

**UNIVERSIDAD ALAS PERUANAS**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**



**TESIS**

**EFFECTOS DE LA ESTABILIZACIÓN QUÍMICA EN LA  
CONSOLIDACIÓN DEL PAVIMENTO DE SUELO  
AFIRMADO EN LA CARRETERA MACUSANI - ITUATA  
- PUNO - 2017**

PRESENTADO POR

Bach. DAVID ELISEO MAMANI QUISOCALA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:  
INGENIERO CIVIL

JULIACA -- PERÚ

2017



**UAP** | **UNIVERSIDAD  
ALAS PERUANAS**

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL

## ACTA DE TITULACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL

En Juliaca, siendo las 09:00 horas del día 19 de agosto del 2017, en el Salón de Grados de la Universidad Alas Peruanas y bajo la Presidencia del **Mg. HUGO ANSELMO CCAMA CONDORI**, se inició la Sesión Pública de Sustentación y Evaluación correspondiente para obtener el Título Profesional de Ingeniero Civil por la modalidad de **Sustentación de Tesis**.

En la que el Bachiller: **MAMANI QUISOCALA, DAVID ELISEO**

Sustentó la Tesis de Ingeniería:

*Tesis*

**“EFECTOS DE LA ESTABILIZACIÓN QUÍMICA EN LA  
CONSOLIDACIÓN DEL PAVIMENTO DE SUELO AFIRMADO EN LA  
CARRETERA MACUSANI - ITUATA - PUNO - 2017”**

Ante el jurado integrado por los señores catedráticos:

<b>Mg. HUGO ANSELMO CCAMA CONDORI</b>	<b>(Presidente)</b>
<b>Ing. ALFREDO PONCE FLORES</b>	<b>(Miembro)</b>
<b>Ing. GILMER SALAS MADERA</b>	<b>(Secretario)</b>

Sustentado el mismo, el graduando obtuvo el siguiente resultado:

*APROBADO POR UNANIMIDAD*

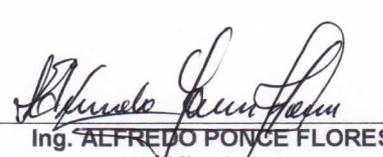
En fe de lo cual se asentó la presente Acta que firman el señor Presidente y los demás miembros del Jurado.

  
Mg. HUGO ANSELMO CCAMA CONDORI

Presidente  
CIP: 189445

  
Ing. GILMER SALAS MADERA

Secretario  
CIP: 86417

  
Ing. ALFREDO PONCE FLORES

Miembro  
CIP: 73698

## Formulario de Autorización de Registro y Publicación de Producción Académica en el Repositorio Institucional de la UAP

### A LOS AUTORES Y CREADORES DE NUESTRA UNIVERSIDAD:

En la actualidad los Repositorios Institucionales representan una estrategia de información y comunicación de las instituciones académicas, el formar parte de un Repositorio Institucional, contribuye a fomentar el nivel de competitividad, visibilidad, imagen pública y relevancia de un investigador y la posibilidad de ser consultado y difundido mundialmente, a través de su obra, mediante un archivo de formato electrónico.

Al depositar su obra en el Repositorio Institucional UAP, el autor concede a la Universidad Alas Peruanas S.A., una Licencia no exclusiva sobre su creación y el logro del propósito enunciado.

### Datos del Autor

<b>Datos del Autor</b>			
Nombre y Apellidos:	David Eliseo Mamani Quisocala		
DNI:	41107571	Teléfono:	958521000
E-Mail:	david_emq@hotmail.com		

### Datos de la Investigación

<input type="checkbox"/>	Trabajo académico
<input type="checkbox"/>	Trabajo de Investigación
<input checked="" type="checkbox"/>	Tesis
<input type="checkbox"/>	Artículo Académico
<input type="checkbox"/>	Libros y/o Capítulos de Libro
<input type="checkbox"/>	Otros, especificar en Anexo "A" adjunto. ( Ver Cuadro)
Título:	EFFECTOS DE LA ESTABILIZACIÓN QUÍMICA EN LA CONSOLIDACIÓN DEL PAVIMENTO DE SUELO AFIRMADO EN LA CARRETERA MACUSANI-ITUATA- PUNO 2017
Asesor:	ING. JUAN VARGAS RAMOS
Año:	2017
Carrera Profesional:	INGENIERIA CIVIL

### Licencias

**A. Licencia estándar:**

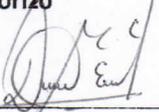
Bajo los siguientes términos, autorizo el registro y publicación en acceso abierto de mi Artículo / Trabajo de Investigación / Artículos Académicos/ Libros y/o capítulos de libro/ Tesis en el Repositorio institucional de la Universidad Alas Peruanas. Con esta autorización de depósito de mi Artículo / Trabajo de Investigación / Tesis, entre otros, otorgo a la Universidad Alas Peruanas S.A., una licencia no exclusiva para reproducir (en cualquier tipo de soporte y en más de un ejemplar, sin modificar su contenido, solo con propósitos de seguridad, respaldo y preservación), distribuir, comunicar al público, transformar (únicamente mediante su traducción a otros idiomas) y poner a disposición del público mi Trabajo de Artículo / Trabajo de Investigación / Tesis (incluido el resumen), en formato físico o digital, en cualquier medio, conocido o por conocerse, a través de los diversos servicios provistos por la Universidad, creados o por crearse, tales como el Repositorio Digital de Tesis UAP, Colección de Tesis, entre otros, en el Perú y en el extranjero, por el tiempo y veces que considere necesarias, y libre de remuneraciones.

Declaro que el presente Artículo / Trabajo de Investigación / Artículos Académicos/ Libros y/o capítulos de libro /Tesis, es una creación de mi autoría y exclusiva titularidad, o coautoría con titularidad compartida, y me encuentro facultado a conceder la presente licencia y, asimismo, garantizo que dicha tesis no infringe derechos de autor de terceras personas.

La Universidad Alas Peruanas consignará el nombre del/los autor/es de la tesis, y no le hará ninguna modificación más que la permitida en la presente licencia.

**Autorizo su publicación (marque con una X):**

- SI, autorizo que se deposite inmediatamente de acceso abierto
- SI, autorizo que se deposite y publique de acceso abierto partir de la fecha:
- 01 Año
- 02 Años
- 03 Años
- NO, Autorizo

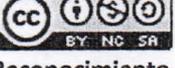
  
\_\_\_\_\_  
FIRMA

28/08/2017  
\_\_\_\_\_  
FECHA

\* Lo siguiente es OPCIONAL, pero es importante porque el licenciamiento Creative Commons fija las condiciones de uso de su tesis en la Web. Si desea obviar esta parte, vaya a la última hoja del formulario, coloque su firma y fecha para completar su autorización.

**B. Licencia Creative Commons: Otorgamiento de una licencia Creative Commons**

Si usted concede una licencia Creative Commons sobre su tesis, mantiene la titularidad de los derechos de autor de ésta y, a la vez, permite que otras personas puedan reproducirla, comunicarla al público y distribuir ejemplares de ésta, siempre y cuando reconozcan la autoría correspondiente, bajo las condiciones siguientes:

MARQUE	TIPO LICENCIA	DESCRIPCIÓN
X	 Reconocimiento CC BY	Esta licencia permite a otros distribuir, mezclar, ajustar y construir a partir de su obra, incluso con fines comerciales, siempre que le sea reconocida la autoría de la creación original. Esta es la licencia más servicial de las ofrecidas. Recomendada para una máxima difusión y utilización de los materiales sujetos a la licencia.
	 Reconocimiento- Compartirlgual CC BY-SA	Esta licencia permite a otros re-mezclar, modificar y desarrollar sobre tu obra incluso para propósitos comerciales, siempre que te atribuyan el crédito y licencien sus nuevas obras bajo idénticos términos. Cualquier obra nueva basada en la tuya, lo será bajo la misma licencia, de modo que cualquier obra derivada permitirá también su uso comercial.
	 Reconocimiento- SinObraDerivada CC BY-ND	Esta licencia permite la redistribución, comercial y no comercial, siempre y cuando la obra no se modifique y se transmita en su totalidad, reconociendo su autoría.
	 Reconocimiento- NoComercial CC BY-NC	Esta licencia permite a otros entremezclar, ajustar y construir a partir de su obra con fines no comerciales, y aunque en sus nuevas creaciones deban reconocerle su autoría y no puedan ser utilizadas de manera comercial, no tienen que estar bajo una licencia con los mismos términos.
	 Reconocimiento- NoComercial- Compartirlgual CC BY-NC-SA	Esta licencia permite a otros entremezclar, ajustar y construir a partir de su obra con fines no comerciales, siempre y cuando le reconozcan la autoría y sus nuevas creaciones estén bajo una licencia con los mismos términos.
	 Reconocimiento- NoComercial- SinObraDerivada CC BY-NC-ND	Esta licencia es la más restrictiva de las seis licencias principales, sólo permite que otros puedan descargar las obras y compartirlas con otras personas, siempre que se reconozca su autoría, pero no se pueden cambiar de ninguna manera ni se pueden utilizar comercialmente.

  
 \_\_\_\_\_  
 Firma

28/08/2017  
 \_\_\_\_\_  
 Fecha

**Datos del Autor**

Nombre y Apellidos:		DAVID ELISEO MAMANI QUISOCALA	
DNI:	41107571	Teléfono:	958521000
E-Mail:	dau.d_emg@hotmail.com		

**Datos de la Investigación**

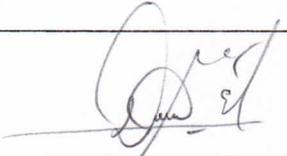
<input type="checkbox"/>	Trabajo Académico		
<input type="checkbox"/>	Trabajo de Investigación		
<input checked="" type="checkbox"/>	Tesis		
<input type="checkbox"/>	Artículo Académico		
<input type="checkbox"/>	Libros y/o Capítulos de Libro		
<input type="checkbox"/>	Otros, especificar en Anexo "A" adjunto. (Ver Cuadro)		
Título:	EFECTOS DE LA ESTABILIZACIÓN QUÍMICA EN LA CONSOLIDACIÓN DEL PAVIMENTO DE SOLO AFIRMATO EN LA CARRETERA MACUSANI - ITUATA - PUNO 2017		
Asesor:	ING. JUAN VARGAS RAMOS		
Año:	2017	Carrera Profesional:	INGENIERIA CIVIL

**Declaratoria**

Declaro que he leído este Artículo / Trabajo de Investigación / Tesis en su totalidad referenciado en este documento, he hecho la revisión y corrección de estilo del presente trabajo de tesis considerando lo señalado en la Guía y Manual de Tesis de la Universidad Alas Peruanas y del Manual de Estilo de la APA, versión en inglés.

Asumo la responsabilidad de cualquier error u omisión en el documento y soy consciente que este compromiso de fidelidad tiene connotaciones académicas y éticas.

En caso de incumplimiento de esta declaración, me someto a lo dispuesto en las normas académicas de la Universidad Alas Peruanas.

  
 \_\_\_\_\_  
 FIRMA

28/08/2017  
 \_\_\_\_\_  
 FECHA

**CUADRO: TIPOS DE DOCUMENTOS PARA INCLUIR (ANEXO A)**
**DRIVER 2.0 Actualizado 29 de Agosto 2016**

info:eu-repo/semantics/article	Artículo científico	<input type="checkbox"/>
info:eu-repo/semantics/doctoralThesis	Tesis doctorado	<input type="checkbox"/>
info:eu-repo/semantics/mastherThesis	Tesis de Maestría	<input type="checkbox"/>
info:eu-repo/semantics/bachelorThesis	Tesis de Bachiller	<input type="checkbox"/>
info:eu-repo/semantics/report	Reporte	<input type="checkbox"/>
info:eu-repo/semantics/book	Libro	<input type="checkbox"/>
info:eu-repo/semantics/monograph	Monografía	<input type="checkbox"/>
info:eu-repo/semantics/bookPart	Capítulo o parte de un libro	<input type="checkbox"/>
info:eu-repo/semantics/review	Revisión	<input type="checkbox"/>
info:eu-repo/semantics/conferenceObject	Conferencia	<input type="checkbox"/>
info:eu-repo/semantics/lecture	Presentación	<input type="checkbox"/>
info:eu-repo/semantics/patent	Patente	<input type="checkbox"/>
info:eu-repo/semantics/workingPaper	Working paper	<input type="checkbox"/>
info:eu-repo/semantics/technicalDocumentation	Documentos Técnicos	<input type="checkbox"/>
info:eu-repo/semantics/dataset	Datos	<input type="checkbox"/>
info:eu-repo/semantics/software	Sistemas Informáticos	<input type="checkbox"/>
info:eu-repo/semantics/Video	Videos	<input type="checkbox"/>
info:eu-repo/semantics/contributionToPeriodical	Contribución no académica	<input type="checkbox"/>
info:eu-repo/semantics/other	Otros	<input checked="" type="checkbox"/>

## **DEDICATORIA**

“A mi madre por su ejemplo de lucha, a mis hermanos Angélica, Inocencia, Yolanda, Lucio, Edgar y Rubén por su cariño, confianza y consejos, a mis sobrinos Ricky, Jhessica, Alice y Katty por ser mi motivación e inspiración, al hombre que me dio la vida, a pesar de haberlo perdido a muy temprana edad siempre ha estado cuidándome y guiándome desde el cielo, a los docentes, amigos por su apoyo y orientación constante.”

## **AGRADECIMIENTO**

Mi mayor gratitud a Dios por bendecirme y hacer realidad este sueño anhelado, a todos mis docentes que han influido con sus lecciones a lo largo de mi carrera universitaria, por formarme como persona de bien y prepararme profesionalmente para los retos que pone la vida.

Mi especial agradecimiento a mis amigos por el apoyo constante en el transcurso de este trabajo, a mis familiares porque ellos estuvieron en los días más difíciles de mi vida como estudiante.

## RESUMEN

En el Perú una de las grandes problemáticas para el desarrollo económico es no contar con vías de acceso hacia los poblados tanto en la zona de la sierra y selva amazónica; es por ello que se siente la necesidad de los gobernantes tanto nacional, regional como municipal para dar más énfasis en la construcción de vías de acceso, siendo una de las soluciones básicas para mejorar la calidad de vida de las personas generando desarrollo y progreso. En ese contexto es necesario plantear alternativas de las tecnologías que mejoren la estabilización de suelos como es el Aditivo Enzimático PROES que es un aditivo que al incorporarse al suelo mejora su capacidad mecánica de soporte de los suelos. El objetivo principal de este estudio fue Evaluar el efecto de la estabilización química en la consolidación del pavimento de suelo afirmado en la carretera Macusani- Ituata- Puno 2017. Metodológicamente el estudio asumió el diseño experimental, transversal implica destacar las características más importantes de la investigación es la aplicación del Aditivo PROES, para evaluar la mejora en la estabilización de suelo afirmado. De los resultados obtenidos demuestran que la incorporación del aditivo PROES, si influye considerablemente en la estabilización del suelo, así mismo la resistencia mecánica del afirmado aumenta su valor confirmándose una mejoría en los resultados de las pruebas CBR, con un aumento en los resultados de las pruebas considerablemente en el material con aditivo con respecto al material sin aditivo.

Palabras clave: Consolidación del pavimento, Estabilización Química, Suelo afirmado.

## **ABSTRACT**

In Peru, one of the major problems for economic development is not having access roads to the villages in the area of the sierra and Amazon jungle; It is for this reason that the need for national, regional and municipal governments to emphasize the construction of access roads is one of the basic solutions to improve the quality of life of people, generating development and progress. In this context, it is necessary to propose alternatives of the technologies that improve soil stabilization, such as the PROES Enzymatic Additive, which is an additive that, when incorporated into the soil, improves its mechanical capacity to support soils. The main objective of this study was to evaluate the effect of the chemical stabilization in the consolidation of the soil pavement affirmed in the road Macusani- Ituata-Puno 2017. Methodologically the study assumed the experimental design, cross-cutting implies highlighting the most important characteristics of the research Is the application of the PROES Additive, to evaluate the improvement in the established soil stabilization. From the results obtained show that the incorporation of the PROES additive, if it influences considerably the stabilization of the soil, also the mechanical strength of the affirmed increases its value confirming an improvement in the results of the CBR tests, with an increase in the results of the Tests considerably on the material with additive with respect to the material without additive.

Keywords: Pavement consolidation, Chemical Stabilization, Ground asserted

## INDICE

INTRODUCCIÓN .....	13
CAPITULO I : PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO .....	14
1.1. DESCRIPCIÓN DE LA REALIDAD PROBLEMÁTICA .....	14
1.2. DELIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN .....	15
1.2.1. Delimitación espacial .....	15
1.2.2. Delimitación temporal .....	15
1.2.3. Delimitación social/conductual.....	15
1.2.4. Delimitación conceptual.....	15
1.3. PLANTEAMIENTO PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN .....	16
1.3.1. Problema General .....	16
1.3.2. Problemas Específicos .....	16
1.4. OBJETIVO DE LA INVESTIGACIÓN .....	16
1.4.1. Objetivo General.....	16
1.4.2. Objetivos Específicos .....	16
1.5. FORMULACION HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN .....	17
1.5.1. Hipótesis General .....	17
1.5.2. Hipótesis Específico .....	17
1.6. VARIABLES DE LA INVESTIGACIÓN .....	17
1.6.1. Variable independiente.....	17
1.6.2. Variable dependiente:.....	17
1.6.3. Operacionalización de Variables .....	18
1.7. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN .....	18
1.7.1. Tipo y nivel de investigación.....	18
a). Tipo de investigación .....	18
b). Nivel de investigación .....	19
1.7.2. Diseño y método de investigación .....	19
a). Diseño de investigación .....	19
b). Metodo de investigación .....	20
1.7.3. Población y muestra de la investigación.....	21
a). Población.....	21
b).Muestra.....	21

1.7.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos .....	21
a). Técnicas .....	21
b). Instrumentos .....	22
1.8. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN .....	22
1.8.1. Justificación .....	22
1.8.2 Importancia .....	23
1.8.3. Limitaciones .....	23
CAPITULO II : MARCO TEORICO .....	24
2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN .....	24
2.1.1. ANTECEDENTES GENERALES .....	24
2.1.2. ESTUDIOS ESPECIFICOS .....	24
2.2. MARCO TEÓRICO .....	27
2.2.1. Ensayos de suelos .....	27
2.2.2. Fiabilidad .....	28
2.2.3. Ensayos de fiabilidad .....	29
2.2.4. Suelo .....	30
2.2.4.1 Mecánica de suelos .....	30
2.2.4.2 Ingeniería de suelos .....	31
2.2.5. Estabilización de Suelos .....	31
2.2.5.1 Fundamentos para la estabilización de suelos para carreteras .....	32
2.2.5.1.1 Estabilidad Volumétrica .....	33
2.2.5.1.2 Resistencia .....	33
2.2.5.1.3 Permeabilidad .....	34
2.2.5.1.4 Durabilidad .....	35
2.2.5.1.5 Compresibilidad .....	35
2.2.5.2 Tipos de estabilización .....	36
2.2.5.2.1 Estabilización mecánica .....	36
2.2.5.2.2 Estabilización física .....	37
2.2.5.2.3 Estabilización química .....	38
2.2.5.2.4 Estabilización con cal .....	38
2.2.5.2.5 Estabilización suelo-cemento .....	40

2.2.5.2.6 Estabilización con productos asfálticos.....	40
2.2.5.2.7 Estabilización con escoria de fundación.....	42
2.2.5.2.8 Estabilización con polímero.....	42
2.2.5.2.9 Estabilización con aditivo PROES.....	43
2.2.5.2.10 Ensayo CBR.....	55
2.2.5.2.11 Ensayo de Proctor Modificado.....	56
2.2.6 Características de desempeño dentro de la conservación vial.....	60
2.2.6.1 Contratos de Conservación vial por Niveles de Servicio (CCVNS).....	61
2.2.6.2 Indicadores de desempeño .....	61
2.2.6.2.1 Indicie Internacional de Rugosidad (IRI).....	61
2.2.6.2.2 Deflectometría. ....	62
2.2.6.2.3 Número Estructural.....	63
CAPITULO III : PROPUESTA TECNICA DE LA INVESTIGACION .....	68
3.1. CRITERIOS ADOPTADOS PARA LA REVISION DE LA SITUACION ACTUAL .....	68
3.1.1. Ubicación.....	68
3.1.2. Resumen de la Situación Actual.....	69
3.1.3. Análisis y Revisión de los parámetros básicos .....	69
3.1.3.1. Orografía .....	69
3.1.3.2. Clasificación de la Carretera de acuerdo a la demanda....	70
3.1.3.3. Velocidad.....	70
3.1.3.4. Ancho de Calzada .....	70
3.1.4. Suelos y pavimentos. ....	74
3.1.4.1 Resumen de la Situación Actual .....	74
3.1.4.2 Estudio del Suelo de Fundación .....	75
3.1.4.3 Descripción de los materiales de fundación .....	75
3.1.4.4 Verificación de espesores de capa granular .....	76
3.1.4.5 Evaluación Estructural .....	77

3.1.4.6 Análisis estadístico .....	78
3.1.5. Geología y Geotecnia.....	79
3.1.5.1 Resumen de la Situación Actual .....	79
3.2. IMPLEMENTACIÓN DE TECNOLOGÍA PROES A UN CAMINO	80
3.2.1. Sustento del coeficiente estructural.....	80
3.2.1.1. Sustento del coeficiente estructural de la capa estabilizada con tecnología PROES.....	80
3.2.1.2. Valor de la relación de soporte CBR.....	82
3.2.1.3. Estabilización de suelos de cantera con tecnología proes.....	83
3.2.2. Diseño estructural del pavimento .....	84
3.2.2.1. Diseño metodología para la construcción de carreteras... ..	85
3.2.2.2. Tráfico para NAASRA.....	85
3.2.2.3. De la normativa .....	86
3.2.2.4. Diseño de espesor de pavimento-método NAASRA	87
3.2.3. Estructura de pavimento.....	87
3.2.3.1 Consideraciones para la estructuración del pavimento – tecnología PROES .....	87
3.2.4. Secciones de diseño .....	89
3.2.5. Proceso constructivo de bases estabilizadas con aditivo PROES.....	90
3.2.5.1. Descripción general del proceso .....	90
3.2.5.2. Base estabilizada .....	90
3.2.5.3. Recubrimiento con Slurry Seal .....	94
CAPITULO IV :PRESENTACIÓN, ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS .....	95
4.1. VERIFICACIÓN DE LA COMPACTACIÓN.....	95
4.2. DISCUSIÓN.....	98
CONCLUSIONES .....	99
RECOMENDACIONES.....	100
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	101
Anexo 1 MATRIZ DE CONSISTENCIA.....	104
Anexo 2 ENSAYOS DE LABORATORIO.....	106

## LISTA DE TABLAS

Tabla. II.1.Permeabilidad según la textura del suelo.....	35
Tabla. II.2.Permeabilidad según la estructura del suelo.....	35
Tabla. II.3.Categoría de la subrasante según su CBR.....	56
Tabla III.1.IMDa de carretera.....	70
Tabla III.2.Ancho promedio de calzada existente.....	70
Tabla III.3.Radio exterior mínimo correspondiente a un radio interior.....	72
Tabla III.4. Resultados de la Evaluación Estructural del Corredor vial en estudio.....	79
Tabla III.5.Coeficientes de resistencia relativa de las diferentes capas de un pavimento flexible.....	81
Tabla III.6.Espesor adoptado para un SN de 0.87.....	83
Tabla III.7.Gradación Canteras para Estabilización.....	84
Tabla III.8.Características Físico Mecánicas Canteras Estabilizadas.....	84
Tabla III.9. Ejes Equivalentes del tramo Macusani – Ituata medidos desde la progresiva 0+400 hasta la progresiva 13+000.....	86
Tabla III.10.Clasificación según volumen de tránsito para carreteras en la red nacional.....	86
Tabla III.11.Espesor mínimo según el tipo de suelo de fundación sugerido por el MTC para la estabilización en carreteras de bajo volumen de tránsito.....	89
Tabla IV.1.Muestra: A-4(1). CBR al 95%, M.D.S Y O.C.H.....	95
Tabla IV.2.Muestra: Combinación A-2(4) 85% y A-7-5(9) 15%.....	96
Tabla IV.3.Muestra: Combinación A-3(0) 85% y A-7-5(9) 15%.....	97

## LISTA DE FIGURAS

Figura. I.1.Operacionalizacion de variables.....	18
Figura II.1. Esquema del Proceso de dosificación de una base con tecnología Proes.....	44
Figura II.2.Riego de Liga.....	48
Figura II.3.Colocación de slurry seal.....	48
Figura II.4.Cuenco de deflexiones.....	62
Figura III.1.Situación inicial de la vía en estudio en estudio.....	69
Figura III.2.Radios de Curvas de Volteo. Nótese las curvas Espirales.....	71
Figura III.3. Estructura del pavimento estabilizado con la tecnología PROES para el presente estudio.....	89
Figura III.4Preparación de la Sub Rasante.....	91
Figura III.5.Esparcido de cemento.....	92
Figura III.6.Compactación de la base con rodillo lizo.....	93
Figura IV.1.Muestra: A-4(1). CBR al 95%, M.D.S Y O.C.H.....	95
Figura IV.2.Combinación A-2(4) y A-7-5(9).....	96
Figura IV.3.Combinación A-3(0) Y A-7-5(9) Con 2% de Cemento y Aditivo.....	97

## INTRODUCCION

En el Perú una de las grandes problemáticas para el desarrollo económico es no contar con vías de acceso hacia los poblados tanto en la zona de la sierra y selva amazónica; es por ello que se siente la necesidad de los gobernantes tanto nacional, regional como municipal para dar más énfasis en la construcción de vías de acceso, siendo una de las soluciones básicas para mejorar la calidad de vida de las personas generando desarrollo y progreso.

El crecimiento social y económico de una población se debe principalmente a sus vías de comunicación ya que a través de ellas se realizan las relaciones comerciales, personales, de comunicación, etc., pero el gasto económico que demanda la construcción de caminos y carreteras, y su posterior mantenimiento, hace que sean proyectos inviables en poblados cuya afluencia vehicular es baja, justamente por ser pueblos en vías de desarrollo.

En respuesta a este problema, es que actualmente, gracias a la aparición de nuevas tecnologías, se puede habilitar caminos de buena transitabilidad a bajo costo por un periodo de vida determinado, en proyectos denominados servicio de gestión y conservación vial por niveles de servicio de corredores viales lo que viene a ser una buena primera solución, para fomentar el incremento del tránsito hacia estas zonas. Una de estas nuevas tecnologías es la elaboración de bases estabilizadas con algún tipo de agente aglomerante, ya sea químico o de otra índole, que comparadas al clásico sistema de construcción de carreteras con bases y sub bases, resulta optima y rentable en el caso ya mencionado.

El presente proyecto pretende determinar si es posible alcanzar un adecuado nivel de transitabilidad mediante el uso de un aditivo químico llamado PROES para la construcción de una base estabilizada, proyecto de gestión y conservación vial por niveles de servicio realizado entre las localidades de Macusani - Ituata, sirviendo de antecedente para futuros proyectos sobre este tipo de estabilización.

## CAPITULO I

### PLANTEAMIENTO METODOLOGICO

#### 1.1. DESCRIPCION DE LA REALIDAD PROBLEMÁTICA

Atarama Mondragón, Edson, en su Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Civil, señala que “El crecimiento social y económico de una población se debe principalmente a sus vías de comunicación ya que a través de ellas se realizan las relaciones comerciales, personales, de comunicación, etc., pero el gasto económico que demanda la construcción de caminos y carreteras, y su posterior mantenimiento, hace que sean proyectos inviables en poblados cuya afluencia vehicular es baja, justamente por ser pueblos en vías de desarrollo”

La carretera de Macusani - Ituata se encuentra expuesta a las continuas lluvias propias de la zona. En respuesta a este problema, es que actualmente, gracias a la aparición de nuevas tecnologías, se puede habilitar caminos con buena transitabilidad a bajo costo por un periodo de vida determinado. Una de estas nuevas tecnologías es la elaboración de bases estabilizadas con agente aglomerante, ya sea químico o de otra índole, que comparadas al clásico sistema de construcción de carreteras con bases y sub bases, resulta optima y rentable en el caso ya mencionado.

En ese contexto es necesario plantear alternativas de las tecnologías que mejoren la estabilización de suelos como es el Aditivo Enzimatico PROES que es un aditivo que al incorporarse al suelo mejora su capacidad mecánica de soporte de los suelos.

Con el propósito de abordar este fenómeno, se plantea el siguiente cuestionamiento que direcciona esta presente investigación:

¿Cuál es el efecto de la estabilización química en la consolidación del

pavimento de suelo afirmado en la carretera Macusani - Ituata - Puno 2017?

## **1.2. DELIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN**

### **1.2.1 Delimitación espacial**

Esta investigación fue realizada en Tramo: Macusani – Ituata, Región Puno, toma como sujeto de estudio la vía afirmada en proceso de construcción, en donde se ha recopilado y analizado la información referente a la estabilización de suelo afirmado, para la serviciabilidad de la vía.

### **1.2.2 Delimitación temporal**

El presente trabajo de investigación se llevará a cabo a partir de Mayo del 2017 hasta agosto del 2017, tiempo que permitirá desarrollar y mostrar los resultados de la investigación.

### **1.2.3 Delimitación social/conductual**

El objeto de estudio de la presente investigación es la vía Macusani – Ituata, Región Puno y tendrá impacto en las poblaciones adyacentes a la vía, quienes hacen uso frecuente de la vía para el traslado de sus productos, así mismo permite la interconexión con los demás ciudades cercanas al área del proyecto.

### **1.2.4 Delimitación Conceptual**

Esta investigación abarca dos conceptos fundamentales como estabilización química y consolidación del pavimento que direccionaran el presente trabajo de investigación.

### **1.3. PLANTEAMIENTO DE PROBLEMAS DE INVESTIGACION**

#### **1.3.1. Problema General**

¿Cuál es el efecto de la estabilización química en la consolidación del pavimento de suelo afirmado en la carretera Macusani - Ituata - Puno 2017?.

#### **1.3.2. Problemas Específicos**

- ¿Cuál es el efecto de la estabilización química en la resistencia mecánica del suelo afirmado en la carretera de Macusani - Ituata - Puno 2017?.
- ¿Cuál es el efecto de la estabilización química en la permeabilidad del suelo afirmado en la carretera de Macusani - Ituata - Puno 2017?

### **1.4. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACION**

#### **1.4.1. Objetivo general**

Evaluar el efecto de la estabilización química en la consolidación del pavimento de suelo afirmado en la carretera Macusani - Ituata - Puno 2017.

#### **1.4.2. Objetivos específicos**

- Determinar el efecto de la estabilización química en la resistencia mecánica del suelo afirmado en la carretera de Macusani - Ituata - Puno 2017.
- Determinar el efecto de la estabilización química en la permeabilidad del suelo afirmado en la carretera de Macusani - Ituata - Puno 2017.

## 1.5. FORMULACION DE LA HIPOTESIS DE INVESTIGACION

### 1.5.1. Hipótesis general

El efecto de la estabilización química en la consolidación del pavimento de suelo afirmado es positiva en la carretera Macusani - Ituata - Puno 2017.

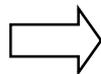
### 1.5.2. Hipótesis específico

- El efecto de la estabilización química en la resistencia mecánica del suelo afirmado es significativa en la carretera de Macusani - Ituata - Puno 2017.
- El efecto de la estabilización química en la permeabilidad del suelo afirmado es significativa en la carretera de Macusani - Ituata - Puno 2017.

## 1.6. VARIABLES DE LA INVESTIGACIÓN

### 1.6.1 Variable independiente

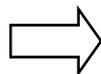
Variable independiente (X)



Estabilización química

### 1.6.2. Variable dependientes

Variable dependiente (Y)



Consolidación del pavimento

### 1.6.3 Operacionalización de Variables.

Figura. I.1.  
Operacionalización de variables

VARIABLES	DIEMNSIONES	INDICADORES
VARIABLE INDEPENDIENTE (x) Estabilización química	Aditivo Proes	Proporción de mezclado Diseño de mezcla con aditivo PROES
VARIABLE DEPENDIENTE (y) Consolidación del pavimento	Resistencia mecánica a la compresión	Capacidad portante Granulometría Ensayos CBR Ensayos proctor modificado
	permeabilidad	Capacidad portante Granulometría Ensayos CBR Ensayos proctor modificado

Fuente: elaboración propia.

## 1.7 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

### 1.7.1. Tipo y nivel de Investigación

#### a) Tipo de investigación

El presente estudio asume el enfoque cuantitativo, se recolectará los datos con instrumentos estandarizados y por el propósito de estudio es de tipo básico o fundamental está orientado a comprobar y valorar la contribución

del aditivo PROES en la estabilización de vías carrozables y por la naturaleza de estudio es experimental, debido que se trabaja con variable independiente (Aditivo Enzimático PROES) y la variable dependiente (Estabilización de Suelo Afirmado) con ensayos de laboratorio.

#### **b) Nivel de investigación**

Asimismo, de acuerdo a las características y profundidad del estudio corresponde al nivel de investigación experimental analítica por que explica los efectos de la variable independiente sobre la variable dependiente ya que lo que se pretende es aplicar los resultados a situaciones reales donde se presenten problemas similares, para validar que la incorporación del aditivo PROES, en la mejora d la estabilización de los suelos de afirmado, la investigación es experimental.

### **1.7.2. Diseños y métodos de Investigación**

#### **a) Diseño de investigación**

La presente es una investigación que asume el diseño experimental, transversal implica destacar las características más importantes de la investigación es la aplicación del Aditivo PROES, para evaluar la mejora en la estabilización de suelo afirmado, en ese contexto se asume las siguientes fases.

FASE 1. Fase preparatoria. En esta fase se plantea el plan de trabajo, en el cual se definen los objetivos y la hipótesis, como también se analiza las variables de estudio

FASE 2. Recolección de la información. En esta etapa de la investigación se realizara una recopilación de información bibliográfica y de internet para adquirir los conocimientos relacionados, con el objeto de estudio. Posteriormente se identificó la unidad de análisis, donde se realizó la toma

de muestras para el ensayo en laboratorios. Para lograr la recolección de datos se utilizará los siguientes instrumentos:

- Protocolo de toma de muestra.
- Registro de datos estadísticos.
- Recursos informáticos (Internet).
- Registro fotográfico apuntes perspectivas.
- Trabajo de campo (observación estructurada directa).
- Cuaderno de apuntes.
- Inventario de información (bibliotecas y centros de documentación).
- Planos de obra vectorizados

FASE 3. Procesamiento y análisis de la información: En esta etapa se organizara e interpretara los resultados de laboratorio. Con las variables obtenidas se procederá a cuantificar la mejora en la estabilización de suelos. Para la interpretación de datos se usara la estadística ANOVA a fin de determinar la mejora en la estabilización. Se empleará los siguientes medios de procesamiento y análisis.

- Autocad (software que se usara para vectorizar planos).
- Microsoft office Excel (software que se usara para el procesamiento de cuadros y tablas).
- Microsoft office Word. (software que se usara para la edición de textos).
- SPSS 11 (software que se usara para probar la hipótesis a través de tabulación de datos y distribución de frecuencias).

#### **b) Método de investigación**

Desarrollar un trabajo de investigación, requiere la aplicación de un conjunto de estrategias o procedimientos denominados métodos, los que nos van a permitir arribar a los resultados que se busca, en este caso demostrar la hipótesis , es así que se emplearon los siguientes métodos

generales de investigación: método inductivo observacional, método analítico y el método estadístico.

### **1.7.3. POBLACIÓN Y MUESTRA DE LA INVESTIGACIÓN**

#### **a) Población**

La unidad de observación objeto del presente estudio de investigación corresponden al Tramo: Macusani – Ituata en la región Puno en dicha vía se ha incorporado el aditivo enzimático PROES para la estabilización de suelos en afirmado de la vía.

#### **b) Muestra**

En la presente investigación para obtener las características de la población se usó el método de muestreo, el tipo de muestreo es no probabilístico (no aleatorio) de tipo intencional, el muestreo se basó exclusivamente en los sectores que se encuentran entre las progresivas del Desde la progresiva 0+00 HASTA 0+3000

### **1.7.4. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS**

#### **a) Técnicas**

Las técnicas constituyen elementos de investigación más precisos, específicos y concretos de la investigación, a través de las técnicas operacionalizamos los diversos indicadores en la práctica para la presente investigación se usaron las siguientes técnicas.

**Técnica documental o bibliográfica.** Nos ha permitido revisar la documentación de carácter teórico.

**Técnica de ensayos de laboratorio** Esta técnica ha permitido mostrar los resultados de los laboratorios bajo estándares y protocolos de ensayo normados en el reglamento.

**Técnica de la estadística.** Los datos estadísticos obtenidos de campo, fueron cuantificados, luego sometido a un tratamiento estadístico, como elemento que ofrece mayor nivel de precisión y confiabilidad cuando se trata de medir los resultados.

#### **b) Instrumentos**

Los instrumentos que se ha utilizado en la presente investigación son fichas de observación, protocolos de ensayo de CBR, PROCTOR MODIFICADO.

### **1.8. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN.**

#### **1.8.1. Justificación**

La presente tesis se desarrolla por la necesidad de aplicar de manera práctica y económica la adición de PROES en la estabilización de suelos afirmados, durante el proceso constructivo de las vías, hasta este momento las vías afirmadas presentaban deterioros en un tiempo muy corto y por ende no se podían transitar con la comodidad necesaria. En respuesta a este problema, es que actualmente, gracias a la aparición de nuevas tecnologías, se puede habilitar caminos con buena transitabilidad a bajo costo por un periodo de vida determinado. Una de estas nuevas tecnologías es la elaboración de bases estabilizadas con algún tipo de agente aglomerante, ya sea químico o de otra índole, que comparadas al clásico sistema de construcción de carreteras con bases y sub bases, resulta optima y rentable en el caso ya mencionado. En ese contexto este estudio pretende contribuir en mostrar que la adición de PROES mejora la estabilización de los suelos y esto permitirá que los proyectos nuevos se planteen bajo este enfoque, a fin de mejorar nuestra vías del país y de la región, que garanticen la serviciabilidad y que el transito sea adecuado y seguro en la vías.

### **1.8.2 Importancia**

La importancia de este estudio radica que la infraestructura vial es un agente determinante en el desarrollo social, económico y cultural de las diferentes regiones de nuestro país, es por eso que es importante considerar a nuestros pavimentos como el principal activo económico que posee la nación, en la actualidad el estado de las vías primarias y secundarias se encuentran por debajo de los niveles de competitividad requeridos por el medio, al lograr realizar la intervención en las vías nacionales se podría percibir el beneficio en la disminución de los costos de operación, adicionalmente de reactivar el desarrollo económico en regiones particulares.

### **1.8.3. Limitaciones**

La poca información existente sobre la aplicación e incorporación del Aditivo PROES en la región País es una limitante, ya que no se tiene referencias sobre estudios anteriores en nuestro medio y en el país, que permita tener una validación del aditivo PROES, así mismo para realizar este tipo de estudios se requiere la coordinación con las instituciones que tienen como cargo el mantenimiento y conservación de las vías las cuales muestran poco interés por realizar este tipo de estudios.

## **CAPITULO II**

### **MARCO TEORICO**

#### **2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACION**

##### **2.1.1. ANTECEDENTES GENERALES.**

León Fierro, Kenneth Junior (2016), en su tesis denominada “Funcionalidad del aditivo sólido rocatech 70/30 como aglomerante para una base estabilizada con la tecnología PROES en el proyecto Red Vial N° 3-Cusco”, presentado el 2016 por el tesista, indicó: “Los suelos tratados con tecnología Proes típicamente desarrollan enlaces fuertes que le otorgan cohesión al material. Estos enlaces a diferencias de los suelos tratados únicamente con cemento no frágiles, debido al tipo de aditivos que utiliza Proes. El proceso químico hace que aumente la resistencia manteniendo un comportamiento estable, flexible y dúctil de los suelos. Mientras se mantenga los enlaces cohesivos el material presentará un módulo relativamente alto en comparación con el suelo sin tratar”.

Atarama Mondragón, Edson (2015), en su tesis denominada “Evaluación de la transitabilidad para caminos de bajo tránsito estabilizados con aditivo PROES”, presentado el 2015 por el tesista, concluyó: “De la evaluación del suelo de fundación se encontró que predominan los suelos formados por arena arcillosa y arcillas inorgánicas, la clasificación predominante SUCS es SC y CL, y en AASHTO es A-2-6, con un índice de plasticidad promedio de 13%, la humedad natural que presentan los suelos se encuentra con un promedio de 16% y máximos de 51%, de los CBRs encontrados están en el rango de 5% y 30%, con un promedio de 16% al 95% de la MDS”.

Serigos Pedro, Antonio (2009), en su tesis denominada “rigidez a baja deformación de suelo de la formación pampeado y cemento portland”, presentado el 2009 por el tesista concluyó: “Los productos de las reacciones químicas entre el agua, cemento portland y los minerales de la

fracción arcillosa del suelo dependerán del tipo y de la cantidad de cada una de estas. El suelo utilizado en este trabajo es un limo de baja plasticidad de la formación pampeada proveniente de la localidad de Ranelagh, en la provincia de Buenos Aires”. El cemento utilizado fue un CPN 40 (MRS), las dosificaciones de cemento utilizadas fueron del 4,68 y 10%.

Ruano López, Denis Robin (2012), en su tesis denominada “Estabilización de suelos cohesivos por medio de arenas volcánicas y cal viva”, presentado el 2012 por el tesista concluyó: “Las características de las arenas de origen volcánico usadas en la investigación presentan cualidades positivas para la estabilización de suelos cohesivos, las minas ya se usan de forma exitosa en la construcción para diferentes áreas como fundición de concretos y la fabricación de tejas de concreto prefabricadas”.

Díaz Ariza, Jesús Alberto y Mejía Vargas Julio Cesar (2004), en su tesis denominada “Estabilización de suelos mediante el uso de un aditivo químico a base de compuestos inorgánicos”, presentado el 2004 por los tesisistas concluyeron: “Como ocurre con casi todas las estabilizaciones es necesario determinar las dosificaciones óptimas para cada tipo de suelo para su aplicación”. “Los resultados muestran que el aditivo químico no parece tener un gran efecto sobre las propiedades de plasticidad. Lo cual permite intuir una acción más de tipo cementante que de tipo químico en la estabilización de los suelos; al menos en los ensayados”.

### **2.1.2. ESTUDIOS ESPECIFICOS**

Para este trabajo de investigación se han tomado como referentes trabajos de investigación estudiados en diferentes realidades, que sirvieron como guía de trabajo para el presente estudio de tesis.

EVALUACIÓN DE LA TRANSITABILIDAD PARA CAMINOS DE BAJO TRÁNSITO ESTABILIZADOS CON ADITIVO PROES: el estudio se realizó con el objetivo si es posible alcanzar un adecuado nivel de transitabilidad mediante el uso de un aditivo químico llamado PROES. La carretera en estudio ha sido evaluada tanto funcional como estructuralmente mediante ensayos de laboratorio con base a las normas técnicas peruanas. Para la evaluación funcional se midió el Índice Internacional de Rugosidad (IRI) para determinar la rugosidad sobre la superficie de rodadura y para la evaluación estructural se midió las deflexiones sobre la base estabilizada y por medio del retrocálculo se calculó el número estructural de la base. Los resultados muestran que la superficie de rodadura califica a la carretera como un pavimento nuevo (IRI menor o igual a 4 m/Km) y respecto a la capacidad de soporte, se sobrepasa el mínimo número estructural calculado en el diseño de la carretera (SNMin 0.87).

Finalmente se demuestra que el uso de la tecnología PROES mejora la capacidad de soporte del suelo, uniformiza las características físicas y mecánicas del suelo en general y garantiza un correcto desempeño en términos de niveles de servicio. (Atarama, 2015)

DIAGNOSTICO ESTRUCTURAL DE AFIRMADO ESTABILIZADO CON CLORURO DE MAGNESIO MEDIANTE EL MODELO MATEMATICO DE HOGG Y VIGA BENKELMAN: El objetivo general de este trabajo fue determinar el módulo de elasticidad de la subrasante y de la base estabilizada de un afirmado estabilizado con cloruro de magnesio en la costa. Para esto se procesó información obtenida de ensayos no destructivos con la viga Benkelman de doble brazo y relación de 2:1 que permitió medir deformaciones elásticas sobre la base estabilizada al aplicar una carga estándar de manera fácil, práctica y económica. Con las deflexiones medidas en campo y su posterior análisis de resultados trabajados con el Modelo de Hogg se determinaron las deformaciones teóricas del suelo y el modulo elástico tanto para la subrasante y base

estabilizada. Obteniendo los módulos elásticos de la subrasante y con ello el CBR en cada punto ensayado, con esto se pudo determinar qué sectores necesitan mantenimiento y que otros necesitan mejoramiento de subrasante, además se calculó la diferencia de costo entre realizar una base estabilizada con cloruro de magnesio y otra simplemente afirmada, resultando más barato la primera opción en un período de diez años. Finalmente, se calculó los módulos elásticos de la base estabilizada en ambas fajas y se determinó gráficamente su dispersión concluyendo lo importante que es el proceso constructivo en este tipo de pavimentos. (Jiménez, 2014).

## **2.2. MARCO TEORICO.**

### **2.2.1. Ensayos de suelos.**

Los ensayos de suelos se desarrollan en los laboratorios de mecánica de suelos, a través de pruebas para determinar las características geotécnicas de un terreno, como parte de las técnicas de reconocimiento físico mecánico. Estos ensayos se ejecutan sobre las muestras previamente obtenidas en el terreno y, dependiendo del tipo de ensayo, se exigen distintas calidades de muestra.

#### **Clasificación de los ensayos.**

Para la determinación de las propiedades del suelo, los ensayos se clasifican en:

**Ensayos de identificación:** son los únicos (junto con los de compactación) que pueden realizarse sobre muestras alteradas. Pueden ser:

- Físicos: granulometría, plasticidad o peso específico de partículas.
- Químicos: Contenido en sulfatos, carbonatos o materia orgánica.

**Ensayos de estado:** humedad natural, peso específico seco o aparente. Proporcionan la situación del terreno en su estado natural. Como excepción, pueden utilizarse muestras alteradas para la obtención de la humedad natural, siempre que se protejan de pérdidas posteriores de humedad nada más proceder a su obtención.

- Ensayos de permeabilidad: en permeámetros de carga constante, de carga variable o en célula triaxial.
- Ensayos de cambio de volumen: compresibilidad edométrica, expansividad (presión de hinchamiento, hinchamiento libre, índice de Lambe) y colapso.

**Ensayos de resistencia:** compresión simple, corte directo (CD, CU, UU), compresión triaxial (CD, CU, UU). (22).

- Otros ensayos, sobre todo en rocas:
- Compactación proctor.
- Índice de dispersividad Pin-Hole (sobre muestra alternada).

**Ensayos sobre rocas:** compresión simple (con o sin galgas extensométricas), carga puntual (Point Load), corte directo de diaclasas, índice de durabilidad Slake, compresión triaxial.

- Ensayos químicos sobre agua freática: obtención de pH, de contenido en sales solubles o de elementos contaminantes.

### 2.2.2. Fiabilidad.

En ingeniería existe el interés de observar el comportamiento de los productos fabricados. Sobre todo interesa estudiar las causas de que los productos fallen, los efectos que producen los fallos y los aspectos de diseño, fabricación y mantenimiento que pueden afectar a los fallos.

Uno de los objetivos en la industria es diseñar y mantener un producto de forma tal que dure el mayor tiempo posible.

La fiabilidad es la capacidad de los productos o servicios de comportarse en la forma requerida bajo condiciones establecidas y durante un tiempo establecido, dicho de otro modo, es la permanencia de la calidad de los productos o servicios a lo largo del tiempo.

La diferencia entre calidad y fiabilidad es que la calidad garantiza que el producto sale de fábrica en buenas condiciones. La fiabilidad garantiza que el producto permanezca en buenas condiciones durante un periodo razonable de tiempo; pero evidentemente, la calidad de un producto contribuye a la fiabilidad del mismo.

Por tanto, la calidad carece de la dependencia temporal de la fiabilidad. Y esta dependencia temporal introduce una incertidumbre en la definición de fiabilidad, es decir, saber si un producto funcionará a lo largo de un periodo de tiempo es una cuestión de probabilidad.

En definición formal la fiabilidad es la probabilidad de que un producto se comporte adecuadamente durante un tiempo establecido.

Por tanto, es necesario el uso de la probabilidad y la estadística en el estudio de la fiabilidad. Este estudio se va basar en la observación del patrón de los tiempos de fallo de los productos (tiempos de vida).

### **2.2.3. Ensayos de fiabilidad.**

Para obtener el grado de fiabilidad de una muestra determinada de suelo, necesitamos realizar ensayos de la estimación de la incertidumbre, esto se basa principalmente en un parámetro que caracteriza la variabilidad de los resultados de ensayos de laboratorio y de cualquier medición. Se

identifican parámetros que influyen en los resultados, y se demuestran los errores significativos y el grado de confiabilidad que este ensayo pueda tener en el proceso del análisis en el laboratorio de mecánica de suelos, una vez que se cuantifique los errores que se presentan durante el desarrollo de un ensayo de laboratorio, esta cuantificación de la incertidumbre de los resultados de ensayos de mecánica de suelos permite identificar y minimizar los errores con la finalidad de contribuir a la confiabilidad de los resultados y mejora la evaluación del ensayo se suelo realizado.

#### **2.2.4. Suelo.**

El suelo, desde el punto de vista de la ingeniería es un agregado natural no cementado de granos minerales y materia orgánica en descomposición, con líquido y gas en los espacios vacíos entre las partículas que lo contribuyen. El ingeniero, compara al suelo como un material de construcción que tienen una importante influencia en el diseño y construcción de una obra de ingeniería. El suelo al igual que otros materiales posee propiedades ingenieriles, que están gobernadas por el tamaño de sus partículas y la forma en que estas interaccionan entre sí. Los suelos por lo general, son materiales heterogéneos y anisotrópicos, por lo que no están compuestos de un mismo material en toda su masa, además son materiales no conservativos, es decir que la masa de suelo al deformarse no recupera su forma original.

##### **2.2.4.1 Mecánica de suelos.**

La mecánica de suelos, estudia el comportamiento y las propiedades físicas del suelo cuando fuerzas y agentes externos actúan en la masa de suelo. Esta rama de la geotecnia considera la estructura del suelo, la forma de las partículas que lo constituyen y las fases que éste presenta, concentrándose en las propiedades ingenieriles.

#### **2.2.4.2 Ingeniería de suelos.**

Ingeniería de suelos, es la aplicación de los principios de la mecánica de suelos a problemas prácticos, donde la experiencia y la teoría se complementan. Es una ciencia, que combina los conocimientos de la ingeniería geotécnica y la ingeniería geológica al estudio del comportamiento y la clasificación de los elementos encontrados en la corteza terrestre, como ser: suelo, roca y agua subterránea.

#### **2.2.5. Estabilización de Suelos.**

Si un suelo tiene buena capacidad de soporte, resistente a los esfuerzos de corte, y si su comportamiento estructural no cambia significativamente frente a variaciones de humedad, se dice que es un suelo estable. Sin embargo cuando se presenta un suelo que no reúne las características necesarias para trabajar directamente con él, se tendrá cuatro posibilidades:

- Utilizar el material como de bajo aporte.
- Sustituir el material.
- Modificar sus propiedades (estabilizar).
- Combinación de suelos.

La estabilización de suelos se define como el mejoramiento de las propiedades físicas de un suelo a través de procedimientos mecánicos e incorporación de productos químicos, naturales o sintéticos. Tales estabilizadores, por lo general se realizan en los suelos de subrasante inadecuado o pobre, en este caso son conocidas como estabilización suelo cemento, suelo cal, suelo asfalto y otros productos diversos. En cambio cuando se estabiliza una sub base granular o base granular, para obtener un material de mejor calidad se denomina como subbase o base granular tratada (con cemento o con cal o con asfalto, etc.).

Estabilizar los suelos consiste en dotar a los mismos, de capacidad de soporte y permanencia de propiedades en el tiempo. Las formas son variadas y van desde la agregación de otro tipo de suelo, a la integración de uno o más agentes estabilizantes. Cualquiera sea la forma de estabilizar el suelo, se continúa de un proceso de compactación.

Se define la estabilización como un proceso intercediendo la reducción de sus susceptibilidades al dominio del agua y a las condiciones del tránsito, modificando notablemente las características del mismo, generando un incremento en su capacidad de soporte y estabilidad a largo plazo, nos referimos a su durabilidad. Para suelos arcillosos (A-4(1), A-4(0) Y A-7-5(9)), de características plásticas que se inclinan a sufrir deformaciones volumétricas a consecuencia de cambios de humedad y con baja plasticidad de soporte el objetivo será una disminución en su índice de plasticidad, ya que un IP demasiado elevado significará un demasiada expansión y opuesta contracción, a la vez una baja capacidad para soportar cargas.

#### **2.2.5.1 Fundamentos para la estabilización de suelos para carreteras.**

Las carreteras de Tercera Clase, según el MTC (2013), son aquellas con IMDA menores a 400 veh/día, con calzada de dos carriles de 3,00 m de ancho como mínimo, aun excepcionalmente pueden tener hasta 2,50m; Estas carreteras pueden funcionar con soluciones denominadas básicas o económicas, consistentes en la aplicación de estabilizadores de suelos, emulsionantes asfálticas y/o micro pavimentos; o en afirmado, en la superficie de rodadura.

La estabilización se fundamenta en el mejoramiento de las propiedades del suelo, como son la estabilidad volumétrica,

resistencia, permeabilidad, compresibilidad y durabilidad siendo estas las más relevantes al momento de realizar algún tipo de estabilización. Al elegir algún tipo de producto para mejorar las características del suelo los estudios se concentran en verificar si mejora alguna de éstas propiedades.

#### **2.2.5.1.1 Estabilidad Volumétrica.**

La expansión y contracción de varios suelos, causados por los constantes cambios de humedad, se pueden manifestar en forma repentina o acompañando a las variaciones estacionales o con la actividad del ingeniero.

Para el desarrollo de esta propiedad nos basaremos en los tipos de suelos arcillosos; los cuales tienen la capacidad de expansión o de retracción dependiendo de su contenido de humedad. En un suelo de estas características el objetivo primordial es cambiar esa masa de arcilla expansiva a una masa completamente rígida o en una masa granulada, pero con una capacidad de expansión mínima; esto es juntar las partículas que la conforman, de manera que puedan resistir las presiones internas que provocan la expansión y/o hinchamiento. Esto más que todo se logra con la aplicación de procesos químicos o térmicos. Para arcillas ubicadas en la superficie los procesos químicos son efectivos; los procesos térmicos se han aplicado a arcillas más profundas.

#### **2.2.5.1.2 Resistencia.**

La estabilización mecánica es fundamental para mejorar esta propiedad (compactación), para lograr una mayor resistencia se necesita aplicar algunas formas de estabilización, estas son:

- a) Compactación (mediante amasado, vibración o impactos)
- b) Vibro-flotación
- c) Precarga
- d) Drenaje (para reducir la cantidad y/o presión de agua en los poros de los suelos)
- e) Estabilización mecánica con mezclas y/o combinación de otros suelos
- f) Estabilización química con cemento, cal u otros aditivos.

Con poca resistencia ocurre comúnmente en suelos orgánicos, ya que la presencia de material orgánico no permite una adecuada estabilización de estos suelos.

#### **2.2.5.1.3 Permeabilidad.**

En los diferentes tipos de suelos la permeabilidad es la capacidad de transferir agua (u otra sustancia); es permeable cuando éste deja pasar a través de él una cantidad considerable de fluido, y es impermeable si la cantidad de fluido es nulo. El suelo se puede definir como permeable pues presenta poros; en este caso son los espacios vacíos que le permiten absorber el agua; a su vez estos espacios vacíos están interconectados de tal forma que dispone de caminos por los que el agua puede pasar sin ningún impedimento. Si no ocurre esto, es decir, la cantidad de espacios vacíos es mínima, entonces el suelo será impermeable.

Muchas veces la permeabilidad se ve perjudicada por las propiedades y estructura del suelo, donde éstas serán dependientes del número y tamaño de los poros del suelo.

Según la textura, mientras el suelo sea más fino (textura más fina) más lenta será su permeabilidad

Tabla. II.1.

Permeabilidad según la textura del suelo

Suelo	Textura	Permeabilidad
Suelos arcillosos	fina	De muy lenta a muy rápida
Suelos limosos	Modernamente fina	
	Modernamente gruesa	
Suelos arenosos	Gruesa	

Fuente: Ministerio de Transportes y Comunicaciones.

La permeabilidad se podrá modificar si se modifica la estructura, como lo indica la siguiente tabla:

Tabla. II.2.

Permeabilidad según la estructura del suelo

Tipo de estructura		Permeabilidad
Laminar	Gran traslapo	De muy lenta a muy rápida
	Ligero traslapo	
En bloque		
prismática		
Granular		

Fuente: Ministerio de Transportes y Comunicaciones.

**2.2.5.1.4 Durabilidad.**

La resistencia al intemperismo es lo deseable para obtener suelos estabilizados, los principales problemas de durabilidad están relacionados a los suelos cercanos a la superficie de rodamiento; y para mejorarlas se necesita de la inserción de químicos, dependiendo del tipo de suelo.

**2.2.5.1.5 Compresibilidad.**

Es el grado en que la masa de suelo disminuye su volumen bajo el efecto de una carga. Esta propiedad afecta a otras como la

permeabilidad; también altera la magnitud y el sentido de las fuerzas interpartículas; modificando la resistencia del suelo al esfuerzo cortante o pudiendo provocar deslizamientos. Si se habla de los suelos de textura gruesa (gravas y arenas); la compresibilidad será mínima, pues sus partículas están en contacto. Nos centraremos en los suelos de grano fino, las arcillas y limos; si se comprime una masa húmeda de estos suelos, se produce una reducción en su volumen, pues gran parte de la humedad y el aire presentes se eliminarán; la compresibilidad llega al máximo mientras mayor cantidad de materia orgánica esté presente.

Estos problemas pueden afectar a los suelos naturales como a los estabilizados, si bien en estos últimos los peores comportamientos suelen ser consecuencia de diseños inadecuados, tales como una mala elección del agente estabilizador o un serio error en uso.

#### **2.2.5.2 Tipos de estabilización.**

La estabilización de suelos consiste en dotar a los mismos, de resistencia mecánica y permanencia de tales propiedades en el tiempo. En la actualidad se emplean los siguientes métodos:

- Estabilización mecánica (compactación).
- Estabilización física
- Estabilización química (cemento, cal, asfalto, otros productos).

##### **2.2.5.2.1 Estabilización mecánica.**

Con esta técnica se pretende mejorar propiedades de los suelos ejerciendo una acción mecánica de corta duración de forma repetitiva sobre una masa de suelo parcialmente saturado, sin cambiar la forma, estructura y composición básica del mismo. Se utilizan equipos

compactadores, donde el objetivo principal es lograr incrementar la resistencia al corte reduciendo el volumen de vacíos presentes en el suelo. Al compactar el suelo se obtiene:

- Mayor densidad, por lo que tendremos una mejor distribución de fuerzas que actúan sobre el suelo.
- Mayor estabilidad, pues al no compactar un suelo se tendrán asentamientos desiguales por lo tanto inestabilidad de la estructura.
- Disminución de la contracción del suelo, al existir espacios vacíos, provocando en suelos arcillosos la contracción y dilatación del suelo y por último ocasionará una disminución de los asentamientos.

#### **2.2.5.2.2 Estabilización física.**

Entre los métodos de estabilización física de suelos más aplicados en carreteras son:

- a) Combinación o mezcla de suelos: se considera combinación o mezcla de suelos cuando adicionamos material de préstamo, pero esta agregación y mezcla no hace que sea estable como para ser pavimento de una carretera, ya que para hacer posible esto debe tener cohesión con las partículas y estas al estar con las diferentes sollicitaciones de cargas, no deben separarse e incluso salirse del camino. La combinación adecuada de los suelos, en la mayoría de los casos da como resultado un material estable, de obtener una combinación adecuada se procede a conformar y compactar de acuerdo a densidad y espesor requerido.
- b) Sustitución de suelos: se da principalmente cuando el suelo de la capa de subrasante existente no cumple con las características

necesarias para su buen funcionamiento, debido a su baja capacidad de soporte, materiales inadecuados o contaminados y con muy poco aporte para el pavimento.

Por lo que se procede al cambio por una material que cumpla las características necesarias para un buen funcionamiento acorde a las diferentes solicitaciones de cargas que recibirá la estructura, las características deben están contemplados dentro del manual de carreteras vigente. Los espesores de suelos recomendados para la estabilización por sustitución de suelos son entre:

$$3% < \text{CBR} < 6\%$$

#### **2.2.5.2.3 Estabilización química.**

La estabilización química de suelos se refiere principalmente a la adición de agentes estabilizantes químicos específicos, el cual se debe mezclar íntima y homogéneamente con el suelo a tratar y curar de acuerdo a especificaciones técnicas propias del producto. Con esta tecnología de estabilización se busca generar una reacción química del suelo con el estabilizante para lograr la modificación de las características y propiedades del suelo; y así darle mayor capacidad de respuesta a los requerimientos de carga dinámica a los que estará sometido, ya sea en la etapa de construcción y/o de servicio.

#### **2.2.5.2.4 Estabilización con cal.**

Se da con la mezcla de suelo, cal y agua, se genera la estabilidad cuando la cal viva reacciona químicamente con el agua. Al hidratarse la cal genera reacciones con las partículas arcillosas y esto evoluciona permanentemente en una fuerte matriz cementante.

La ventaja de estabilizar suelos con cal, es que aumenta la plasticidad, así como también el LL como el LP, y también considerablemente su IP.

También se genera una compactación óptima gracias al aumento de su humedad, densificando al suelo de su elevada humedad natural, donde no permitirían la construcción de la capa de rodadura sobre ellos.

La National Lime Association resumen las propiedades que se obtienen después de una estabilización o mejoramiento con cal, en lo siguiente:

- Reducción del índice de plasticidad, debido a una reducción del límite líquido y a un incremento del límite plástico.
- Reducción considerable del ligante natural del suelo por aglomeración de partículas.
- Obtención de un material más trabajable y fiable como producto de la reducción del contenido de agua en los suelos (rotura fácil de grumos).
- La cal ayuda a secar los suelos húmedos lo que acelera su compactación.
- Reducción importante del potencial de contracción y del potencial de hinchamiento.
- Incremento de la resistencia a la compresión simple de la mezcla posterior al tiempo de curado alcanzando en algunos casos hasta un 40% de incremento.
- Incremento de la capacidad portante del suelo (CBR).
- Incremento de la resistencia a la tracción del suelo.
- Formación de barreras impermeables que impiden la penetración de aguas de lluvia o al ascenso capilar de aguas subterráneas.

#### **2.2.5.2.5 Estabilización suelo-cemento**

Se obtiene por la combinación de un suelo separado con aditivo sólido (cemento), teniendo como principal adición el agua, procediendo a una compactación y curado adecuado. Solo así, esta combinación para una base estabilizada se convierte en otro endurecido, mejorando su resistencia altamente.

Al realizar los ensayos de Proctor modificado, determinamos el óptimo contenido de agua, así mismo para la compactación de suelos. Estas propiedades dependen de:

- Tipo y cantidad de suelo, cemento y agua
- Ejecución
- Edad de la mezcla compactada y tipo de curado.

Mientras más cemento y tiempo de preparación tenga la mezcla, aumenta su resistencia, el IP disminuye antes de agregarse el cemento e iniciarse el fraguado, su LL cambia ligeramente y su densidad máxima y húmeda cambia ligeramente.

#### **2.2.5.2.6 Estabilización con productos asfálticos**

La mezcla de un suelo con un producto asfáltico puede tener como finalidad:

- Un aumento de su estabilidad por las características aglomerantes del ligante que envuelve las partículas del suelo.
- Una impermeabilización del suelo, haciéndolo menos sensible a los cambios de humedad y por tanto más estable en condiciones adversas.

La dosificación necesaria de ligante es función principalmente de la granulometría (superficie específica) del suelo. Los suelos más adecuados son los granulares con pocos finos, de reducida plasticidad, que presentan menos del 20% que pasa la malla N°200,  $LL < 30$  e  $IP < 10$ .

El material asfáltico usualmente empleado son las emulsiones asfálticas y los asfaltos fluidificados de viscosidad media. La mezcla se hace con frecuencia in situ, y la elección del ligante asfáltico dependerá de la granulometría del suelo, de su contenido de humedad y de las condiciones climáticas. La granulometría puede ser abierta, cerrada con finos o cerrada sin finos, pero una mayor superficie específica exigirá un ligante de curado y rotura más lentos, para permitir una mezcla más adecuada. En zonas con temperaturas elevadas, también deberán usarse productos de curado y rotura más lentos, éstos podrán ser más viscosos.

En el caso de las estabilizaciones con emulsiones asfálticas se emplea un emulsificante, tal como un agente químico utilizado como emulsificante y definido como tenso activo o surfactante aniónico o catiónico, que determinará la clasificación de las emulsiones como aniónicas, catiónicas o no iónicas. Se tienen emulsiones de fraguado lento, medio y rápido, de acuerdo al porcentaje de cemento asfáltico que se emplea. Una emulsión asfáltica es una dispersión de asfalto en agua en forma de pequeñas partículas de diámetro de entre 3 y 9 micras. Este tipo de aglutinantes<sup>12</sup> puede usarse casi con cualquier tipo de material aunque por economía se recomienda que se emplee en suelos gruesos o en materiales triturados que no presenten un alto índice de plasticidad; puede usarse también con las arcillas pero solo le procura impermeabilidad; además, para el caso de suelos plásticos, con otros productos se logra mayor eficiencia y economías.

#### **2.2.5.2.7 Estabilización con escoria de fundación**

Hoy en día las escorias de acería o de otros hornos de fundición se emplean en muchas partes del mundo, en la fabricación del cemento, como agregados en la fabricación de hormigón, como material de base y sub-base en los pavimentos, en la estabilización de subrasantes, en la carpeta asfáltica formando parte del ligante bituminoso<sup>10</sup>; en la agricultura también se ha encontrado aplicación, así como en el tratamiento de aguas residuales. Al emplearse este subproducto en construcción de infraestructura vial se evita explotar nuevas canteras, manteniendo el paisaje de la zona; como no requiere procesar los agregados se reduce el consumo de energía y combustibles, y se reducen las emisiones de CO<sub>2</sub> al ambiente.

En los suelos estabilizados con escoria y cal el porcentaje estimado en peso de cal se encuentra en 1.5 y 3% y de escoria entre 35% - 45% en volumen. La utilización de grados con tamaño máximo limitado al de las arenas facilita los trabajos de mantenimiento sin desgastar prematuramente las cuchillas de motoniveladoras ni formar estrías sobre la calzada. Además tamaño de agregados mayores a 1 cm al ser despedidos por la acción del tránsito pueden provocar daños a los vehículos así como a las personas.

#### **2.2.5.2.8 Estabilización con polímero**

La palabra polímero se usa para una gran variedad de productos ofrecidos a la industria de construcción de carreteras. Algunos productos de “polímeros” tienen la misma fórmula que los jabones en polvo. Algunos simplemente lubrican el suelo para ayudar a lograr la máxima densidad cuando se compacta el suelo tratado. Ellos no tienen propiedades vinculantes del todo. Muchos de estos polímeros requieren gran contenido de arcilla y cuentan con una capa a ser

tratada que tiene arcilla para proporcionar las propiedades vinculantes requeridas para una base de carreteras exitosa. Estabilización de suelos y control de polvo es una forma única de polímero entrelazados de estireno acrílico, basada en agua, económicamente efectiva, amigable al ambiente. Los polímeros se caracterizan por tener una resistencia mecánica eficiente, los polímeros se distinguen de los demás materiales son sus propiedades mecánicas.

Con polímeros se logra mejorar la estabilización ya que aumenta su resistencia y capacidad de carga, esto se debe porque cada partícula es cubierta con el polímero, luego se entrelaza por la formula única de polímeros entrelazados al ser compactados formando una masa semi-rígida, flexible, resistente al agua y con capacidad de carga.

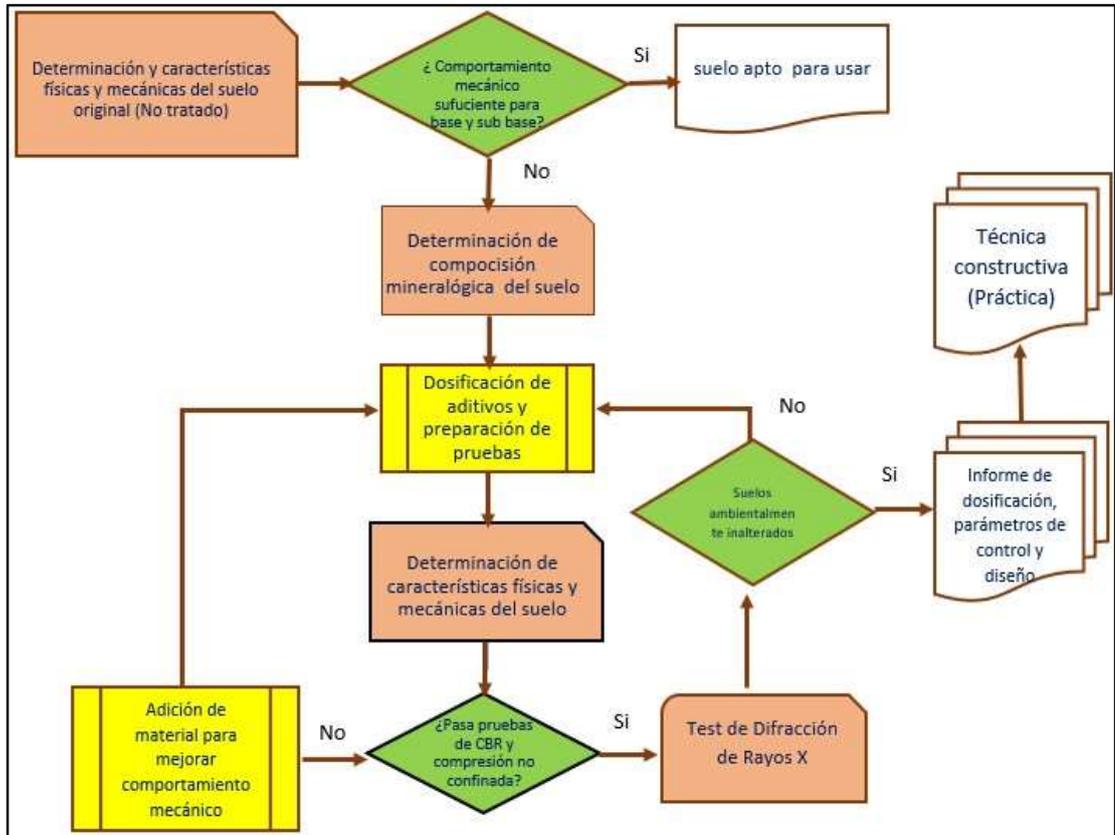
#### **2.2.5.2.9 Estabilización con aditivo PROES**

Este procedimiento se refiere a la construcción de bases tratadas químicamente usando el Aditivo Líquido Proes100 y la Tecnología PROES©, ubicadas sobre la subrasante o mejoramiento de suelos y destinadas a formar parte de la estructura de un pavimento indicado en proyecto de ingeniería.

La estabilización con Tecnología PROES©, consiste en el mejoramiento estructural de las propiedades del suelo natural. Luego del análisis de suelos e informe de dosificación, la estabilización se realiza agregando al suelo las dosis estudiada de un aditivo sólido y un aditivo líquido PROES100© diluido en el agua de amasado, logrando una mezcla homogénea, y compactando a lo menos a un 95% de la D.M.C.S. El espesor de la base y la dosificación de los aditivos quedan definido por el diseño de ingeniería y especificado en la oferta de PROES©.

Figura II.1.

Esquema del Proceso de dosificación de una base con tecnología Proes



Fuente: proestech Perú®

### A. Especificaciones técnicas

En general todos los suelos pueden ser estabilizados químicamente con la tecnología Proes, lo que se necesita hacer, es un estudio de dosificación, determinando previamente las características físicas, composición mineralógica, PH15 y comportamiento mecánico del material sin tratar. Posteriormente se estudia una dosificación que depende de los índices iniciales y de la estructura que se desea obtener (ejemplo CBR final). La empresa distribidora del producto en el Perú Proestech Perú R a menudo caracteriza a los distintos tipos de suelos genéricos que se pueden encontrar en el país de la siguiente manera:

**Arenas (finas, medias y gruesas):**

Pasante por malla N°200: varía entre 0,25% – 10% Índice de plasticidad:

La estabilización para este tipo de suelo considera mezclar el suelo natural con un porcentaje de arcilla que varía entre el 10% y el 20% dependiendo de la plasticidad de este último, de modo que el pasante por malla N°200 de la mezcla de suelo sea superior a 12% y el I.P. mínimo 5%.

Aditivo líquido: entre 0,23 y 0,30 lt/m<sup>3</sup> de suelo compacto.

Aditivo sólido: entre 45 y 80 kg/m<sup>3</sup> de suelo compacto

**Arcillas:**

Pasante por malla N°200: superior a 50% Índice de plasticidad: superiores a 10%.

La estabilización para este tipo de suelo en algunos casos puede considerar mezclar el suelo natural con un porcentaje de material granular de tamaño máximo 2" que varía entre 20% y 30%. La mezcla de los materiales debe cumplir  $2\% < I.P. < 20\%$ .

Aditivo líquido: entre 0,23 y 0,30 lt/m<sup>3</sup> de suelo compacto.

Aditivo sólido: entre 40 y 70 kg/m<sup>3</sup> de suelo compacto.

**Limos:**

Pasante por malla N°200: superior a 50% Índice de plasticidad: inferiores a 10%

La estabilización para este tipo de suelo debe considerar mezclar el suelo natural con un porcentaje de material granular de tamaño máximo 2" que varía entre 25% y 40% dependiendo del CBR del suelo natural. La mezcla de los materiales debe cumplir  $2\% < I.P. < 20\%$

Aditivo líquido: entre 0,24 y 0,30 lt/m<sup>3</sup> de suelo compacto.

Aditivo sólido: entre 40 y 70 kg/m<sup>3</sup> de suelo compacto

**Maicillos:**

Tamaño máximo: variable

Pasante por malla N°200: inferiores a 50% Índice de plasticidad: varía entre 1% y 15%

La estabilización para este tipo de suelo solamente en algunos casos puede considerar mezclar el suelo natural con un porcentaje de material granular de tamaño máximo 2" que varía entre 15% y 25%.

Aditivo líquido: entre 0,25 y 0,30 lt/m<sup>3</sup> de suelo compacto.

Aditivo sólido: entre 50 y 65 kg/m<sup>3</sup> de suelo compacto

**Bases estabilizadas:**

Tamaño máximo: malla 2"

Pasante por malla N°200: entre 3% - 12% Índice de plasticidad: sup. 1%

Aditivo líquido: entre 0,22 y 0,30 lt/m<sup>3</sup> de suelo compacto.

Aditivo sólido: entre 45 y 65 kg/m<sup>3</sup> de suelo compacto

**Bases granulares:**

Tamaño máximo: malla 2"

Pasante por malla N°200: entre 3% - 6% Índice de plasticidad: N.P.

Aditivo líquido: entre 0,22 y 0,30 lt/m<sup>3</sup> de suelo compacto.

Aditivo sólido: entre 45 y 65 kg/m<sup>3</sup> de suelo compacto

La estabilización para este tipo de suelo considera mezclar el suelo natural con un porcentaje de arcilla que varía entre el 10% y el 20% dependiendo de la plasticidad de este último, de modo que el pasante por malla N°200 de la mezcla de suelo sea superior a 12% y el I.P. mínimo 3%.

Todos los porcentajes de suelos a mezclar, así como las cantidades de aditivos líquido y sólido, deberán ser ratificados en el estudio de dosificación por algún laboratorio de mecánica de suelos, al momento de determinar el sector donde se aplicará la Tecnología Proes. A continuación se muestra un algoritmo del proceso que se utiliza para estabilizar con tecnología PROES.

### **B. Limitaciones meteorológicas**

Para realizar faenas de estabilización con tecnología PROES es necesario que la temperatura ambiente sea superior a 10°C por al menos 4 horas del día durante el primer mes de curado.

La condición de temperatura anterior debe cumplirse para evitar el fenómeno de “latencia”, que es cuando la temperatura es menor a 8 °C, la reacción química se paraliza hasta que la temperatura supere los 10 ° C.

Se debe suspender la estabilización química cuando las condiciones climáticas predominantes en esa temporada se estimen como lluviosas y frías (temperaturas que no superan los 10°C y precipitaciones frecuentes).

### **C. Carpeta de rodado**

El sector a estabilizar puede ser transitado durante y después de la estabilización, a excepción de encontrarnos en una situación climatológica de exceso de humedad. Sin embargo, la base estabilizada con tecnología PROES está diseñada primordialmente para aumentar capacidad estructural al pavimento y no como carpeta de rodado permanente, ya que la acción abrasiva del tráfico la desgasta. Para proteger la base estabilizada PROES y aumentar la vida útil, requiere sellar la base con algún tratamiento asfáltico u otro que determine el proyecto.

La base PROES es una base ligada, impermeable, altamente cohesiva, flexible y con resistencia a la compresión en el rango de 30 kg/cm<sup>2</sup> a los 21 días de iniciada la reacción (Módulo Elástico > 500 MPa). Estas características permiten que la carpeta de rodado sea diseñada exclusivamente para resolver el tema de la abrasión y no para agregar capacidad estructural al pavimento.

Dependiendo del tráfico, clima, estándar requerido y otras condiciones de operatividad, se pueden usar carpetas de rodado desde una imprimación asfáltica reforzada con emulsiones, un slurry seal (Figura II.2) o una mezcla de asfalto en caliente de espesor hasta 4 cm, que será determinado por diseño Figura II.3).

Figura II.2.  
Riego de Liga



Fuente: elaboración propia

Figura II.3.  
Colocación de slurry seal



Fuente: elaboración propia

Las especificaciones de materiales y métodos de aplicación es el estándar de cada carpeta de rodado, con la sola excepción del proceso de imprimación que para el caso particular de esta tecnología corresponde a un “riego de liga” y para él se deberá utilizar emulsiones asfálticas de quiebre lento del tipo CSS-1h diluidas 1:3 en agua, en una tasa de 0,8 a 1,0 lt/m<sup>2</sup> (diluido). La tasa de residuo asfáltico estará entre 0,17 y 0,22 lt/m<sup>2</sup>. Para el caso de una imprimación reforzada, posterior al riego de liga especificado en párrafo anterior, se realiza un segundo riego de CSS-1h diluido en agua (1:1) a una tasa de 0,8 lt/m<sup>2</sup> a 1,0 lt/m<sup>2</sup> (de la solución), más esparcido de arena inmediatamente después del segundo riego de liga. Se entrega posteriormente al tránsito.

#### **D. Materiales.**

El suelo a estabilizar químicamente corresponderá al suelo existente en la rasante actual del camino o un material mezclado o preparado para este propósito, que debe contener partículas arcillosas (IP>0) y que en términos generales tiene su mejor desempeño en suelos con las siguientes características:

- Tamaño Máximo: 2”
- Pasante Malla # 4 > 40%
- Pasante Malla # 200 > 12%

La dosificación de los aditivos sólido y líquido utilizados en la estabilización, así como los espesores, serán definidos en el proyecto de ingeniería, una vez conocidas las características específicas del material a estabilizar. Si el suelo natural disponible no cumple con las características descritas, el diseño de ingeniería y la dosificación que complementa la oferta PROES© propondrá una combinación de dosificación y adición de materiales para lograr los resultados esperados.

## **E. Equipos Necesarios.**

Los equipos mínimos requeridos son:

- Motoniveladora (escarificado y acordonado, pre-mezclado suelo con aditivo sólido, mezclado de suelo con aditivo sólido y aditivo líquido, perfilado final).
- Camiones Cisterna o Aljibe (aplicación aditivo líquido y humectación de la base). Cantidad de camiones depende de distancia de transporte y volumen de agua.
- Rodillo Liso Vibratorio y/o Rodillo Pata de Cabra (compactación). (25) Opcionalmente, se puede utilizar:
- Camión esparcidor de aditivo sólido (esparcir aditivo sólido).
- Recicladora o Pullver-Mixer con Camión Cisterna (aplicación aditivo líquido y mezclado de los aditivos sólido y líquido con el material).
- Retroexcavadora o Cargador frontal (Manipulación del aditivo sólido, transportado en el formato de maxi sacos)
- Camión  $\frac{3}{4}$  con estanques plástico y presión por bomba.

Los Rendimientos promedios están en el rango de 300-400 m<sup>3</sup> por jornada de 8 horas. En el caso de utilizar recicladora se puede en el rango 900 a 1.500 m<sup>3</sup> por jornada.

## **F. Procedimiento de Trabajo.**

Este ítem quedará definido en el proyecto de ingeniería. La generalidad es que con motoniveladora se escarifique y/o ruta la superficie original de camino y que será aprovechada para la base. Este material se acordona y se procede a compactar la subrasante. Antes de colocar el material de base y después de haber dado término al movimiento de tierras, la subrasante debe ser perfilada a las cotas y pendientes indicadas en los planos del proyecto (Foto

1). La sobre excavación en que se incurra se absorberá con el material natural extraído de la excavación o con el material de base. Posteriormente se procederá a compactar el sello, según lo establezca el proyecto.

### **G. Aplicación de Aditivos y Mezclado.**

Terminada la preparación de la subrasante a satisfacción de la I.T.O., se realiza la estabilización química del suelo. Esta etapa está acompañada por personal técnico calificado de PROES©. Con el equipo adecuado, como motoniveladora, camión esparcidor y/o pullver mixer y camión cisterna, se procede a adicionar a un volumen establecido de material el Aditivo Sólido (Foto 3), que puede ser suministrado en bolsas o a granel, en la dosis especificada y se mezcla el suelo (con humedad natural) con el aditivo sólido y se extiende (Foto 4). Esta adición del aditivo sólido se puede realizar antes, siendo independiente la adición del aditivo líquido diluido en el agua de amasado.

Posteriormente a la adición del aditivo sólido, en un camión cisterna o estanque, se diluye el Aditivo Líquido PROES© (\*) en un volumen máximo determinado por el diferencial entre la humedad óptima y la humedad natural del suelo (se debe contar con equipo para medir humedad natural del material, ya sea con Densímetro o Speedy), más el agua estimada por pérdidas por evaporación en la manipulación y tiempo de trabajo. El riego del suelo, su revoltura y extensión con motoniveladora se realizan simultáneamente. Es recomendable en caso de condiciones climáticas inestable, diluir el aditivo líquido en menos cantidad de agua, para asegurar el 100% de aplicación del aditivo líquido. Si falta agua, se adiciona después.

El mezclado de los aditivos debe ser homogéneo en toda la superficie, respetando el espesor de diseño y ejecutado en un tiempo

tal, que permita lograr la compactación, para la cual se dispone de máximo 5,0 horas desde la adición del aditivo líquido PROES©, dadas por la reacción de endurecimiento de la mezcla.

#### **H. Compactación.**

El equipo adecuado para la compactación es el rodillo liso vibratorio (Foto 8) o rodillo pata de cabra (estática o dinámica). La cantidad de equipo será dada por el rendimiento del ítem anterior y el rendimiento de los equipos de compactación. No deberá compactarse espesores sueltos superiores a 25 cm, siendo necesario hacer bases compactadas por capas cuando el espesor de diseño (compacto) sea superior. En casos de espesores reducidos (menor a 15 cm) hay que prestar especial cuidado en evitar la sobre compactación.

La compactación deberá ser igual o superior al 95% de la D.M.C.S.

#### **I. Cuidado de la Estabilización.**

Durante los cuatro días siguientes a la estabilización se debe cuidar que el suelo tratado no varíe su humedad (es decir que la base se mantenga húmeda), de tal forma que si se produce evaporación superficial del agua, deberá regarse. Una opción de control de la evaporación es colocar un riego de liga con emulsión lenta diluida en agua, lo que puede realizarse 24 horas después de haber terminado las faenas de estabilización. No es necesario esperar los cuatro días para hacer la imprimación.

Para casos especiales como pérdida acelerada o exceso de humedad, reperfilado, curvas pronunciadas o bajas temperaturas se debe consultar las Especificaciones que maneja el Supervisor PROES©.

#### **J. Partidas del Presupuesto y Bases de Medición.**

La partida incluye la provisión y suministro de todos los materiales y

aditivos, equipos y mano de obra necesarios para la confección, colocación, compactación, terminación y mantención de bases estabilizadas químicamente con Tecnología PROES®.

Se medirá por metro cúbico (m<sup>3</sup>) de base estabilizada de capacidad de soporte mayor a CBR o Resistencia a Compresión especificado en el proyecto de ingeniería (por ejemplo Resistencia a la Compresión mayor a 2,8 MPa), de acuerdo a las dimensiones teóricas de ancho, espesor y largo requeridos por el Proyecto y aprobados por la I.T.O.

#### **K. Control de Calidad.**

Si bien la función del Supervisor no es realizar controles de calidad, ya que esta función corresponde a los Laboratorios de Autocontrol y/o Inspección. Técnica, el Supervisor podrá solicitar la realización de los siguientes controles previo, durante, para recepción y posterior a la ejecución de las Obras:

##### **Previo al inicio de la estabilización.**

Antes del inicio de las faenas de estabilización química, el Supervisor de Proes deberá solicitar al Laboratorio de Autocontrol y/o Inspección Técnica los análisis de los materiales a estabilizar. Estos análisis deberían realizarse cada vez que visiblemente el material a estabilizar cambie. Se deberá individualizar el sector de donde se toma la muestra de suelo e indicar a qué tramo representa. Los ensayos mínimos requeridos son:

- Granulometría
- Límites de Atterberg
- Proctor Modificado
- Capacidad de Soporte CBR (de modo ocasional si en las especificaciones de proyecto se indica).
- Ocasionalmente se podrá solicitar ensayo de Límites de Atterberg

y de Difracción de Rayos X a material bajo mala # 200.

### **Durante el proceso de estabilización.**

Durante el proceso de estabilización deberán realizarse ensayos de capacidad de soporte CBR y Estabilidad Marshall. Se recomienda que la cantidad mínima de ensayos a realizar sea uno cada 3.000 m<sup>2</sup> de superficie estabilizada. Se deberá individualizar el sector de donde se toma la muestra de suelo. La muestra de suelo a ensayar deberá ser tomada una vez que el aditivo sólido haya sido incorporado y homogéneamente revuelto con el suelo a estabilizar (esto debería ser cuando el suelo ha sido revuelto y extendido y está listo para recibir el aditivo líquido) y el aditivo líquido será incorporado en Laboratorio. Los ensayos mínimos requeridos son:

- Control de Compactación
- Capacidad de Soporte CBR. (Expansión)
- Estabilidad Marshall.

### **Nuevas dosificaciones.**

Durante la ejecución de grandes obras, se recomienda estar continuamente haciendo nuevos estudios de dosificación, con objeto de lograr dosificaciones más eficientes, considerando los materiales locales, subrasante y el aditivo sólido disponible. Lo anterior en el marco de estabilizaciones que cumplan con las estructuras especificadas en el proyecto. (25)

### **Para recepción de la estabilización.**

Inmediatamente terminada la compactación de las bases estabilizadas, para recepcionarlas, se deberán realizar controles de la compactación alcanzada por las mismas. Los sectores donde se realiza el control de densidades deben individualizarse y se recomienda que la cantidad mínima de ensayos a realizar sea uno

cada 400 m<sup>2</sup> de superficie estabilizada.

Finalizado el proceso de estabilización.

Después de 7 días de estabilizado el suelo, el Supervisor podrá solicitar al Laboratorio de Autocontrol y/o Inspección ensayos con penetrómetro dinámico de cono portátil (PDCCP). Se recomienda que la cantidad mínima de ensayos a realizar sea uno cada 700 m<sup>2</sup> de superficie estabilizada.

Adicionalmente, pasado 21 días de la estabilización, el Supervisor deberá informar al Administrador del Proyecto Proes, para que éste programe control de las bases estabilizadas por medio de deflectometría de impacto (LWD o FWD). Estos ensayos deben ser realizados también por el laboratorio de la obra. (25)

#### **2.2.5.2.10 Ensayo CBR**

El ensayo CBR (California Bearing Ratio) suele emplearse en carreteras y aeropuertos para la caracterización mecánica de los suelos por ser un ensayo sencillo para ser realizado in situ o en laboratorio. Es, posiblemente, el ensayo más utilizado en todo el mundo para estimar la capacidad de soporte de una explanada, factor básico para el dimensionamiento de los firmes. El ensayo CBR es un ensayo de penetración o punzonamiento y además se mide el hinchamiento del suelo al sumergirlo durante 4 días en agua. En Perú se sigue la norma técnica NTP 339.145. Se compacta una muestra de suelo, con la humedad y energía de compactación deseada, en un molde cilíndrico de 152,4 mm de diámetro interior y 177,8 mm de altura, provisto con un collar supletorio y una base perforada. Esta muestra se sumerge en agua durante 4 días con una sobrecarga que ocasiona una compresión equivalente a la del futuro firme sobre la explanada, midiéndose el hinchamiento vertical, que se expresa en porcentaje de la altura de la muestra. La muestra se ensaya a

penetración mediante una prensa y un pistón cilíndrico, que se desplaza a velocidad uniforme. El Índice resistente CBR se define como la razón, en porcentaje, entre la presión necesaria para que el pistón penetre en el suelo hasta una profundidad determinada y la correspondiente a esa misma penetración en una muestra patrón de grava machacada. Se obtiene este índice para dos penetraciones, de 2,54 y 5,08 mm, tomándose como índice CBR el mayor valor.

El suelo utilizado en el ensayo no puede contener más de un 10% de partículas retenidas por el tamiz 20, pudiéndose sustituir hasta un 30% por una proporción igual de material comprendido entre los tamices 5 y 20. La inmersión puede afectar, en algunos suelos, a la evaluación de la resistencia a esfuerzo cortante, siendo esta en algunos casos demasiado pesimista. Este ensayo no está concebido para suelos granulares y los valores superiores a 20 tienen solamente una significación cualitativa.

Tabla. II.3.  
Categoría de la subrasante según su CBR

Nombre	Subrasante	CBR
S0	Muy Pobre	<3%
S1	Pobre	3% - 5%
S2	Regular	6% - 10%
S3	Buena	11% - 19%
S4	Muy Buena	>20%

Fuente autores: Elaboración Propia en base a MTC.

#### 2.2.5.2.11 Ensayo de Proctor Modificado.

Actualmente existen muchos métodos para reproducir, al menos teóricamente, en laboratorio las condiciones dadas de compactación en terreno. Históricamente, el primer método, respecto a la técnica que se utiliza actualmente, es el debido R.R. Proctor y que es conocido como Prueba Proctor estándar. El más empleado,

actualmente, es la denominada prueba Proctor modificado en el que se aplica mayor energía de compactación que el estándar siendo el que está más de acuerdo con las solicitaciones que las modernas estructuras imponen al suelo. También para algunas condiciones se utiliza el que se conoce como Proctor de 15 golpes.

El objetivo es conseguir la máxima compacidad de un suelo o capa granular con una energía de compactación determinada, con el fin de evitar asentamientos una vez puesta en servicio la obra.

El objeto del ensayo es determinar, en un suelo o capa granular, la relación entre la densidad seca y la humedad para una energía de compactación de 2700 KN-m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>, y definir la densidad seca máxima y su humedad correspondiente, denominada óptima, que se puede conseguir con ese suelo en el laboratorio.

El agua que se utiliza en la compactación funciona como lubricante, disminuyendo la fricción entre las partículas y permitiendo una mayor compactación con una menor energía. Para obtener la densidad máxima de un suelo será necesario obtener 5 puntos (densidad / humedad); 3 de ellos se deben encontrar en la rama ascendente y los 2 restantes en la rama descendente. El método está basado en la determinación de las densidades secas de varias probetas, compactadas en idénticas condiciones pero con contenidos de humedad diferentes. Para cada contenido de humedad se alcanza una determinada densidad, de manera que estos pares de valores, representados en coordenadas cartesianas, definen la relación buscada.

#### **A. Uso.**

El suelo colocado como terraplén de la ingeniería (terraplenes, cojines de la fundación, bases del camino) se condensa a un estado denso

para obtener características satisfactorias de la ingeniería tales como fuerza de esquileo, compresibilidad, o permeabilidad. Además, los suelos de la fundación se condensan a menudo para mejorar sus características de la ingeniería. Las pruebas de la compactación del laboratorio proporcionan la base para determinar la compactación de los por ciento y moldear el contenido en agua necesitado para alcanzar las características requeridas el dirigir, y para la construcción que controla para asegurar que la compactación requerida y los contenidos en agua están alcanzados.

El grado de compactación de suelo requerido para alcanzar las características deseadas el dirigir se especifica a menudo como porcentaje del peso seco máximo modificado como resuelto usando este método de la prueba. Si el grado requerido de compactación es substancialmente menos que el peso seco máximo modificado usando este método de la prueba, puede ser practicable para que la prueba sea realizada usando el método D698 de la prueba y especificar el grado de compactación como porcentaje del peso seco máximo estándar. Puesto que más energía se solicita la compactación usando este método de la prueba, las partículas del suelo se emban más de cerca que cuando se utiliza D698. El resultado total general es un peso seco máximo más alto, un contenido de agua óptimo más bajo, una mayor fuerza de esquileo, una mayor tiesura, una compresibilidad más baja, vacíos más bajos del aire, y una permeabilidad disminuida. Sin embargo, porque los suelos de grano fino altamente condensados, absorción del agua puede dar lugar a la hinchazón, con fuerza de esquileo reducida y la compresibilidad creciente, reduciendo las ventajas del esfuerzo creciente usado para la compactación. El uso de D698, por otra parte, permite la compactación usando menos esfuerzo y generalmente en un contenido de agua óptimo más alto. El suelo condensado puede ser menos frágil, más flexible, más permeable, y menos conforme a

efectos de la hinchazón y de contraerse. En muchos usos, el edificio o los códigos de la construcción pueden dirigir qué método de la prueba, D698 o éste, debe ser utilizado cuando al especificar la comparación de la prueba de laboratorio resulta el grado de compactación del suelo sobre el terreno en el campo.

Durante diseño de un terraplén dirigido, la prueba realizada para determinar esquiroleo, la consolidación, la permeabilidad, u otras características requiere especímenes de la prueba ser preparada condensando el suelo en un contenido en agua prescrito el moldear para obtener un peso de unidad predeterminado. Es práctica común a primero determina el contenido en agua óptimo y el peso seco máximo por medio de una prueba de la compactación. Los especímenes de la prueba se condensan en un contenido en agua seleccionado el moldear (w), mojado o seco del grado óptimo o en el grado óptimo y en un peso seco seleccionado relacionado con un porcentaje del peso seco máximo. La selección del contenido en agua del moldeado (w), mojado o seco del grado óptimo o en el grado óptimo y el peso seco se puede basar en experiencia previa, o de una gama de valores se puede investigar para determinar los por ciento necesarios de compactación.

## **B. Herramientas y equipos.**

- Zaranda.-Con la finalidad de obtener una muestra de buena representatividad se utiliza las zarandas cuya mallas son de diámetros de: 2",3/4",3/8", N°4.
- HORNO.- El horno deberá estar debidamente calibrada y mantener una temperatura de 110+5°c para secar la muestra en sus diferentes pasos del ensayo.
- CAZUELA.- Bandeja que nos permite almacenar el material debe estar debidamente etiquetada e indicar su peso de 2500 gr.

- **BALANZA.-** Equipo que nos permite medir la masa (en suelo “peso”) de la muestra en los diferentes pasos del ensayo. estas pueden ser electrónicos o mecánicos pero con precisión de +0.01gr.
- **RECIPIENTE.-** Sirve para preparar la muestra del suelo incrementando agua para diferentes puntos del proctor modificado.
- **PISON.-** La masa del pisón es de  $454 \pm 0.01$  kg. la cara golpeante del pisón debe ser plana y circular, el pisón debe caer de libremente de  $457.2 \pm 1.6$  mm.
- **MOLDE:** Un molde que tenga en promedio  $4 \pm 0.016$  pulg de diámetro interior, altura de  $4.584 \pm 0.018$  pulg. y un volumen de  $0.333 \pm 0.0005$  pie<sup>3</sup>.
- **REGLA:** Regla metálica, rígida de una longitud conveniente no menor de 10 pulgadas. el borde de arrastre debe ser biselado si es más grueso de 1/8 pulg.
- **CUCHARON.-** Nos sirve para mezclar la muestra y de colocar en partes la muestra en el molde de 4 pulg. (
- **BADILEJO.-** Sirve para poder modelar la muestra de suelo o mezclar la muestra.
- **ALICATE.-** Nos sirve para ajustar y desajustar el molde.
- **GUANTES:** Nos ayuda a proteger el suelo en contacto directo con las manos.

### **2.2.6. Características de desempeño dentro de la conservación vial**

Es necesario definir aquellos parámetros que debemos controlar para que se asegure el correcto desempeño de la carretera en estudio. Estos parámetros varían dependiendo del tipo de contrato al que está sujeta la carretera y a las características propias de la misma. Por esta razón, se definirá el tipo de contrato que regirá sobre la carretera y a partir de ahí se hablará de los parámetros a evaluar.

### **2.2.6.1. Contratos de Conservación vial por Niveles de Servicio (CCVNS)**

La gestión de conservación de carreteras en el Perú, comenzó a ser medida por Niveles de Servicio, por primera vez hace 18 años, a través de las concesiones viales (IVA, 2011). A partir del año 2007 se crea el “Proyecto Perú”, como parte de la estrategia del Ministerio de Transportes y Comunicaciones, se vienen entregando Contratos de Conservación de carreteras por Niveles de Servicio, que representan un cambio fundamental en la gestión de conservación vial nacional, lo cual ha hecho que tome mayor relevancia el contar con parámetros de medición acordes a las necesidades de los usuarios y realidad de nuestro país.

### **2.2.6.2. Indicadores de desempeño**

Para asegurar que la carretera en estudio alcance valores adecuados que aseguren un nivel de serviciabilidad óptimo de acuerdo al contrato al que se rige definido anteriormente, se medirán una serie de indicadores, propios de este tipo de contrataciones. Serán definidos a continuación.

#### **2.2.6.2.1. Índice Internacional de Rugosidad (IRI)**

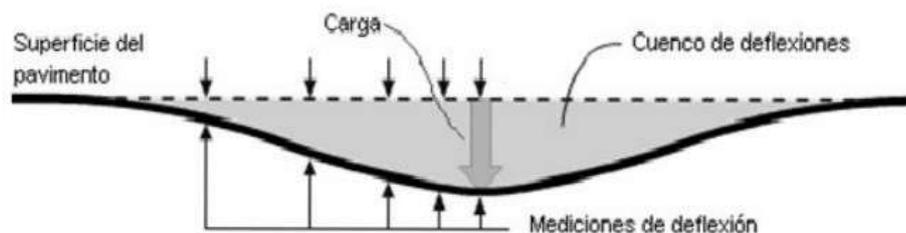
En 1982, el IRI fue propuesto por el Banco Mundial como un índice estándar para medir la rugosidad del pavimento (Sayers, Gillespie, & Queiroz, 1986). El IRI se expresa en unidades de pendiente, medidas por la acumulación de la suspensión de una rueda (un cuarto de carro) cuando ésta recorre la superficie a una velocidad de referencia de 80 km/h (Romero, 1996). En este sentido, es un índice de comodidad de rodadura, y constituye el parámetro de la vía que percibe el usuario.

Así el IRI describe las vibraciones del vehículo causadas por la irregularidad del perfil y es linealmente proporcional a la rugosidad de la vía. El valor más bajo,  $IRI=0$ , corresponde a un perfil plano. Aunque no existe un límite superior para el IRI, en la práctica los valores por encima de 8 m/km, indican un pavimento impasable por un vehículo excepto a velocidad reducida (MTC M. d., 2013).

#### 2.2.6.2.2. Deflectometría

Es una medición de la deformación o hundimiento de la superficie del pavimento cuando se aplica un peso estándar (Dynatest Chile S.A., 2010). Las solicitaciones de carga inducen a la estructura de pavimento a un desplazamiento en sentido vertical en magnitudes muy pequeñas, generalmente del orden de centésimas o milésimas de milímetro. Este desplazamiento vertical es conocido con el nombre de deflexión.

Figura II.4.  
Cuenco de deflexiones



Fuente: Instituto Mexicano del transporte, 1998

Cuando este desplazamiento vertical se presenta bajo una carga normalizada producto de la utilización de un equipo como el deflectómetro de impacto, sus resultados son útiles para poder interpretar el estado o condición estructural de un pavimento.

Estos datos son utilizados en “metodologías de cálculo inverso o Retrocálculo” (Leal Noriega, 2010), para estimar y analizar diversos parámetros estructurales, tales como los módulos de las capas que conforman un pavimento, el número estructural que representa la resistencia total de toda la estructura o la vida residual o remanente de la misma, entre otros.

Las deflexiones pueden determinar el estado crítico existente en alguna de las capas interiores de la estructura de un pavimento (Dynatest Chile S.A., 2010), razón por la cual se podrá encontrar un pavimento con daños superficiales que presente bajas deflexiones y otro en buen estado con altas deflexiones.

Entre las deflexiones más utilizadas se encuentran: El área del cuenco de deflexiones y la deflexión máxima o valor máximo de desplazamiento vertical bajo la aplicación de la carga.

### **2.2.6.2.3. Número Estructural**

#### **A. Definición**

El número estructural (SN) de un pavimento es un valor abstracto que expresa la resistencia estructural del pavimento en general requerido para combinaciones de las solicitaciones que soportará la carretera. Se utiliza para determinar el grosor total que tendrá el paquete estructural de la carretera.

#### **B. Función del número estructural**

El diseño formal de pavimentos hoy en día se fundamenta en cálculos de ingeniería basados en ecuaciones de diseño establecidos, como las ecuaciones empíricas que se encuentran en la Guía de 1993 AASHTO para el Diseño de Estructuras de Pavimentos. Un elemento crítico de la ecuación de pavimento flexible es, como se mencionó

antes, el número estructural, lo que representa el requisito general de la estructura necesaria para sostener las cargas de tráfico previstos en el diseño. El número estructural requerido depende de una combinación del soporte del suelo, las cargas totales de tráfico, capacidad de servicio del pavimento, y las condiciones ambientales, según la ecuación sugerida por AASTHO (1993).

$$\log_{10}(W_{18}) = Z_R \times S_o + 9.36 \times \log_{10}(SN+1) - 0.20 + \frac{\log_{10}\left(\frac{\Delta PSI}{4.2-1.5}\right)}{0.40 + \frac{1094}{(SN+1)^{5.19}}} + 2.32 \times \log_{10}(M_R) - 8.07$$

Aunque la ecuación de diseño antes descrita se puede utilizar de diferentes maneras dependiendo de las entradas disponibles, una de sus aplicaciones más comunes es eficaz para resolver el número estructural.

### C. Relación con capas de pavimento

El número estructural es un valor que se aplica al total de la estructura del pavimento, pero para completar el diseño todavía se tiene que conseguir de este valor los espesores de las capas individuales. Esto se maneja utilizando una ecuación del tipo mostrado en la ecuación sugerida por AASTHO (1993):

$$SN = a_1 D_1 + a_2 D_2 M_2 + a_3 D_3 M_3 + \dots$$

Esta fórmula se puede adaptar a cualquier número de capas del pavimento, ya que cada expresión (tal como un  $a_2 D_2 M_2$ ) en la fórmula corresponde a una sola capa, de modo que las variables en la expresión corresponden a las características de dicha capa. El número del subíndice se utiliza en la expresión simplemente para indicar de qué capa se refiere. Las variables representan lo siguiente:

A = un coeficiente de capa que representa la fuerza relativa del material

D = espesor de la capa en pulgadas

M = coeficiente de drenaje

Los coeficientes de capa y drenaje son valores que deben reflejar las características del material que se utilizarán para construir esa capa de pavimento. Los espesores de las capas individuales son los que efectivamente se están utilizando la ecuación de diseño y el número estructural que se encontrará para ellos.

#### **D. Coeficiente de capa**

Dado que el coeficiente de capa representa la resistencia del material, esta es la principal variable en el tipo de material que se va a utilizar para cada capa. Para fines de diseño, los coeficientes de capa se determinan empíricamente basándose en el rendimiento del material. Algunas empresas constructoras del rubro a menudo establecen valores específicos de coeficiente de capa para materiales de uso común como una política de diseño estándar. Algunos valores típicos del coeficiente de capa son (ASSTHO, 1993):

- Mezcla asfáltica en caliente - 0.44
- Mezcla asfáltica de baja estabilidad - 0,20
- Base de agregado - 0.13
- Relleno mecanizado - 0.10

Puesto que el coeficiente capa puede ser afectado por las propiedades del material, así como la posición de la capa en la que se usará el material, en algunos casos se utilizan diferentes valores que podrían ser más apropiados para las condiciones locales.

#### **E. Coeficiente de drenaje**

Un coeficiente de drenaje es un valor asignado a una capa de pavimento que representa su pérdida relativa de fuerza debido a

características de drenaje y la exposición a saturación por humedad. Aquellas capas que drenan lentamente o que, a menudo, están saturadas tendrían un coeficiente de drenaje menor, mientras que las capas que drenan rápidamente y casi nunca se saturan tendrían un coeficiente de drenaje superior. Para la mayoría de los diseños de pavimento y por comodidad de cara al diseño, se suele establecer un coeficiente de drenaje igual a 1 (MTC M. d., 2008), que indica características de drenaje normales.

Otro punto a tener en cuenta es que debido a que el número estructural se utiliza para calcular los espesores de las capas, el cambio de un coeficiente de drenaje sólo tendrá un impacto en el espesor de la capa de pavimento para la cual se realizó el cambio. No va a hacer que cualquier capa sea más densa o resolverá los problemas de drenaje de otras capas. Si hay un problema de drenaje real con una de las capas, es mejor diseñar un sistema de drenaje para dicha capa o aumentar la densidad de la misma para reducir al mínimo la infiltración de agua.

#### **F. Espesor**

Una vez que se hayan decidido los coeficientes de capa y drenaje adecuados, se pueden trabajar espesores adecuados para cada una de las capas del pavimento. El método AASHTO también se puede aplicar a la evaluación de pavimentos existentes, así como el diseño de nuevas estructuras de pavimento. Por ejemplo, cuando se considera que un pavimento necesita rehabilitación, los espesores de las capas existentes podrían ser unidos para determinar un número estructural para el pavimento en su lugar; comparando esto con el número estructural requerido para el diseño actualizado daría una indicación del tipo y espesor del tratamiento de rehabilitación necesario.

Vale la pena señalar que, aun cuando se haya determinado el número estructural, esto no dicta automáticamente una única respuesta correcta para espesor de la capa de pavimento. Suponiendo que hay más de una capa estructural, normalmente habrá diferentes combinaciones de espesor de la capa que podría alcanzar el número estructural requerido. Sin embargo, con base en los costos relativos de los materiales para las diferentes capas, junto con consideraciones prácticas de construcción (como no hacer una sola capa excesivamente gruesa o delgada), es probable que la definición del número estructural dirija a una combinación particular de espesores de capa.

## CAPITULO III

### PROPUESTA TECNICA DE LA INVESTIGACION

#### 3.1. CRITERIOS ADOPTADOS PARA LA REVISION DE LA SITUACION

##### ACTUAL

Para la revisión de la situación inicial de la carretera se tiene en cuenta la normatividad del manual de diseño geométrico de carreteras EG-2001 (MTC M. d., 2001), el manual para el diseño de carreteras pavimentadas de bajo volumen de tránsito (MTC M. d., 2008) y el manual para el diseño de carreteras no pavimentadas de bajo volumen de tránsito (MTC M. d., 2008) y el manual de carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos (MTC M. d., 2013).

##### 3.1.1. Ubicación

Se encuentra atravesando las localidades Macusani - Ituata, de la región Puno. El tramo de ruta inicia en la localidad de Macusani km 0+000.

:

- Latitud: 16°26'39.446"S
- Longitud: 79°38'24.070"W
- Cota: 4460.9 m.s.n.m.

Y culmina el tramo en la progresiva 56+000 en la localidad de Ituata con coordenadas geográficas:

- Latitud: 16°14'53.942"S
- Longitud: 77°27'18.77"W
- Cota 1973.1 m.s.n.m.

### 3.1.2. Resumen de la Situación Actual

El tramo, tiene una longitud de 56.00 Km, se encuentra a nivel de afirmado, teniendo como punto de inicio la localidad de Macusani, y termina en la localidad de Ituata. La morfología es accidentada en la mayor parte del tramo, se observa que la superficie de rodadura presenta fallas tipo baches y erosiones, deformaciones de la plataforma ocasionadas principalmente por discurrir de las aguas de las lluvias y aguas superficiales, así como el paso vehicular y la deficiencia de sistemas de drenaje superficial y subterránea que dificultan la evacuación de las aguas Pluviales.

Figura III.1.  
Situación inicial de la vía en estudio.



Fuente: elaboración propia

### 3.1.3 Análisis y Revisión de los parámetros básicos:

#### 3.1.3.1. Orografía

La orografía actual oscila ente tipo 3 y tipo 4 ya que la inclinación transversal del terreno, normal al eje de la vía, varía entre el 50% y 100% (EG 2001), y en algunos sectores la inclinación transversal del terreno, normal al eje de la vía, es mayor de 100%.

### 3.1.3.2. Clasificación de la Carretera de acuerdo a la demanda

Se realizó un estudio del tráfico procedente de las localidades de Macusani e Ituata. De esto se llegó a que la clasificación del corredor vial que, según EG 2001, es de tipo carretera de 3RA. Clase, que soportan tráfico menores a 400 veh/día.

Tabla III.1.  
IMDa de carretera

Inicio	Fin	IMDa
Macusani	Ituata	57

Fuente: Elaboración propia.

### 3.1.3.3. Velocidad

La velocidad con la que se puede transitar en las condiciones actuales debido a su topografía y en el estado en que se encuentra el corredor vial es en un promedio de 20 km/h.

### 3.1.3.4. Ancho de Calzada

#### A. Ancho de Calzada del corredor vial

El ancho de la calzada es muy variable a lo largo del Corredor Vial, es difícil identificar carriles y bermas de anchos fijos, en el corredor vial se tiene un solo carril (usados por ambos sentidos de tránsito). El ancho promedio de la calzada por tramo es igual al ancho de la plataforma ya que no se tiene bermas en la calzada actual.

Tabla III.2.  
Ancho promedio de calzada existente

Inicio	Fin	Ancho Promedio (m)
Macusani	Ituata	5.15

Fuente: Elaboración propia

Los anchos en la calzada del tramo son reducidos por factores como pérdida de plataforma, lo que ocasiona un peligro constante para los usuarios (vehículos).

### B. Bermas.

La plataforma del corredor vial en sus tramos no tiene ancho que permitan realizar bermas.

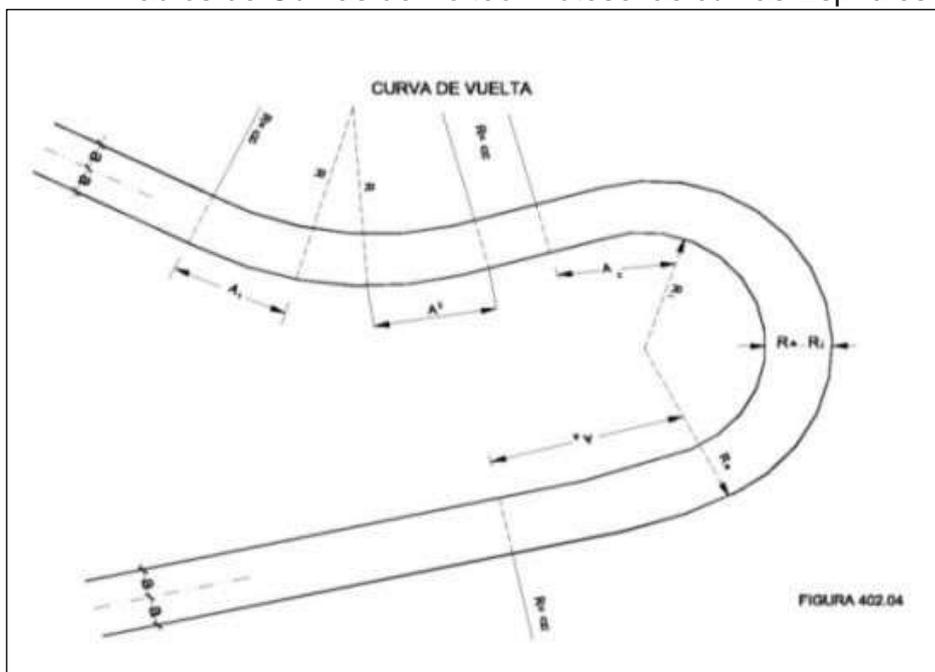
### C. Plazoletas

El corredor vial no tiene las plazoletas que permitan dar pase a los vehículos opuestos o adelantarse aquellos del mismo sentido.

### D. Radio Mínimo en Curva de Volteo

El capítulo 402.09 del EG 2001, introduce el concepto de curvas de vuelta, y proporciona la Tabla III.3, con radio interior y exterior de la curva de volteo, como se observa en la Figura III.2:

Figura III.2.  
Radios de Curvas de Volteo. Nótese las curvas Espirales.



Fuente: Manual DG-2001

Tabla III.3.  
Radio exterior mínimo correspondiente a un radio interior

Radio interior Ri (m)	Radio Exterior Mínimo Re (m). según maniobra prevista		
	T2S2	C2	C2+C2
6,0	14,00	15,75	17,50
7,0	14,50	16,50	18,25
8,0	15,25	17,25	19,00
10,0	16,75 *	18,75	20,50
12,0	18,25	20,50	22,25
15,0	21,00 *	23,25	24,75
20,0	26,00 *	28,00	29,25

Fuente: Manual DG-2001

La tabla considera un ancho de calzada en recta de 6m., en caso de que ella sea superior, Re deberá aumentarse consecuentemente hasta que  $Re - Ri = \text{Ancho Normal Calzada}$ .

Además el DG-2001, define las posibilidades para definir el radio interior, de acuerdo a lo siguiente:

- El radio interior de 6 m, representa un mínimo absoluto y sólo podrá ser usado en caminos de muy poco tránsito, en forma excepcional.
- El radio interior de 8 m, representa un mínimo normal en caminos de poco tránsito.
- En carreteras de importancia se utilizarán radios interiores >15 m.”

Como es una carretera de bajo volumen de tránsito se usará un radio interior igual a 6 m, Se considera el radio interior según recomienda la Tabla III.3. El radio exterior es 14 m para un vehículo T2S2, por efectos de dotar de mayor seguridad a la curva de volteo el radio mínimo deberá utilizarse de 10 m. En las curvas de volteo que se

mencionan los que no cumplen el radio mínimo de volteo serán incrementados, por lo que se tendrá un volumen de desquinche.

### **E. Sobreanchos**

En el corredor vial las curvas horizontales no cuentan con los sobre anchos necesarios (como es de conocimiento, en las curvas el vehículo ocupa un mayor ancho que en los tramos rectos).

Para el cálculo de sobre anchos necesarios con parámetros establecidos se aplica la siguiente fórmula para el cálculo analítico (MTC M. d., 2001):

$$Sa = n \left( R - \sqrt{R^2 - L^2} \right) + V / 10 \sqrt{R}$$

Dónde:

- Sa = Sobre ancho (m)
- V = Velocidad (Kph)
- R = Radio de Curva Circular (m)
- n = Número de Carriles (m)
- L = Distancia entre eje Posterior y parte Delantera (del vehículo tipo T2S2 adoptado) (m).

Téngase en cuenta que por tratarse de un solo carril el sobre ancho se divide entre 2.

### **F. Pendientes Máximas**

Se considerará los sugeridos en las normas DG – 2001. Atendiendo a los parámetros adoptados en el proyecto la pendiente máxima no debe pasar del 12%. En curvas con radios menores a 50 debe evitarse pendientes en exceso a 8%, debido a que la pendiente en el lado interior de la curva se incrementa muy significativamente.

### **3.1.4. Suelos y pavimentos:**

#### **3.1.4.1. Resumen de la Situación Actual**

De la evaluación del suelo de fundación se encontró que predominan los suelos formados por arena arcillosa y arcillas inorgánicas, la clasificación predominante SUCS es SC y CL, y en AASHTO es A-2-6, con un índice de plasticidad promedio de 13%, la humedad natural que presentan los suelos se encuentra con un promedio de 16% y máximos de 51%, de los CBRs encontrados están en el rango de 5% y 30%, con un promedio de 16% al 95% de la MDS.

En el tramo, se ha encontrado material granular de cantera, conformado por materiales gravas arenosas mal gradadas con presencia de limos, la clasificación predominante SUCS es GP-GM, y en AASHTO es A-1-a, con un índice de plasticidad promedio de 4%, con CBRs promedio de 33% al 95% de la MDS. Los espesores de recarga existente encontrados varían entre 0 cm a 90 cm con un promedio de 18 cm. Luego de la evaluación del suelo de fundación y la recarga existente se realizó un perfil estratigráfico.

De la evaluación funcional del tramo se encontró que se encuentra con un IRI promedio de 14.84 m/km, el tramo está clasificado como: caminos no pavimentados rugosos, con desprendimiento de agregados y depresiones profundas, según las escalas del Banco Mundial. Por lo tanto se decidió realizar un perfilamiento simple con motoniveladora para disminuir el IRI hasta un valor de 8 m/km que faciliten los trabajos de estabilización.

### **3.1.4.2. Estudio del Suelo de Fundación:**

Con el objeto de determinar las características físico-mecánicas de los materiales del terreno de fundación se llevó a cabo la investigación mediante la ejecución de prospecciones en el suelo (calicatas), de donde se obtuvieron muestras representativas, las que fueron trasladadas al laboratorio de suelos contratado donde fueron objeto de estudio. Se llevó el registro de los espesores de cada una de las capas del subsuelo, sus características de gradación, humedad, color, plasticidad, su estado de compacidad entre otros. Las muestras representativas fueron sometidas a los siguientes ensayos:

- Análisis granulométrico por tamizado MTC E107
- Límite líquido MTC E 110
- Límite plástico e índice de plasticidad MTC E 111
- Clasificación SUCS ASTM D-2487
- Clasificación para vías de transportes (AASHTO) ASTM D-3282
- Contenido de humedad MTC E 108
- Proctor Modificado MTC E 115
- California Bearing Ratio (CBR) MTC E 132

### **3.1.4.3. Descripción de los materiales de fundación**

En el tramo, se ha considerado 3 sectores homogéneos obtenidos mediante la aplicación de los criterios de AASHTO'93 (Part III, Chapter 3 Guides for Field Data Collection). Se han efectuado en total 132 exploraciones mediante calicatas en la carretera ubicadas de forma alternada en ambas huellas de la vía, las muestras de los suelos de fundación de la carretera en estudio han sido ensayadas en laboratorio, obteniéndose sus propiedades mecánicas, el cual se

resumen a continuación:

- Sector 1 (km 0+000 – km 8+000): Predominan los suelos formados por arenas arcillosas y limos, con una plasticidad promedio de 15.0%, la clasificación predominante SUCS es SC y CL, y en AASHTO es A-2-6, los CBRs encontrados están en el rango de 5.8% y 26.0%, con un promedio de 16.9% al 95% de la MDS, el índice de consistencia determina un suelo sólido, no obstante este es un estado variable con la humedad.
- Sector 2 (km 9+000 – km 13+000): Predominan los suelos formados por gravas y arcillas con grava de tamaño máximo de 2", con una plasticidad promedio de 13.0%, la clasificación predominante SUCS es GC y SC, los CBRs encontrados están en el rango de 7.1% y 29.8%, con un promedio de 16.8% al 95% de la MDS, el índice de consistencia determina un suelo sólido; puntualmente se ha observado suelos de consistencia plástico blando y semi líquidos.
- Sector 3 (km 14+000 – km 56+000): Predominan en este sector suelos formados por acillas inorgánicas, con una plasticidad promedio de 14.0%, la clasificación predominante SUCS es CL, los CBRs encontrados están en el rango

#### **3.1.4.4. Verificación de espesores de capa granular existente**

Este estudio se desarrolló con la finalidad de determinar las características físico- mecánicas del material de recarga existente en el tramo, es decir, el material que se ha venido depositando sobre el terreno de fundación a lo largo del tiempo por acción de los fenómenos atmosféricos.

La investigación se llevó a cabo mediante la ejecución de pozos exploratorios a “cielo abierto”. De los resultados de las prospecciones, se ha observado en el campo y de acuerdo al perfil estratigráfico, que la plataforma del tramo, está conformada superficialmente por un material granular existente, gravas con arenas, con finos arcillo limosos. Las muestras representativas fueron sometidas a los siguientes ensayos:

- Análisis granulométrico por tamizado MTC E107
- Límite líquido MTC E 110
- Límite plástico e índice de plasticidad MTC E 111
- Clasificación SUCS ASTM-D-2487
- Clasificación para vías de transportes (AASHTO) ASTM-D-3282
- Contenido de humedad MTC E 108
- Proctor Modificado MTC E 115
- California Bearing Ratio (CBR) MTC E 132

#### **3.1.4.5. Evaluación Estructural**

Los trabajos de campo han consistido en la medición deflectométrica del pavimento mediante el uso del Deflectómetro (LWD), que se usa típicamente para la medición de la capacidad portante en capas de subrasante, subbase y base.

Para la medición se utilizó niveles de carga que proporciona deflexiones en el rango deseado, idealmente sobre los 300 micrones. Deflexiones muy pequeñas presentan incertidumbre en la determinación de módulo, en tanto que deflexiones muy altas se deben evitar pues el rango de lectura del aparato es de 2200 micrones (2.2 mm). Para evitar exceder el rango se redujo el nivel de carga. El rango de carga aplicado varió a lo largo del proyecto entre

8.1kN y 15kN.

En general se realizaron 6 golpes de LWD en cada punto, y un punto de ensayo cada 200 m de avance. Las mediciones se llevaron a cabo cerca de la huella derecha del carril de circulación, Se realizaron un total cercano a los 2735 puntos de ensayo válidos. Todos los ensayos se realizaron con el plato de carga de 300 mm de diámetro.

#### **3.1.4.6. Análisis estadístico**

Los estudios de deflexiones recuperables, han demostrado que las deflexiones medidas en una sección de pavimento, presentan una distribución de frecuencias que se asemejan a una distribución normal. Por lo tanto, a partir de las deflexiones individuales, asumiendo que se hallan distribuidas de acuerdo a la ley de Gauss se han determinado la deflexión media (D), la desviación estándar, y el coeficiente de variación (Cv).

Para efectos de evaluación, diseños de refuerzos asfálticos se emplea el concepto de Deflexión Característica, que representa mejor a una sección de comportamiento Estructural Homogéneo; siguiendo el criterio adoptado normalmente en análisis estadísticos, se puede establecer como Deflexión Característica el valor:

$$D_c = D + 1.645 \times \sigma$$

Evaluado en su condición Estructural Inicial, los resultados del corredor vial se dan a continuación:

Tabla III.4.  
Resultados de la Evaluación Estructural del Corredor vial en estudio.

tramo	Mcusani - Ituata (x10 <sup>-2</sup> mm)	Sectores Homogéneos					
		0+00	8+00	9+00	13+00	14+00	56+00
Promedio	38.7	31		47		30	
Desviación estándar	25.6	17		33		18	
Coefficiente de Variación	66.1	55		71		58	
Deflexión Característico	80.8	59		102		60	

Fuente: Elaboración propia

### 3.1.5. Geología y Geotecnia.

Se realizaron estudios Geológicos, Geomorfológicos y Estructurales, tanto regional como local del área de estudio, para identificar los principales problemas geodinámicas y sus características, evaluando su magnitud y consecuencias sobre la vía.

Esta investigación se llevó a cabo mediante la excavación de calicatas, trincheras con la obtención de las muestras correspondientes y su análisis in situ y laboratorio.

#### 3.1.5.1. Resumen de la Situación Actual

El tramo está conformado por un alto porcentaje de rocas débiles de tipo sedimentario como son las areniscas, limolitas, lutitas (CGVN, 2010), e intrusivos meteorizados mayormente con cobertura de suelos residuales de grosores variables. Estas rocas en su gran mayoría muestran una exposición totalmente disturbada, en forma intercalada, su estratificación muy delgada que va desde menos de 1 cm hasta 40 cm en algunos casos de las rocas sedimentarias, de dureza media a blanda y presentan una meteorización alta.

Los eventos geodinámicos externos presentes en el tramo se encuentran conformados por: deslizamientos, derrumbes, desprendimientos de bloques, erosiones fluviales, erosiones de laderas y asentamientos en algunos sectores críticos, esto debido a las características climáticas, topográficas y litoestratigráficas que conforman la superficie del terreno y por la acción antrópica por lo que el agente desencadenante principal de estos procesos es el agua.

Para un mejor manejo y entendimiento de la información, se ha clasificado en dos tipos de estudios: Geología local y Geodinámica externa. Se presentan a continuación:

## **3.2. IMPLEMENTACIÓN DE TECNOLOGÍA PROES A UN CAMINO.**

### **3.2.1. Sustento del coeficiente estructural**

#### **3.2.1.1. Sustento del coeficiente estructural de la capa estabilizada con tecnología PROES**

El coeficiente estructural (SN) (AASHTO, 1993) representa el aporte resistente de cada una de las capas de la estructura del pavimento. En el tramo, por los alcances del proyecto en sí y para asegurar un adecuado nivel de servicio, se considera como único requisito estructural que la capa superior del pavimento tenga un coeficiente estructural equivalente a una estructura con SN 0.87, este es un valor abstracto que representa la resistencia total requerida para la capa superior de la estructura del pavimento para un periodo de diseño de 5 años.

Para la definición del coeficiente estructural de la capa de estabilizada con tecnología PROES, se realizaron una serie de muestreos y ensayos utilizando según estudio de dosificación el aditivo líquido

PROES más un aditivo sólido como aglomerante por equilibrio de carga eléctrica entre este aditivo y la parte fina del material, con el material granular existente y de canteras de préstamo lateral, cuyos resultados fueron relacionados con los criterios y ábacos del Método AASHTO (1993).

Dentro de la bibliografía revisada se encuentra una tabla, donde se define un valor de coeficiente estructural para un material similar al utilizado en el presente trabajo. El libro “Los Pavimentos en las Vías Terrestres Calles, Carreteras y Aeropuertos” (Céspedes Abanto, 2002) en la pág. 143, nos presenta la tabla 6.19, donde se indican los coeficientes de resistencia relativa de las diferentes capas de un pavimento flexible (para espesores en pulgadas), los mismos que han sido determinados en base a los resultados de la Carretera Experimental AASHTO:

- Base Tratada con Cemento (No un suelo-cemento) 0.23
- Base Tratada con Asfalto 0.25 – 0.30

Tabla III.5.  
Coeficientes de resistencia relativa de las diferentes capas de un pavimento flexible

Componentes de un pavimento	Coeficientes		
	A1	A2	A3
<b>Capa de rodamiento</b>			
Mezcla in situ (estabilidad baja)	0.20		
Mezcla en planta (estabilización alta)	0.44		
Arena asfalto	0.40		
<b>Capa de base</b>			
Grava Arenosa		0.07	
Piedra Picada		0.14	
<b>Base tratada con cemento (no es suelo cemento)</b>			
650 lb/pulg <sup>2</sup> , o mas		0.23	
400 a 650		0.20	
400 o menos		0.15	

<b>Base tratada con material bituminoso:</b>			
De gradación gruesa		0.30	
Arena asfalto		0.25	
Base tratada con Cal		0.15-0.30	
<b>Sub Base</b>			
Grava arenosa			0.11
Arena o arcilla arenosa			0.05-0.10

Fuente: Céspedes Abanto (2002).

El aporte resistente de la capa estabilizada con tecnología PROES, es validado por sus bondades mediante las pruebas, cuyo propósito al incluirse el aditivo sólido (función aglomerante por equilibrio de cargas eléctricas) y el aditivo líquido (función de ionizador que produce la reacción química de la parte fina del material a estabilizar), fue el de incrementar la resistencia del material aceptable como el principal criterio de diseño, además de impermeabilizar y dejar con comportamiento flexible la base estabilizada, incremento verificado para la capa estabilizada con PROES especialmente a través del CBR, para cada una de las muestras ensayadas, que garantizarán la durabilidad deseada y un buen comportamiento.

### 3.2.1.2. Valor de la relación de soporte CBR

Los resultados de las propiedades físicas de la estabilización de suelos de cantera, se ha de obtener en las condiciones más adversas, para la obtención del valor de la Relación de Soporte Relativo (CBR), se ha curado por 7 días al aire y 4 días sumergidos al agua, con el CBR de diseño se obtiene el módulo de la capa, utilizando la correlación obtenida del Appendix CC-1 "Correlation of CBR values with soil index properties"

Se adoptó un espesor mínimo de 11 cm sugerido por las especificaciones técnicas de estabilizar con PROES y se calculó el espesor que se adoptara

Tabla III.6.  
Espesor adoptado para un SN de 0.87

SN requerido	Coefficiente Estructural	Espesor Mínimo	Espesor Adoptado
0.87	0.079/cm	11.0 cm	11.0 cm

Fuente: Elaboración propia

### 3.2.1.3. Estabilización de suelos de cantera con tecnología proes:

Se efectuó la ubicación de fuentes de materiales dentro del tramo y en zonas adyacentes, cuyas características principales fueran el tener los volúmenes de materiales necesarios, pero principalmente con propiedades geotécnicas adecuadas para las actividades a efectuar. La calidad de los materiales para los diversos usos, han sido estudiados mediante el empleo de los siguientes ensayos estándar.

- Análisis granulométrico por tamizado MTC E 204
- Límite líquido MTC E 110
- Límite plástico e índice de plasticidad MTC E 111
- Clasificación SUCS ASTM D-2487
- Clasificación AASHTO ASTM D-328
- Proctor modificado MTC E 115
- California Bearing Ratio (CBR) MTC E 132
- Abrasión MTC E 207

A continuación se describe la cantera considerada (cantera Km 28+500), y Las características de los materiales de cantera utilizados para la realización de las pruebas de estabilización son las siguientes:

Tabla III.7.  
Gradación Canteras para Estabilización

Tamiz	% Pasa	
	Cantera km 8+500	Cantera km 38+000
2"	100.0	100.0
3/4"	86.9	81.9
3/8"	74.4	65.1
N° 4	59.6	49.6
N° 10	49.5	40.1
N° 40	32.5	23.4
N° 200	19.9	12.0

Fuente: Elaboración propia

Tabla III.8.  
Características Físico Mecánicas Canteras Estabilizadas

Descripción	Características	
	Cantera 8+500	Cantera 38+000
Límite Líquido	40.49 %	34.82%
Límite Plástico	24.8 %	33.53 %
Índice Plástico	15.2 %	1.3%
Abrasión	43.4 %	38.4%
Máxima Densidad Seca	1.626 g/cm <sup>3</sup>	1.839g/cm <sup>3</sup>
Óptimo Contenido de Humedad	18.0%	11.8 %
CBR a 0.1" al 95%	55.6 %	133.4 %
Cemento	50 kg/m <sup>3</sup>	50 kg/m <sup>3</sup>
Proes	0.30 l/m <sup>3</sup>	0.30 l/m <sup>3</sup>

Fuente: Elaboración propia

### 3.2.2. Diseño estructural del pavimento

El diseño del pavimento de la carretera a nivel de solución de ingeniería, se efectuó con los resultados idóneos obtenidos en los ensayos de laboratorio y en tramos de prueba, los que se convirtieron en el sustento técnico para la estructura que se está definiendo como mejor alternativa. Para efectos del diseño se han analizado por: "Metodología del manual de diseño de carreteras no pavimentadas de bajo volumen de tránsito" (MTC M. d., 2008).

### **3.2.2.1. Diseño metodología para la construcción de carreteras**

Conforme a lo establecido en el Manual de Diseño de Carreteras no Pavimentadas de Bajo Volumen de Tránsito de la Dirección General de Caminos y Ferrocarriles, el espesor del material granular a colocar sobre determinada subrasante está en función del CBR de subrasante y el número de ejes equivalentes de 8.2 tn.

La solución adoptada, cumple con las exigencias del Manual de Diseño de Carreteras No Pavimentadas de Bajo Tránsito, y además, por ajustarse a las solicitudes dadas en esta carretera, se ha aplicado la metodología planteada por la National Association of Australian State Road Authorities (NAASRA) para un período de 05 años. Este tramo se ha dividido en sectores homogéneos, en el cálculo del espesor granular en cada sector, el paquete estructural resultante está conformado por las capas de: subrasante o suelo de fundación, afirmado existente y la recarga de material granular, éstas dos últimas constituyen una capa de material existente de los cuales los 110 mm superiores son estabilizados con Tecnología PROES.

### **3.2.2.2. Tráfico para NAASRA**

Dentro de la metodología para el Estudio de la Demanda del Tránsito, las cargas y el volumen de tráfico juegan un papel importante en el diseño estructural del pavimento, por lo que se ha establecido datos realistas para este caso específico. Se ha realizado el conteo vehicular, cuyos resultados arrojan EE (ejes equivalentes), como se muestra a continuación:

Tabla III.9.

Ejes Equivalentes del tramo Macusani – Ituata medidos desde la progresiva 0+400 hasta la progresiva 13+000.

<b>Tramo</b>	<b>Periodo de diseño</b>	<b>ESAL</b>
Macusani – Ituata	5 años	$2.28 \times 10^5$

Fuente: Elaboración propia

### 3.2.2.3. De la normativa:

El “Manual para la Conservación de Carreteras No Pavimentadas de Bajo Volumen de Tránsito”, clasifica el tipo de vía de acuerdo al volumen de tránsito, identificándose en la clase de carreteras:

Tabla III.10.

Clasificación según volumen de tránsito para carreteras en la red nacional.

<b>CLASE</b>	<b>T0</b>	<b>T1</b>	<b>T2</b>	<b>T3</b>	<b>T4</b>
IMD (Total de vehículos ambos sentidos)	< 15	16 - 50	51 - 100	101 - 200	201 - 400
Vehículos Pesados (Carril de diseño)	< 6	16 - 15	16 - 28	29 - 56	57 - 112
Nº Rep. EE (carril de diseño)	$< 2.5 \times 10^4$	$2.6 \times 10^4$ $-1.5 \times 10^4$	$7.9 \times 10^5$ - $1.5 \times 10^5$	$1.6 \times 10^5$ - $3.1 \times 10^5$	$3.2 \times 10^5$ - $6.1 \times 10^5$

Fuente: MTC, 2008

De la clasificación, se determina que los volúmenes de Ejes Equivalentes (EE) que soportará el afirmado, están dentro del rango:

$$EE = 1.6 \times 10^5 - 3.1 \times 10^5$$

Por lo tanto el tráfico se clasifica en clase T3.

#### **3.2.2.4. Diseño de espesor de pavimento – método NAASRA**

Para el dimensionamiento de los espesores de la capa de afirmado, se adoptó como representativa la siguiente ecuación del método NAASRA, que relaciona el valor soporte del suelo (CBR) y la carga actuante sobre el afirmado, expresada en número de repeticiones de ESAL.

$$e = [219 - 211 \times (\log_{10} \text{CBR}) + 58 \times (\log_{10} \text{CBR})^2] \times \log_{10} \times (\text{Nrep}/120)$$

Dónde:

- e = Espesor de la capa de afirmado en mm
- CBR = Valor del CBR de la subrasante
- Nrep = Número de repeticiones de EE para el carril de Diseño.
- SN = Número Estructural.

#### **3.2.3. Estructura de pavimento.**

##### **3.2.3.1. Consideraciones para la estructuración del pavimento – tecnología PROES**

Con la finalidad de definir una estructura de pavimento con un nivel de serviciabilidad adecuado para el tramo, se presentan a continuación las siguientes consideraciones técnicas tomadas en cuenta para la estructuración del pavimento estabilizado con la tecnología PROES.

##### **A. Superficie de rodado**

Con el objetivo de conseguir una superficie de rodadura que brinde una aceptable serviciabilidad al usuario, se ha definido la colocación de un mortero asfáltico (Slurry Seal) modificado con polímero (e = 10 mm), que será colocado sobre la capa de material estabilizado. Para efectos de diseño el coeficiente de capa se considera nulo, siendo su

aporte más relevante en la condición funcional del pavimento a construir.

## **B. Base Estabilizada**

Se han estudiado los materiales a emplearse para establecer su idoneidad en los trabajos de mantenimiento periódico, para lo cual se han ubicado a lo largo del tramo varias canteras como fuente de material, no obstante la capa en su conjunto que ser constituida con aporte de afirmado existente y/o recarga, seguidamente se ha realizado diseños de mezcla suelo – aditivo con la tecnología PROES, obteniendo valores de CBR mayores o iguales a 116% al 95% de la MDS y 0.1” de penetración, en consecuencia el coeficiente de aporte estructural para esta capa es de 0.20 para espesores de capa en pulgadas o su equivalente 0.079 para espesores en centímetros.

## **C. Material granular existente**

De acuerdo al estudio del material granular existente, se verificó que hay presencia de espesores con valor de soporte CBR considerable para el aporte estructural, de acuerdo al MTC (MTC M. d., 2008) se indica:

“En caso de que el tramo tenga ya una capa de afirmado, se aprovechará el aporte estructural de la capa existente. Sólo se colocará el espesor de afirmado necesario para completar el espesor total obtenido según la metodología de diseño empleada.” La estructura del pavimento estabilizado con la tecnología PROES ha sido definida de acuerdo a la siguiente figura.

Figura III.3.  
Estructura del pavimento estabilizado con la tecnología PROES para el presente estudio.



Fuente: PROESTECH, 2011

Para garantizar una adecuada relación modular<sup>1</sup>, paralelamente se verifica que la capa subyacente de material granular tenga un espesor mínimo en función al tipo de fundación:

Tabla III.11.  
Espesor mínimo según el tipo de suelo de fundación sugerido por el MTC para la estabilización en carreteras de bajo volumen de tránsito.

Tipo de Fundación	e capa subyacente
Muy buena (CBR $\geq$ 20%)	5.0 cm
Regular (CBR 11-19%)	7.0 cm
Mala (CBR $\leq$ 10%)	10.0 cm

Fuente: MTC, 2008

### 3.2.4. Secciones de diseño.

Las secciones de diseño adoptadas, cumplen con las exigencias del MTC (MTC M. d., 2008) y la “metodología NAASRA”, para un período de 05 años, y además cumplen con los alcances del proyecto, donde señala: que el número estructural (SN) de capa superior estabilizada no será menor de 0.87.

### **3.2.5. Proceso constructivo de bases estabilizadas con aditivo PROES**

#### **3.2.5.1. Descripción general del proceso**

Este procedimiento se refiere a la construcción de bases tratadas químicamente con tecnología PROES., ubicadas sobre la sub rasante o base estabilizada perteneciente al paquete estructural del pavimento. Ya que, en nuestra carretera, el soporte estructural estará dado por la base, se requiere un recubrimiento que funcione como una protección asfáltica que reduzca el desgaste por rozamiento y clima, que no aporta capacidad portante. Esta protección se realizará con slurry seal.

#### **3.2.5.2. Base estabilizada.**

##### **A. Equipamiento mínimo para la construcción:**

Los equipos mínimos requeridos son los siguientes:

- Motoniveladora (escarificado y acordonado, pre-mezclado suelo con aditivo sólido, mezclado de suelo con aditivo sólido y aditivo líquido, perfilado final).
- Camiones cisterna o aljibe (aplicación aditivo líquido y humectación de la base). Cantidad de camiones depende de distancia de transporte y volumen de agua.
- Rodillo Liso Vibratorio y/o Rodillo Pata de Cabra (compactación).

Los Rendimientos promedios están en el rango de 300-400 m<sup>3</sup> por jornada de 8 horas (PROESTECH, 2011).

- Opcionalmente, se puede utilizar:
- Camión esparcidor de aditivo sólido (esparcir aditivo sólido).

- Recicladora o Pullver-Mixer con Camión Cisterna (aplicación aditivo líquido y mezclado de los aditivos sólido y líquido con el material).
- Motoniveladora (apoyo a Recicladora y perfilado)
- Rodillos Lisos Vibratorios y/o Rodillo Pata de Cabra (compactación según plasticidad y espesor del material a estabilizar).

Los rendimientos promedios están en el rango de 700-1.200 m<sup>3</sup> por jornada de 8 horas (PROESTECH, 2011).

## **B. Preparación de la subrasante**

Esta instancia quedará definida en el proyecto mismo. La generalidad es que con motoniveladora se escarifique y/o rutee la superficie original de camino y que será aprovechada para la base. Este material se acordona y se procede a compactar la subrasante.

Antes de colocar el material de base y después de haber dado término al movimiento de tierras, la subrasante debe ser perfilada a las cotas y pendientes indicadas en los planos del proyecto (Figura III.4).

Figura III.4.  
Preparación de la Sub Rasante



Fuente: elaboración propia

La sobre excavación en que se incurra se absorberá con el material natural extraído de la excavación o con el material de base. Posteriormente se procederá a compactar el sello, según lo establezca el proyecto. Después de perfilada y compactada la sub rasante, debe controlarse el cumplimiento de las cotas en todos los puntos y deberá agregarse o quitarse el material que sea necesario para llevar la rasante a los niveles especificados en el plano de proyecto.

### **C. Aplicación de aditivos y mezclado.**

Terminada la preparación de la sub rasante, se realiza la estabilización química del suelo. Con el equipo adecuado, como Motoniveladora, camión Esparcidor y/o pullver Mixer y camión cisterna, se procede a adicionar a un volumen establecido de material el aditivo sólido (Figura III.5), que puede ser suministrado en bolsas o a granel, en la dosis especificada y se mezcla el suelo (con humedad natural) con el aditivo sólido y se extiende (Figura 3.4). Esta adición del aditivo sólido se puede realizar antes, siendo independiente de la adición del aditivo líquido diluido en el agua de amasado.

Figura III.5.  
Esparcido de cemento



Fuente: elaboración propia

## D. Compactación

El equipo adecuado para la compactación es el rodillo liso vibratorio (Figura 3.7) o rodillo pata de cabra (estática o dinámica).

Figura III.6.  
Compactación de la base con rodillo liso



a) Inicio de compactación con rodillo liso    b) Acabado final con rodillo liso

La cantidad de equipo será dada por el rendimiento del ítem anterior y el rendimiento de los equipos de compactación. No se compactará espesores sueltos superiores a 25 cm, siendo necesario hacer bases compactadas por capas cuando el espesor de diseño (compacto) sea superior.

Hay que evitar la sobre compactación que se puede dar fácilmente cuando los espesores son reducidos (menor a 15 cm), ya que se fisura la base durante este proceso. Es conveniente hacer al comienzo de la estabilización de una base, una comprobación de la compactación, realizando pasadas de rodillo con frecuencia baja o alta, y se revisa la compactación, de tal manera que se verifique a las cuantas pasadas, ya no sube más la densidad seca. La compactación deberá ser igual o superior al 95% de la M.D.S.

## E. Cuidado de la estabilización

Durante los cuatro días siguientes a la estabilización se debe cuidar que el suelo tratado no varíe su humedad (es decir que la base se

conservar húmeda), de tal forma que si se produce evaporación superficial del agua, deberá regarse. En caso que la temperatura sea menor a 8 °C, la reacción es más lenta y mientras dure esta condición de temperatura baja, la reacción entra en estado de latencia (se suspende), hasta que la temperatura sea superior a los 8°C.

Una opción de control de la evaporación es colocar un riego de liga con emulsión lenta diluida en agua, lo que puede realizarse 24 horas después de haber terminado las faenas de estabilización. No es necesario esperar los cuatro días para hacer la imprimación. En caso que se tenga un aumento de la humedad superficial por lluvia, derrame de otras aguas, o inundaciones, deberá suprimirse el tránsito hasta que esta condición cambie o se cumplan los 4 días de curado.

La presencia de fisuras se debe a que las especificaciones de curado no se han cumplido, y hay que verificar la profundidad de estas fisuras, para definir que se resuelve hacer. Sí las fisuras son superficiales, se puede aplicar el sello asfáltico superficial, o sino de debe rehacer la base.

### **3.2.5.3. Recubrimiento con Slurry Seal**

El Slurry Seal es un mortero asfáltico compuesto por una mezcla de una emulsión asfáltica aprobada, agregado mineral o agregado pétreo, agua, y ciertos aditivos especificados, debidamente dosificados, mezclados y uniformemente aplicado sobre la base estabilizada. El mortero asfáltico terminado deberá dejar una textura y superficie homogénea, adherido firmemente a la superficie previamente preparada, y tener una superficie resistente a deslizamientos durante su tiempo de vida útil. A continuación nos encargaremos de señalar todo lo necesario para la colocación del recubrimiento:

## CAPITULO IV

### PRESENTACIÓN, ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

#### 4.1. VERIFICACIÓN DE LA COMPACTACIÓN

Como se mencionó en el capítulo segundo para que la estabilización con aditivo PROES sea exitosa se debe verificar que la compactación en la base debe ser al menos 95% de la máxima densidad seca obtenida con el ensayo Proctor, por lo tanto, se procedió a evaluar el estado del tramo, luego de estabilizar, mediante el ensayo del cono de densidades, obteniéndose los resultados que se presentan en la tabla IV.1:

Tabla IV.1.

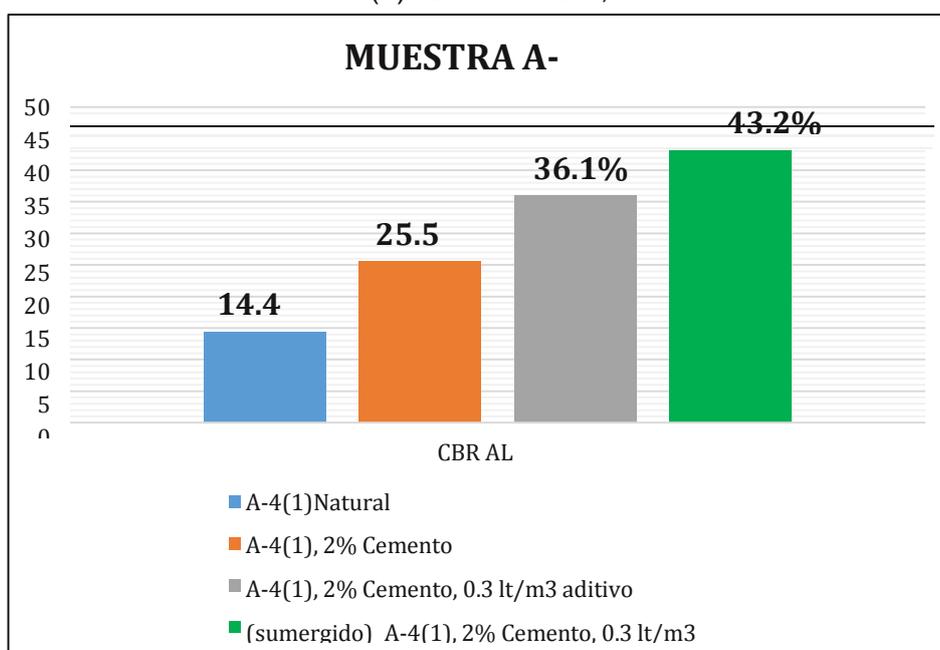
Muestra: A-4(1). CBR al 95%, M.D.S Y O.C.H

COMBINACION	CBR AL 95%	M.D.S	O.C.H
A-4(1) Natural	14.4%	1.922 gr/cc	11.74%
A-4(1) 2% de Cemento	25.5%	1.922 gr/cc	11.74%
A-4(1), 2% cemento, 0.3 lt/m3 aditivo líquido (sumergido)	36.1%	1.922 gr/cc	11.74%
A-4(1), 2% cemento, 0.3 lt/m3 aditivo liquido (curado)	43.2%	1.922 gr/cc	11.74%

Fuente: Elaboración propia.

Figura IV.1.

Muestra: A-4(1). CBR al 95%, M.D.S Y O.C.H



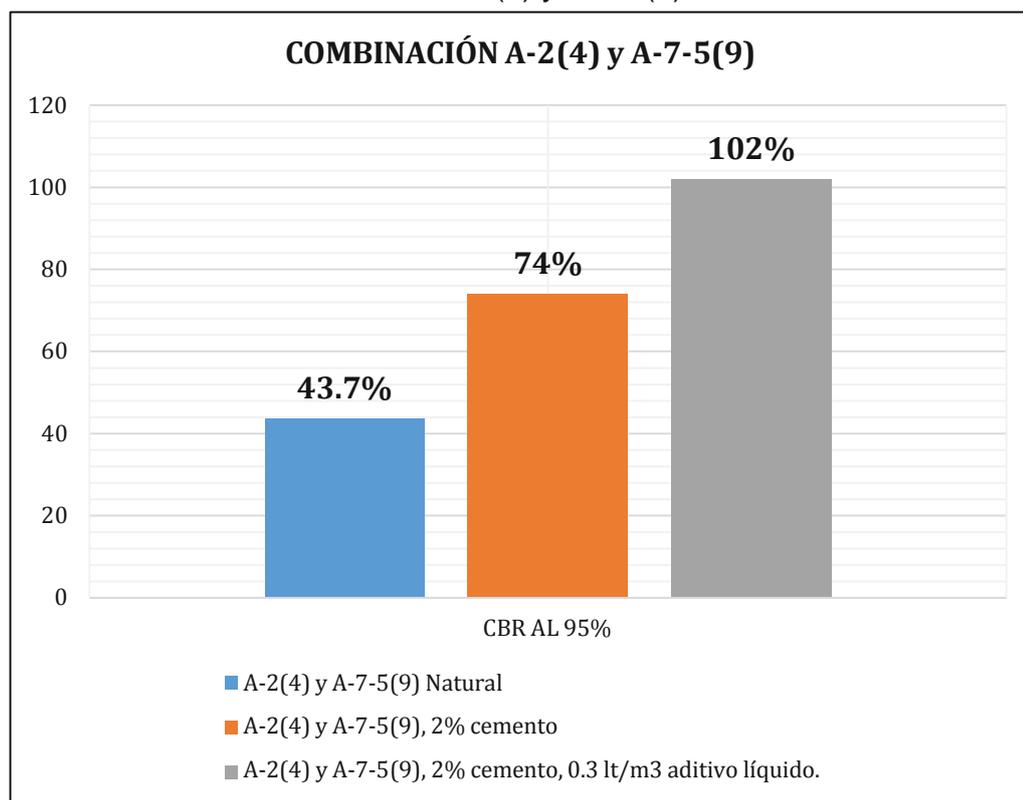
Fuente: Elaboración propia.

Tabla IV.2.  
Muestra: Combinación A-2(4) 85% y A-7-5(9) 15%

COMBINACIÓN	CBR AL 95%	M.D.S	O.C.H
A-2(4) y A-7-5(9) Natural	43.7%	1.964 gr/cc	11.09%
A-2(4) y A-7-5(9), 2% cemento	74%	1.964 gr/cc	11.09%
A-2(4) y A-7-5(9), 2% cemento, 0.3 lt/m3 aditivo líquido.	102%	1.964 gr/cc	11.09%

Fuente: Elaboración propia.

Figura IV.2.  
Combinación A-2(4) y A-7-5(9)



Fuente: Elaboración propia.

Tabla IV.3.

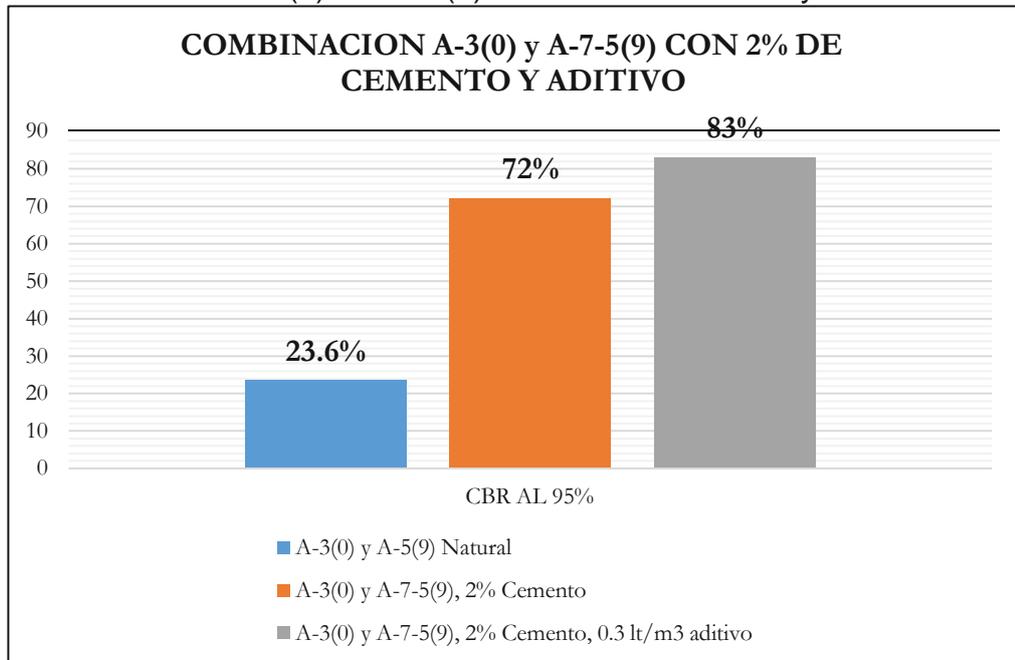
Muestra: Combinación A-3(0) 85% y A-7-5(9) 15%

COMBINACION	CBR AL 95%	M.D.S	O.C.H
A-3(0) y A-7-5(9) Natural	23.6%	1.768 gr/cc	13.54%
A-3(0) y A-7-5(9), 2% cemento	72%	1.768 gr/cc	13.54%
A-3(0) y A-7-5(9), 2% cemento, 0.3 lt/m3 aditivo líquido.	83%	1.768 gr/cc	13.54%

Fuente: Elaboración propia.

Figura IV.3.

Combinación A-3(0) Y A-7-5(9) Con 2% de Cemento y Aditivo



Fuente: Elaboración propia.

## 4.2. DISCUSIÓN

En concordancia a los antecedentes de la investigación realizadas en la ciudad de Piura por el tesista investigador Edson Atarama Mondragón (2015), donde los suelos estudiados en estado natural fueron arena arcillosa y arcillas inorgánicas (A-2-6), con CBR medidos en el rango de 5% al 30% y gravas arenosas mal gravadas A-1-a con CBR medidos en el rango de 33% al 95%. Aplicando aditivo PROES con dosificación entre (0.20 lt/m<sup>3</sup> y 0.30 lt/m<sup>3</sup>), y cemento entre (50 y 60 kg/m<sup>3</sup>) obtuvo CBR al 95% en el rango de 116.4% al 129.9%.

Mientras tanto los suelos estudiados en estado natural en la investigación aplicada en la carretera del AA.HH El Milagro, Distrito de San Juan Bautista – Loreto, fueron A-4(1) y combinaciones de 85% de A-2-4(0) con 15% de A-7-5(9) y de 85% de A-3(0) con 15% de A-7-5(9), donde se obtuvo CBR medidos en el rango de 14.4% al 43.7%. Aplicando aditivo PROES con una dosificación de 0.30 lt/m<sup>3</sup> y cemento de 2% (40 kg/m<sup>3</sup>) se obtuvo CBR medidos en el rango de 43.2% al 102%.

Comparando los resultados podemos determinar que si bien es cierto el aditivo PROES si aumenta la resistencia de los suelos, sin embargo, analizando ambos resultados debemos tener en cuenta que las dosificaciones aplicadas tanto en aditivo como en cemento en ambos sectores es diferente.

## CONCLUSIONES

**Primero:** Las pruebas realizadas en la carretera demuestran que efectivamente los ensayos con la incorporación del aditivo PROES, si influye considerablemente en la estabilización del suelo en la carretera Macusani – Ituata.

**Segundo:** La resistencia mecánica del afirmado aumenta su valor confirmándose una mejoría en los resultados de las pruebas CBR, con un aumento en los resultados de las pruebas considerablemente en el material con aditivo con respecto al material sin aditivo.

**Tercero:** Mediante estos resultados, hemos podido determinar de qué podemos trabajar mejor en la zona realizando combinaciones. Donde utilizamos los materiales que existe en gran volumen como: A-3(0) en 85% y A-7-5(9) en 15% de un (23.6 a 83) % triplicando el CBR de natural a uso con aditivos donde alcanzo un 352%.

## RECOMENDACIONES

Se recomienda la siguiente:

- Primero:** Acorde a la investigación y comparando los resultados, recomendamos trabajar más con el tipo de muestras de suelo combinando A-3(0) y A-7-5(9) por haber alcanzado un 83%, así mismo A-2-4(0) y A-7-5(9) por alcanzar un 102%, ya que descubrimos que con estas dosificaciones de mezcla obtenemos un suelo más resistente que los demás.
- Segundo:** También podemos trabajar con el suelo no combinado como el A- 2-4(0), porque esta con la mezcla de los aditivos (sólido y líquido- PROES) al obtención del CBR es mayor 135%; no pudimos encontrar exactamente porque la capacidad de la prensa de CBR de la universidad es solo de 1000 libras
- Tercero:** Realizar los estudios de estabilización de suelos de la zona, para reducir los costos considerablemente.
- Cuarto:** Una vez estabilizado el suelo, se debe colocar una capa asfáltica que no supere los 6cm de espesor, siendo la mayoría de ellos tratamientos asfálticos delgados de 1 pulgada.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Atarama M. 2015. Evaluación de la transitabilidad para caminos de bajo tránsito estabilizados con aditivo PROES. Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería Civil. Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Civil. 2015.

León F. 2016. Funcionalidad del aditivo sólido rocatech 70/30 como aglomerante para una base estabilizada con la tecnología PROES en el proyecto red vial n°3 – cusco. Universidad Continental – Huancayo. Facultad de Ingeniería Civil. Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Civil. 2015.

Serigos P. 2009. Rigidez a baja deformación de suelo de la formación pampeado y cemento portland. Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ingeniería. Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Civil.

López. R. 2012. Estabilización de suelos cohesivos por medio de arena volcánica y cal viva. Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería. Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Civil.

Ariza. D. 2004. Estabilización de suelos mediante el uso de un aditivo químico a base de compuestos inorgánicos. Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Fisiomecánicas. Tesis para optar el título de Ingeniero Civil.

Barrera y Garnica 2002. Compresibilidad.ADDREBIND. 2016. Estabilización de suelos con polímero. [En línea] USA. Disponible en web: <http://aggrebind.com/es/acerca-de-aggrebind/que-es-unpolimero-que-es-la-estabilizacion-del-suelo>

Montejo F.2002. Ingeniería de pavimentos para carreteras. 2ª ed. Bogotá: Agora Editores, 733p.

Gutiérrez y Montes .2010. Estabilización de suelos Ministerio de Transportes y Comunicaciones. 2008. Manual de Diseño de carreteras.

Ministerio de Transportes y Comunicaciones. 2013. Manual de Diseño de carreteras. En línea ([http://www.wikivia.org/wikivia/index.php/Ensayo\\_CBR](http://www.wikivia.org/wikivia/index.php/Ensayo_CBR)) IECA.2011.Estabilización de suelos con cemento.

RAVINES M.2010. Pruebas con un producto enzimático como agente estabilizador de los suelos para carreteras. Tesis (Título de Ingeniero Civil). Piura, Perú, Universidad de Piura, Facultad de Ingeniería. Enlínea:[http://www.est.uc3m.es/esp/nueva\\_docencia/leganes/ing\\_industrial/estadística\\_industrial/doc\\_grupo2/archivos/fiabilidad.pdf](http://www.est.uc3m.es/esp/nueva_docencia/leganes/ing_industrial/estadística_industrial/doc_grupo2/archivos/fiabilidad.pdf))

Laboratorio de Mecánica de Suelo – Universidad Científica del Perú, Iquitos.  
PROESTECH – Estabilizando Caminos desde 1999.

National Lime Association. Manual de suelo estabilizado con cal. The versatile chemical. Boletín 326.2004.429.)

Barrera, M., & Garnica, P. (2002). Introducción a la mecánica de suelos no saturados en vías terrestres: Instituto Mexicano de Transportes. Obtenido de <http://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt198.pdf>

Castro, B. (2009). Características de los equipos y programas: Escuela Superior Politecnica del Litoral, Ecuador. Obtenido de <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/6124/8/capitulo%203.pdf>

MTC, M. d. (2000). Compactación de suelos en laboratorio utilizando una energía modificada MTC E 115-2000. Lima.

MTC, M. d. (2000). Manual de ensayos de materiales para carreteras. Lima.

MTC, M. d. (2001). Manual de diseño Geométrico para carreteras. Lima

MTC, M. d. (2004). Norma Técnica de Estabilizadores químicos, MTC E 1109 - 2004. Lima.

MTC, M. d. (2008). Manual de carreteras no pavimentadas de bajo volumen de tránsito. Lima.

MTC, M. d. (2008). Manual de diseño de carreteras pavimentadas de bajo volumen de tránsito. Lima.

MTC, M. d. (2008). Manual para la conservación de carreteras no pavimentadas de Bajo volumen de Transito - Volumen 1. Lima.

MTC, M. d. (2011). Manual para el diseño de caminos no pavimentados de bajo tránsito.

MTC, M. d. (2013). Manual de Carreteras: Especificaciones técnicas generales para la construcción. Lima.

MTC, M. d. (2013). Manual de Carreteras: Mantenimiento o Conservación vial. Lima. MTC, M. d. (2013). Manual de Carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos Lima. MTC, M. d. (s.f.). Manual de Carreteras: Mantenimiento y conservación Vial. Lima.

## **ANEXOS**

### **Anexo 1**

#### **MATRIZ DE CONSISTENCIA**

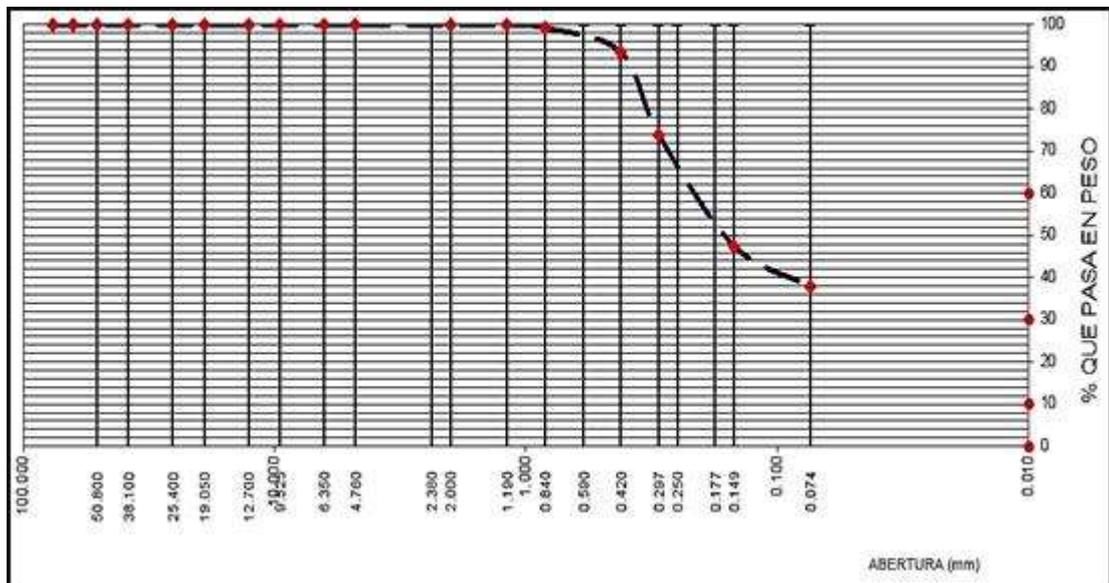
PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPOTESIS	VARIABLES	DIEMNSIONES	INDICADORES	METODOLOGIA
<p><b>Problema general:</b> ¿Cuál es el efecto de la estabilización química en la consolidación del pavimento de suelo afirmado en la carretera Macusani - Ituata - Puno 2017?</p> <p><b>Problema específico:</b> ¿Cuál es el efecto de la estabilización química en la resistencia mecánica del suelo afirmado en la carretera de Macusani - Ituata - Puno 2017?</p>	<p><b>Objetivo general:</b> Evaluar el efecto de la estabilización química en la consolidación del pavimento de suelo afirmado en la carretera Macusani - Ituata - Puno 2017</p> <p><b>Objetivo específico:</b> Determinar el efecto de la estabilización química en la resistencia mecánica del suelo afirmado en la carretera de Macusani - Ituata - Puno 2017</p>	<p><b>Hipótesis general:</b> El efecto de la estabilización química en la consolidación del pavimento de suelo afirmado es positiva en la carretera Macusani - Ituata - Puno 2017</p> <p><b>Hipótesis específica:</b> El efecto de la estabilización química en la resistencia mecánica del suelo afirmado es significativa en la carretera de Macusani - Ituata - Puno 2017</p> <p>El efecto de la estabilización química en la acción química en la</p>	<p>VARIABLE INDEPENDIENTE (x) Estabilización química</p> <p>VARIABLE DEPENDIENTE (y) Consolidación del pavimento</p>	<p>Aditivo Proes</p> <p>Resistencia mecánica a la compresión</p>	<p>Proporción de mezclado</p> <p>Diseño de mezcla con aditivo PROES</p> <p>Capacidad portante Granulometría Ensayos CBR</p> <p>Ensayos proctor modificado</p> <p>Capacidad portante Granulometría Ensayos CBR</p> <p>Ensayos proctor modificado</p>	<p><b>TIPO:</b> Cuantitativa, aplicado, causal</p> <p><b>NIVEL:</b> Explicativo, analítico</p> <p><b>DISEÑO:</b> Evaluativa</p> <p><b>MÉTODO:</b> Deductivo - inductivo</p> <p><b>POBLACIÓN:</b> Carretera de Macusani - Ituata - Puno</p> <p><b>MUESTRA:</b> Desde la progresiva 0+000 HASTA 0+3000</p> <p><b>TÉCNICAS:</b> Observación Ensayos INSTRUMENTOS: Fichas De Observación estructuralada Certificaciones Ensayos de laboratorio</p> <p><b>PROCEDIMIENTOS:</b> ANOVA. t de students</p>

## **Anexo 2**

### **ENSAYOS DE LABORATORIO**

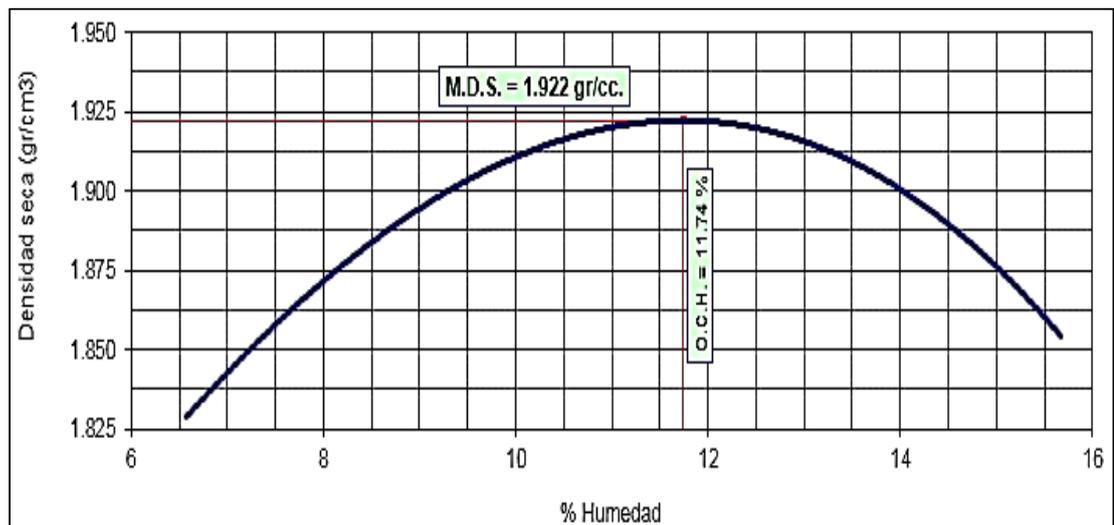
### Clasificación de suelos A-4

Tamices ASTM	Abertura en mm.	Peso Retenido	%Retenido Parcial	%Retenido Acumulado	% que Pasa	Especific.	Observaciones
2 1/2"	63.500						L. Líquido : NP
2"	50.800						L. Plástico : NP
1 1/2"	38.100						Ind. Plástico : NP
1"	25.400						Clas. SUCS : SM
3/4"	19.050						Clas. AASHTO : A-4 (1)
1/2"	12.700						
3/8"	9.525						
1/4"	6.350						
Nº4	4.760				100.00		
Nº10	2.000	0.13	0.07	0.07	99.93		
Nº20	0.840	1.43	0.78	0.85	99.15		
Nº40	0.420	10.41	5.65	6.49	93.51		
Nº50	0.297	36.05	19.55	26.05	73.95		
Nº100	0.149	48.79	26.46	52.51	47.49		
Nº200	0.074	17.86	9.69	62.20	37.80		
Pasa Nº200		69.70	37.80				



## Compactación y humedad de suelos

Profundidad	: Acopio - Mezcla							
Fecha de ensayo	: 12/08/2016							
Fecha de muestreo	: 01/08/2016							
<b>1.- Compactación</b>								
Prueba N°	1	2	3	4				
Numero de capas	5	5	5	5				
Numero de golpes	25	25	25	25				
Peso suelo + molde (gr.)	5964	6096	6166	6148				
Peso molde (gr.)	4134	4134	4134	4134				
Volumen del molde (cm <sup>3</sup> )	939	939	939	939				
Peso suelo compactado (gr.)	1830	1962	2032	2014				
Densidad húmeda (gr/cm <sup>3</sup> )	1.949	2.089	2.164	2.145				
<b>2.- Humedad (%)</b>								
N° Recipiente	1	2	3	4	5	6	7	8
Recipiente + suelo húmedo (gr.)	160.63	184.79	166.98	166.94	134.28	125.84	135.59	141.24
Recipiente + suelo seco (gr.)	153.00	176.56	155.21	157.08	125.37	116.74	122.53	127.77
Peso de recipiente (gr.)	38.51	49.66	39.80	48.62	53.33	49.14	41.35	39.45
Peso de agua (gr.)	7.63	8.23	11.77	9.86	8.91	9.10	13.06	13.47
Peso de suelo seco (gr.)	114.49	126.90	115.41	108.46	72.04	67.60	81.18	88.32
Humedad (%)	6.66	6.49	10.20	9.09	12.37	13.46	16.09	15.25
Promedio Humedad (%)	6.57	6.57	10.20	9.64	12.91	13.46	16.09	15.67
Densidad Seca (gr/cm <sup>3</sup> )	1.829	1.829	1.906	1.906	1.916	1.916	1.854	1.854



## CBR. Muestra c-4

Profundidad	:	Acopio - Mezcla						
Fecha de ensayo	:	12/08/2016						
Fecha de muestreo	:	01/08/2016						
Molde	Nº	2		7		21		
Capas	Nº	5		5		5		
Golpes por capa	Nº	12		25		56		
Condición de muestra		<b>Hum. Optim.</b>	<b>Saturada</b>	<b>Hum. Optim.</b>	<b>Saturada</b>	<b>Hum. Optim.</b>	<b>Saturada</b>	
Peso de suelo húmedo + molde	Gr.	12660	13085	13345	13331	13552	13785	
Peso del molde	Gr.	8505	8505	8798	8798	8629	8629	
Volúmen del suelo	c.c.	2372	2372	2341	2341	2341	2341	
Peso del suelo húmedo	Gr.	4155	4580	4547	4593	4923	5156	
Densidad húmeda	Gr/c.c.	<b>1.752</b>	<b>1.931</b>	<b>1.942</b>	<b>1.962</b>	<b>2.103</b>	<b>2.203</b>	
<b>HUMEDAD</b>								
Nº de Recipiente	Nº	4	5	6	7	8	9	
Peso del suelo húmedo + Recip.	Gr.	143.13	95.28	140.63	135.90	125.61	120.38	
Peso del suelo seco + Recip.	Gr.	134.01	84.74	130.20	123.03	117.05	111.45	
Peso de la Recipiente	Gr.	52.97	47.71	39.45	55.97	41.46	37.36	
Peso del agua	Gr.	9.12	10.54	10.43	12.87	8.56	9.53	
Peso del suelo seco	Gr.	81.04	37.03	90.75	67.06	75.59	74.09	
Humedad	%	11.25	28.46	11.49	19.19	11.32	12.86	
Densidad seca	Gr/c.c.	<b>1.575</b>	<b>1.503</b>	<b>1.742</b>	<b>1.646</b>	<b>1.889</b>	<b>1.952</b>	
<b>EXPANSION</b>								
Fecha	Hora	Tiempo días	Dial (pulg.)	Expansión %	Dial (pulg.)	Expansión %	Dial (pulg.)	Expansión %
1 de agosto de 2016	10:12	0	0.170	0.00	0.176	0.00	0.171	0.00
2 de agosto de 2016	11:20	1	0.252	1.63	0.257	1.61	0.214	0.85
3 de agosto de 2016	12:32	2	0.253	0.02	0.259	0.04	0.216	0.04
4 de agosto de 2016	12:15	3	0.253	0.00	0.259	0.00	0.216	0.00
5 de agosto de 2016	12:05	4	0.253	0.00	0.259	0.00	0.216	0.00

## Curva de compactación

