

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL**



**ESTABILIZACIÓN IÓNICA DE SUELOS CON TERRASIL
EN LOS CONTRATOS DE MANTENIMIENTO Y
CONSERVACIÓN VIAL**

INFORME DE SUFICIENCIA

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO CIVIL

MIGUEL ANGEL CRISTÓBAL CALDERÓN

Lima- Perú

2015

"A MIS PADRES, POR SU AMOR, TRABAJO Y SACRIFICIOS EN TODOS ESTOS AÑOS, GRACIAS
A USTEDES HE LOGRADO LLEGAR HASTA AQUÍ Y CONVERTIRME EN LO QUE SOY".

	Pág.
RESUMEN	3
LISTA DE CUADROS	5
LISTA DE FIGURAS	6
INTRODUCCIÓN	8
CAPÍTULO I: ASPECTOS GENERALES	9
1.1 OBJETIVOS	9
1.2 ALCANCE	9
CAPÍTULO II: CARRETERAS NO PAVIMENTADAS	11
2.1 DEFINICIÓN DE CARRETERAS	11
2.2 CARRETERAS NO PAVIMENTADAS	11
CAPÍTULO III: ESTABILIZACIÓN DE CARRETERAS NO PAVIMENTADAS	17
3.1 PRINCIPIOS Y FUNDAMENTOS GENERALES DE LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS	17
3.1.1 Estabilización mecánica	17
3.1.2 Estabilización química	17
3.2 MÉTODOS DE ESTABILIZACIÓN	21
3.2.1 Estabilización Mecánica	21
3.2.2 Estabilización Química	23
CAPÍTULO IV: ESTABILIZACIÓN DE CARRETERAS CON TERRASIL	38
4.1 DESCRIPCIÓN DEL TERRASIL	38
4.1.1 Organo Silanos	39
4.1.2 Información sobre los componentes	41
4.1.3 Propiedades físicas y químicas	41
4.2 ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON TERRASIL EN LOS CONTRATOS DE CONSERVACIÓN Y MANTENIMIENTO VIAL	41
4.2.1 Proyecto "Servicio de Conservación Vial por Niveles de Servicio del Corredor Vial EMP. PE 04-B (Hualapampa) – Sondor – Huancabamba – Pacaibamba – Socchabamba – Puesto Vado Grande/	41

Sondor – Tabaconas – EMP.PE – 5N (Ambato)/ Huancabamba –
Canchaque y Socchabamba – Ayabaca”

CAPÍTULO V: METODOLOGÍA	50
5.1 EJEMPLO DE APLICACIÓN: PROYECTO “SERVICIO DE CONSERVACIÓN VIAL POR NIVELES DE SERVICIO DEL CORREDOR VIAL EMP. PE 04-B (HUALAPAMPA) – SONDOR – HUANCABAMBA – PACAIBAMBA – SOCCHABAMBA – PUESTO VADO GRANDE/ SONDOR – TABACONAS – EMP.PE – 5N (AMBATO) / HUANCABAMBA – CANCHAQUE Y SOCCHABAMBA – AYABACA	50
5.1.1 Estudio de suelo de fundación	50
5.1.2 Condición Funcional (IRI) inicial	50
5.1.3 Soluciones de ingeniería – Tramo II	51
5.1.4 Diseño estructural	52
5.1.5 Proceso Constructivo	55
5.2 ENSAYOS DE LABORATORIO	59
5.2.1 Estabilizadores químicos	60
5.2.2 Caracterización del Suelo	61
5.2.3 Propiedades de desempeño	62
CAPÍTULO VI: EVALUACIÓN TÉCNICO ECONÓMICA DEL ADITIVO	67
CAPÍTULO VII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	73
7.1 CONCLUSIONES	73
7.2 RECOMENDACIONES	75
BIBLIOGRAFÍA	76
ANEXOS	77

RESUMEN

Las distintas actividades de conservación de los caminos no pavimentados se realizan a intervalos de tiempo diferentes e involucran variados niveles de trabajo. Tanto la periodicidad de las actividades como el trabajo específico requerido dependen de la magnitud del deterioro, volúmenes de tránsito, calidad de los materiales que conforman la estructura y sub rasante, condiciones climáticas, y principalmente, del nivel de servicio al que se requiere mantener el camino.

En esta investigación se presenta los resultados de los ensayos de laboratorio realizados en varios tipos de suelos peruanos y un aditivo estabilizador de suelos, el Terrasil. El aditivo fue proporcionado por la empresa BREM ENVIRONMENTAL SOLUTIONS S.A.C. distribuidor del producto en el Perú.

Se han realizado ensayos estándar de clasificación de suelos, contenido de humedad y ensayos especiales de compactación Proctor Modificado, CBR y compresión no confinada para el material natural y con distintos porcentajes del estabilizador de suelos utilizado en la conservación y mantenimiento de vías no pavimentadas.

TERRASIL está compuesto al 100% por organosilanos, y es capaz de reaccionar con los suelos a nivel molecular. Forma enlaces Si-O-Si (siloxano) con las moléculas de la superficie, cuya elevada fortaleza aporta una eficacia prolongada en el tiempo. El producto genera una membrana transpirable, que confiere propiedades hidrófobas, al mismo tiempo que permite la evaporación de agua. Además, mejora la adherencia con polímeros y betunes y elimina el índice de plasticidad de los suelos.

Posee grupos Silanol, que reaccionan con los silicatos presentes en el suelo, transformando su superficie y confiriéndoles propiedades hidrófobas permanentes. Así, el suelo repelerá las moléculas de agua, impermeabilizándolo y evitando los problemas derivados de la presencia de la misma.

La evaluación de resultados indica que para varios tipos de suelos ensayados puede lograrse sustantivos incrementos en la capacidad de soporte de los suelos con la adición del aditivo. El incremento en los valores de CBR es variable, en función de la naturaleza de los suelos y el porcentaje del aditivo, por

lo que se recomienda realizar ensayos de laboratorio previo a su utilización, para determinar el porcentaje óptimo del aditivo a ser usado en la estabilización.

En la parte final del trabajo se hace mención especial de un proyecto desarrollado actualmente en la región de Loreto, cuyo objetivo fue cuantificar objetivamente los beneficios técnicos de la aplicación del Terrasil como estabilizador de suelos en la Selva peruana, además de definir dosis particulares para aplicaciones en caminos rurales.

INTRODUCCIÓN

La inestabilidad de los suelos es uno de los principales problemas que presentan las carreteras no pavimentadas; para corregir este problema se usan variadas técnicas de estabilización de suelos; una de las formas de estabilización de suelos, es aquella que se realiza utilizando productos químicos no tóxicos que dotan a estos suelos (Carreteras) un mejor comportamiento en servicio; para tal efecto existe en el mercado un variado grupo de empresas dedicadas a la producción de productos químicos estabilizadores, los cuales a su vez buscan proporcionar las bondades de sus respectivos productos y el menor costo en el que se incurriría si se optara por usar dichos productos.

La estabilización de suelos para el diseño y construcción de pavimentos se define como un mejoramiento de los materiales de terreno de fundación, subbase y base, incrementando de manera notoria su resistencia y capacidad de carga y disminuyendo su sensibilidad al agua y a los cambios volumétricos durante el ciclo de humedecimiento y secado.

La presente investigación permitirá conocer las ventajas técnicas, económicas y ambientales del estabilizador químico Terrasil, el cual consiste en el uso de un organosilano iónico, capaz de repeler el agua, eliminar el hinchamiento y la absorción de los suelos. Logrando conseguir una mejora de cualquier tipo de suelo, al conseguir que el suelo se comporte en todo momento en condiciones "secas", lográndose de esta manera establecer un sistema eficaz del suelo tratado.

LISTA DE CUADROS		Pág.
Cuadro N°2.1	Características básicas para la superficie de rodadura de las Carreteras No Pavimentadas de Bajo Volumen de Transito.	12
Cuadro N°2.2 :	Infraestructura Vial del País.	13
Cuadro N°4.1 :	Características del material de cantera.	38
Cuadro N°4.2:	Resultados de las muestras tratadas.	43
Cuadro N°4.3:	Características del material tratado con 1kg/m ³ de Terrasil.	44
Cuadro N°4.4:	Características del material tratado con 0.5kg/m ³ de Terrasil y 1% de cemento.	44
Cuadro N°4.5:	Análisis mecánico por tamizado (muestra tratada con 1kg/m ³ de Terrasil).	45
Cuadro N°4.6:	Análisis mecánico por tamizado (muestra tratada con 0.5kg/m ³ de Terrasil y 1% de cemento).	46
Cuadro N°4.7:	Resultados de C.B.R.	48
Cuadro N°4.8:	Control de Densidades.	47
Cuadro N°5.1:	Caracterización de las mezclas de suelos para el Aeródromo de San Lorenzo.	61
Cuadro N°5.2:	Caracterización de las mezclas de suelos para el Aeródromo de Sepahua.	62
Cuadro N°5.3:	Resumen de Máxima densidad Seca y Optimo Contenido de Humedad.	63
Cuadro N°5.4:	Resumen de los Resultados de C.B.R. y Ensayo de Compresión No Confinada de Suelos Químicos para el Proyecto: Aeródromo de San Lorenzo	64
Cuadro N°5.5:	Resumen de los Resultados de C.B.R. y Ensayo de Compresión No Confinada de Suelos Químicos para el Proyecto: Aeródromo de Sepahua.	64
Cuadro N°6.1:	Rehabilitación y mantenimiento de caminos rurales (Fuente Provias Nacional).	68
Cuadro N°6.2:	Cálculo de Costos Directos de Mejoramiento a Nivel de Afirmado.	69
Cuadro N°6.3:	Cálculo de Costos Directos de Mejoramiento a Nivel de Afirmado con Terrasil.	70
Cuadro N°6.4:	Costos de Inversión, Operación y Mantenimiento de Carpetas de afirmado simple y afirmados estabilizados con Terrasil.	71

LISTA DE FIGURAS		Pág.
Figura N°2.1:	Red Vial Nacional Según Tipo de Superficie de Rodadura (DGCF).	12
Figura N°2.2:	Camino de tierra.	16
Figura N°2.3:	Camino de a nivel de afirmado.	16
Figura N°3.1:	Distribución de esfuerzos cuando se aplica estabilización con geomalla.	23
Figura N°3.2:	Colocación de cal para estabilización de vía.	28
Figura N°3.3:	Efecto del contenido de cal sobre la plasticidad de la Arcilla Londres.	30
Figura N°3.4:	Suelos granulares cementados a través de puntos de contacto.	32
Figura N°4.1:	Efecto del terrasil sobre el suelo Tratado.	38
Figura N°4.2:	Superficie hidrófoba creada por el silano (Izquierda).	39
Figura N°4.3:	Distribución Química de los Organo-Silanos.	40
Figura N°4.4:	Esquema de los tramos a intervenir.	42
Figura N°4.5:	Curva Granulométrico (muestra tratada con 1kg/m ³ de Terrasil).	47
Figura N°4.6:	Curva Granulométrico (muestra tratada con 0.5kg/m ³ de Terrasil y 1% de cemento).	47
Figura N°4.7:	Panel fotográfico del proceso constructivo.	49
Figura N°5.1:	C.B.R. de diseño.	50
Figura N°5.2:	I.R.I característico según sector.	50
Figura N°5.3:	Sectorización de los tramos.	51
Figura N°5.4:	Resultados del aditivo en el tramo 08, tramo 02 y tramo 03.	51
Figura N°5.5:	Determinación de espesor según diseño del método NAASRA.	55
Figura N°5.6:	Estructura del pavimento recomendada.	55
Figura N°5.7:	Proceso constructivo.	56
Figura N°5.8:	Proceso constructivo.	56
Figura N°5.9:	Proceso constructivo.	56
Figura N°5.10:	Proceso constructivo	57
Figura N°5.11:	Proceso constructivo	58
Figura N°5.12:	Proceso constructivo	58

Figura N°5.13:	Estado actual de la pista del aeródromo de San Lorenzo.	59
Figura N°5.14:	Probetas tratadas sometidas a un recipiente con agua.	65
Figura N°5.15:	Probetas tratadas sometidas a un recipiente con agua.	65
Figura N°5.16:	Probetas en estado natural sometida a recipiente con agua.	66

CAPÍTULO I: ASPECTOS GENERALES

La red vial es la base del desarrollo sostenido de casi la totalidad de las actividades comerciales de un país, y es un factor importante en la generación de beneficios sociales. Las carreteras son el sistema de circulación por el que transitan bienes y servicios (el transporte es un servicio y lleva bienes). Todos los productos de importación como de exportación dependen de estas redes. Cuanto mejor sea la red vial disminuirán más el costo de traslado; con lo que los precios de los bienes disminuyen, también bajan los tiempos de recorrido con lo cual se logra utilidades mayores.

1.1. OBJETIVOS

El objetivo del presente estudio es presentar un nuevo producto que incluya nuevas tecnologías para aplicar mejoras en superficies de caminos no pavimentados, alcanzando una mayor serviciabilidad; aplicando una solución básica que otorgue una mayor calidad de vida a los usuarios y con un costo de conservación menor. Otorgarles a estos caminos condiciones que permitan generar una redistribución y/o mayor nivel de flujos de tránsito en aquellos caminos, que por su bajo volumen de tránsito actual, no son posibles postularlos a un mejoramiento mayor o cambio de estándar. Para esto se propone el uso del Terrasil como estabilizante para carpetas de rodado a nivel de afirmado, investigar su efectividad de la aplicación de esta y verificar su comportamiento en diversos tipos de suelos a través de ensayos de laboratorio y pruebas de terreno para luego definir las condiciones que debe reunir un camino para que sea apto para ser estabilizado, determinar la dosificación del Terrasil que requiera utilizarse para distintas características de los suelos, condiciones climáticas y finalmente recomendar la dosificación para los suelos en estudio.

1.2. ALCANCE

El presente estudio presenta dos proyectos en donde se aplica el aditivo estabilizador.

El primer proyecto corresponde al “Servicio de Conservación Vial por Niveles de Servicio del Corredor Vial EMP. PE 04-B (Hualapampa) – Sondor – Huancabamba – Pacaibamba – Socchabamba – Puesto Vado Grande/ Sondor – Tabaconas – EMP.PE – 5N (Ambato)/ Huancabamba – Canchaque y

Socchabamba – Ayabaca”, donde se usa el Terrasil como aditivo mejorador de las características físico mecánicas del material de recarga (suelo granular) que será usado para la conformación de la base estabilizada, mostrándose los resultados y dosificaciones del producto.

El segundo proyecto corresponde a evaluar las propiedades hidrófobas que confiere el Terrasil en comparación con otros estabilizadores para la Rehabilitación y/o Mejoramiento del Aeródromo de San Lorenzo, distrito de Barranca, Provincia Datem del Marañón, departamento de Loreto y Rehabilitación y/o Mejoramiento del Aeródromo de Sepahua, distrito de Sepahua, Provincia de Atalaya, Departamento de Ucayali, sometiendo a los ensayos correspondientes según la norma técnica de estabilizadores químicos MTC E 1109-2004, mostrándose los resultados y dosificación del producto.

CAPÍTULO II: CARRETERAS NO PAVIMENTADAS

2.1 DEFINICIÓN DE CARRETERAS

Una carretera es una vía de dominio y uso público, proyectada y construida fundamentalmente para la circulación de vehículos terrestres. La carretera se distingue de un camino porque la primera está especialmente concebida para la circulación de vehículos de transporte. El diseño de una carretera y su respectiva superficie de rodadura responde a una necesidad justificada social y económica; es decir, ambos conceptos se correlacionan para establecer las características técnicas y físicas que debe tener la carretera que se proyecta a fin de que los resultados buscados sean óptimos, en beneficio de la comunidad que requiere del servicio, la cual normalmente se encuentra en situación de limitaciones muy estrechas de recursos locales y nacionales.

Las carreteras han sido desde siempre el principal medio de desplazamiento de viajeros, y la vía principal para la distribución de mercancías. Al conectar los pueblos y comunidades con las grandes ciudades, y al fortalecer la integración de los países, las carreteras han sido indispensables en el desarrollo de diversas actividades y regiones en todo el mundo. Actualmente, ante un mundo cada vez más integrado, que intercambia más bienes y servicios, la importancia de las carreteras se ha incrementado notablemente, convirtiéndose en verdaderas vías que impulsan la competitividad de la economía y también el desarrollo social.

2.2 CARRETERAS NO PAVIMENTADAS

El Perú posee una red vial de 96,000 km de los cuales solo el 16% están pavimentados (datos septiembre de 2008). Los caminos no pavimentados constituyen el 84% de la red vial y están compuestos principalmente por carpetas de rodado de ripio o de tierra.

La clasificación por su función o jurisdicción está dada como sigue

- a) Carreteras de la Red Vial Nacional
- b) Carreteras de la Red Vial Departamental
- c) Carreteras de la Red Vial Vecinal o Rural

De las cuales todas son administradas por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC), y cuyas función es delega a Provias Nacional en el caso

de rutas nacionales; y a Provias Descentralizado en el caso de rutas departamentales, vecinales y caminos rurales.

Cuadro N°2.1: Características básicas para la superficie de rodadura de las Carreteras No Pavimentadas de Bajo Volumen de Transito.

Carretera de BVT	IMD Projectado	Ancho de Calzada (m)	Estructuras y Superficie de Rodadura Alternativas (**)
T3	101 - 200	2 carriles 5.50 - 6.00	Afirmado (material granular, grava de tamaño máximo 5 cm homogenizado por zarandeo o por chancado) con superficie de rodadura adicional (min. 15 cm), estabilizada con finos ligantes u otros; perfilado y compactado.
T2	51 - 100	2 carriles 5.50 - 6.00	Afirmado (material granular natural, grava seleccionada por zarandeo o por chancado con tamaño máximo 5 cm); perfilado y compactado, min. 15 cm.
T1	16 - 50	1 carril(*) o 2 carriles 3.50 - 6.00	Afirmado (material granular natural, grava seleccionada por zarandeo o por chancado con tamaño máximo 5 cm); perfilado y compactado, min. 15 cm.
T0	< 15	1 carril(*) 3.50 - 4.50	Afirmado (tierra) en lo posible mejorada con grava seleccionada por zarandeo, perfilado y compactado, min. 15 cm.
Trocha carrozable	IMD Indefinido	1 sendero (*)	Suelo natural (tierra) en lo posible mejorado con grava natural seleccionada; perfilado y compactado.

(*) Con plazoletas de cruce, adelantamiento o volteo cada 500 – 1000 m; mediante regulación de horas o días, por sentido de uso.

(**) En caso de no disponer gravas en distancia cercana las carreteras pueden ser estabilizado mediante técnicas de estabilización suelo-cemento o cal o productos químicos u otros.

Fuente: Manual para el diseño de carreteras no pavimentadas de bajo volumen de Tránsito. MTC, Marzo 2008.

Esta investigación está basada en incluir un método para mejorar los niveles de servicio de los caminos no pavimentados, los cuales no tienen una capa de asfalto, y se encuentran a nivel de afirmado.

Cuadro N°2.2: Infraestructura Vial del País

Red Vial (km)	Pavimentada	No Pavimentada	Sub Total Existentes	En F Poyecto	Total (Km)
Nacional	12,445	11,151	23,596	2,421	26,017
Departamental o Regional	1,500	21,500	23,000	6,000	29,000
Vecinal o Rural	700	78,300	79,000	2,000	81,000
	14,645	110,951	125,596	10,421	137,000

Fuente: XXIII Reunión del Consejo de Directores de Carretera de Iberia e Iberoamérica, Dirección General de Caminos y Ferrocarriles. MTC, Mayo 2011.

El objetivo básico de estos caminos es proporcionar accesibilidad a zonas urbanas y rurales durante todas las estaciones del año, y permitir el tránsito de diferentes tipos de vehículos. Es posible que la cantidad de caminos no pavimentados no disminuya significativamente en el tiempo, debido a que los recursos económicos generalmente son utilizados para la pavimentación y conservación de caminos nacionales y departamentales, como consecuencia de su mayor importancia geopolítica ya que absorben el 85% al 90% del tráfico (expresado como Transito Medio Diario Anual – TMDA) de toda la red vial administrada por el Ministerio de Transportes.

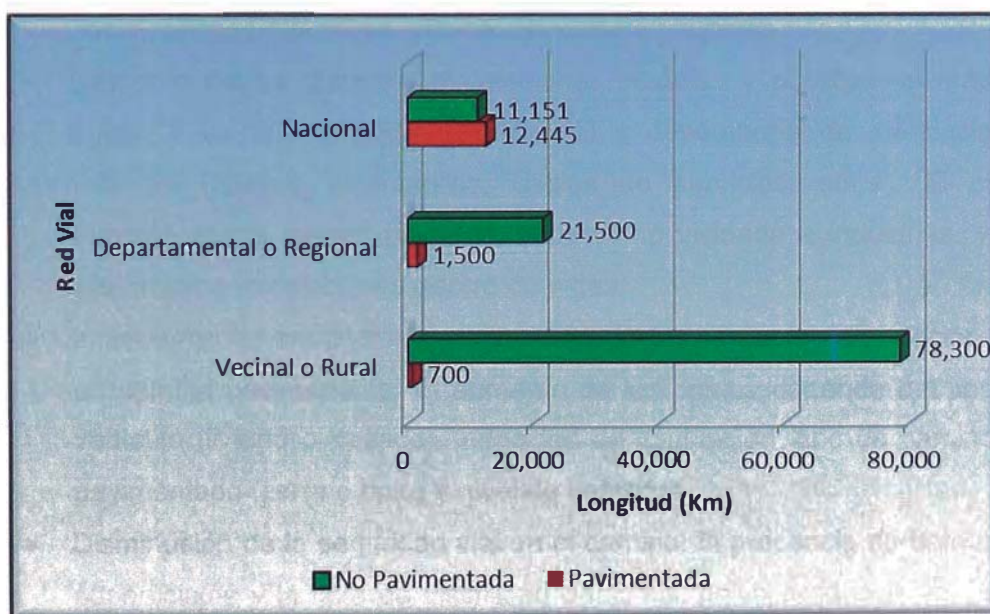


Figura N°2.1: Red Vial Nacional Según Tipo de Superficie de Rodadura (DGCF).

Debido al aumento del tráfico producto del crecimiento económico, y a la escasa conservación que reciben, los caminos no pavimentados presentan un estado de

deterioro elevado cuyas consecuencias visibles son diversas fallas superficiales (baches, encalaminado, ahuellamiento, material suelto, otros) y la generación de polvo. Más aun los caminos no pavimentados cuando alcanzan su máximo nivel de deterioro dejan de ser transitables.

Los caminos no pavimentados representan el 88% (Dirección General de Caminos y Ferrocarriles, MTC) de nuestra red vial y presentan problemas y condiciones particulares en comparación con los caminos pavimentados, siendo las principales:

- La serviciabilidad de los caminos no pavimentados varía drásticamente en cortos periodos de tiempo debido a las solicitaciones de tránsito y climáticas.
- Mayores requerimientos de conservación generan restricciones al tránsito produciendo un continuo impacto al usuario.
- Deterioro ambiental: se considera como deterioro ambiental el impacto del polvo y material suelto en el entorno natural (arboles, plantas, cultivos, fuentes de agua).
- Integración social: caminos en mal estado desincentivan la integración social, acceso a la salud, educación, cultura y turismo.
- Deterioro de los bienes e instalaciones privadas y públicas: el material suelto y el polvo afectan la vida útil y desempeño de instalaciones urbanas (postes, alcantarillas, cables de servicios, otros). El polvo también afecta bienes privados, tales como vivienda e industrias, y los artefactos e instalaciones dentro de estas.
- Incremento de los costos de operación de los vehículos en relación con un camino pavimentado. El aumento de los costos depende del tipo de vehículo (liviano o pesado), velocidad de circulación, tipo de camino no pavimentado (tierra o ripio) y nivel de deterioro.
- Disminución de la seguridad vial en el camino: la presencia de deterioros superficiales y la falta de visibilidad debido al polvo producen un mayor riesgo para los usuarios, lo que se traduce en un mayor número de accidentes.

Para mejorar el estándar de caminos no pavimentados existen cuatro alternativas:

- Pavimentar los caminos, lo cual involucra una alta inversión de recursos económicos que no se justifica para caminos no pavimentados de bajo volumen de tránsito.
- Aplicar tratamientos superficiales asfálticos, los cuales se pueden considerar un pavimento más económico, pero también requiere una alta inversión de recursos económicos.
- Implementar un programa de gestión y conservación de los caminos no pavimentados para restablecer periódicamente su estándar.
- Mejorar las propiedades físicas y/o mecánicas del suelo que conforman la carpeta de rodado mediante la utilización de la técnica de estabilización química del suelo.

Como consecuencia de la gran cantidad de caminos no pavimentados, el alto costo que involucra su conservación, ya que no se justifica su pavimentación, la opción de estabilizar químicamente los suelos que conforman las carpetas de rodado constituye una alternativa altamente recomendable.

Los caminos no pavimentados son la categoría más baja de caminos en la jerarquía de la red vial, y generalmente son caminos de bajos volúmenes de tráfico (TMDA < 200 veh/día). Los caminos no pavimentados son de tierra y ripio:

Caminos de tierra: son huellas formadas esencialmente por el tránsito de vehículos sobre el terreno natural, en algunos casos se suele remover la capa de suelo vegetal. Estos caminos en la mayoría de los casos no presentan ningún estándar de diseño. Se caracterizan por contener un alto porcentaje de material fino. La Figura N°2.2 muestra un típico camino de tierra de acceso a una zona rural.

Caminos a nivel de afirmado consisten en una capa superficial (10 a 20 cm) compuesta por material importado que cumple una gradación específica, principalmente grava con una cantidad reducida de finos. Además, este tipo de caminos presentan un mínimo estándar de diseño de ingeniería, el cual

especifica el alineamiento horizontal y vertical, la sección transversal, señalización y el sistema de drenaje (Figura N°2.3).



Figura N°2.2: Camino de tierra.



Figura N°2.3: Camino a nivel de afirmado

CAPÍTULO III: ESTABILIZACIÓN DE CARRETERAS NO PAVIMENTADAS

3.1. PRINCIPIOS Y FUNDAMENTOS GENERALES DE LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS

En las obras de infraestructura vial encontramos suelos con diversas características los cuales debemos darle el mejor uso para disminuir los costos de estas obras. Puede utilizar el material tal y como se presenta pero siempre haciendo algunas restricciones en el diseño debido a su calidad, desechar el material existente y sustituirlo por otro material de características adecuadas y por último modificar algunas características del material para que pueda cumplir con los requisitos mínimos que pide el diseño y que la calidad obtenida sea la adecuada. Es esta última alternativa la que da origen a la estabilización de suelos.

El propósito de la estabilización de caminos es mejorar el comportamiento mecánico y físico de las distintas capas granulares que conforman un camino, tales como carpetas de rodado, bases y sub-bases, y de la subrasante. También permite modificar ciertas propiedades del suelo con la finalidad que éste resista mejor la acción de agentes externos, tales como el agua, viento y el tránsito. Existen dos técnicas de estabilización de suelos: la mecánica y la química.

3.1.1 Estabilización mecánica: Tradicionalmente, la estabilización mecánica se define como un proceso que consiste en el mejoramiento de las propiedades físicas y mecánicas de un suelo sin la adición de materiales extraños, distinguiéndose dos procedimientos: mezcla de diferentes tipos de suelos y compactación.

3.1.2 Estabilización química: La estabilización química de suelos es una técnica que se basa en la aplicación de un producto genéricamente denominado estabilizador químico, el cual se debe mezclar íntima y homogéneamente con el suelo a tratar y curar de acuerdo a especificaciones técnicas propias del producto. La aplicación de un estabilizador químico tiene como objetivo principal transferirle al suelo tratado, en un espesor definido, ciertas propiedades tendientes a mejorar su comportamiento ya sea en la etapa de construcción y/o de servicio.

La estabilización química se utiliza como complemento a la estabilización mecánica. El principal interés es mejorar y hacer más duradera en el tiempo la superficie de rodado, incrementando la resistencia del suelo y mejorando su comportamiento en presencia de agua. Las propiedades que debe tener en cuenta un ingeniero y las cuales se pueden mejorar mediante la estabilización son las siguientes:

a) Estabilidad Volumétrica:

Los cambios de humedad dan origen a la expansión y contracción de muchos suelos, si estas expansiones no se controlan en alguna forma, originaran presiones las cuales pueden ocasionar graves deformaciones y rupturas en el pavimento. Las arcillas son las que más frecuentemente presentan estos problemas, un medio para modificar la arcilla expansiva consiste en transformarla en una masa rígida o granular cuyas partículas estén lo suficientemente ligadas para resistir la presión expansiva interna.

b) Resistencia:

Generalmente la resistencia de un suelo es más baja cuanto mayor sea el contenido de humedad. En suelos arcillosos la condición más alta de resistencia es cuando se calienta a temperaturas muy elevadas. La acción abrasiva del tránsito puede hacer que un material cohesivo se pulverice y pierda su cohesión. Dependiendo de la humedad y la energía de compactación se logran diferentes características de resistencia en un suelo arcilloso, ya que un suelo arcilloso compactado del lado seco en la curva de compactación presenta con la humedad de compactación un comportamiento relativamente **elástico** y con una resistencia relativamente alta; mientras que este mismo suelo compactado con una alta humedad, no obstante que su peso volumétrico seco sea alto, presentaría resistencias bajas y comportamiento **plástico o viscoso**, este efecto se debe a que una alta humedad produce en una arcilla efectos de repulsión entre sus partículas, proporcionando con ello que la cohesión sea menor que en el caso de emplear humedades de compactación bajas. La explicación a esto reside a la diferente estructuración que adoptan las arcillas al ser compactadas mediante procedimientos de compactación diferentes.

c) Permeabilidad:

No es difícil modificar la permeabilidad en suelos, esto se logra por varios métodos como compactación, en materiales arcillosos el uso de defloculantes puede reducir la permeabilidad significativamente; el uso de floculantes aumenta correspondientemente el valor de la permeabilidad.

En suelos los problemas de permeabilidad se reflejan en dos tipos, uno de ellos está relacionado con la disipación de las presiones de poro y el otro relacionado con el flujo del agua a través del suelo. El tener presiones de poro excesivas puede originar deslizamientos en explanaciones y el flujo de agua puede ocasionar tubificaciones y arrastres.

Si un suelo arcilloso se compacta con humedades muy bajas se tendrá una alta permeabilidad debido a los grumos que no se disgregan, resistiendo el esfuerzo de compactación y permitiendo con ello que se forme una gran cantidad de vacíos intersticiales. Mientras más alta sea la humedad de compactación se producirán menores permeabilidades en el suelo compactado, ya que éste tiene mayores oportunidades de deformarse, eliminándose así grandes vacíos.

d) Compresibilidad:

Esta propiedad es de suma importancia en los suelos, pues modifica la permeabilidad, altera las fuerzas existentes entre las partículas tanto en magnitud como en sentido, lo que tiene una importancia decisiva en la modificación de la resistencia del suelo al esfuerzo cortante.

En el caso de las arcillas saturadas, si no se permite el drenaje y se aplican esfuerzos, éstos serán tomados por el agua. En el momento en que se permita el drenaje, los esfuerzos serán transmitidos gradualmente al esqueleto o estructura del suelo, este proceso produce una compresión gradual de dicha estructura, fenómeno conocido como consolidación.

La humedad de compactación tiene una gran importancia en la compresibilidad de suelos compactados, pues si se compactan dos especímenes al mismo peso volumétrico pero una en la rama seca de la curva de peso volumétrico contra

humedad y el otro en la rama húmeda, se tendrá que para presiones de consolidación bajas el espécimen compactado del lado húmedo será más compresible debido a que su estructura se encuentra más dispersa, pero para grandes presiones se tienen colapsos y reorientaciones en la estructura del espécimen que se encuentra en el lado seco, lo cual provoca que éste sea ahora más compresible. Bajo presiones muy altas, ambas muestras llegan a la misma relación de vacíos ya que se llega a una orientación similar.

e) Durabilidad:

Esta característica está relacionada con la resistencia al intemperismo, a la erosión o a la abrasión del tráfico; de esta manera los problemas de durabilidad en las vías terrestres suelen estar muy asociados a suelos situados relativamente cerca de la superficie de rodado. Por ende estos problemas pueden afectar a los suelos naturales como también a los estabilizados, consecuencia de un mal diseño, mala designación del estabilizador y su mala aplicación o uso.

Una deficiencia en los estudios de estabilización es la carencia de pruebas adecuadas para estudiar la durabilidad. Las pruebas de intemperismo a veces no son adecuadas para el estudio de agregados para pavimentos por no producir en forma eficiente el ataque a que estarán sujetos. La durabilidad es uno de los aspectos más difíciles de cuantificar y la reacción común ha sido la de sobre diseñar, lo cual a veces puede no ser lo más adecuado.

La importancia de estabilizar suelos con fines de obras viales, es contemplar desde el momento de diseño una adecuada solución y evaluar la rentabilidad de aplicar una metodología de estabilización precisa para el lugar en el que se proyecta la construcción del tipo de vía, ya que por lo general este análisis se contempla lamentablemente durante la etapa de ejecución, generando costos adicionales durante la etapa de ejecución, generando costos adicionales o modificaciones presupuestales que transforman al proyecto en una obra poco rentable y a la cual se le aplican soluciones técnicamente muy poco adecuadas ya que estas se dan de manera improvisada durante la ejecución de obra.

Se trata de utilizar soluciones de bajo costo adecuadas al bajo volumen de tránsito que solicita a este tipo de caminos.

3.2. METODOS DE ESTABILIZACIÓN

El principio de los métodos de estabilización es detener el deterioro de los caminos no pavimentados, con métodos o técnicas de construcción que permitan obtener caminos más durables que requieran un mínimo de conservación. La estabilización de suelos ofrece un medio práctico para asegurar este objetivo, tanto en la construcción de caminos nuevos como en la rehabilitación de caminos deteriorados. Existen dos técnicas de estabilización de suelos:

3.2.1. Estabilización Mecánica

Tradicionalmente, la estabilización mecánica se define como un proceso que consiste en el mejoramiento de las propiedades físicas y mecánicas de un suelo sin la adición de materiales extraños, distinguiéndose dos procedimientos: mezcla de diferentes tipos de suelos y compactación. En la actualidad también se incluyen dentro de esta categoría el uso de refuerzos manufacturados para mejorar la resistencia, tales como los geotextiles.

a) Mezcla de diferentes tipos de suelos

La mezcla de dos o más tipos de suelo en las proporciones requeridas tiene la finalidad de obtener un material granular que cumpla ciertos requerimientos de granulometría y plasticidad para lograr la estabilidad deseada. Las situaciones más comunes son mejorar la estabilidad de suelos cohesivos de baja resistencia agregando material grueso, y mejorar materiales granulares inestables debido a su falta de cohesión adicionando material fino. En este último caso, el mezclado mejora la resistencia a cargas, resistencia a la abrasión, reduce permeabilidad y facilita la compactación. Obtener un suelo bien graduado mediante el mezclado de dos o más suelos permite llenar los vacíos de aire entre las partículas y obtener una densidad máxima seca mayor después de compactado.

b) Compactación

La compactación de un suelo es el proceso de densificación, realizado generalmente por medios mecánicos, mediante el cual las partículas de suelo son empaquetadas más cercanamente a través de la reducción de los vacíos de aire contenidos en la masa de suelo, aumentando la fricción entre las partículas.

La compactación es medida cuantitativamente en términos de la densidad seca del suelo, cuyo valor depende del tipo de suelo, su contenido de humedad y del esfuerzo de compactación aplicado. Valores mayores de densidad permiten incrementar la resistencia, reducir la compresibilidad, permeabilidad y susceptibilidad a cambios de humedad, y afectan favorablemente la resistencia a los ciclos de hielo- deshielo y deformación plástica.

c) Geotextiles

Los geotextiles se utilizan sobre suelos muy blandos para incrementar su capacidad de soporte, y/o actuar como separadores para prevenir que los finos penetren a las capas granulares compuestas por materiales de mejor calidad. En caminos pavimentados, el aumento de la capacidad de soporte que proporciona el geotextil al material de la subrasante permite diseñar pavimentos más durables y más homogéneos en su comportamiento.

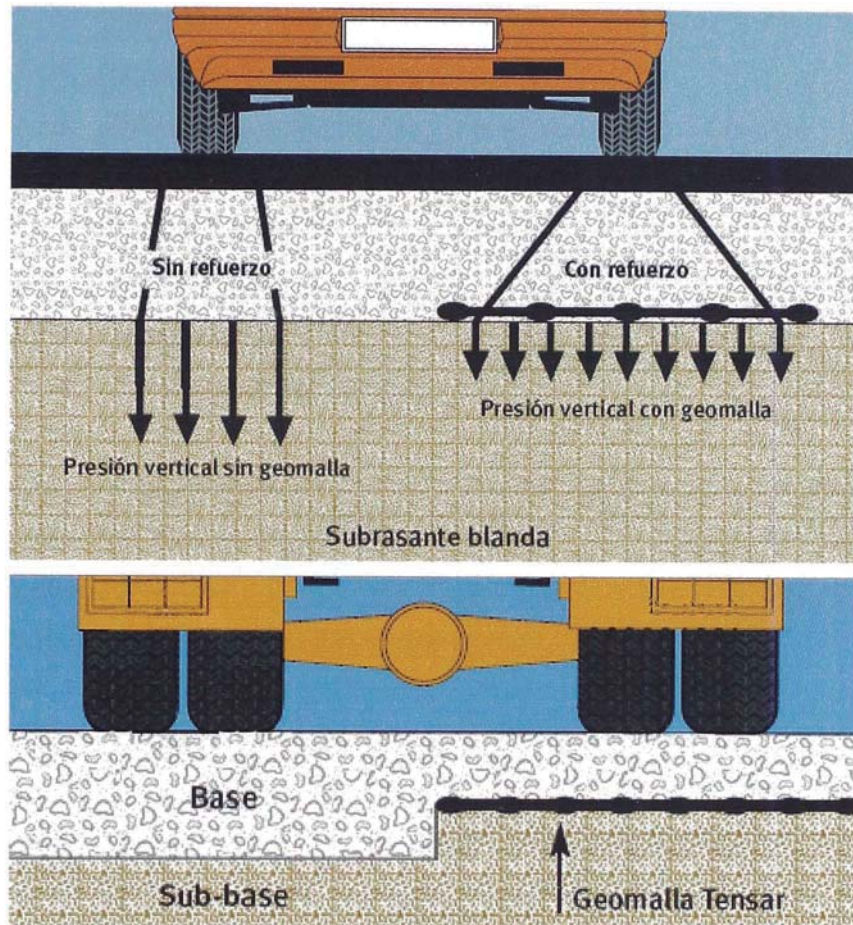


Figura N°3.1: Distribución de esfuerzos cuando se aplica estabilización con geomalla.

3.2.2. Estabilización Química

La estabilización química se utiliza como complemento a la estabilización mecánica. Consiste en mejorar las propiedades físicas y/o mecánicas del suelo mediante la adición de un producto químico, el cual normalmente produce un cambio en las propiedades moleculares superficiales de los granos de suelo y/o cementa y/o adhiere los granos entre sí.

Diferentes propiedades del suelo, tales como plasticidad, compresibilidad y permeabilidad pueden ser modificadas utilizando estabilizadores químicos, pero el principal interés es usualmente incrementar la resistencia del suelo y mejorar su comportamiento en presencia de agua.

Thenoux y San Juan (Chile, 2000) establecen las propiedades físicas y mecánicas del suelo deseables de mejorar mediante la estabilización química, a las que llaman propiedades de desempeño del suelo. Estas son:

- Capacidad de Soporte
- Estabilidad bajo el agua
- Estabilidad Volumétrica (ante cambios de humedad o ciclos de hielo/deshielo)
- Permeabilidad
- Trabajabilidad
- Resistencia a la Abrasión
- Control de polvo

De acuerdo a la capa granular del camino que es objeto de la estabilización se pueden distinguir tres aplicaciones de la estabilización química, en donde cada una de estas aplicaciones puede tener diferentes requerimientos de desempeño que se buscan mejorar. Estas aplicaciones son:

➤ Estabilización de Bases o Sub-bases de pavimentos

En general se recomienda la utilización de un estabilizador químico en la construcción de bases o sub-bases para mejorar su comportamiento estructural, en particular se desea mejorar algunos de los siguientes requerimientos de desempeño.

- Ahorro de espesores de pavimentos

En la mayoría de los casos se requiere mejorar la capacidad de soporte de una base o sub-base cuando se desea ahorrar en espesores de capas de rodado de asfalto u hormigón. En este caso se espera que el agente estabilizador mejore la resistencia a compresión y al corte del suelo, o proporcione un aporte estructural mayor que la capa granular sin estabilizador químico.

- Estabilidad estructural cuando existen problemas de drenaje

Existen muchas condiciones en las cuales una estructura de pavimento puede presentar condiciones bajas de drenaje como: deficiente capacidad de drenaje del suelo, depresiones del terreno, grandes explanaciones de

pavimento, etc. En estos casos, la finalidad de los estabilizadores químicos es controlar la resistencia del suelo por medio de uno de los siguientes mecanismos: (1) Reducir la permeabilidad del suelo, esto permite mantenerlo con un bajo contenido de humedad para el cual su resistencia es adecuada. (2) Mejorar la cementación de las partículas finas para controlar la pérdida de resistencia por efecto de la saturación y/o evitar la pérdida o traslado de material fino bajo un extremo del pavimento debido a la presencia de agua y al movimiento vertical del extremo del pavimento, el cual puede producir agrietamiento del pavimento.

- Utilización de material marginales

Los materiales marginales corresponden a suelos fuera de norma, que en ciertas ocasiones se produce la necesidad de utilizarlos, ya sea por razones económicas o por la imposibilidad de conseguir materiales que cumplan las especificaciones. En este caso, la estabilización química permite rectificar las deficiencias de estos materiales y mejorar su comportamiento mecánico y físico. Esta aplicación puede ser muy rentable en regiones con escasez de materiales apropiados para cumplir las especificaciones de bases o sub-bases.

- Estabilización de Carpetas de Rodado Granulares

Usualmente, la estabilización química es utilizada en caminos no pavimentados para mejorar el comportamiento funcional de la superficie de rodado y mejorar ciertas propiedades mecánicas del material. Dependiendo del costo y efectividad del agente estabilizador, se pueden obtener ahorros por conceptos de reducción de los costos de conservación del camino y reducción de los costos de operación de los vehículos. En general, las superficies de rodado granulares son conservadas mediante actividades de nivelado y perfilado con motoniveladora. El estabilizador utilizado debe permitir la realización de estas actividades, por ello, la aplicación de estabilizadores que actúan principalmente cementado o ligando fuertemente las partículas de suelo no es la más adecuada. Existen básicamente tres requerimientos de desempeño que son deseables de mejorar en una carpeta de rodado granular:

- Reducción del deterioro superficial

La principal fuente de disconformidad del usuario del camino es el deterioro superficial que éste presenta, especialmente la calamina y baches. El estabilizador utilizado debe mejorar la resistencia del suelo a la abrasión de modo de reducir la formación de calamina y la pérdida de material desde la superficie de rodado.

- Mejoramiento de la estabilidad estructural durante la estación de lluvia

Este requerimiento es principalmente aplicable a aquellas zonas donde la magnitud de las precipitaciones es tal que reduce significativamente la estabilidad estructural de la carpeta de rodado granular, que en casos extremos puede producir el cierre del camino. La finalidad de la estabilización química es reducir la capacidad del suelo de absorber y retener el agua, es decir, reducir su permeabilidad.

- Control de la emisión de polvo

El uso de estabilizadores químicos tanto para reducir el deterioro superficial como para mejorar la estabilidad del camino durante la estación de lluvias, logran como consecuencia controlar las emisiones de polvo. En muchas ocasiones, el problema principal que se desea solucionar es la liberación de polvo de la superficie de rodado. En estos casos es posible aplicar sólo riegos superficiales de productos estabilizadores sobre el camino, lo cual permite controlar en forma temporal la liberación de polvo. A diferencia de la estabilización química, la aplicación superficial de supresores de polvo tiene una durabilidad relativamente corta, entre 2 a 6 meses, dependiendo del producto utilizado, de las condiciones climáticas y características del tránsito

➤ Estabilización de la Subrasante

Algunos tipos de suelos que conforman la sub-rasante pueden ser mejorados tanto por requerimientos constructivos o requerimientos de desempeño específicos, tales como:

- Mejoramiento de trabajabilidad

En general, los suelos utilizados como sub-rasante corresponden al terreno natural, el que puede presentar un alto contenido de finos y/o exceso de humedad, lo cual dificulta su homogeneización y compactación. Aunque existen diversos tipos de equipos compactadores, que permiten trabajar con una amplia variedad de suelos, en algunas situaciones se requiere el uso de estabilizadores químicos que facilitan el mezclado, homogeneización y compactación del suelo.

- Mejoramiento de la estabilidad volumétrica

Los suelos de la sub-rasante, especialmente aquellos que contienen arcillas, suelen estar sometidos a grandes variaciones de humedad o a ciclos de hielo/deshielo, lo cual genera cambios volumétricos que pueden provocar la deformación de las diferentes capas estructurales que conforman el camino. Tales cambios volumétricos pueden ser controlados utilizando estabilizadores químicos que reduzcan la absorción de humedad del suelo o que disminuyan la temperatura de congelamiento de los mismos.

Los agentes estabilizadores químicos “tradicionales” son el asfalto, la cal y el cemento. Además, existe una amplia variedad de productos o sub-productos derivados de diferentes procesos industriales, y productos obtenidos de depósitos naturales, los cuales son utilizados a una escala significativamente menor que los estabilizadores químicos tradicionales. En general, los distintos estabilizadores químicos son divididos en las siguientes categorías:

a) Estabilización con Agentes Cementantes

La efectividad de este tipo de estabilizadores depende de: la resistencia de la matriz estabilizada, si se forma una unión entre las partículas gruesas del suelo y la matriz, o si las partículas individuales o aglomeraciones de partículas son unidas entre sí.

i. Estabilización con Cal



Figura N°3.2: Colocación de cal para estabilización de vía.

Cal es el nombre genérico utilizado para describir los siguientes tipos:

- Oxido de calcio o cal viva – CaO
- Hidróxido de calcio, cal apagada o cal hidratada – Ca(OH)_2
- Carbonato de cal – CaCO_3

Para la estabilización de suelos se utiliza cal hidratada y cal viva. La siendo la segunda más efectiva que la cal hidratada, y es particularmente útil para estabilizar suelos muy húmedos, tan pronto entra en contacto con el suelo se hidrata y comienza a absorber una gran cantidad de agua, esta reacción es exotérmica y el calor producido ayuda al secado del suelo.

La adición de cal a suelos finos, produce diferentes reacciones que modifican las propiedades físicas y mecánicas del suelo tratado, siendo las más importantes las reacciones de corto plazo caracterizadas por el intercambio de iones (proceso de modificación), y las de largo plazo que son el resultado de la formación de agentes cementantes (proceso de cementación).

Después de agregar a suelos arcillosos se produce una reacción denominada **intercambio iónico**, esta reacción consiste en que iones de calcio presentes en la cal reemplazan los iones de hidrogeno y sodio presentes en la arcilla, esto sucede hasta que las partículas de arcilla queden saturadas de calcio y el

pH del suelo se eleva a 12.4. El intercambio de iones se produce incluso cuando se agrega cal a suelos calcáreos en que la arcilla se encuentra saturada de calcio, debido a que la capacidad de intercambiar iones aumenta con el incremento del pH.

El intercambio de iones tiene dos efectos, el primero es la reducción del espesor de la doble capa de los minerales de arcilla, como los cationes de sodio pueden retener 79 moléculas de agua y en cambio, los de calcio solamente 2, se produce la liberación de la mayoría del agua perteneciente a la capa adsorbida de la partícula de arcilla. El segundo efecto es la floculación o aglomeración de los minerales de arcilla, formando partículas más grandes (similar al tamaño de los limos).

Las principales propiedades físicas y mecánicas modificadas son:

- Reducción del índice de Plasticidad, debido básicamente al incremento del Limite Plástico (Figura N°1.6).
- Incremento del CBR.
- Mejoramiento de la estabilidad volumétrica: reducción del potencial de hinchamiento y contracción debido a la pérdida de humedad.
- Modificación de las características de compactación: (1) Se reduce la Densidad Máxima Compactada Seca en comparación con un suelo no tratado. (2) Se incrementa el contenido de humedad óptimo al aumentar el contenido de cal. Y (3) La curva humedad-densidad es mas llana.
- Mejora la trabajabilidad del suelo, ya que la cal facilita el desmenuzamiento de los terrones de arcilla.

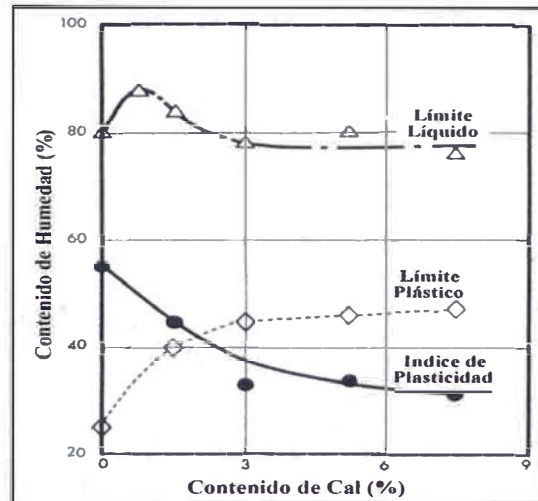


Figura N°3.3: Efecto del contenido de cal sobre la plasticidad de la Arcilla Londres.

Las reacciones a largo plazo son debido a la reacción entre la cal, agua y partículas puzolánicas de la arcilla (alúmina y sílice), a este efecto se le llama **Reacción Puzolánica**, cuando una cantidad significativa de cal es agregada al suelo, el pH se eleva hasta 12.4, a este nivel el pH de la mezcla se produce un significativo incremento en la solubilidad de la sílice y alúmina de la arcilla, los cuales reaccionan con la cal formando agentes cementantes, tales como aluminato de calcio y silicato de calcio, que cementan las partículas de suelo y mejoran algunas propiedades del suelo, produciéndose: (1) Incremento de la resistencia, (2) Mejoramiento de la estabilidad volumétrica, (3) Mejoramiento de la resistencia al agua y la erosión, y (4) Mejoramiento de la resistencia a las heladas. La reacción puzolánica sólo ocurre mientras el agua está presente y es capaz de llevar los iones de calcio a la superficie de las partículas de arcilla.

La magnitud de las reacciones puzolánicas es influenciada principalmente por las propiedades del suelo natural, por ello con algunos suelos la reacción puzolánica es inhibida por la escasa formación de agentes cementantes.

Los suelos estabilizados con cal (al igual que en el caso del cemento) tienden a agrietarse cuando no son curados apropiadamente y se utilizan dosis importantes de cal, esto es consecuencia de la contracción de la mezcla durante el proceso de hidratación. En climas áridos donde las lluvias son escasas esto no presenta un problema. Pero en climas húmedos, el agua que

ingresa a la estructura del pavimento a través de las grietas puede reducir su capacidad de soporte del suelo de la subrasante.

ii. Estabilización con cemento

En la actualidad el cemento es el estabilizador más comúnmente usado, se define como “un producto constituido principalmente por de silicato de calcio, obtenido por calentamiento de una mezcla homogénea de materiales que contienen cal viva (CaO) y sílice (SiO₂), con una pequeña porción de alúmina (Al₂O₃) y óxido de hierro (Fe₂O₃)”. Materiales calcáreos, tales como yeso o caliza proveen la cal, y materiales arcillosos la alúmina, sílice y óxido de fierro.

Los materiales estabilizados con cemento generalmente se dividen en dos clases: suelo cemento y suelo cemento-modificado. El suelo cemento es una mezcla de suelo y/o agregados chancado, cemento y agua, la cual es compactada a alta densidad. Suficiente cemento (mayor al 5% del peso del suelo) es adicionado para producir un material endurecido con la resistencia y durabilidad necesaria para ser utilizado como base en un pavimento flexible y como sub-base en un pavimento de hormigón.

El suelo cemento-modificado es un suelo o agregado que ha sido tratado con pequeñas cantidades de cemento portland (menos del 4% del peso del suelo), con la finalidad de alterar propiedades indeseables del suelo, tal que sea apropiado para el uso en la construcción de caminos. El suelo cemento-modificado es típicamente utilizado para mejorar el suelo de la subrasante o agregados locales para la construcción de sub-bases.

El objetivo de estabilizar un suelo con cemento es básicamente incrementar la resistencia gracias a la formación de agentes cementantes, se producen reacciones puzolánicas, la principal diferencia es que el material puzolánico está presente en el cemento y no necesita ser proporcionado por el suelo. Básicamente, el silicato y aluminato de calcio al reaccionar con agua forma componentes hidratados, los que con el tiempo producen una matriz dura y resistente, la pasta de cemento endurecida. Además, producto de la hidratación se forma hidróxido de calcio (cal), el cual puede reaccionar con el suelo para

formar más productos cementantes mediante el proceso indicado anteriormente para el caso de la estabilización con cal.

En limos y arcillas, la formación de agentes cementantes crea fuertes uniones entre una porción de las partículas finas del suelo, formando una pasta de cemento, la cual encierra a las partículas no unidas. Esto crea una matriz continua con una estructura celular, de la cual depende la resistencia debido a que la resistencia de las partículas no unidas es más baja. Puesto que la matriz fija las partículas finas, el cemento reduce la plasticidad e incrementa la resistencia al corte. La adición de cemento al suelo también reduce su susceptibilidad a cambios volumétricos debido a variaciones de humedad y ante ciclos de hielo y deshielo.

En suelos granulares el efecto de cementación es similar al que ocurre en el hormigón, la única diferencia es que la pasta de cemento no llena los vacíos del agregado debido a que las cantidades de cemento utilizadas generalmente son menores que en el caso del hormigón, sino que la pasta de cemento formada pega las partículas gruesas sólo en ciertos puntos, llamados puntos de contacto (Figura N°1.7). De modo que no se forma una matriz continua y el tipo de fractura depende de la unión entre las partículas gruesas o la resistencia natural de las mismas.

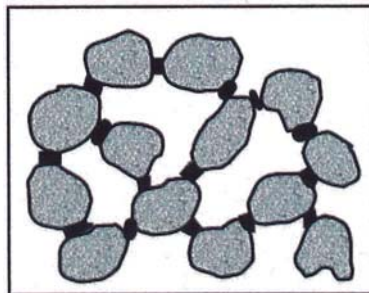


Figura N°3.4: Suelos granulares cementados a través de puntos de contacto.

En caminos no pavimentados, cuando se utilizan bajas dosis de cemento (suelo-cemento modificado) la carpeta de rodado no resiste la acción abrasiva del tránsito, produciéndose el desprendimiento de áridos. Por lo tanto se requiere la construcción de una superficie de rodado, como por ejemplo tratamientos superficiales asfálticos. Además, el endurecimiento de la carpeta imposibilita la realización de actividades de conservación tradicionales, tales como el perfilado. Si se utilizan altas dosis de cemento (suelo-cemento) lo más

probable es que la carpeta resista la acción del tránsito y el clima, pero puede resultar no factible económicamente. Se debe tener especial cuidado en el proceso de mezclado, compactación y terminado, que debe ser realizado antes que la mezcla suelo y cemento comience a endurecer (aproximadamente 4 horas), ya que toda depresión o exceso de material producirán una superficie rugosa y propensa a futuros deterioros.

b) Estabilización con Agentes Asfálticos

Debido a los avances tecnológicos el uso del asfalto como agente estabilizador se ha incrementado, y es aplicado en forma de emulsión o espumado. También se han utilizado asfaltos cortados para estabilizar capas delgadas, pero en la actualidad su uso es poco corriente como consecuencia de la contaminación ambiental que produce la evaporación de los solventes que lo conforman.

El asfalto es un líquido viscoso, que se puede encontrar en estado natural o ser obtenido como un producto de la refinación del petróleo. Tiene importantes propiedades adhesivas y está conformado esencialmente por hidrocarburos. Para estabilización de capas granulares se agrega al suelo en un estado de baja viscosidad, que después de transcurrido un cierto tiempo se convierte en un semi-sólido altamente viscoso. Usualmente se utilizan los siguientes agentes asfálticos para estabilización de caminos:

- **Emulsión asfáltica:** son gotitas de cemento asfáltico suspendidas en agua, las partículas de asfalto no se juntan porque están cubiertas de una película protectora llamada emulsificador. Muchas de las emulsiones usadas como agentes estabilizadores tienen un “asfalto residual” del 60%, es decir, que el 60% del volumen de la emulsión es cemento asfáltico disperso en un 40% del volumen que es agua. Después del mezclado con los áridos, cuando el agua de la emulsión se evapora, el asfalto se vuelve a juntar en una película delgada que es depositada sobre la superficie del agregado.
- **Asfalto espumado:** es cemento asfáltico caliente mezclado con pequeñas dosis de agua y aire en cámaras especiales, este proceso

causa la expansión del cemento asfáltico hasta 20 veces su volumen original. Una vez que el asfalto espumado es inyectado al suelo y revuelto con este, retornando en pocos minutos a su condición original.

A diferencia de la cal y el cemento, que reaccionan químicamente con el material estabilizado, el asfalto actúa físicamente como un ligante, el cual junta las partículas y tiene un efecto impermeabilizante.

En suelos finos el efecto del asfalto es de impermeabilización, las partículas de suelos son cubiertas con asfalto, lo que produce una membrana que previene o impide la penetración del agua. De este modo los suelos finos mejoran su susceptibilidad a cambios de volumen y mejora su capacidad de soporte.

En materiales no cohesivos, como arenas y gravas, se desarrollan dos mecanismos: impermeabilización y adherencia. El primer mecanismo es similar al descrito para suelos finos. El segundo mecanismo es el de adherencia, el asfalto se adhiere a las partículas de agregado, tal que este actúa como un ligante que mantiene pegadas las partículas del suelo. La estabilización con asfalto mejora las propiedades resilientes del suelo.

Materiales estabilizados con asfalto no sufren el problema de agrietamiento asociado a los tratamientos con cal y cemento, y pueden ser abiertos al tránsito inmediatamente debido a la ligazón inicial de las partículas.

La estabilización con agentes asfálticos tiene limitaciones en carpetas de rodado de caminos no pavimentados. A menos que se agreguen cantidades considerables de asfalto al suelo, su acción ligante no será suficiente para prevenir el desprendimiento de los agregados bajo la acción del tránsito. El uso de mayores cantidades de asfalto resulta ser no económico para la mayoría de los caminos no pavimentados, excepto en el caso que se considere utilizar una superficie de rodado adicional a la estabilización, tal como un tratamiento superficial de sello, lechada o combinación de ambos.

c) Estabilización con Compuestos Químicos

Incluye todos los productos que no forman parte de las dos categorías anteriores, algunos son basados en cloruros o sales, derivados del petróleo y aceites, enzimas, lignosulfonatos, melazas, polímeros, resinas, entre otros.

Existe una gran variedad de productos químicos en el mercado, productos de origen natural así como productos derivados de procesos industriales, su utilización en caminos es muy reducida comparándola con el uso del asfalto, cal y cemento. Esto se debe principalmente a que los beneficios y ventajas económicas de la mayoría de estos productos no han sido aun verificados mediante investigaciones de laboratorio y pruebas en terreno. Además, en general la durabilidad de estos productos es de corto y mediano plazo, en ningún caso su ciclo de vida es superior al de agentes cementantes y asfálticos.

En caminos de ripio y tierra, los compuestos químicos son utilizados principalmente para suprimir el polvo, reducir la formación de deterioros superficiales (baches, calamina, otros), para mejorar la interacción del agua con el suelo y facilitar la compactación. También, se utilizan para mejorar la resistencia o soporte del suelo, pero a diferencia de los estabilizadores tradicionales esto es consecuencia del pegado de las partículas finas de suelo, o de la reducción de la permeabilidad o capacidad de absorción de agua del suelo estabilizado. Hay que destacar que algunos compuestos químicos también producen la cementación del suelo, pero en menor grado que el efecto producido por el cemento o la cal.

A continuación se describen los principales compuestos químicos utilizados para la estabilización de caminos no pavimentados, sus propiedades y mecanismos de estabilización.

i. Estabilización con sales (cloruros)

Las sales son utilizadas básicamente en la estabilización de caminos no pavimentados, y corresponden principalmente a sales metálicas, tales como, cloruro de sodio (NaCl), cloruro de calcio (CaCl_2) y cloruro de magnesio (MgCl_2).

La Bischofita es una sal, y como tal, sus propiedades y comportamiento son similares a los cloruros ya mencionados. Por tal motivo, el Capítulo 2 se describen en extenso las propiedades de interés de la Bischofita y sus principales características.

ii. Estabilización con puzolanas

La puzolana puede ser definida como “un sílice, o un material sílico y aluminoso, que en sí mismo no tiene o tiene muy pocas propiedades cementantes. Pero cuando está en forma de polvo muy fino y en presencia de humedad, reacciona químicamente con el hidróxido de calcio (a temperatura ambiente), formando compuestos que tienen propiedades cementantes”.

Las puzolanas son compuestos naturales, tales como los minerales de arcilla del suelo y materiales de origen volcánico. También existen materiales artificiales que son puzolánicos, la mayoría son obtenidos por calentamiento de materiales naturales (tales como arcilla, esquistos, y ciertas rocas silíceas) o son cenizas volantes. De todas las puzolanas, la de mayor interés es la ceniza volante, debido a su disponibilidad y a los diversos estudios e investigaciones que avalan su utilización en la estabilización de caminos. La ceniza volante es un subproducto de las estaciones generadoras de electricidad en base a carbón. El carbón contiene caliza, la cual al quemarse se convierte en cal viva.

La base de la acción cementante de las puzolanas es la reacción puzolánica, la cual fue descrita en extenso para el caso de la estabilización con cal y cemento. La diferencia con suelos estabilizados con cemento portland es que la ganancia de resistencia de suelos tratados con puzolanas no es rápida, sino que se desarrolla lenta y uniformemente en el tiempo desde la compactación inicial del suelo.

Las puzolanas son muy efectivas en pequeños porcentajes en suelos no plásticos de gradación gruesa, por ejemplo gravas arenosas. Estos suelos tratados pueden ser escarificados o nivelados en cualquier época cuando hay humedad presente, y continuara ganando resistencia después de la recompactación. Limos y arenas finas requieren cantidades sustancialmente mayores de aditivo, causando problemas para el mezclado y la conformación de

material muy cementado en la superficie que dificultan la conservación del camino. Suelos plásticos tratados con puzolanas se vuelven extremadamente resbaladizos en climas húmedos, siendo necesario cubrir la carpeta con una capa superior de grava chancada, que proporcione una superficie de tracción a los vehículos.

CAPÍTULO IV: ESTABILIZACIÓN DE CARRETERAS CON TERRASIL

4.1. DESCRIPCIÓN DEL TERRASIL

TERRASIL® está compuesto al 100% por organosilanos, y es capaz de reaccionar con los suelos a nivel molecular. Forma enlaces Si-O-Si (siloxano) con las moléculas de la superficie, cuya elevada fortaleza aporta una eficacia prolongada en el tiempo. El producto genera una membrana transpirable, que confiere propiedades hidrófobas, al mismo tiempo que permite la evaporación de agua. Además, mejora la adherencia con polímeros y betunes y elimina el índice de plasticidad de los suelos.

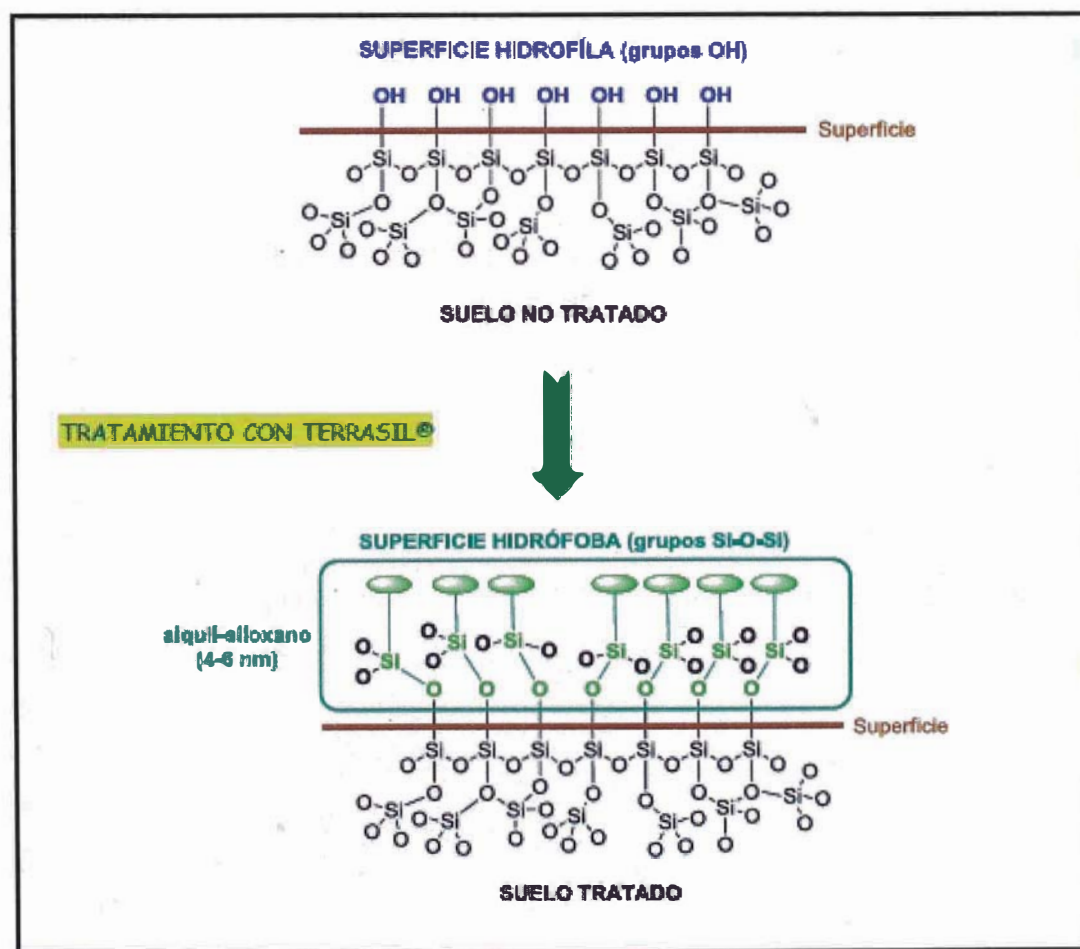


Figura N°4.1: Efecto del terrasil sobre el suelo tratado

En definitiva, lo que TERRASIL consigue es que los suelos se comporten como en condiciones de ausencia de agua. Esto implica que la capacidad portante no se ve disminuida por la presencia de agua, y que los procesos de formación de fisuras/grietas no tienen lugar.

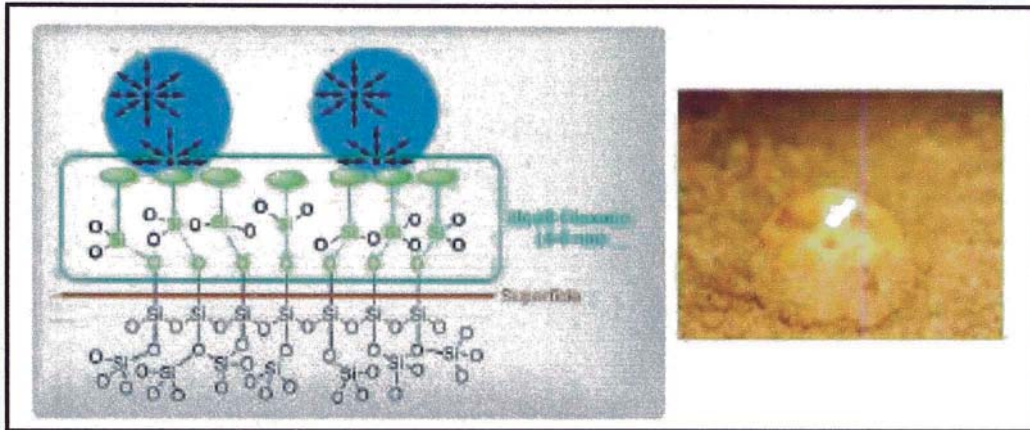


Figura N°4.2: Superficie hidrófoba creada por el silano (Izquierda)

4.1.1. Órgano-Silanos

Los enlaces carbono - silicio son más largos en comparación con los enlaces carbono-carbono (longitud de enlace de 186 vs 154 del peso molecular) y son más débiles, con una energía de disociación del enlace de 451 kJ/mol frente a 607 kJ/mol. El enlace C-Si está algo polarizado hacia el carbono debido a su mayor electronegatividad (C=2,55 vs Si=1,90). Una manifestación de la polaridad de estos enlaces en los órganossilanos se encuentra en la reacción de Sakurai, la misma que es la reacción química en donde se parte de un compuesto con un carbono electrofílico (comúnmente de una cetona) y se le hace reaccionar con alil silanos por catálisis con ácidos de Lewis fuertes (acepta un par de electrones al mismo tiempo, debe tener su octeto de electrones incompleto). (Butterworth, 1981).

Los Órgano-Silanos son solubles al agua, estables al calor, rayos UV y reaccionan con grupos de silanol propensos a húmedecerse con el agua (hidrofílicos) como arena, limos, arcillas y agregados para convertirlos en uniones Alquil-Siloxano, que son altamente estables y que repelen el agua, formando una membrana transpirable in-situ. (BREM, 2013)

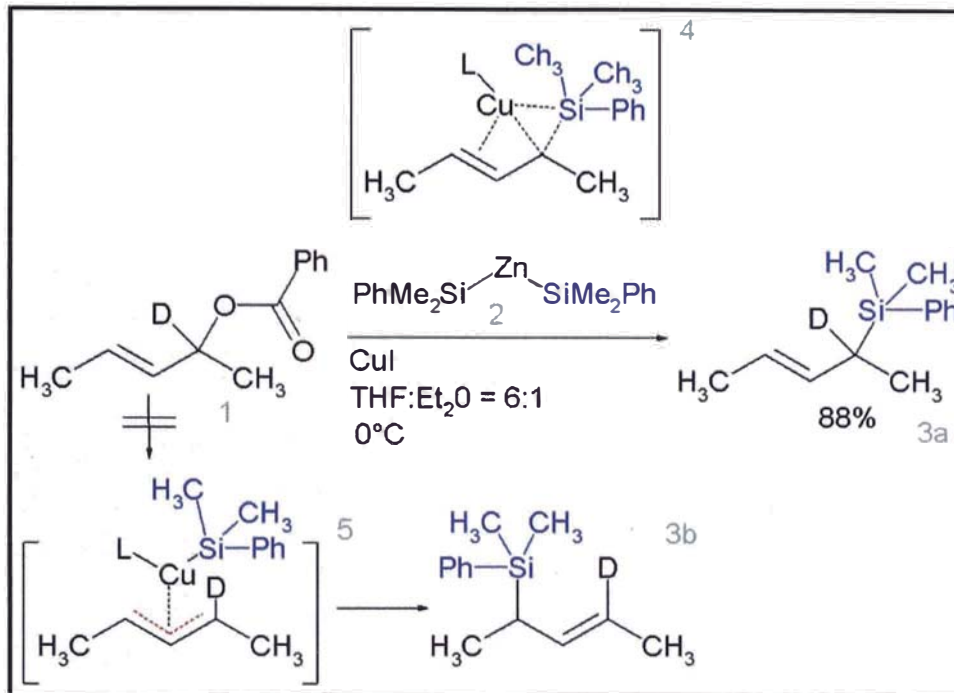


Figura N°4.3: Distribución Química de los Organo-Silanos

La solución con TERRASIL consiste en el uso de un organosilano ionico, capaz de repeler el agua, y eliminar el hinchamiento y la absorción de suelos. Así, se consigue una mejora de cualquier tipo de terreno, al conseguir que el suelo se comporte en todo momento como en condiciones "secas". De esta manera, se establece un sistema de estabilización eficaz del suelo tratado, aportándose además ventajas adicionales:

El suelo se convierte en hidrófobo (repele el agua, eliminando los problemas que se derivan de la presencia de la misma).

El suelo mantiene la transpiración (expulsa el agua en forma de vapor).

Elimina el índice de plasticidad de los suelos.

Mejora la adherencia con polímeros y betún, lo que permite y mejora la aplicación de capas de rodadura, riegos de imprimación

4.1.2. Información sobre los componentes

Organosilanos: 65-70%

Alcohol bencílico (CAS #100-51-6): 25-27 %

Etilenglicol (CAS #107-21-1): 3-5%

4.1.3. Propiedades físicas y químicas

Estado	Líquido
Color	Amarillo pálido
Punto de inflamación	> 75 °C
Peligro de explosión	Desconocido
Densidad	1.01 g/mL
Solubilidad	Miscible con agua
pH	Disolución al 10%: neutra o ligeramente ácida
Viscosidad	100 – 500 cps a 25 °C

4.2. ESTABILIZACION DE SUELOS CON TERRASIL EN LOS CONTRATOS DE CONSERVACION Y MANTENIMIENTO VIAL

Los resultados que se espera obtener de la investigación de laboratorio son los siguientes: Efectividad del Terrasil como estabilizador químico de caminos no pavimentados, Dosis de Terrasil para distintos tipos de suelos, y procedimientos y técnicas de construcción y conservación de carpetas de rodado estabilizadas con Terrasil.

4.2.1. Proyecto “Servicio de Conservación Vial por Niveles de Servicio del Corredor Vial EMP. PE 04-B (Hualapampa) – Sondor – Huancabamba – Pacaibamba – Socchabamba – Puesto Vado Grande/ Sondor – Tabaconas – EMP.PE – 5N (Ambato)/ Huancabamba – Canchaque y Socchabamba – Ayabaca”

4.2.1.1. Información General del Proyecto

El 28 de Agosto del 2012 se suscribió el contrato Nro. 069-2012-MTC/20, con el Consorcio Gestiones Viales del Norte (Obras de Ingeniería – SVC – Odebrecht), por el monto de la propuesta económica ascendente a S/ 241744267,66.

El proyecto está ubicado entre los departamentos de Cajamarca y Piura.

La vía a estabilizar se encuentra en mal estado con presencia de baches profundos.

Los trabajos se iniciaron el 06 de Octubre del 2012 con una concesión de 5 años. A continuación se muestra un esquema de los tramos en concesión:

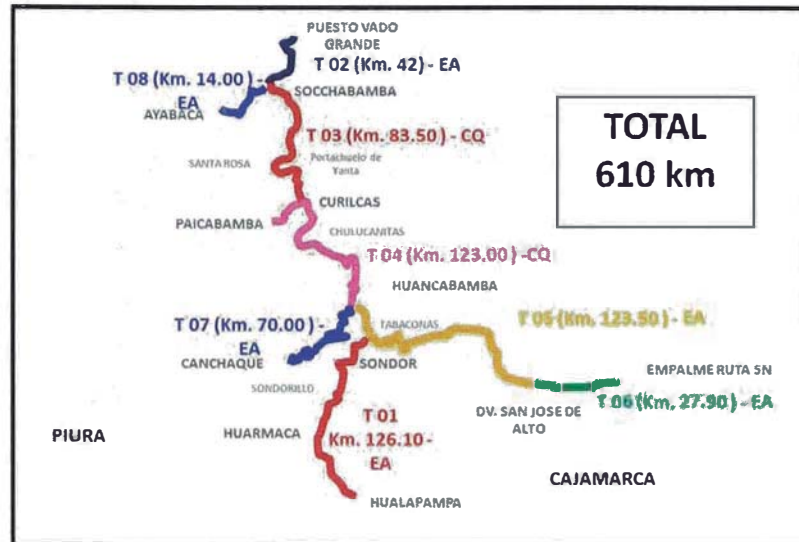


Figura N°4.4: Esquema de los tramos a intervenir.

4.2.1.2. Ejecución del Tramo de Prueba – Tramo 2

a. Características del Suelo

Cuadro N°4.1: Características del material de cantera

CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL DE CANTERA VADO GRANDE Km : 2038+800 TRAMO 2

CLASIFICACION SUCS	GP - GM
CLASIFICACION AASHTO	A-1-a
% DE GRAVA	60%
% PASANTE MALLA N° 200	7.2
% INDICE DE PLASTICIDAD	4%
% EQUIVALENTE DE ARENA	30%
MAXIMADENSIDAD SECA	2.105
OPTIMO CONTENIDO DE HUMEDAD	8.8
C.B.R 1" AL 100%	52.50%
C.B.R 1" AL 95%	38.60%
PESO UNITARIO SUELTO	1650 Kg/m3
ABRASION	26.1
% DE ESPONJAMIENTO	25%

Fuente de Información: Consorcio Gestiones Viales del Norte

b. Diseño teórico de la base estabilizada con aditivo químico Terrasil y Cemento Portland

Se ha colocado dos tipos de mezcla en el tramo de prueba referenciadas como:

- Tramo A: Terrasil (1 Kg. /m³), ubicado en el Km. 2039+100 al 2039+150.
- Tramo B: Terrasil (0.50 Kg. /m³) y Cemento (1%), ubicado en el Km. 2039+150 al 2039+250.

Se ha preparado varias series de muestras para efectuar el curado, a los 4, 7, 15 y 30 días al aire libre. De la misma mezcla colocada en las zonas mencionadas, en base a los resultados del C.B.R. Compresión simple y Deflectometría se determinara el uso del aditivo solo y/o con cemento portland.

c. Dosificación de Agregados con Aditivo Químico y Cemento en Laboratorio

Cuadro N°4.2: Resultados de las muestras tratadas

DOSIFICACION DE LAS MUESTRAS CON DIFERENTES COMBINACIONES		NATURAL	TERRASIL 1Kg/m ³	TERRASIL 0.5 Kg./m ³ + 1% de cemento
PROCTOR	Máxima Densidad Seca	2.102	2.111	2.116
	Optimo Contenido de Humedad	8.78	8.5	8.35
C.B.R.	(100% M.D.S.) 0.1" (4 días de curado)	52.5%	85.2%	110.2%
	(95% M.D.S.) 0.1" (4 días de curado)	38.6%	68.3%	83.4%
	(100% M.D.S.) 0.2" (4 días de curado)	73.2%	150.8%	171.8%
	(95% M.D.S.) 0.2" (4 días de curado)	56.5%	129.4%	153.6%

Fuente de Información: Consorcio Gestiones Viales del Norte

d. Características Físico Mecánicas del Material de base estabilizada del Tramo A y B

Cuadro N°4.3: Características del material tratado con 1kg/m3 de Terrasil

TRAMO A (KM 2039+100) – (KM 2039+150) – TRAMO 2	
CARACTERISTICAS DEL MATERIAL DE BASE ESTABILIZADA CON ADITIVO TERRASIL	
CLASIFICACION SUCS	GP -GM
CLASIFICACION AASHTO	A-1-a
% DE GRAVA	61%
% PASANTE MALLA Nro. 200	8.1
% INDICE DE PLASTICIDAD	5%
MAXIMA DENSIDAD SECA	2.111
O.C.H.	8.5
PESO UNITARIO SUELTO	1650 KG/M3
% DE ESPONJAMIENTO	25%

Fuente de Información: Consorcio Gestiones Viales del Norte

Cuadro N°4.4: Características del material tratado con 0.5kg/m3 de Terrasil y 1% de cemento

TRAMO B (KM 2039+150) – (KM 2039+250) – TRAMO 2	
CARACTERISTICAS DEL MATERIAL DE BASE ESTABILIZADA CON ADITIVO TERRASIL + CEMENTO	
CLASIFICACION SUCS	GP -GM
CLASIFICACION AASHTO	A-1-a
% DE GRAVA	60%
% PASANTE MALLA Nro. 200	9.2
% INDICE DE PLASTICIDAD	6%
MAXIMA DENSIDAD SECA	2.116
O.C.H.	8.35
PESO UNITARIO SUELTO	1650 KG/M3
% DE ESPONJAMIENTO	25%

Fuente de Información: Consorcio Gestiones Viales del Norte

Para hacer una comparación de resultados, se ha obtenido muestras del Tramo de Prueba A y B; esto es, para efectos de Comparación del Comportamiento de los agregados con el aditivo solo y con cemento.

Según los resultados **no alteran** mucho sus características físicas mecánicas, salvo en la plasticidad que aumenta con Terrasil solo, en un promedio de 1 a 2 % y Terrasil con cemento de 2 a 3 %. En el C.B.R., los resultados reales se obtienen a los 15 y 30 días, de curado según recomendación del fabricante.

e. Ensayos de Laboratorio

- **Análisis Mecánico Por tamizado (NORMA MTC E-204, AASHTO T-88, ASTM D – 422)**

Cuadro N°4.5: Análisis mecánico por tamizado (muestra tratada con 1kg/m3 de Terrasil)

TAMIZ	ABERT. mm.	PESO RET.	%RET. PARC.	%RET. AC.	% Q' PASA	NORMA	
3"	76.200				100.0		
2 1/2"	63.500		0.0	0.0	100.0		
2"	50.800		0.0	0.0	100.0	100	
1 1/2"	38.100	138.0	2.8	2.8	97.2		
1"	25.400	636.0	12.8	15.5	84.5	75	95
3/4"	19.050	651.0	13.1	28.6	71.4		
1/2"	12.700	676.0	13.6	42.2	57.8		
3/8"	9.525	362.0	7.3	49.4	50.6	40	75
# 4	4.760	793.0	15.9	65.3	34.7	30	60
# 8	2.380	145.8	7.9	73.2	26.8		
# 10	2.000	27.7	1.5	74.7	25.3	20	45
#16	1.180	0.0	0.0	74.7	25.3		
# 20	0.840	101.9	5.5	80.2	19.8		
# 30	0.590	31.4	1.7	81.9	18.1		
# 40	0.420	27.4	1.5	83.4	16.6	15	30
# 50	0.300	26.6	1.4	84.8	15.2		
# 80	0.180	34.1	1.8	86.7	13.4		
# 100	0.149	38.4	2.1	88.7	11.3		
# 200	0.075	58.3	3.1	91.9	8.1	5	15
< # 200	FONDO	150.4	8.1	100.0	0.0		

Fuente de Información: Consorcio Gestiones Viales del Norte

Cuadro N°4.6: Análisis mecánico por tamizado (muestra tratada con 0.5kg/m3 de Terrasil y 1% de cemento)

TAMIZ	ABERT. mm.	PESO RET.	%RET. PARC.	%RET. AC.	% Q' PASA	NORMA	
3"	76.200				100.0		
2 1/2"	63.500		0.0	0.0	100.0		
2"	50.800		0.0	0.0	100.0	100	
1 1/2"	38.100		0.0	0.0	100.0		
1"	25.400	631.0	13.0	13.0	87.0	75	95
3/4"	19.050	550.0	11.3	24.3	75.7		
1/2"	12.700	772.0	15.9	40.3	59.8		
3/8"	9.525	392.0	8.1	48.3	51.7	40	75
# 4	4.760	715.0	14.7	63.1	36.9	30	60
# 8	2.380	164.6	9.5	72.5	27.5		
# 10	2.000	32.1	1.8	74.4	25.6	20	45
#16	1.180	0.0	0.0	74.4	25.6		
# 20	0.840	89.4	5.1	79.5	20.5		
# 30	0.590	38.0	2.2	81.7	18.3		
# 40	0.420	36.1	2.1	83.8	16.2	15	30
# 50	0.300	34.3	2.0	85.8	14.2		
# 80	0.180	48.5	2.8	88.6	11.4		
# 100	0.149	16.0	0.9	89.5	10.5		
# 200	0.075	23.5	1.4	90.8	9.2	5	15

Fuente de Información: Consorcio Gestiones Viales del Norte

➤ **Ensayo de Rugosidad con Merlin (Tramo A y B Km: 2039+100 – 2039+250)**

LADO	IRI
DERECHO	3.41
IZQUIERDO	3.5

➤ **Curva Granulométrica (Tramo A y B Km: 2039+100 – 2039+250)**

Figura N°4.5: Curva Granulométrica (muestra tratada con 1kg/m3 de Terrasil)

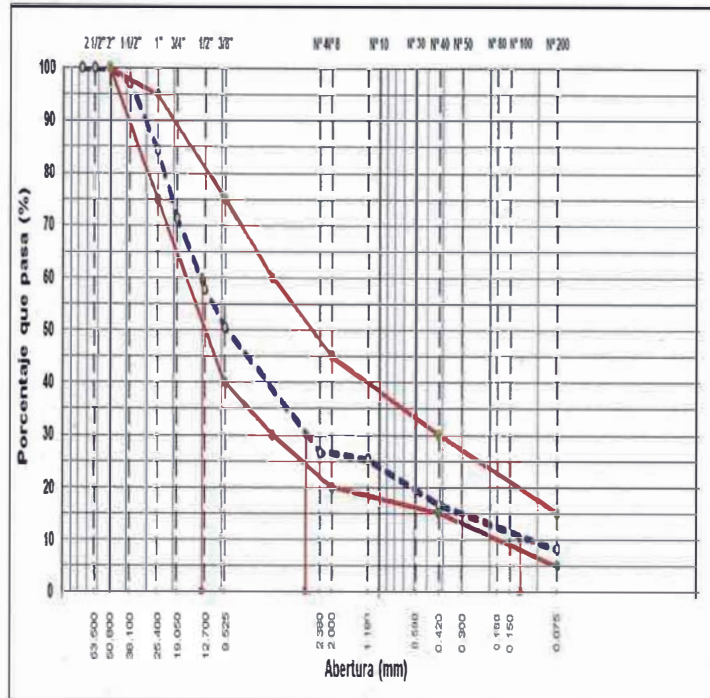
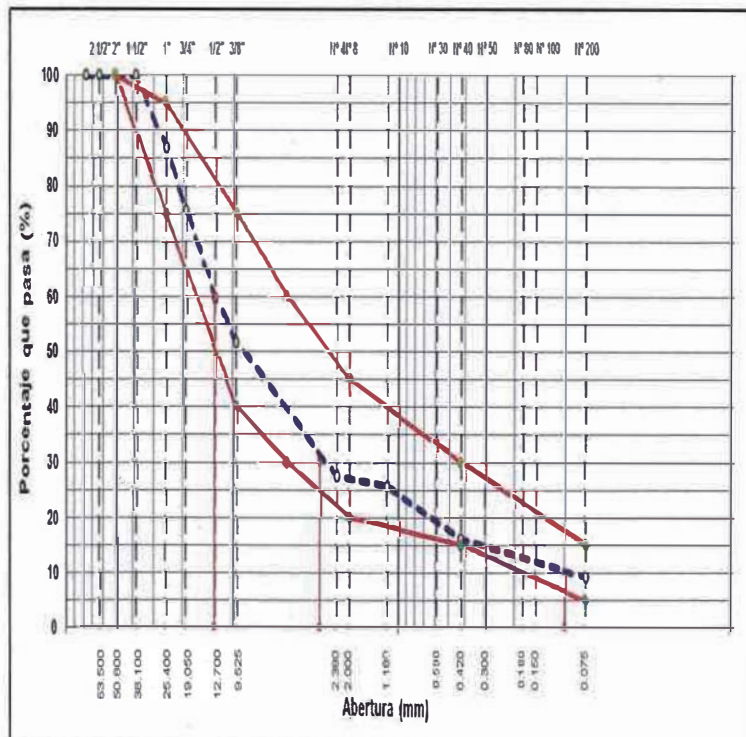


Figura N°4.6: Curva Granulométrica (muestra tratada con 0.5kg/m3 de Terrasil y 1% de cemento)



➤ **Ensayo de C.B.R**

Cuadro N°4.7: Resultados de C.B.R.

CUADRO RESULTADOS DE C.B.R.	
C.B.R 1" AL 100 % 52.50%	C.B.R 1" AL 95 % 38.60%
TERRASIL 1 Kg/m3	TERRASIL 0.5 Kg/m3 + 1 % DE CEMENTO

CLASIFICACION SUCS	GP - GM	CLASIFICACION SUCS	GP - GM
CLASIFICACION AASHTO	A-1-a	CLASIFICACION AASHTO	A-1-a
MAXIMA DENSIDAD SECA	2.111	MAXIMA DENSIDAD SECA	2.116
OPTIMO CONTENIDO DE HUMEDAD	8.53	OPTIMO CONTENIDO DE HUMEDAD	8.35
C.B.R 1"AL 100% 4 DIAS DE CURADO	85.2	C.B.R 1"AL 100% 4 DIAS DE CURADO	110.3
C.B.R 1"AL 95% 4 DIAS DE CURADO	68.2	C.B.R 1"AL 95% 4 DIAS DE CURADO	81.7
C.B.R 1"AL 100% 7 DIAS DE CURADO	105.3	C.B.R 1"AL 100% 7 DIAS DE CURADO	123.2
C.B.R 1"AL 95% 7 DIAS DE CURADO	82.8	C.B.R 1"AL 95% 7 DIAS DE CURADO	94.2
C.B.R 1"AL 100% 14 DIAS DE CURADO	115.3	C.B.R 1"AL 100% 14 DIAS DE CURADO	173.8
C.B.R 1"AL 95% 14 DIAS DE CURADO	90.2	C.B.R 1"AL 95% 14 DIAS DE CURADO	144.9
C.B.R 1"AL 100% 28 DIAS DE CURADO	143.8	C.B.R 1"AL 100% 28 DIAS DE CURADO	192.6
C.B.R 1"AL 95% 28 DIAS DE CURADO	121.2	C.B.R 1"AL 95% 28 DIAS DE CURADO	151

Fuente de Información: Consorcio Gestiones Viales del Norte

➤ **Control de densidades – Método del Cono de Arena**

Cuadro N°4.8: Control de Densidades

N° DE CAPAS	UBICACIÓN DE LA PRUEBA	LADO DE ENSAYO	ESPSOR DE LA CAPA	CONTENIDO DE HUMEDAD		DENSIDAD		% COMPAC.
				OPTIMO	CAMPO	MAXIMA	CAMPO	
Base Estabilizada	2039+120	Izquierdo	0.11	8.5	10.2	2.111	2.09	99.1
Base Estabilizada	2039+140	Derecho	0.10	8.5	10.5	2.111	2.08	98.3
Base Estabilizada	2039+160	Izquierdo	0.115	8.35	9.3	2.116	2.09	99.0
Base Estabilizada	2039+180	Derecho	0.10	8.35	9	2.116	2.12	100.0
Base Estabilizada	2039+210	Izquierdo	0.11	8.35	8.9	2.116	2.12	100.0
Base Estabilizada	2039+240	Derecho	0.11	8.35	9.3	2.116	2.10	99.0

Fuente de Información: Consorcio Gestiones Viales del Norte

➤ **Panel fotográfico del proceso Constructivo**



Figura N°4.7: Panel fotográfico del proceso constructivo

CAPITULO V: METODOLOGÍA

5.1. EJEMPLO DE APLICACIÓN: PROYECTO “SERVICIO DE CONSERVACIÓN VIAL POR NIVELES DE SERVICIO DEL CORREDOR VIAL EMP. PE 04-B (HUALAPAMPA) – SONDOR – HUANCABAMBA – PACAIBAMBA – SOCCHABAMBA – PUESTO VADO GRANDE/ SONDOR – TABACONAS – EMP.PE – 5N (AMBATO) / HUANCABAMBA – CANCHAQUE Y SOCCHABAMBA – AYABACA

5.1.1. Estudio del suelo de fundación :

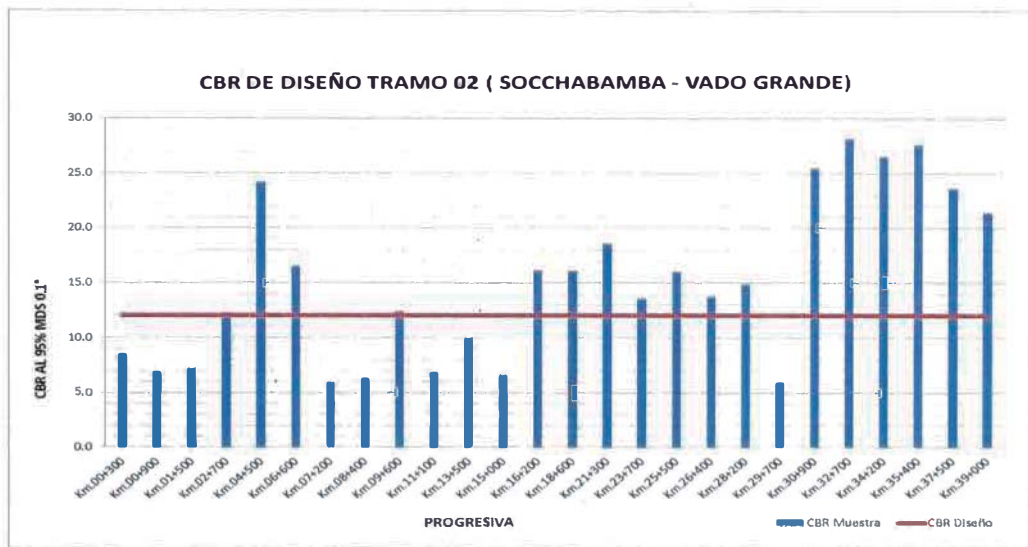


Figura N°5.1: C.B.R. de diseño

5.1.2. Condición Funcional (IRI) inicial:

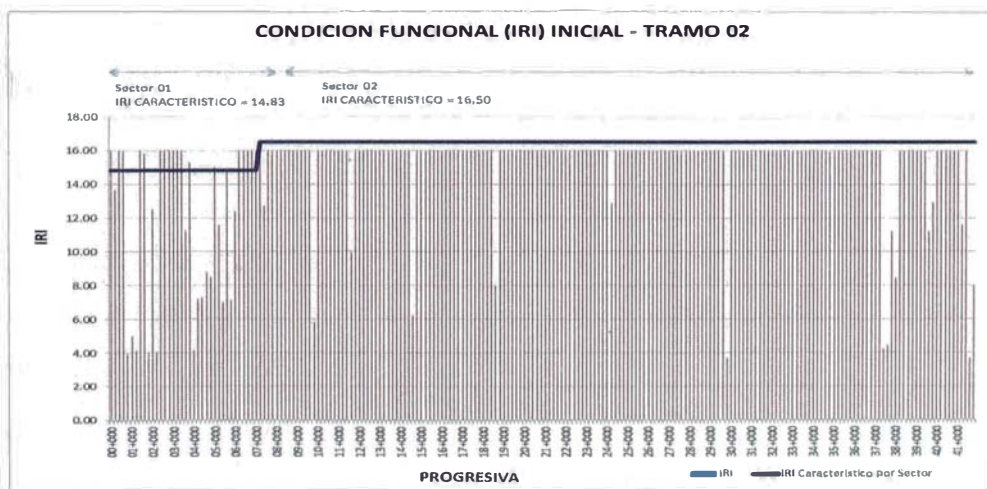


Figura N°5.2: I.R.I. característico según sector

5.1.3. Soluciones de ingeniería – Tramo II

5.1.3.1. Definición de sectores homogéneos:

VARIABLE	SECTORES HOMOGENEOS - TRAMO 02			
	Km 00+000	Km 07+000	Km 13+800	Km 41+800
IRI característico	14.83		16.5	
Def. característica				
Espesor afirmado existente	0 cm		7cm	
CBR Fundación	12%			
EAL	3.23E+04			

Figura N°5.3: Sectorización de los tramos

Las variables mas relevantes a considerar son el CBR de fundación y solicitaciones de tráfico.

5.1.3.2. Diseños de mezcla (Suelo – Agente estabilizador):



Figura N°5.4: Resultados del aditivo en el tramo 08, tramo 02 y tramo 03

Se considero para la dosificación un requerimiento estructural de CBR de 70% al 100% de la MDS, no siendo necesario el uso de Cemento, por la calidad de materiales con que se cuenta en este Tramo.

5.1.4. Diseño estructural

A. Consideraciones de diseño:

Superficie de Rodado: Slurry Seal, con Emulsion Modificada

Base Estabilizada: Se han estudiado materiales competentes para los trabajos de mantenimiento periódico, ubicándose varias canteras como fuente de material, no obstante el diseño considera que la capa en su conjunto debe ser constituida con aporte de afirmado existente y/o recarga de la Fase I. En función a los diseños de mezcla suelo – aditivo se adopta un coeficiente estructural 0.13/in.

B. Diseño NASSRA EG-CBT 2005 – MTC

Desde el punto de vista del diseño de la capa de rodadura solo tienen interés los vehículos pesados (buses y camiones), considerando como tales aquellos cuyo peso bruto excede de 2.5 tn. El resto de los vehículos que puedan circular con un peso inferior (motocicletas, automóviles y camionetas) provocan un efecto mínimo sobre la capa de rodadura, por lo que no se tiene en cuenta en su cálculo.

El tráfico proyectado al año horizonte, se clasificara según lo siguiente:

CLASE	T0	T1	T2	T3
IMDA (Total vehículos ambos sentidos)	< 15	16 - 50	51 - 100	101 – 200
Vehículos pesados (carril de diseño)	< 6	6 - 15	16 - 28	29 – 56
N° Rep. EE (carril de diseño)	< 2.5x10 ⁴	2.6x10 ⁴ - 7.8x10 ⁴	7.9x10 ⁴ - 1.5x10 ⁵	1.6x10 ⁵ - 3.1x10 ⁵

Una vez obtenido el número de vehículos (IMDA) y la cantidad de vehículos pesados (buses + camiones) para el carril de diseño, se determina el tipo de tráfico. No obstante, será necesario obtener el número de repeticiones de Ejes Equivalentes (EE) para el periodo de diseño.

El concepto de EE corresponde a la unidad normalizada por la AASHTO que representa el deterioro que causa en la capa de rodadura un eje simple cargado con 8.16 toneladas. Para el cálculo de los factores destructivos por eje equivalente calculados, se toma en cuenta el criterio simplificado de la metodología AASHTO, aplicando las siguientes relaciones:

Tipo de eje	Eje equivalente EE 8.2tn
Eje simple de rueda simple	$[P/6.6]^4$
Eje simple de rueda doble	$[P/8.16]^4$
Eje tándem de rueda doble	$[P/15.1]^4$
Eje tridem de rueda doble	$[P/22.9]^4$
P = peso por eje en toneladas	

También se considera un factor de ajuste por presión de neumáticos, de tal manera de computar el efecto adicional de deterioro de los afirmados. Este efecto se incrementa mas para el caso de las capas de revestimiento granular en altura donde la baja presión atmosférica genera un aumento de la presión interna del neumático, reduciendo su área de contacto y aumentando la presión sobre la capa de rodadura. Para evitar este efecto en el cálculo de los EE, las llantas deberían tener una presión máxima de 80 psi pulg².

Para el cálculo de EE de 8.2 tn, se usara las siguientes expresiones por tipo de vehículo pesado. El resultado final será la sumatoria de los tipos de vehículos pesados considerados:

$$\text{Nrep de EE 8.2tn} = \sum \frac{[\text{EE}_{\text{día-carril}} * 365 * (1 + t)^{n-1}]}{t}$$

$$\text{EE}_{\text{día-carril}} = \text{EE} * \text{Factor Direccional} * \text{factor carril}$$

$$\text{EE} = N^{\circ} \text{ de vehiculos según tipo} * \text{factor de carga} * \text{factor de presión de llantas}$$

Donde:

$N_{rep \text{ de EE } 8.2tn}$	=	Número de repeticiones de ejes equivalentes de 8.2 tn.
$EE_{\text{día-carril}}$	=	Ejes equivalentes por día para el carril de diseño.
365	=	Número de días del año.
T	=	Tasa de proyección del tráfico, en centésimas.
EE	=	Ejes Equivalentes.
Factor direccional	=	0.5, corresponde a carreteras de dos direcciones por calzada.
Factor carril	=	1, corresponde a un carril por dirección o sentido.
Factor de presión de llantas	=	1, este valor se estima para CBVT y con capa de revestimiento granular.

Se considerarán como materiales aptos para la coronación de la subrasante suelos con CBR igual o mayor de 6%. En caso de ser menor, se procederá a eliminar esa capa de material inadecuado y se colocara un material granular con CBR mayor a 6%; para su estabilización.

Para el dimensionamiento del espesor de la capa de afirmado, se adopto la siguiente ecuación del método presentado por la National Association of Australian State Road Authorities (hoy AUSTROADS), que relaciona el valor de soporte del suelo (CBR) y la carga actuante sobre el afirmado, expresada en Números de Repeticiones de EE.

$$e = [219 - 211 * (\log_{10} CBR) + 58 * (\log_{10} CBR)^2] * \log_{10} \left(\frac{N_{rep}}{120} \right)$$

Donde:

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.

Para el tramo II en estudio, se tiene un número de repeticiones de EE 8.2 tn (carril de diseño) igual a 3.23 E+04, con un C.B.R. del terreno de fundación del 12%, donde aplicando la ecuación del metodo NASSRA se obtiene un espesor de 17 cm de la capa de afirmado. (Ver figura N°5.6).

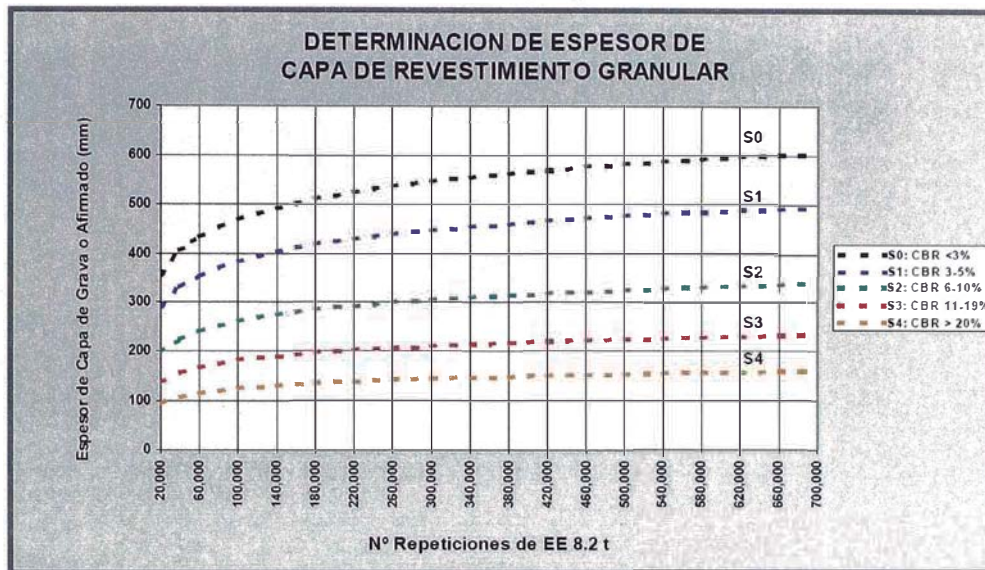


Figura N°5.5: Determinación de espesor según diseño del método NAASRA

SECTOR	CAPA	Espesor	Coefficiente de capa	SN pavimento	SN contractual
km 0+000 al km 41+800	Slurry c/emulsión Modif.	1.0 cm	-	-	0.87
	Base Estabilizada (*)	17.0 cm	0.13/in	0.87	
	Total	18.0 cm		0.87	

Figura N°5.6: Estructura del pavimento recomendada

(*) Se plantea que el espesor de aporte neto, para la base estabilizada, sea menor o igual a 15cm, considerando el reciclado del afirmado existente y/o recarga de la fase I (transitabilidad).

5.1.5. PROCESO CONSTRUCTIVO:

Los productos utilizados, serán Terrasil para los riegos de protección de la rasante, de sellado o de imprimación modificado, así como para él estabilizado del material granular combinado con un porcentaje de cemento y sellada con Terrasil, lo que proporcionará a la vía una mayor estabilidad al reducir la permeabilidad y aumentar la cohesión entre partículas. La mejora de características tanto del suelo modificado como de la carpeta de rodadura aumentará la duración de la vía y por tanto la reducción en los costos de mantenimiento de la misma.

a. Mejoramiento de rasante



Figura N°5.7: Proceso constructivo

b. Compactación de rasante



Figura N°5.8: Proceso constructivo

- c. Aplicación del riego de Terrasil sobre la rasante. 1 Kg de Terrasil en 300 litros de agua y aplicar una cantidad de disolución resultante de 3 litros/m² en dos fases. Riego sobre la rasante preparada de 2 litros/m² el día anterior a la extensión del material estabilizado. Previo a la extensión del material estabilizado regar 1 litro/m² de la disolución ya preparada y dejar secar. Comprobar impermeabilidad.



Figura N°5.9: Proceso constructivo

- d. Extensión del material previamente estabilizado en cantera con la dosificación de 0,5 Kg/m³ + 1% de cemento. Añadir la cantidad necesaria y previamente calculada de Terrasil en el agua necesaria de compactación (en este caso, al llevar posteriormente cemento y por las condiciones climatológicas pasar 1,5 a 2 puntos por encima la humedad óptima de compactación para que luego llegue a la traza en las condiciones perfectas para compactar).

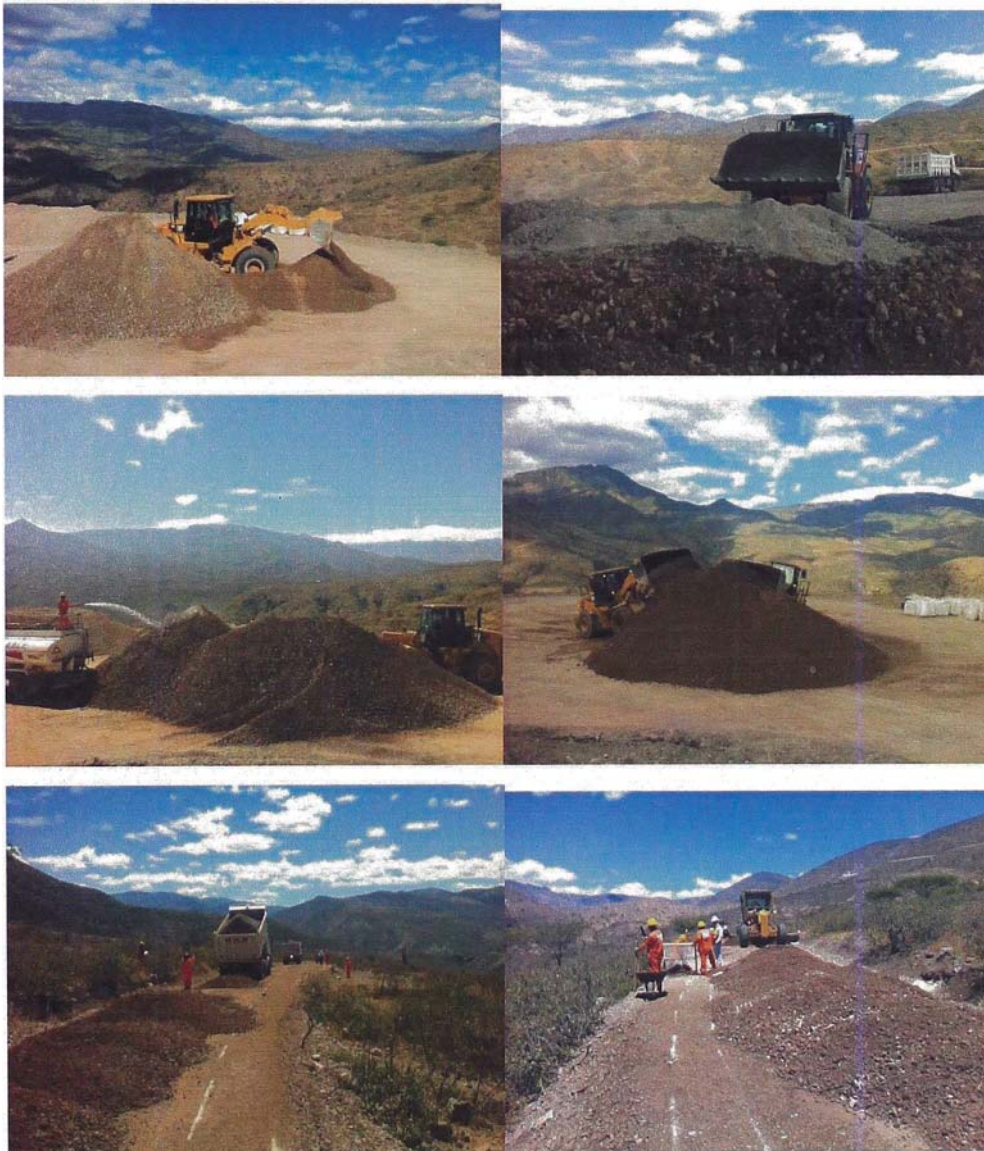


Figura N°5.10: Proceso constructivo

e. Nivelación y pre-compactado

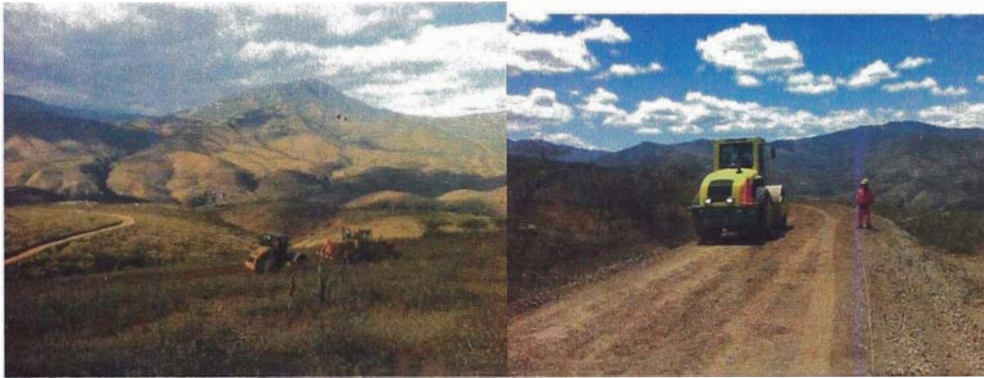


Figura N°5.11: Proceso constructivo

f. Refino y compactado

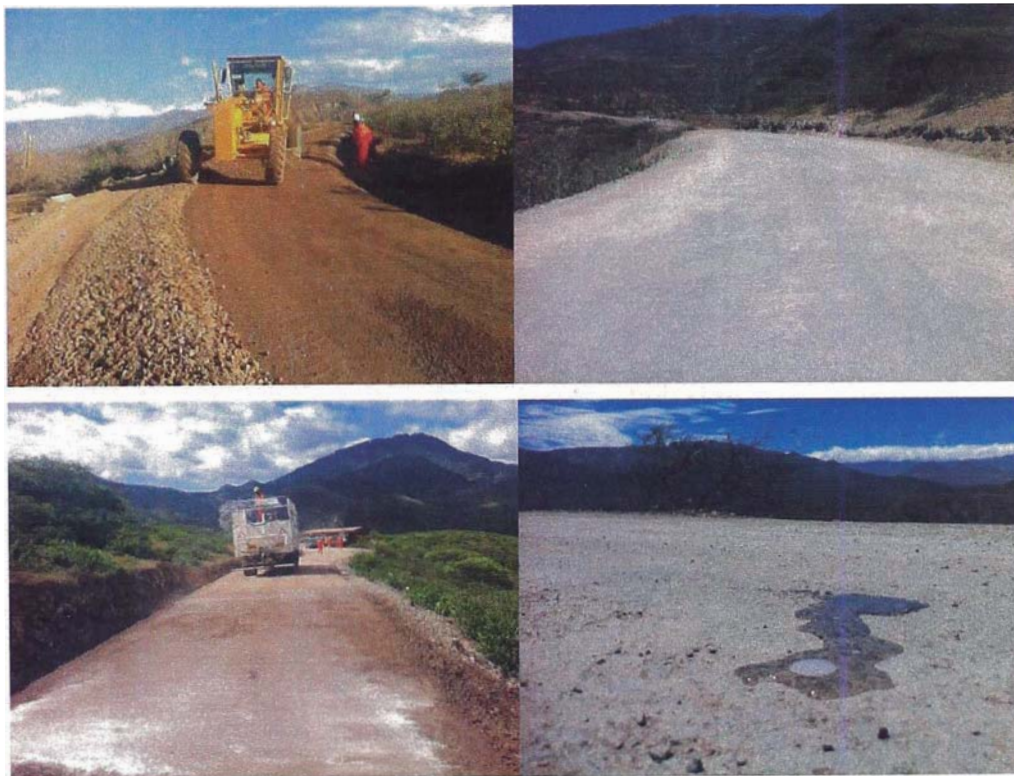


Figura N°5.12: Proceso constructivo

5.2. ENSAYOS DE LABORATORIO:

Con el fin de evaluar las propiedades hidrófobas que confiere el Terrasil en comparación con otros estabilizadores para los proyectos: Rehabilitación y/o Mejoramiento del Aeródromo de San Lorenzo, distrito de Barranca, Provincia Datem del Marañón, departamento de Loreto y Rehabilitación y/o Mejoramiento del Aeródromo de Sepahua, distrito de Sepahua, Provincia de Atalaya, Departamento de Ucayali, se sometieron a los ensayos correspondientes según la norma técnica de estabilizadores químicos MTC E 1109-2004, las siguientes mezclas de suelos:

Aeródromo de San Lorenzo	
MEZCLA I	Cantera de Arcilla “El Nazareno” (60%) – Cantera San Lorenzo (Acopio) (40%)
MEZCLA II	Cantera de Arcilla “El Nazareno” (65%) – Cantera San Lorenzo (Acopio) (35%)

Aeródromo de Sepahua	
MEZCLA I	Cantera de Arcilla “El Mirador” (70%) – Cantera Rio Urubamba (30%)
MEZCLA II	Cantera de Arcilla “El Mirador” (65%) – Cantera Rio Urubamba (35%)



Figura N°5.13: Estado actual de la pista del aeródromo de San Lorenzo

5.2.1 Estabilizadores Químicos:

A continuación se detallaran los estabilizadores químicos usados en este estudio:

- **Terrasil:** Estabilizador químico compuesto al 100% por organosilanos, y es capaz de reaccionar con los suelos a nivel molecular. Forma enlaces Si-O-Si (siloxano) con las moléculas de la superficie, cuya elevada fortaleza aporta una eficacia prolongada en el tiempo. El producto genera una membrana transpirable, que confiere propiedades hidrófobas.
- **Proes:** Estabilizador químico compuesto de aceites sulfonados.
- **ISS 2500 (Ionic Soil Stabilizer):** Estabilizador químico compuesto de aceites sulfonados.
- **Permazyme:** Estabilizador químico de origen organico elaborado con múltiples enzimas de materiales orgánicos fermentados.

A recomendación del distribuidor de cada estabilizador se establecieron las siguientes dosificaciones para cada producto:

ESTABILIZADOR	DOSIFICACION
TERRASIL	0.5 kg/m ³ + Cemento Portland tipo I (1%), en peso del suelo seco
PROES	0.3 L/m ³ + PR3 (3% en peso del suelo seco)
ISS 2500	3.0 L/m ³
PERMAZYME	1L/20m ³ + Silycal (3% en peso del suelo seco)

Según la norma tecnica de estabilizadores quimicos MTC E 1109-2004 no considera la utilización de los productos cemento y asfalto, excepto cuando estos se incorporan, como complemento del estabilizador químico, en porcentajes inferiores a los normalmente utilizados en estabilizaciones suelo-cemento y suelo-asfalto.

Cabe resaltar que los aditivos a usar tienen un principio químico de funcionamiento por lo cual no se esta comparando con el cemento y cal, ya que estos últimos tienen un principio de funcionamiento físico (cohesión).

5.2.2 Caracterización del Suelo:

Previo a la evaluación de las propiedades de comportamiento del suelo, se deben determinar las características del mismo, las cuales se podrán apreciar en el Anexo Nro.2 del presente estudio . A continuación un resumen:

Cuadro N°5.1: Caracterización de las mezclas de suelos para el Aeródromo de San Lorenzo

MALLAS		DENOMINACION	AERÓDROMO DE SAN LORENZO				
			MEZCLA I		MEZCLA II		
SERIE AMERICANA	ABERTURA (mm)	NORMAS ENSAYO	RET(%)	PASA(%)	RET(%)	PASA(%)	
3"	76.200	MTC E-109 (2000)					
2 1/2"	63.500						
2"	50.600						
1 1/2"	38.100						
1"	25.400						
3/4"	19.050						
1/2"	12.700						
3/8"	9.525						
# 4	4.760						
# 8	2.380						
# 10	2.000						
#16	1.180						
# 20	0.840				100	100	
# 30	0.590			1	99	1	99
# 40	0.420			4	95	4	95
# 50	0.300			15	80	13	82
# 80	0.180			17	63	16	66
# 100	0.149			3	60	2	64
# 200	0.075			10	50	9	55
< # 200	-		MTC E-109 (2000)	50	-	55	-
LIMITE LIQUIDO (MALLA N 40)		MTC E-110 (2000)	28		33		
LIMITE PLASTICO (MALLA N 40)		MTC E-111 (2000)	20		23		
INDICE PLASTICO (%)		MTC E-110 (2000)	8		10		
CLASIFICACION DE SUELOS (SUCS)		NTP 339.134 (1999)	CL		CL		
CLASIFICACION DE SUELOS (AASHTO)		NTP 339.135 (1999)	A-4 (1)		A-4 (3)		

Cuadro N°5.2: Caracterización de las mezclas de suelos para el Aeródromo de Sepahua

MALLAS		DENOMINACION	AERÓDROMO DE SEPAHUA				
			MEZCLA I		MEZCLA II		
SERIE AMERICANA	ABERTURA (mm)	NORMAS ENSAYO	RET(%)	PASA(%)	RET(%)	PASA(%)	
3"	76.200	MTC E-109 (2000)					
2 1/2"	63.500						
2"	50.600						
1 1/2"	38.100						
1"	25.400						
3/4"	19.050						
1/2"	12.700						
3/8"	9.525						
# 4	4.760						
# 8	2.380						
# 10	2.000						
#16	1.180						
# 20	0.840						
# 30	0.590						
# 40	0.420						
# 50	0.300			100		100	
# 80	0.180			1	99	1	99
# 100	0.149			7	92	6	93
# 200	0.075			7	85	5	88
< # 200	-		MTC E-109 (2000)	21	64	18	70
LIMITE LIQUIDO (MALLA N 40)		MTC E-110 (2000)	64	-	70	-	
LIMITE PLASTICO (MALLA N 40)		MTC E-111 (2000)	34		34		
INDICE PLASTICO (%)		MTC E-110 (2000)	24		25		
CLASIFICACION DE SUELOS (SUCS)		NTP 339.134 (1999)	10		9		
CLASIFICACION DE SUELOS (AASHTO)		NTP 339.135 (1999)	ML		ML		
			A-4 (5)		A-4 (5)		

5.2.3 Propiedades de desempeño

La efectividad de un estabilizador químico, se determina mediante ensayos realizados sobre probetas estabilizadas químicamente y sobre probetas no tratadas químicamente. Si los resultados obtenidos sobre las primeras mejoran una propiedad de desempeño de las segundas, entonces se dice que el estabilizador es efectivo.

a. Trabajabilidad

Según la norma técnica de estabilizadores químicos MTC E 1109-2004, esta propiedad se puede evaluar mediante la relación humedad/densidad (Ensayo Proctor Modificado), el cual se puede apreciar en el Anexo Nro.2 del presente estudio. A continuación un resumen:

Cuadro N°5.3: Resumen de Máxima densidad Seca y Óptimo Contenido de Humedad

DOSIFICACION	AERÓDROMO DE SAN LORENZO				AERÓDROMO DE SEPAHUA			
	MEZCLA I		MEZCLA II		MEZCLA I		MEZCLA II	
	M.D.S.	O.C.H.	M.D.S.	O.C.H.	M.D.S.	O.C.H.	M.D.S.	O.C.H.
NATURAL	1.741	16	1.712	19.3	1.816	15.5	1.832	15
TERRASIL (0.5KG/M3) + (1%) CEMENTO	1.753	17.8	1.707	19.5	1.816	15.5	1.831	15
PROES (0.30 L/M3) + CAL (3%)	1.726	17.8	1.715	18.9	1.796	15.4	1.806	15.1
ISS (3.0 L/M3)	1.792	16.7	1.691	19.5	1.818	15.2	1.819	14.9
PERMAZYME (01L POR 20 M3) + CAL (3%)	1.74	17.2	1.727	17.4	1.792	15.7	1.811	15.5

A mayor trabajo mecánico de compactación, se obtiene una mayor densidad seca máxima y una menor humedad óptima. Según lo observado en el cuadro N°5.3, el Terrasil hace que disminuya en casi todos los casos la energía de compactación.

b. Capacidad de soporte y estabilidad bajo agua

Estas propiedades se evaluarán mediante el ensayo estándar para la resistencia a la compresión no confinada de suelos con químicos (ASTM-1633) y el ensayo C.B.R. de suelos (MTC E-132), cuyos resultados se pueden apreciar en el Anexo Nro. 2 del presente estudio. A continuación un resumen:

Cuadro N°5.4: Resumen de los Resultados de C.B.R. y Ensayo de Compresión No Confinada de Suelos Químicos para el Proyecto: Aeródromo de San Lorenzo

DOSIFICACION	AERÓDROMO DE SAN LORENZO		
	MEZCLA I	MEZCLA II	
	C.B.R. al 100% de la MDS (MTC E-132)	C.B.R. al 100% de la MDS (MTC E-132)	COMPRESION NO CONFINADA (kg/cm ²) - ASTM 1633
NATURAL	9.6	9.5	-
TERRASIL (0.5KG/M ³) + (1%) CEMENTO	26.0	25	10.86
PROES (0.30 L/M ³) + CAL (3%)	7.2	7.2	11.12
ISS (3.0 L/M ³)	12.1	11.4	6.06
PERMAZYME (01L POR 20 M ³) + CAL (3%)	26.9	24.1	10.04

Cuadro N°5.5: Resumen de los Resultados de C.B.R. y Ensayo de Compresión No Confinada de Suelos Químicos para el Proyecto: Aeródromo de Sepahua

DOSIFICACION	AERÓDROMO DE SEPAHUA		
	MEZCLA I	MEZCLA II	
	C.B.R. al 100% de la MDS (MTC E-132)	C.B.R. al 100% de la MDS (MTC E-132)	COMPRESION NO CONFINADA (kg/cm ²) - ASTM 1633
NATURAL	16.2	18.3	-
TERRASIL (0.5KG/M ³) + (1%) CEMENTO	26.0	25.1	10.07
PROES (0.30 L/M ³) + CAL (3%)	19.0	19.7	12.17
ISS (3.0 L/M ³)	26.0	22.2	9.68
PERMAZYME (01L POR 20 M ³) + CAL (3%)	35.3	30.6	12.03

De acuerdo a los resultados podemos apreciar que el Terrasil aumenta el C.B.R. hasta en un 170% mas del natural, considerando la baja dosificación de aditivo y material cementante, en comparación con los otros productos.

Para evaluar la propiedad hidrofoba que confiere el Terrasil al suelo se sometieron las probetas tratadas a un recipiente con un nivel bajo de agua tal como se muestra en la siguiente figura:



Figura N°5.14: Probetas tratadas sometidas a un recipiente con agua

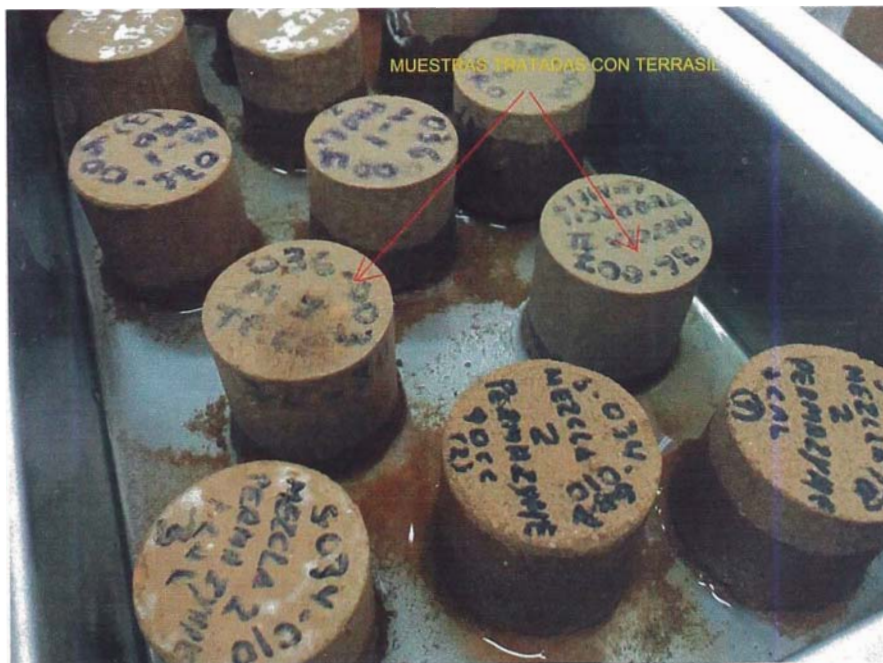


Figura N°5.15: Probetas tratadas sometidas a un recipiente con agua

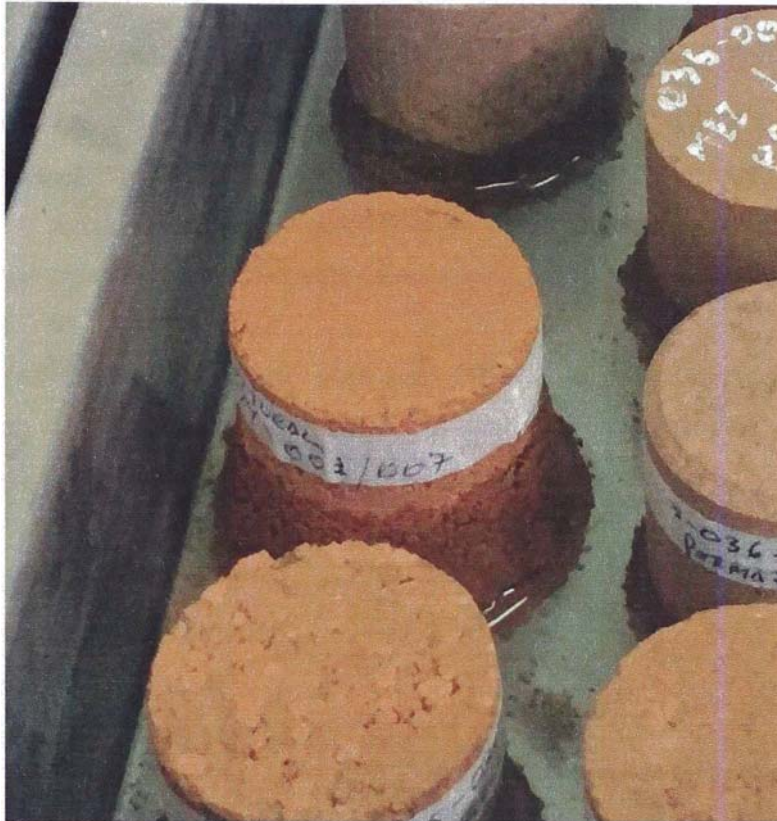


Figura N°5.16: Probetas en estado natural sometida a recipiente con agua

En menos de una hora podemos comprobar que las otras muestras aditivadas presentaban ascension capilar del agua, mientras las probetas tratadas con Terrasil mantenian sus condiciones secas, cabe mencionar que las probetas sin aditivar sometidas a esta condición, se saturaron completamente a los pocos minutos y comenzaron a tener cambios volumetricos, tal como se muestra en la figura Nro. 16.

CAPITULO VI: EVALUACIÓN TÉCNICO ECONÓMICA DEL ADITIVO:

A continuación se presenta un análisis de costos de construcción y conservación para carpetas estabilizadas con Terrasil, realizado a través de datos históricos obtenidos de diversas fuentes involucradas en la ejecución de este tipo de obras, tales como Provias Nacional, Provias Descentralizado y Empresas Privadas.

Los objetivos fundamentales de este sub capítulo, es determinar el costo de construcción de 1 kilometro de carpeta granular con incorporación de Terrasil, identificando la incidencia de los siguientes componentes:

- Costo de PERSONAL
- Costo de MAQUINARIA
- Costo de TERRASIL
- Costo de OTROS MATERIALES.

Para la realización de este estudio se considera la siguiente metodología:

- a) Obtención de costos constructivos promedio de Provias Nacional y Provias Descentralizado, además de diversas empresas contratistas en los años 2014 y 2015, para **afirmados simples** ejecutados mediante la modalidad de Administración Directa y por contrato respectivamente (Cuadro N°6.1).
- b) Obtención de costos constructivos promedio de Provias Nacional y Provias Descentralizado, además de diversas empresas contratistas en los años 2014 y 2015, para **afirmados estabilizados con Terrasil** ejecutados mediante la modalidad de Administración Directa y por contrato respectivamente (Cuadro N°6.2).
- c) Determinación de costos de conservación para carpetas de afirmado con y sin incorporación de Terrasil.
- d) Evaluación económica de ambas alternativas, considerando costos de construcción y conservación, utilizando los valores validados en a), b) y c).

El Ministerio de Transportes con el fin de que los caminos rurales tengan o aseguren su transitabilidad, ha implementado un programa en el cual hace un desembolso de dinero para trabajos de mantenimiento y mejora de estos caminos, a continuación se detalla el tipo de trabajo que se debe ejecutar, el tiempo estimado para cada trabajo y el monto necesario para cubrir las necesidades para mejorar el camino.

Cuadro N°6.1: Rehabilitación y mantenimiento de caminos rurales (Fuente Provias Nacional)

Tipo de Trabajo	Tiempo de Intervención	U\$\$/Km
Rehabilitación del Camino Rural	Inversión Inicial	17,000.00
Mantenimiento Rutinario	Cada año	700.00
Mantenimiento Periódico	Cada 03 años	2,800.00

La Rehabilitación del Camino Rural, consiste en la conformación de sub rasante (nivelación y perfilado del terreno natural, relleno y pequeños cortes), lastrado (conformación de la plataforma, compactado) y obras de arte (construcción y/o reparación de alcantarillas, badenes, muros de contención, cunetas, zanjas de coronación, pontones, puentes).

El Mantenimiento Rutinario, consiste en acciones rutinarias y por lo general manuales, para prevenir el deterioro de la vía, sobresalen: bacheo, parches, limpieza de cunetas, bermas, alcantarillas y otros.

El Mantenimiento Periódico, consiste en acciones preventivas con uso intensivo de maquinaria. Reposición de material de afirmado.

Cuadro N°6.2: Cálculo de Costos Directos de Mejoramiento a Nivel de Afirmado

COSTOS DIRECTOS DE MEJORAMIENTO A NIVEL DE AFIRMADO ESPESOR 0.15M					UNIDAD:	M3
					REND:	540 M3/día
A: MAQUINARIA Y EQUIPOS	UNIDAD	CUADRILLA	CANTIDAD	PRECIO	PRECIO PARCIAL (S/.)	
		(A)	(AXK)	(A x B)		
Motoniveladora 180 - 200 hp	HM	1	0.015	240.00	S/. 3.556	
Rodillo Liso 210 hp	HM	1	0.015	140.00	S/. 2.074	
Cisterna de agua de 3,500 glns	HM	1	0.015	120.00	S/. 1.778	
Camión Baranda (Logístico)	HM	1	0.015	40.00	S/. 0.593	
Camioneta Pick up	HM	1	0.015	35.00	S/. 0.519	
Bomba de desplazamiento positivo	HM	1	0.015	10.00	S/. 0.148	
Herramientas Manuales (5% de la M.O.)	%MO		5.00	2.07	S/. 0.104	
SUBTOTAL EQUIPOS					S/. 8.770	
B: MANO DE OBRA	UNIDAD	CUADRILLA	CANTIDAD	PRECIO	PRECIO PARCIAL (S/.)	
Capataz	HH	1	0.015	35.000	S/. 0.519	
Operario	HH	1	0.015	21.000	S/. 0.311	
Peones	HH	4	0.059	21.000	S/. 1.244	
SUBTOTAL MANO DE OBRA					S/. 2.074	
C: MATERIALES	UNIDAD		CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	PRECIO PARCIAL (S/.)	
Material Afirmado	m3		1.150	20.00	S/. 23.00	
Agua	m3		0.100	12.50	S/. 1.250	
SUBTOTAL MATERIALES					S/. 24.25	
					COSTO DIRECTO (M3)	
					S/. 35.09	
					COSTO DIRECTO (M2)	
					S/. 5.26	

Fuente: Elaboración Propia

Considerando:

LONGITUD DE VIA (m)	1000.00
ANCHO DE VIA (m)	6.00
ESPESOR (m)	0.15
COSTO POR KM.	S/31,581.00

Cuadro N°6.3: Cálculo de Costos Directos de Mejoramiento a Nivel de Afirmado con Terrasil

COSTOS DIRECTOS DE MEJORAMIENTO A NIVEL DE AFIRMADO ESPESOR 0.15M					UNIDAD:	M3
					REND:	540 M3/día
A: MAQUINARIA Y EQUIPOS	UNIDAD	CUADRILLA	CANTIDAD	PRECIO	PRECIO PARCIAL (S/.)	
		(A)	(AXK)	(A x B)		
Motoniveladora 180 - 200 hp	HM	1	0.015	240.00	S/. 3.556	
Rodillo Liso 210 hp	HM	1	0.015	140.00	S/. 2.074	
Cisterna de agua de 3,500 glns	HM	1	0.015	120.00	S/. 1.778	
Camión Baranda (Logístico)	HM	1	0.015	40.00	S/. 0.593	
Camioneta Pick up	HM	1	0.015	35.00	S/. 0.519	
Bomba de desplazamiento positivo	HM	1	0.015	10.00	S/. 0.148	
Herramientas Manuales (5% de la M.O.)	%MO		5.00	2.07	S/. 0.104	
SUBTOTAL EQUIPOS					S/. 8.770	
B: MANO DE OBRA	UNIDAD	CUADRILLA	CANTIDAD	PRECIO	PRECIO PARCIAL (S/.)	
Capataz	HH	1	0.015	35.000	S/. 0.519	
Operario	HH	1	0.015	21.000	S/. 0.311	
Peones	HH	4	0.059	21.000	S/. 1.244	
SUBTOTAL MANO DE OBRA					S/. 2.074	
C: MATERIALES	UNIDAD		CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	PRECIO PARCIAL (S/.)	
Material de Afirmado	m3		1.15	20.00	S/23.00	
Químico estabilizador - Terrasil	kg		0.50	40.00	S/20.00	
Agua	m3		0.100	12.50	S/. 1.250	
SUBTOTAL MATERIALES					S/. 64.25	
					COSTO DIRECTO (M3)	
					S/. 75.09	
					COSTO DIRECTO (M2)	
					S/. 11.26	

Fuente: Elaboración Propia

Considerando:

LONGITUD DE VIA (m)	1000.00
ANCHO DE VIA (m)	6.00
ESPESOR (m)	0.15
COSTO POR KM.	S/67,581.00

Se observa claramente que el ítem de materiales presenta una mayor variación. Cabe señalar que en muchos el costo del ítem **materiales** se ve incrementado en las obras de estabilización pues se requiere más rigurosidad de los materiales granulares que componen la base respecto a los afirmados simples.

Para la conservación de carpetas se realiza preferentemente la operación de “reperfilado con compactación”, en la cual se recupera el material granular existente y se reconforma la superficie de rodadura. Para el caso de las carpetas estabilizadas con Terrasil se puede reincorporar estabilizador en este proceso, considerando una dosis menor a la inicial, la cual se estima en una quinta parte de la dosis inicial.

Cuadro N°6.4: Costos de Inversión, Operación y Mantenimiento de Carpetas de afirmado simple y afirmados estabilizados con Terrasil

Años	SIN PROYECTO (Costos de Mantenimiento)	AFIRMADO		AFIRMADO ESTABILIZADO	
		Inversión (S/.)	Mantenimiento (S/.)	Inversión (S/.)	Mantenimiento (S/.)
		31,581.00		67,581.00	
2015	2,275.00		11,375.00		2,275.00
2016	2,275.00		11,375.00		2,275.00
2017	2,275.00		11,375.00		2,275.00
2018	2,275.00		11,375.00		13,516.00
2019	2,275.00		11,375.00		2,275.00
2020	2,275.00		11,375.00		2,275.00
2021	2,275.00		11,375.00		2,275.00
2022	2,275.00		11,375.00		13,516.00
2023	2,275.00		11,375.00		2,275.00
2024	2,275.00		11,375.00		2,275.00
Costo Parcial		31,581.00	113,750.00	67,581.00	45,232.00
COSTO TOTAL			145,331.00		112,813.00

Fuente: Elaboración propia.

Este tipo de caminos estabilizados, tienen un menor costo de construcción y de conservación, por lo cual, el Terrasil puede ser una alternativa de conservación para las rutas con climas de alta precipitación pluvial.

En caminos públicos es conveniente privilegiar la creación de caminos más económicos, el estado ahorraría cantidades importantes de dinero que se pueden destinar a otros proyectos de beneficio social. Estos caminos presentan un menor número de operaciones de mantenimiento para su conservación que los caminos de tierra o grava.

Por ser caminos más económicos, se pueden utilizar como habilitación de desvíos temporales, ya que cumplen con las expectativas de economía y duración.

CAPITULO VII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 CONCLUSIONES

- La estabilización química con Terrasil es un complemento a la estabilización mecánica de capas granulares, y tiene diferentes propósitos de acuerdo a los requerimientos de desempeño asociado a la base, sub base o sub rasante de un camino.
- En el Perú, el uso de estabilizadores químicos tradicionales (asfalto, cemento y cal) no es adecuado técnica y económicamente para carpetas granulares de rodado. Económicamente la estabilización de caminos no pavimentados con cal, cemento y asfalto no se justifica en países en desarrollo, menos aun para caminos con bajos volúmenes de tránsito. Además, el uso de estos estabilizadores presenta algunas dificultades en caminos no pavimentados, siendo los principales: (1) se forma una carpeta endurecida que no permite o dificulta la ejecución de las actividades de perfilado y nivelado con la maquinaria tradicional (motoniveladora) cuando se presenten los deterioros. (2) Como las dosis que se utilizan para estabilizar caminos de grava son pequeñas, la carpeta de rodado estabilizada no resiste adecuadamente la acción abrasiva del tránsito, y requiere ser cubierta con una superficie delgada de rodado (Por ej.: tratamiento superficial doble).
- En el mercado internacional existe gran diversidad de compuestos químicos para la estabilización de carpetas granulares de rodado. El principal problema con la mayoría de estos aditivos es que no existen estudios suficientes que respalden su efectividad, tampoco está claro en que materiales se deben utilizar o cuáles son las dosis recomendadas.
- Los resultados de la investigación, especialmente los de terreno indican que el Terrasil es un producto muy efectivo para la estabilización de carpetas granulares y suelos con elevada sensibilidad al agua, altamente expansivos o baja resistencia a la carga.
- En el Tramo II del "Servicio de Conservación Vial por Niveles de Servicio del Corredor Vial EMP. PE 04-B (Hualapampa) – Sondor – Huancabamba – Pacaibamba – Socchabamba – Puesto Vado Grande/ Sondor – Tabaconas – EMP.PE – 5N (Ambato)/ Huancabamba – Canchaque y Socchabamba – Ayabaca" se logró obtener un aumento de C.B.R desde un 52.50% hasta un 173% haciendo uso de una dosificación de Terrasil de 0.5 kg/m³ + 1% de

cemento en peso del suelo seco, para un tipo de suelo granular GP-GM. Tener en cuenta que la norma técnica de estabilizadores químicos MTC E 1109-2004 no considera la utilización de los productos cemento y asfalto, excepto cuando estos se incorporan, como complemento del estabilizador químico, en porcentajes inferiores a los normalmente utilizados en estabilizaciones suelo-cemento y suelo-asfalto.

- En los ensayos realizados para el proyecto "Rehabilitación y/o Mejoramiento del Aeródromo de San Lorenzo" se logro aumentar el C.B.R. hasta un 170% más del natural para un tipo de suelo limoso CL y con una dosificación de 0.5 kg/m³ + 1% de cemento.
- En los ensayos realizados para el proyecto "Rehabilitación y/o Mejoramiento del Aeródromo de Sepahua" se logro aumentar el C.B.R. hasta un 60% más del natural para un tipo de suelo limoso ML y con una dosificación de 0.5 kg/m³ + 1% de cemento.
- El suelo tratado con Terrasil se convierte en Hidrófobo logrando repeler el agua y eliminando los problemas que se derivan de la presencia de la misma, esto se pudo comprobar sometiendo las probetas tratadas a un nivel determinado de agua, manteniendo siempre sus condiciones secas.
- Al evaluar los tramos estabilizados con Terrasil, se permite concluir que el Terrasil puede ser efectiva por un periodo superior a dos años, sin ningún tipo de conservación. Por lo tanto pueden obtenerse importantes beneficios económicos derivados de la reducción de los costos de conservación y costos de operación de los vehículos.

Según la evaluación técnico económica se podrían reducir los costos de mantenimiento a largo plazo hasta en un 20% por km.

- El suelo tratado con Terrasil mejora la adherencia con polímeros y betún, lo que permite y mejora la aplicación de capas de rodadura, riegos de imprimación u otro.
- La construcción y rehabilitación de caminos no pavimentados estabilizados con Terrasil es similar al proceso tradicional, no requiriéndose maquinaria específica de alto costo, lo cual facilita la incorporación de la técnica de estabilización con Terrasil al proceso constructivo.

7.2 RECOMENDACIONES:

A continuación se indican diversas recomendaciones para el mejor desempeño de carpetas granulares de rodado estabilizadas con Terrasil, las cuales son consecuencia de los resultados obtenidos en la presente investigación y observaciones de terreno:

- Se recomienda utilizar dosis de Terrasil entre 0.5-1 kg/m³ para estabilización de caminos no pavimentados.
- Se recomienda el uso de Terrasil para suelos de la Selva Peruana.
Se recomienda aplica riegos con baja dosificación de Terrasil o riegos de imprimación (asfaltos cortados o emulsiones) sobre la superficie del camino, y asegurar un sistema de drenaje que permita la rápida evacuación del agua fuera del camino
- Al igual que para todo camino no pavimentado, el bombeo de la carpeta de rodado es esencial para la rápida evacuación del agua desde el camino, evitando de esta manera la acumulación de agua sobre la calzada y la formación de puntos débiles. Se recomienda utilizar un bombeo de 4% en las zonas más lluviosas.
- Con el propósito de prolongar la vida útil de los caminos estabilizados con Terrasil, se recomienda que las entidades públicas o privadas a cargo del camino implementen un programa de conservación, el cual incluya actividades de bacheo, riego superficial con Terrasil y escarificado con compactación. Este programa de conservación se debe ajustar de acuerdo al volumen y tipo de tránsito, como también a las condiciones climáticas prevalecientes.
- Finalmente, se recomienda que se confeccione una base de datos con los antecedentes de nuevos proyectos de estabilización con Terrasil. Los datos que se deben incluir son características del material granular, dosis de Terrasil utilizada, características del tránsito y condiciones climáticas. Además, se debe realizar un seguimiento a estos nuevos proyectos para evaluar la efectividad del Terrasil. Los antecedentes contenidos en esta base de datos deben permitir en el futuro utilizar dosis de Terrasil específicas acordes a las características del suelo, características del tránsito y a las condiciones climáticas.

BIBLIOGRAFÍA

- Ballarin Zavala, Miguel Ángel; "Mejoramientos de caminos no pavimentados en el Departamento de Huánuco mediante la Estabilización de suelos comparando el Estabilizador orgánico PERMA-ZYME 22X y el PROBASE TX-55", tesis UNI-FIC, Perú, 2006.
- BREM ENVIRONMENTAL SOLUTIONS S.A.C.; Especificaciones técnicas del Aditivo Estabilizador Terrasil, Lima, 2014.
- Garagorri Huaman Edwar Filiberto "Estabilización de Suelos para Carreteras en la Selva". Tesis para optar el título profesional, FIC-UNI, Lima (1994).
- Juárez Badillo, Eulalio; Fundamentos de la Mecánica de suelos; Limusa, México, 1979.
- La Rosa Orbezo, Noelia Thais; Aplicación del aditivo Quim KD-40 para estabilizar suelos en caminos no pavimentados. Aplicación: Calles del centro poblado Santa Maria de Huachipa. Tesis para optar el título profesional, FIC-UNI, Lima, 2006.
- MINISTERIO DE TRANSPORTES Y COMUNICACIONES. Manual para el diseño de carreteras no pavimentadas de bajo volumen de tránsito, Lima, 2008.
- MINISTERIO DE TRANSPORTES Y COMUNICACIONES. Manual técnico de Mantenimiento rutinario para la red vial departamental no pavimentada. Dirección General de Caminos y Ferrocarriles del Ministerio de Transportes y Comunicaciones. Lima, 2006
- Ugaz Palomino, Roxana María; Estabilización de suelos y su aplicación en el mejoramiento de subrasante, tesis UNI-FIC, Perú, 2006.
- Yturry Garnica, Alex Mauricio "Investigación de Aditivos Estabilizadores de Suelos para La Construcción de Carreteras". Informe de Suficiencia, FIC-UNI, Lima (1999).