores).
- Para mantener la vía terrestre a nivel de la subrasante mejorada para un tramo de 5Km se determinó dos alternativas de costos, la primera alternativa mejorando la subrasante con el 15% de grava con un costo de 2.376.990,90 Bs, la segunda mejorando la subrasante con el 30% de grava teniendo un costo de 3.752.952.47 Bs.
- El diseño del paquete estructural del pavimento flexible se realizó aplicando la norma AASTHO 93 donde asumieron espesores mínimos de la capa base y subbase según la norma. Para el cálculo del número de ejes equivalentes se siguió la ley Boliviana N.º 441 de control de pesos y dimensiones vehiculares en la red vial.

5.2. Recomendaciones

- De acuerdo a los resultados de la compactación se puede apreciar que al incorporar sal al suelo natural funciona como retardante de pérdida de humedad, haciendo que aumente el tiempo de evaporación, se recomienda continuar el trabajo de investigación como supresor de polvo para carreteras no pavimentadas.
- Se recomienda trabajar con porcentajes mayores al 7% de cloruro de sodio para observar cómo sigue influyendo en el suelo.
- Tratar de evitar el uso de suelos con alta presencia de materia orgánica que pueden afectar los resultados de los ensayos.
- Realizar ensayos para tener un mejor resultado de la estabilización, ya que existen diferentes tipos de suelos y cada uno reacciona de diferente manera con porcentajes de sal similares.
- Para realizar el ensayo de compresión de rocas, se recomienda llevarlos a la pedrería para tener dimensiones uniformes y superficies planas para evitar resultados erróneos
- Realizar un muestreo mayor, a fin de tener una caracterización más exacta del suelo y las canteras en estudio.
- Usar guantes al momento de manipular la sal, porque al entrar en contacto con el produce una reacción química que produce calor, que si bien no es peligrosa puede causar irritación en la piel y más aún si tiene algún tipo de heridas puede ser dolorosa.
- Para conseguir resultados favorables es recomendable seguir todos los procedimientos de cálculo tal y como indican las normas para obtener respuestas buenas y mejorar el criterio de evaluación.
- Los resultados del diseño del paquete estructural son válidos para los niveles de tráfico de la variante canaletas – Entre Ríos, condiciones climáticas y características de suelos de los primeros 5km Tramo antiguo Canaletas-Entre Ríos.

