



**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**

TESIS

**EVALUACIÓN DE PAVIMENTOS CON SUELO
ESTABILIZADO, UTILIZANDO ADITIVOS
QUÍMICOS, EN LA ZONA DE SELVA BAJA**

**PRESENTADA POR EL BACHILLER
ADA NANCY O'DIANA QUIRÓZ**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERA CIVIL**

LIMA – PERÚ

2016

DEDICATORIA

A mi Mamá, que desde el cielo me está mirando.

A mi querido Padre,

A mi amado esposo Juan de Dios

y adorados hijos Adita y Juanito.

AGRADECIMIENTO

A mi Alma Mater UAP y a mis docentes

RESUMEN

La finalidad de la presente tesis es emplear pavimentos con suelo estabilizado, para mejorar la transitabilidad de la carretera SM-100 : Emp.PE-50N (Moyobamba) – Jepelacio, provincia de Moyobamba, región San Martín, que actualmente tiene una superficie de rodadura descubierta y no hay una comunicación continua y segura durante todo el año, que permita desarrollar económicamente al distrito de Jepelacio y comunidades aledañas; esto se debe a que en temporadas de alta precipitación pluvial (Diciembre – Abril), los suelos con características físico-mecánicas desfavorables hacen que esta vía sea intransitable.

La metodología de investigación consistió en la evaluación superficial de la plataforma vial, estudio de suelos y canteras, identificación de zonas de mejoramiento, elección técnica-económica del mejor aditivo químico estabilizador y finalmente el diseño del pavimento básico.

Los resultados de los ensayos de suelos nos indican que la mayoría de los suelos son finos; se definió a la cantera Tumba como banco de materiales y sus resultados de ensayos fueron satisfactorios respecto a las especificaciones técnicas EG-2013 del MTC. Se evaluaron a los tres aditivos propuestos y se realizó la estabilización de los suelos más los materiales de la cantera Tumba, para el diseño final del pavimento básico.

PALABRAS CLAVE: PAVIMENTOS CON SUELO ESTABILIZADO, UTILIZANDO ADITIVOS QUÍMICOS

ABSTRACT

Objectives this thesis aims stabilized soil pavements used to improve the walkability of the road SM-100: Emp. PE-50N (Moyobamba) - Jepelacio province of Moyobamba, San Martín region, which currently has a tread pool and there is a continuous and secure communication throughout the year, allowing the district to develop economically Jepelacio and surrounding communities; This is because in high rainfall seasons (December to April), soils with unfavorable physical and mechanical characteristics make this road is impassable.

The research methodology involved the assessment of road surface platform, study of soils and quarries, identifying areas for improvement, technical-economic choosing the best stabilizer chemical additive and finally the design of the basic pavement.

The results of soil tests indicate that most soils are fine; was defined as the Tomb quarry bank materials and test results were satisfactory with respect to the technical specifications EG-2013 MTC. They were assessed at three proposed additives and soil stabilization materials over the Tomb quarry for the final design of the basic pavement were performed.

KEYWORDS: FLOORING STABILIZED SOIL, USING CHEMICAL ADDITIVES

INTRODUCCIÓN

En la vía departamental SM-100: Emp. PE-50N (Moyobamba) – Jepelacio, provincia de Moyobamba, región San Martín, que actualmente tiene una superficie de rodadura descubierta (de material granular), no hay una comunicación continua y segura durante todo el año, que permita desarrollar económicamente al distrito de Jepelacio y comunidades aledañas; esto se debe a que en temporadas de alta precipitación pluvial (Diciembre – Abril), los suelos con características físico-mecánicas desfavorables hacen que esta vía sea intransitable.

Esto a la vez hace que en un tiempo corto, la capa granular sufra un rápido y prematuro deterioro, por pérdida y contaminación de los materiales que la componen, trayendo consigo la disminución de la serviciabilidad y de la vida útil de la carretera, que obliga a un permanente y costoso trabajo de conservación vial ya que se cuenta con escasos bancos de materiales apropiados (que cumplan con las especificaciones técnicas estándar).

Para solucionar este problema se propone pavimentos con suelo estabilizado, que resistan el tráfico para el periodo de servicio o de diseño, cuya particularidad en este proyecto es la adición de elementos estabilizantes e impermeabilizantes que mejoren las propiedades de los materiales.

ÍNDICE

Dedicatoria.....	I
Agradecimiento.....	II
Resumen.....	III
Abstract	IV
Introducción.....	V
Índice.....	VI

Capítulo 1: GENERALIDADES

1.1. Antecedentes.....	10
1.2. Descripción del problema	10
1.3. Objetivos	11

Capítulo 2: MARCO TEÓRICO

2.1. Conceptos generales y definiciones.....	12
2.2. Enfoques Teóricos.....	17
2.3. Emulsiones Asfálticas.....	23

Capítulo 3: MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Potencial humano e la investigación.....	33
3.2. Materiales y herramientas empleados en la investigación.....	34
3.3. Metodología.....	35

Capítulo 4: RESULTADOS

4.1.	Descripción de la vía de estudio.....	47
4.2.	Resultado de la evaluación superficial de la vía.....	48
4.3.	Resultado del estudio de suelos.....	50
4.4.	Resultado del estudio de la cantera Tumba.....	58
4.5.	Resultado de los ensayos de estabilización.....	61
4.6.	Resultado del Diseño de Pavimentos.....	69

Capítulo 5: DISCUSIONES

5.1.	Interpretación de los Resultados del Estudio de Suelos.....	76
5.2.	Interpretación de los Resultados del Estudio de Canteras.....	82
5.3.	Interpretación de los Resultados de Estabilización de suelos.....	83
5.4.	Interpretación de los Resultados del Diseño de Pavimentos.....	83
5.5.	Comparación de Resultados.....	87

CONCLUSIONES.....	89
RECOMENDACIONES	91
BIBLIOGRAFÍA.....	92
ANEXOS.....	94

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

1.1. ANTECEDENTES

En la tesis de Barrueta A. (1), se hace mención del estudio de suelos y diseño del pavimento en la ciudad de Pucallpa, observando y pensando en el problema vial urbano de esta ciudad, con esta tesis se estableció las características físicas y mecánicas de los suelos arcillosos de la ciudad de Pucallpa; seguidamente del estudio de suelos, se realizó la estabilización de los suelos con cal, para mejorar la capacidad de soporte del suelo de fundación ; y finalmente se analizó el tráfico en la ciudad para dimensionar un pavimento flexible.

En la tesis de Mendoza J. (2), menciona que el Gobierno está llevando un intenso programa orientado hacia el desarrollo vial, a través de la construcción y rehabilitación de carreteras. Programa en el cual se incluye el uso de estabilizadores como insumo indispensable para otorgarle mayor vida útil, y consecuentemente, lograr un considerable ahorro. El aditivo Zymplex PZ 22X, es una alternativa eficaz para la estabilización de carreteras cuya formulación líquida enzimática natural, no tóxica y biodegradable mejora la calidad de las obras de ingeniería. Por todo lo expuesto en su tesis, Mendoza concluye que los resultados obtenidos con la aplicación del aditivo estabilizador de suelos, son satisfactorios.

1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Se basa en el análisis de la vía departamental SM-100: Emp. PE-50N (Moyobamba) – Jepelacio, provincia de Moyobamba, región San Martín, que actualmente tiene una superficie de rodadura descubierta (de material granular), no hay una comunicación continua y segura durante todo el año, que permita desarrollar económicamente al distrito de Jepelacio y comunidades aledañas.

Esto se debe fundamentalmente a que en periodos de lluvia los suelos, debido a sus características, hacen que esta vía sea intransitable. La solución que se propone es la idea de pavimentos con suelo estabilizado.

1.3. OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Usar pavimentos con suelo estabilizado, para mejorar la transitabilidad de la carretera SM-100 (Moyobamba – Jepelacio), dando continuidad al crecimiento del tráfico que a su vez concluirá en un desarrollo económico de la zona.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Mejorar la Serviciabilidad de la carretera SM-100, para aumentar el tráfico que permita en un futuro recategorizar la vía de estudio, que conllevará a la construcción de un pavimento convencional y definitivo de acuerdo a las normas estándar.
- Utilizar estabilizadores químicos de suelos para mejorar las propiedades de los materiales de las canteras seleccionadas y así conformar un pavimento resistente y duradero por el periodo de servicio establecido.
- Definir el estabilizador de mayor eficiencia, de costo promedio y de aplicación sencilla y rápida.
- Establecer una solución económicamente aceptable, que permita solo una inversión inicial, y luego mantenimientos periódicos y rutinarios mínimos.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. CONCEPTOS GENERALES Y DEFINICIONES

Suelos Colapsables: Este tipo de suelos presenta una estructura que se desestabiliza con la presencia de agua, ocasionando el colapso o falla súbita de la sub rasante, se pueden evitar observando las evidencias cercanas a la zona, este tipo de suelos puede ocasionar fallas severas y hundimientos en la estructura del pavimento. Los suelos colapsables presentan cambios súbitos en la resistencia cuando el contenido de humedad se aproxima a la saturación. Cuando están secos o con bajo contenido de humedad los suelos colapsables dan la impresión de ser un depósito estable. Sin embargo, estos suelos cuando el contenido de humedad es alto, tienen a colapsar y reducir bruscamente su volumen (6). Por tanto la determinación de la sensibilidad de los suelos al colapso, está en función a la existencia de suelos arcillosos que en presencia de agua se expanden considerablemente y luego se contraen con la pérdida de ésta; para este análisis es necesario utilizar el concepto de Humedad, Límite Líquido, Límite plástico e Índice de Liquidez de los suelos.

Límite Plástico (LP): Es el contenido de humedad por debajo del cual se puede considerar el suelo como un material no plástico.

Límite Líquido (LL): Es el contenido de humedad por debajo del cual el suelo se comporta como un material plástico. A este nivel de contenido de humedad, el suelo está en el vértice de cambiar su comportamiento al de un fluido viscoso.

Índice de liquidez de suelos (I_L): Es el valor numérico, que evalúa el grado de consistencia líquida que presenta un suelo in-situ. Se considera que los valores cercanos a cero se encuentran pre consolidados y por lo tanto ofrecen resistencia. Cuando el I_L es superior a 1, entonces el suelo puede ser amasado, en otras palabras se encuentra en estado plástico y deformable. Cuando el I_L es negativo, significa que no contiene mucha humedad, y por lo tanto, por más plástico que sea el suelo, no es deformable.

Suelos Expansivos: La expansión se produce como consecuencia de las variaciones de volumen localizados en suelos expansivos que absorben y retienen la humedad. En el Perú la selva se tiene alta presencia de suelos expansivos y estos deben ser detectados durante los estudios para evitar afectaciones en el pavimento. Los suelos expansivos presentan grandes cambios en el volumen de suelo con los cambios de humedad. El potencial de expansión de estos suelos depende de la cantidad de arcilla, su densidad relativa, su humedad de compactación, densidad, permeabilidad y su nivel freático. El potencial hinchamiento también depende de la composición mineralógica de los suelos finos.

Compresibilidad de suelos: Los cambios en volumen o compresibilidad, tienen una importante influencia en las propiedades de los suelos, pues se modifica la permeabilidad, se alteran las fuerzas existentes entre las partículas tanto en magnitud como en sentido, lo que tiene una importancia decisiva en la modificación de la resistencia del suelo al esfuerzo cortante y se provocan desplazamientos. 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 son transmitidos gradualmente al esqueleto o estructura del suelo; este proceso produce una compresión gradual de dicha estructura, fenómeno conocido como la consolidación de suelos.

Aguas subterráneas: Las observaciones del nivel del agua subterránea y la presión de la misma, son una parte importante de las exploraciones geotécnicas para el diseño de pavimentos, así mismo, la identificación de las condiciones de las aguas subterráneas deben recibir el mismo nivel de atención que las descripciones del suelo y las muestras. El nivel del agua también es fundamental para determinar los requerimientos de drenaje para la construcción y comportamiento a largo plazo de la vía. Además el nivel del agua influye en la selección de métodos de estabilización adecuada.

La permeabilidad de la subrasante por lo general no representa un problema dentro del proceso de diseño del pavimento salvo que exista interés en analizar la posibilidad de reducir el nivel freático o desecar el suelo. Por lo general el mayor interés está en conocer la permeabilidad de la base y subbase para establecer las características de drenaje de los materiales en el lugar. En este caso se pueden efectuar pruebas in-situ o en laboratorio con los materiales.

Durante las perforaciones de estudio entre los meses de julio y septiembre se ha ubicado aguas subterráneas en el km 9+000 a una profundidad de -0.90 m. Si bien es cierto que el punto ubicado es mínimo se debe tener en cuenta que estos trabajos se efectuaron en temporada de escasas precipitaciones pluviales; lluvias que aumentan considerablemente entre los meses de diciembre y abril. Por lo tanto importante el control del agua subterránea, ya que al subir por capilaridad y encontrar un pavimento altamente permeable, causaría un colapso del mismo.

Ascensión Capilar en los suelos: Es la capacidad que tiene el agua de elevar su nivel en temporadas de alta precipitación pluvial. Los espacios vacíos continuos en el suelo actúan como montones de tubos capilares con secciones variables; por lo tanto, debido al efecto de la tensión superficial, el movimiento del agua en el suelo tiene lugar por ascensión capilar.

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

Estabilización de suelos: Consiste en mejorar las características físicas y/o mecánicas de los suelos, tales como la capacidad de soporte, la deformabilidad o comprensibilidad, la estabilidad volumétrica ante la presencia de agua, entre otros, buscando en todos los casos un buen comportamiento esfuerzo – deformación. Los efectos que se produce al estabilizar un suelo se destaca el aumento del CBR, disminución de su plasticidad, reducción del hinchamiento y la disminución de la permeabilidad de los suelos.

Suelo estabilizado con productos químicos: Consiste en la construcción de una o más capas de suelos estabilizados con productos químicos, de acuerdo con las especificaciones técnicas EG-2013, los materiales a usar deben de tener IP menor que 12%, proporción de sulfatos menor de 0,2% en peso, abrasión de los ángeles no mayor a 50%, los agregados gruesos no deben presentar pérdidas en sulfato de magnesio

superiores al 18% y en materiales finos superiores al 15%, así como de las dimensiones, alineamientos y secciones transversales indicados en el Proyecto.

Aditivo Estabilizante Terrasil: Este aditivo 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. La solución consiste en el uso de un organosilano iónico, 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, el suelo mantiene la transpiración, 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.

Aditivo Estabilizante Con Aid: Este aditivo es un compuesto sintético derivado del ácido sulfónico ($R - SO_3H$), especialmente producido por CON-AID (PTY) LTD, para propósitos de estabilización iónica de suelos. CON-AID reacciona electroquímicamente con las arcillas y limos finos de los suelos consolidándolos y reforzando su capacidad de carga. Para saber si un suelo determinado puede o no ser mejorado y estabilizado con Con-Aid Súper, solamente es necesario contar con un ensayo de Identificación y Clasificación (AASHTO), con detalle de Límites de Atterberg y granulometría correspondientes.

Aditivo Estabilizante Sistema Consolid: Es un sistema de estabilización de suelos, que utiliza el suelo existente en la plataforma, convirtiéndolo en material de construcción. Esta acción brinda un ahorro considerable, pues no se necesita material clasificado de canteras y permite aprovechar el material nativo o existente en la plataforma del camino o carretera. Este conformado por dos componentes:

Consolid C-444: Es un componente líquido permite la aglomeración irreversible de las partículas finas del suelo y de este modo una reducción de la superficie activa del mismo. Actúa sobre el agua absorbida insertándose entre las partículas del suelo

formando complejas estructuras moleculares que actúan mediante procesos catalíticos que reduciendo la tensión superficial de agua que circunda dichas partículas. De tal manera, la película de agua que las cubre se dispersa permitiendo así su evaporación.

Quedando la cantidad suficiente para la lubricación entre las partículas de suelo, promoviendo una mayor capacidad de compactación y la atracción electromagnética entre ellas proveyendo al suelo una mayor resistencia a la deformación. Los contenidos de agua del suelo, especialmente su saturación capilar, son altamente disminuidos.

Solidry: Es un producto complementario de Consolid C-444 y refuerza la protección contra el agua, bloqueando los capilares y permitiendo además que el agua de la superficie no penetre en la capa tratada. El espectro de suelos al que se puede aplicar Solidry es muy amplio, pudiendo ser suelos no plásticos, pero está diseñado principalmente para ser aplicado a suelos de alta plasticidad, llevando su índice plástico a valores tales que el suelo pueda ser trabajado fácilmente. Solidry, es el componente sólido del sistema y el que permite en conjunto con el componente líquido Consolid (C-444) iniciar el proceso catalítico del suelo estabilizado. Ésta propiedad diferencia totalmente al Sistema Consolid de otros suelos estabilizados con componentes químicos, enzimáticos, etc., al lograr el Sistema Consolid obtener altos valores estructurales del suelo y estables en el tiempo.

California Bearing Ratio (CBR): Valor de la relación de soporte, se obtiene como un porcentaje del esfuerzo requerido para hacer penetrar un pistón a una profundidad de 0.1 pulgadas en una muestra de suelo y el esfuerzo requerido para hacer penetrar el mismo pistón, la misma profanidad de 0.1 pulgadas, en una muestra patrón. En la presente investigación se realizarán pruebas con tres aditivos químicos estabilizantes (Terrasil, Con Aid y Sistema Consolid), se efectuarán ensayos en laboratorio para evaluar su efecto desde el punto de vista de capacidad relativa de soporte (CBR) y la reducción de la permeabilidad en los suelos (Ascensión capilar). Se optará por la mejor alternativa y finalmente se calculará los espesores de las capas que conformarán el pavimento.

Número estructural (SN): La gráfica 7.33 de la AASHTO permite la obtención del número estructural de diseño. Para obtener el Número Estructural requerido se ha considerado establecer el Coeficiente Estructura de la mezcla estabilizada (material de cantera + el suelos natural).

Transitabilidad de la vía: Que exista una comunicación continua y segura de la vía de estudio (Dv. Moyabamba-Jepelacio), durante todo el año.

Índice de serviciabilidad de un pavimento: Se define como la capacidad de servir al tipo de tránsito para el cual ha sido diseñado, como proveer un manejo seguro y confortable al usuario. La finalidad de este trabajo es proponer pavimentos con suelo estabilizado, para mejorar la transitabilidad de la vía y por ende incrementar el índice de serviciabilidad del pavimento.

Recubrimiento bituminoso: Se trata de la capa protectora, que se coloca después de un riego impermeabilizante sobre la capa estabilizada y que será formulada con emulsión asfáltica de rotura lenta y arena natural limpia.

2.2. ENFOQUES TEÓRICOS

Guía para muestreo de suelos (MTC E 101): Proporciona métodos para el muestreo e investigación de suelos y rocas con base en procedimientos normales, mediante los cuales deben determinarse las condiciones del suelo, de la roca y del agua freática.

Métodos para la reducción de muestras de campo (MTC E 103): Proporciona tres métodos de preparación de muestras de campo a tamaños apropiados para ensayos empleando procedimientos que minimizan la variación en la medición de las características entre las muestras de ensayo y las muestras de campo.

Obtención en laboratorio de muestras representativas por cuarteo (MTC E 105):

Establece procedimientos para obtener en el laboratorio la muestra necesaria para realizar los ensayos de forma que sea representativa de la muestra total recibida.

Análisis granulométrico por tamizado (MTC E 107): Determina cuantitativamente la distribución de tamaños de partículas del suelo. Esta norma describe el método para determinar los porcentajes de suelo que pasan por los distintos tamices de la serie empleada en el ensayo, hasta el de 74 mm (N° 200).

Material que pasa malla N° 200 (MTC E 202): Describe el procedimiento para determinar, por lavado, la cantidad de material fino que pasa el tamiz de 75 mm (No. 200) en el suelo. Durante el ensayo se separan de la superficie del suelo, por lavado, las partículas que pasan el tamiz de 75 mm (No. 200), tales como: arcillas, agregados muy finos, y materiales solubles en el agua.

Determinación del Límite Líquido de los suelos (MTC E 110): El límite líquido de un suelo es el contenido de humedad expresado en porcentaje del suelo secado en el horno, cuando éste se halla en el límite entre el estado plástico y el estado líquido.

Determinación del Límite Plástico é Índice Plástico de los suelos (MTC E 111): Es la determinación en el laboratorio del límite plástico de un suelo y el cálculo del índice de plasticidad (I.P.) si se conoce el límite líquido (L.L.) del mismo suelo. Se denomina límite plástico (L.P.) a la humedad más baja con la que pueden formarse barritas de suelo de unos 3,2 mm (1/8") de diámetro, rodando dicho suelo entre la palma de la mano y una superficie lisa (vidrio esmerilado), sin que dichas barritas se desmoronen.

Método para determinar la humedad en los suelos (MTC E 108): El presente modo operativo establece el método de ensayo para determinar el contenido de humedad de un suelo. La humedad o contenido de humedad de un suelo es la relación, expresada como porcentaje, del peso de agua en una masa dada de suelo, al peso de las partículas sólidas.

Proctor modificado (MTC E 115): Este ensayo abarca los procedimientos de compactación usados en laboratorio, para determinar la relación entre el Contenido de Agua y Peso Unitario Seco de los suelos (curva de compactación), compactados en un molde de 4 o 6 pulgadas (101,6 o 152,4 mm) de diámetro con un pisón de 10 lbf (44,5 N) que cae de una altura de 18 pulgadas (457 mm), produciendo una Energía de Compactación de 56 000 lb pie/pie³ (2 700 kN-m/m³). Este ensayo se aplica sólo para suelos que tienen 30% o menos en peso de sus partículas retenidas en el tamiz de 3/4" pulg (19,0 mm). Se proporciona 3 métodos alternativos. El método usado debe ser indicado en las especificaciones del material a ser ensayado. Si el método no está especificado, la elección se basará en la gradación del material.

Cuando el 20% ó menos del peso del material son retenidos en el tamiz N° 4 (4,75 mm) se considera método "A"; cuando más del 20% del peso del material es retenido en el tamiz N° 4 (4,75mm) y 20% o menos de peso del material es retenido en el tamiz 3/8 pulg (9,5 mm) se considera como método "B"; finalmente cuando más del 20% en peso del material se retiene en el tamiz 3/8 pulg (9,53 mm) y menos de 30% en peso es retenido en el tamiz ¾ pulg (19,0 mm) se considera como método "C".

Un suelo con un contenido de Humedad determinado es colocado en 5 capas dentro de un molde de ciertas dimensiones, cada una de las capas es compactada en 25 ó 56 golpes con un pisón de 10 lbf (44.5 N) desde una altura de caída de 18 pulgadas (457 mm), sometiendo al suelo a un esfuerzo de compactación total de aproximadamente de 56 000 pie-lbf/pie³ (2 700 kN-m/m³). Se determina el Peso Unitario Seco resultante. El procedimiento se repite con un número suficiente de contenidos de agua para establecer una relación entre el Peso Unitario Seco y el Contenido de Agua del Suelo. Estos datos, cuando son graficados, representan una relación curvi-lineal conocida como curva de Compactación. Los valores de Optimo Contenido de Agua y Máximo Peso Unitario Seco Modificado son determinados de la Curva de Compactación.

California Bearing Ratio en laboratorio (MTC E 132): Describe el procedimiento de ensayo para la determinación de un índice de resistencia de los suelos denominado valor de la relación de soporte, que es muy conocido, como CBR (California Bearing Ratio).

El ensayo se realiza normalmente sobre suelo preparado en el laboratorio en condiciones determinadas de humedad y densidad; pero también puede operarse en forma análoga sobre muestras inalteradas tomadas del terreno. Este índice se utiliza para evaluar la capacidad de soporte de los suelos de sub rasante y de las capas de base, sub base y de afirmado. Este modo operativo hace referencia a los ensayos para determinación de las relaciones de Peso Unitario - Humedad, usando un equipo modificado.

Equivalente de arena (MTC E 114): Determinar la proporción relativa del contenido de polvo fino nocivo, o material arcilloso, en los suelos o agregados finos.

Abrasión los ángeles (MTC E 207): Se refiere al procedimiento que se debe seguir para realizar el ensayo de desgaste de los agregados gruesos hasta de 37.5 mm (1 ½") por medio de la máquina de Los Ángeles. El método se emplea para determinar la resistencia al desgaste de agregados naturales o triturados, empleando la citada máquina con una carga abrasiva.

Durabilidad al Sulfato de Sodio y Sulfato de Magnesio (MTC E 209): Describe el procedimiento que debe seguirse, para determinar la resistencia a la desintegración de los agregados, por la acción de soluciones saturadas de sulfato de sodio o de magnesio. Este método suministra una información útil para juzgar la calidad de los agregados que han de estar sometidos a la acción de los agentes atmosféricos, sobre todo cuando no se dispone de datos sobre el comportamiento de los materiales que se van a emplear, en las condiciones climáticas de la obra.

Impurezas orgánicas en finos (MTC E 213): Tiene por objeto establecer el procedimiento que debe seguirse para determinar la presencia y el contenido de materia orgánica en el agregado fino usado en la preparación de morteros o concretos de cemento hidráulico.

Método de ensayo normalizado para la determinación cuantitativa de sulfatos solubles en suelos y agua subterránea (NTP 339.178):

Esta norma establece un procedimiento para la determinación del contenido de ión sulfato soluble en suelos y aguas subterráneas, se han considerado dos métodos: El método gravimétrico (Método A) y el método turbidimétrico (Método B); la selección del método dependerá de la concentración del ion sulfato en la muestra y de la exactitud deseada.

Método de ensayo para la determinación cuantitativa de cloruros solubles en suelos y agua subterránea (NTP 339.177):

Esta norma establece el procedimiento de ensayo para la determinación cuantitativa del ion cloruro soluble en agua contenido en suelos y agua subterránea, con este método se pueden analizar muestras de suelos cuyo contenido de cloruro sea de 10 mg/kg a 150 mg/kg y muestras de aguas con contenidos de 1,5 ppm a 100 ppm.

Potencial de hidrógeno de agua (pH) (MTC E 129): Este modo operativo se refiere a la determinación del pH (potencial del hidrógeno) de un suelo.

Adhesividad de los ligantes bituminosos a los áridos finos (procedimiento riedel-weber) (MTC E 220):

Este modo operativo describe el procedimiento que debe seguirse para determinar la adhesividad de los ligantes bituminosos a los áridos finos, arenas naturales o de machaqueo. Este método puede aplicarse a todo tipo de ligante bituminoso, como betunes de penetración modificados o sin modificar, fluidificados, fluxados, emulsiones bituminosas y alquitranes. El ensayo consiste en someter diferentes porciones de la muestra del árido envuelto con el ligante a la acción de soluciones de carbonato sódico de concentración molar creciente.

Clasificación SUCS (ASTM D-2487):

Esta práctica describe un sistema de clasificación de mineral y los suelos orgánicos de minerales con fines de ingeniería basados en determinación en el laboratorio de las características del tamaño de las partículas, límite líquido, y el índice de plasticidad que se utilizan cuando se requiere clasificación.

Esta norma es la versión de la ASTM, Sistema Unificado de Clasificación de Suelos. La base para el esquema de clasificación es el Sistema de Clasificación Aeródromo desarrollado por A. Casagrande a principios de 1942.

Clasificación AASHTO (ASTM D-3282): Esta norma describe un procedimiento para la clasificación suelos minerales y orgánicos, minerales en siete grupos basados en determinación en el laboratorio de la distribución de tamaño de las partículas, límite líquido, y el índice de plasticidad. Puede ser usado cuando se requiere clasificación de ingeniería, especialmente para fines de construcción de carreteras. La evaluación de los suelos dentro de cada grupo es hecha por medio de un índice de grupo, que es un valor calculado de una fórmula empírica; la clasificación del grupo, incluyendo el índice de grupo, debe ser útil en la determinación de la calidad relativa del material del suelo para su uso en estructuras de movimiento de tierras, en particular los terraplenes, explanadas, sub bases y bases.

Diseño de Pavimento MTC: Para efectos del diseño, se ha empleado la metodología expuesta en el Manual de Diseño de Carreteras no Pavimentadas de Bajo Volumen de Tránsito del Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú, en el mismo se establecen estructuras preconcebidas en función al Manual NAASRA (Nacional Association of Australian State Road Authorities) que actualmente es el AUSTROADS.

Parámetros que definen la estructura del pavimento son los de resistencia de los suelos, expresados en CBRs, así como las cargas que imponen los tráficos de los diferentes sectores.

2.3. EMULSIONES ASFÁLTICAS

2.3.1. SUELOS ADECUADOS PARA ESTABILIZARCON EMULSIÓN ASFÁLTICA

Suelos de grano fino:

- La posibilidad de estabilizar suelos de grano fino con asfalto depende de su plasticidad y de la cantidad de material que pasa el tamiz # 200.
- Un exceso de partículas finas se traduce en una superficie específica muy grande, que exigiría una proporción considerable de asfalto para cubrir la superficie de todas las partículas.

Suelos de grano fino:

REQUISITOS ARTÍCULO 340 ESPECIFICACIONES INVÍAS PARA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON EMULSIÓN ASFÁLTICA

GRANULOMETRÍA

TAMIZ	% PASA
# 4	100
# 200	5-25

OTROS REQUISITOS

Indice plástico	≤ 7
Clasificación	A-1-b o A-2-4
Equivalente de arena	Suelos A-1-b, ≤ 90 Suelos A-2-4, entre 20 y 40
CBR del suelo sin estabilizar	≥ 15

Materiales granulares

REQUISITOS ARTICULO 340 ESPECIFICACIONES INVIAS PARA ESTABILIZACIÓN DE MATERIALES GRANULARES CON EMULSION ASFALTICA

GRANULOMETRÍA

TAMIZ	% PASA	
	BEE- 1	BEE -2
1 ½"	100	100
1"	70 - 100	100
½"	50 - 80	60 - 90
3/8"	45 - 75	50 - 80
# 4	30 - 60	30 - 60
# 8	20 - 45	20 - 45
# 40	10 - 27	10 - 27
# 100	5 - 18	5 - 18
# 200	3 - 15	3 - 15

OTROS REQUISITOS

Indice plástico	≤ 7
Desgaste Los Angeles	≤ 50 %
IP * Pasa tamiz # 200	≤ 72

REQUISITOS DE LAS EMULSIONES ASFÁLTICAS PARA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS

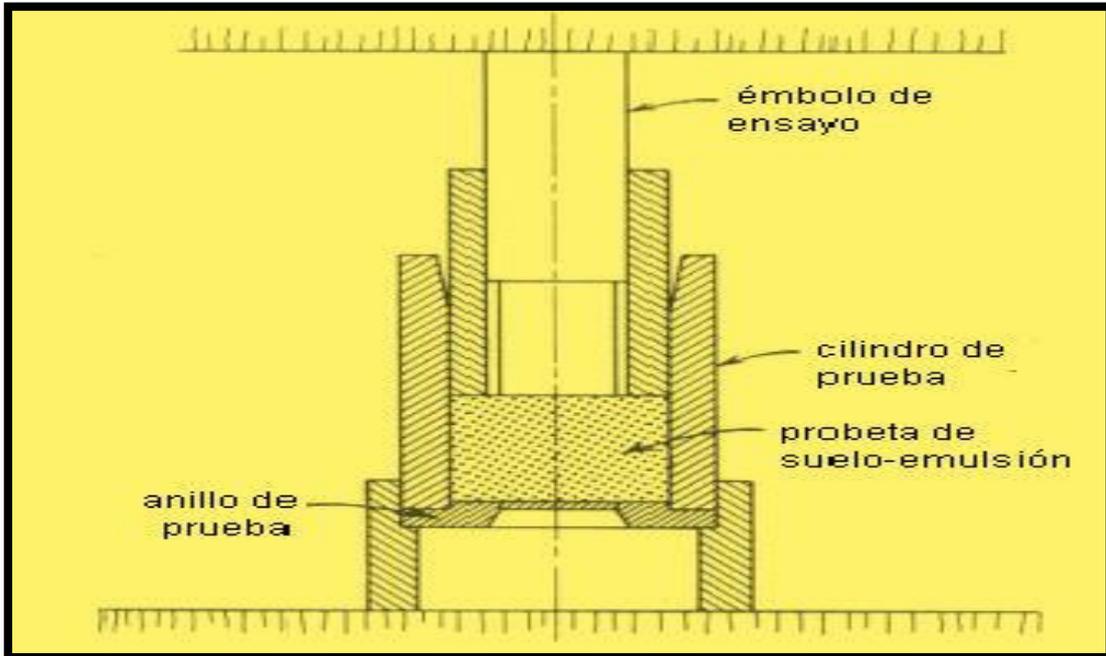
TIPO DE EMULSIÓN		CRL 1		CRL 1h	
1. ENSAYO SOBRE EMULSION		mín.	máx.	mín.	máx.
Viscosidad	E-763				
• Saybolt Furol a 25° C segundos		-	200	-	100
• Saybolt Furol a 50° C segundos		-	-	-	-
Contenido de agua en volumen %	E-761	-	43	-	43
Estabilidad al almacenamiento					
• Sedimentación a los 7 días %	E-764	-	5	-	5
Destilación	E-762				
• Contenido de asfalto residual %		57	-	57	-
• Contenido de disolventes %		-	-	-	0
Tamizado					
• Retenido T 20 (850 µm)	E-765	-	0.1	-	0.1
Rotura					
• Dioctilsulfosuccinato sódico %	E-766	-	-	-	-
• Mezcla con cemento %					
	E-770	-	-	-	2
Carga de partículas	E-767	POSITVA		POSITVA	
PH	E-768	-	6	-	6
2. ENSAYOS SOBRE RESIDUO DE DESTILACION					
Penetración (25°C, 100gr, 5seg) Q.1.mm.	E-706	60 100	100 250	60	100
Ductilidad (25°C, 5cm/min) cm.	E-702	40	-	40	-
Solubilidad en tricloroetileno %	E-713	97	-	97	-

2.3.2. DISEÑO DE LAS MEZCLAS

- Los métodos de diseño de mezclas con emulsiones asfálticas utilizan la durabilidad como criterio de comportamiento de la mezcla después de compactada y curada.
- La mayoría de los métodos incluyen la determinación de la pérdida de capacidad resistente de la mezcla después de un período de inmersión en agua, comparando la resistencia luego de inmersión con la resistencia inicial.
- Existen muchos métodos para el diseño de mezclas con emulsiones asfálticas.

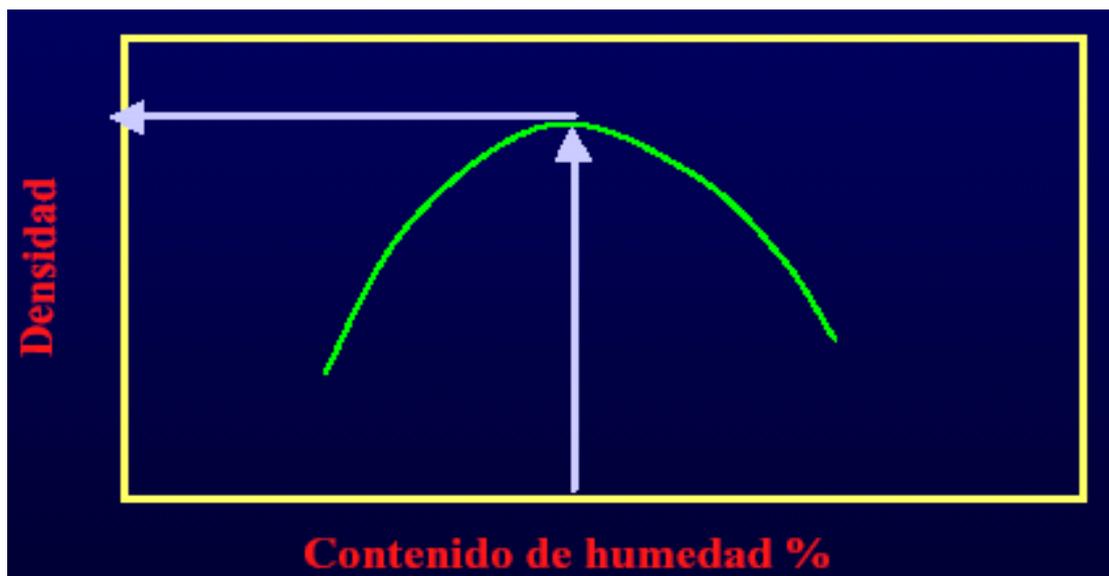
CRITERIOS DE DISEÑO DE MEZCLAS PARA BASES ESTABILIZADAS CON EMULSIÓN ASFÁLTICA (ESPECIFICACIÓN INVÍAS 340-02)	
Suelos de grano fino	Materiales granulares
Norma INVE - 812 "Dosificación y ensayo de mezclas de suelo emulsión"	Norma INVE - 738 "Efecto del agua sobre las mezclas asfálticas compactadas" (Ensayo de inmersión - compresión)
Norma de referencia: ASTMD 915 (descontinuada)	Norma de referencia: ASTMD 1075
Requisitos	Requisitos
Extrusión seca ≥ 454 kg	Resistencia seca ≥ 10 kg/cm ²
Extrusión húmeda ≥ 151 kg	Resistencia húmeda ≥ 7.5 kg/cm ²
Absorción de agua ≤ 7 %	Resistencia conservada ≥ 50 %
Expansión ≤ 5 %	

Esquema del ensayo de extrusión sobre probetas de suelo –emulsión (norma INV E-812)



• **DISEÑO DE LA MEZCLA POR EL MÉTODO DE INMERSIÓN –COMPRESIÓN**

1. **Determinación de la humedad óptima de compactación:**



2. Determinación del contenido óptimo teórico de ligante:

—Fórmula Duriez

$$L = K \sqrt[5]{\Sigma}$$

%L = % de asfalto residual

K = módulo de riqueza (2.5 – 3.5)

Σ = Superficie específica

Σ = (0.17G + 0.33g + 2.30S + 12s + 135f) / 100

G = % partículas mayores de 10 mm

g = % partículas entre 5 mm y 10 mm

S = % partículas entre 0.315 mm y 5 mm

s = % partículas entre 0.08 mm y 0.315 mm

f = % partículas menores de 0.08 mm

3. Elaboración de mezclas:

- Se elaboran mezclas con diferentes cantidades de emulsión, correspondientes a porcentajes de ligante por encima y debajo del óptimo teórico, manteniendo el contenido óptimo de fluidos de compactación.

4. Compactación de probetas:

- Se compactan probetas de 10 cm por 10 cm de altura mediante compresión creciente hasta alcanzar 210 kg/cm², manteniendo esta presión durante 2 minutos (compactar seis probetas para cada contenido de ligante).

5. Curado de las probetas:

- Desmoldado de las probetas y curado al aire durante 7 días a 25°C.
- Separar cada juego de 6 probetas en 2 grupos para el resto del curado:

—Uno de los grupos se mantiene otros 7 días al aire a 25°C.

—El otro grupo se sumerge en agua a 25°C por 7 días.

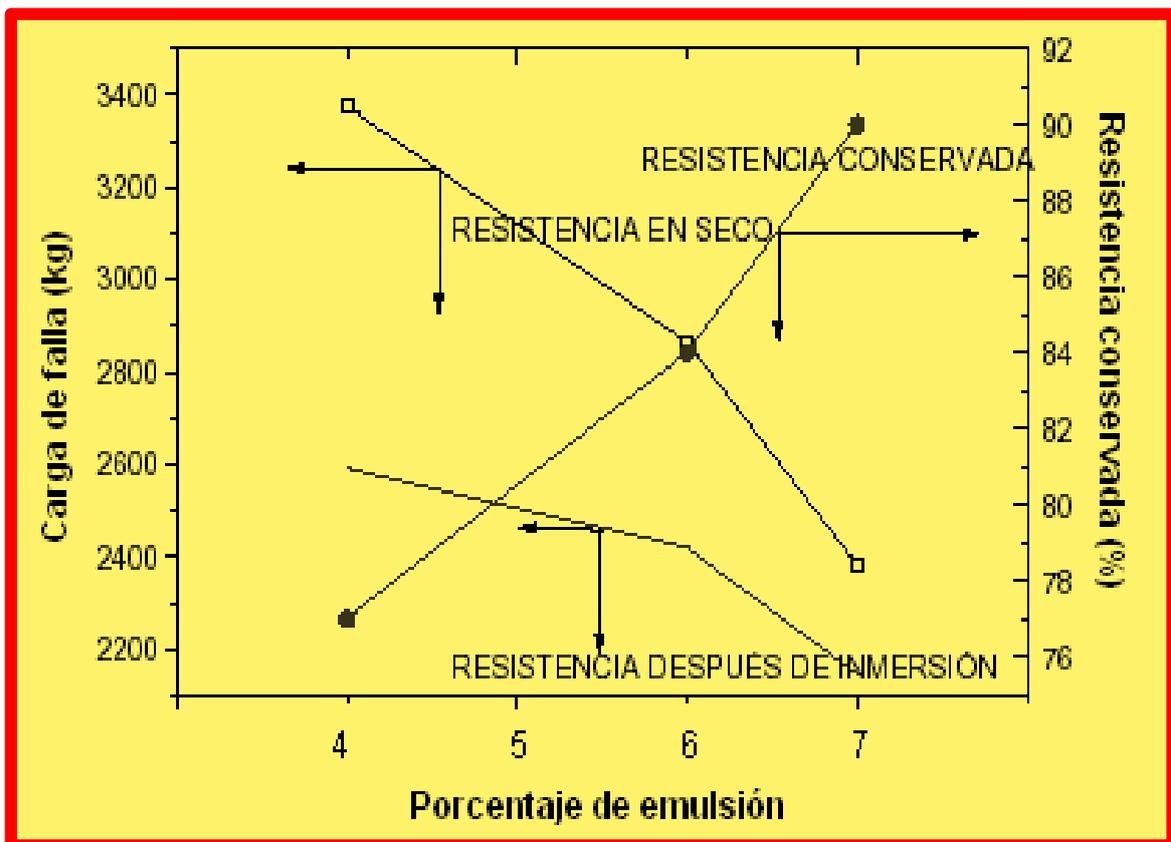
6. Ensayo de compresión:

- Al término del período de curado, se determina la densidad de las probetas y se rompen por compresión simple, promediando las resistencias para cada porcentaje de ligante (por aparte las curadas en seco y las curadas en húmedo).

7. Determinación del contenido óptimo de emulsión:

- Se dibujan gráficas de resistencia seca, resistencia húmeda y resistencia conservada y elegir el porcentaje óptimo de emulsión, de acuerdo con el criterio de diseño.

Representación gráfica de los resultados de un ensayo de inmersión –compresión



2.3.3. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES ESTABILIZADOS CON EMULSIÓN ASFÁLTICA, CON FINES DE DISEÑO DE PAVIMENTOS

Módulo dinámico:

- Se trata de materiales muy variables y difíciles de modelar, debido a que su rigidez varía con el período de curado, la temperatura y el tiempo de aplicación de la carga
- Fórmula de Finn para determinar el módulo dinámico de mezclas tratadas con emulsión asfáltica, a 25° C:

$$\ln(MR * 10^{-3}) = 0.40\gamma_m + 2.46(SF) - 0.015(P) - 1.13$$

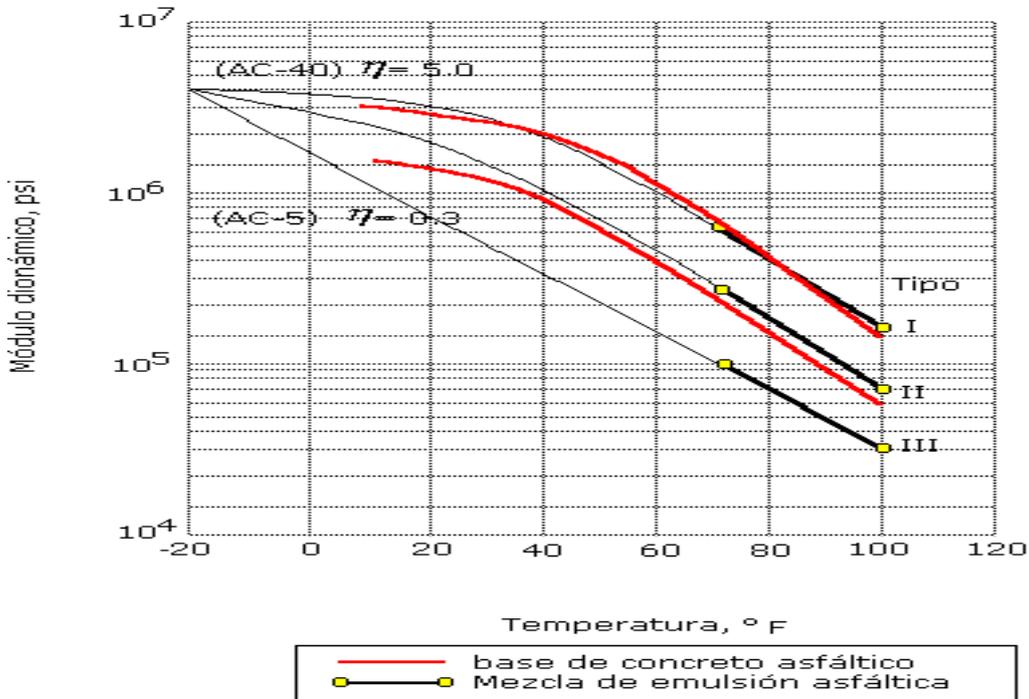
γ_m = densidad de la mezcla, lb/pie³

SF = proporción de arena, en peso (retenido entre tamices # 4 y # 200)

P = penetración del asfalto base, 0.1 mm

- CHEVRON desarrolló 3 tipos de mezclas con emulsión asfáltica:
 - Tipo I: elaborada en planta con agregados procesados y con propiedades similares a las de un concreto asfáltico.
 - Tipo II: elaborada con agregados clasificados.
 - Tipo III: elaborada con arenas o limos arenosos.
- Se determinaron los valores de sus módulos en el rango de 23°C a 38°C, luego de curado total y se compararon con los de mezclas de base de concreto asfáltico elaboradas con cementos asfálticos AC – 40 y AC –5, encontrándose alta coincidencia.

Variación del stiffness con la temperatura, para 3 tipos de mezclas con asfalto emulsificado en condición curada



- En las mezclas con emulsión asfáltica es muy importante tener en cuenta los efectos del curado en el módulo dinámico.

$$E_t = E_f - (E_f - E_i) \cdot R F t$$

E_t = módulo a la temperatura T y tiempo de curado t.

E_f = módulo a la temperatura T para la mezcla totalmente curada.

E_i = módulo a la temperatura T para la mezcla en estado no curado (inicial).

- $R F t$ = factor de reducción que tiene en cuenta la cantidad de curado alcanzada en el tiempo t.

**FACTOR DE REDUCCIÓN MODULAR DE UNA MEZCLA CON EMULSIÓN
ASFÁLTICA EN UN TIEMPO DE CURADO = t**
(se supone que la mayoría del curado ocurre en 6 meses)

TIEMPO (meses)	≤ 1	2	3	4	5	6
RF_t	1.0	0.38	0.22	0.15	0.10	0.05

- Para superar las reducidas velocidades de curado de las estabilizaciones con emulsión, se acostumbra añadir bajas proporciones de cemento (1%-3%) que incrementan el módulo de la mezcla hasta en 200%, según la emulsión utilizada.
- El módulo dinámico de las capas estabilizadas con emulsión asfáltica tiende a reducirse con el tiempo, a causa de la fatiga por la aplicación de las cargas del tránsito.

**VALORES TÍPICOS DE MÓDULOS DINÁMICOS PARA CAPAS ESTABILIZADAS
CON EMULSIÓN ASFÁLTICA**

CARACTERÍSTICAS DE LAS ESTABILIZACIONES CON EMULSIÓN ASFÁLTICA
(Fernández del Campo – España)

Mezcla No	Resistencia tras curado húmedo en ensayo de inmersión – compresión (kg)	Módulo dinámico a 20° C, según norma NLT 349/90 (MPa)
1	510 - 760	1300 - 2000
2	760 - 1320	2000 - 3500
3	> 1320	> 3500

**VALORES MODULARES PROMEDIO DE LAS BASES ESTABILIZADAS CON EMULSIÓN
ASFÁLTICA DEL INSTITUTO DEL ASFALTO**

Tipo de mezcla	Módulo dinámico (MPa)		
	Inicial a 23° F	Final a 23° C	Final a 38° C
I	1034	5171	1724
II	793	2758	862
III	414	1034	345

Comportamiento a la fatiga:

- El comportamiento a fatiga de las estabilizaciones con emulsión asfáltica es similar al de las mezclas bituminosas en caliente.

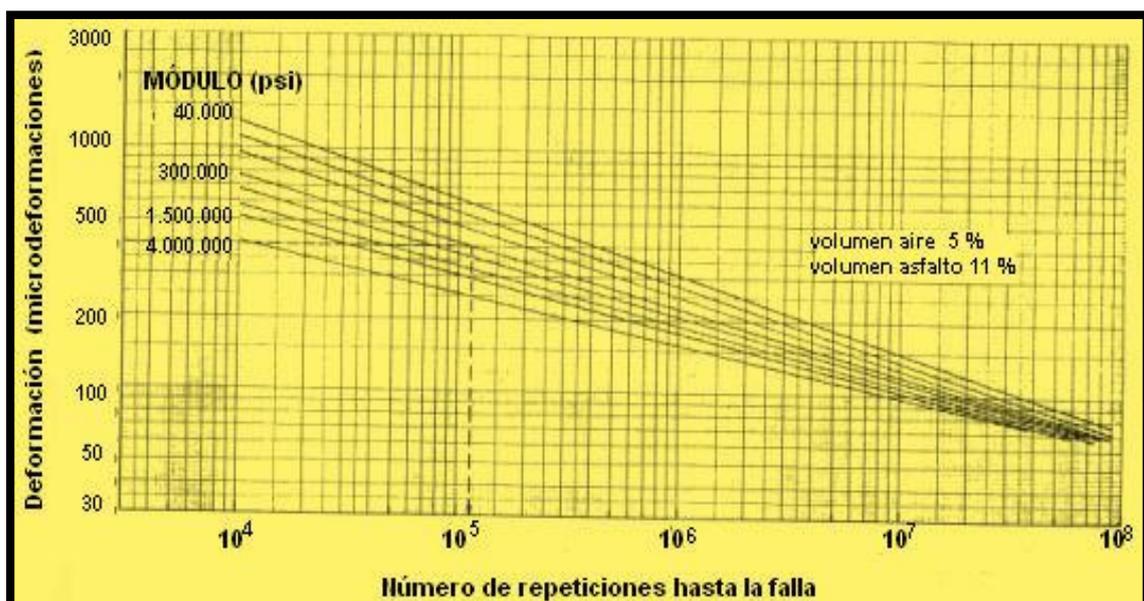
$$N_f = K_e t - c$$

N_f =número de aplicaciones de carga hasta la falla para una deformación inicial de tensión, et.

K_c =constantes de regresión obtenidas del análisis de los datos de la prueba de fatiga.

- El stiffness de la mezcla tiene una considerable incidencia en el resultado de la prueba de fatiga.
- Para una determinada mezcla e iguales condiciones de temperatura y frecuencia de aplicación de carga, la curva de fatiga varía según el criterio que se elija para considerar la falla (reducción de módulo, cantidad de agrietamiento).
- Los resultados de fatiga en el laboratorio conducen a una estimación muy conservativa de una mezcla bituminosa, por lo cual se deben aplicar factores de desplazamiento.

Criterio de fatiga para mezclas elaboradas con emulsiones asfálticas (CHEVRON)



CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. POTENCIAL HUMANO EN LA INVESTIGACIÓN

Trabajos de Campo

01 Bachiller en Ingeniería Civil

01 Técnico de suelos

01 Conductor de camioneta

02 obreros

Trabajos de Laboratorio

01 Bachiller en Ingeniería Civil para supervisión de los ensayos

02 Técnico de suelos

04 Auxiliares de suelos

Trabajos de Gabinete

01 Ingeniero Civil para constatar e interpretar los resultados del laboratorio

01 Bachiller en Ingeniería Civil

3.2. MATERIALES Y HERRAMIENTAS EMPLEADOS EN LA INVESTIGACIÓN

Trabajos de Campo

- Equipos de protección personal (EPP)
- Parantes con cintas y malla de señalización para seguridad vial
- Paneles de madera, sogas, baldes y escaleras
- Picos, lampas y barretas
- Wincha
- Bolsas de polietileno y sacos de polipropileno
- Etiquetas
- Cuadernos de campo para suelos y canteras
- Pizarra, plumones y lapiceros
- GPS y cámara fotográfica

Trabajos de laboratorio:

- Muestras suficientes de suelo y canteras
- Aditivos químicos (Terrasil, Con Aid y Sistema Consolid)
- Equipos, herramientas y materiales necesarios para realizar los ensayos en laboratorio

Trabajos de Gabinete:

- Computadora con los software necesarios
- Biblioteca (Normas, especificaciones técnicas, fichas técnicas, etc.)
- Accesorios de librería.

3.3. METODOLOGÍA

La metodología de la investigación consiste en:

La evaluación de la plataforma vial, estableciendo su estado de condición actual (superficial, funcional y estructural), así mismo la realización del estudio de los suelos, para determinar sus características físico-mecánicas, con la finalidad de definir el perfil estratigráfico (Anexo N° 2), establecer su capacidad de soporte, y su posible comportamiento ante la transmisión de las cargas del tráfico futuro.

Estudio de canteras, para lo cual se han ubicado un banco de materiales, con volumen necesario y adecuada caracterización física de sus materiales.

La estabilización de la mezcla de suelo o agregados de cantera, con aditivos mejoradores, cuyos resultados se analizarán, desde el punto de vista de la capacidad de soporte y permeabilidad.

Finalmente diseño del pavimento, conformado por una capa estabilizada que será cubierta por un recubrimiento bituminoso, para mejorar la transitabilidad de la carretera SM-100: Dv. Moyabamba – Jepelacio; sin hacer mucha inversión y a la vez beneficiar económicamente al distrito de Jepelacio. Esto también permitirá que en un futuro próximo, el incremento del tráfico permita recategorizar la carretera, lo que conllevará a la construcción de un pavimento estándar, que cumpla con las especificaciones técnicas EG-2013.

Las etapas de la metodología (campo, laboratorio y gabinete) son secuenciales e importantes, los cuales se detallan a continuación:

Trabajos de campo

La evaluación superficial de la carretera se efectuó en secciones de 1000 m de longitud. Una vez completada la división se obtienen los datos de estudio y se determina el URCL de cada sección. Para tal efecto se procedió de la siguiente manera: Se caminó la carretera con la finalidad de efectuar las mediciones de las fallas en el pavimento y establecer las posibles causas que la ocasionaron, incluidos los problemas de drenaje.

Para hacer la medición, se han reconocido las fallas existentes para caminos no revestidos, los cuales son:

81 – Sección inadecuada

82 – Drenaje lateral inadecuado

83 – Encalaminado

84 – Polvo

85 – Baches

86 – Ahuellamiento

87 – Pérdida de agregado



Figura Nº 01: Generación de polvos que se aprecian en los días soleados



Figura N° 02: Encalaminados, se presenta en las zonas de curvas de la carretera



Figura N° 03: Pérdida de agregados de severidad media en toda la carretera

Para determinar las características físico-mecánicas de los materiales se han efectuado un total de 49 perforaciones de estudio en la plataforma de la carretera SM-100: Dv. Moyabamba – Jepelacio, las cuales se ubicaron en forma de zig-zag en la actual plataforma vial. Se distanciaron las perforaciones una de la otra aproximadamente en 250 m, se tomaron las muestras, se llevó un registro en el que se anotó el espesor de cada uno de los estratos encontrados, sus características de gradación, forma, plasticidad, humedad, color y el estado de compactación de cada uno de ellos. Las muestras alteradas se colocaron en bolsas de polietileno para su traslado al laboratorio. Estos métodos de muestreo de suelos y de reducción de muestras de campo fueron realizados conforme se menciona en las normas MTC E 101 y MTC 103 respectivamente.



Figura N° 04: Vista panorámica de la calicata C-13 del estudio de suelos

Para la ubicación de las fuentes de materiales se hizo el reconocimiento de la zona comprendida en el proyecto, siendo las características requeridas el tener los volúmenes de materiales necesarios y una adecuada caracterización física de sus materiales.

De la inspección de canteras se ubicó la Cantera Tumba como mejor alternativa y esta se encuentra fuera de la vía estudiada (SM-100), se recorre desde la progresiva km 0+000, unos 3,0 kilómetros de vía asfaltada en sentido Jepelacio – Moyabamba, llegando así a la carretera marginal de la selva, la cual se toma en sentido Moyobamba – Rioja, recorriendo esta vía asfaltada unos 10,5 kilómetros; posteriormente se recorre hacia el lado izquierdo 11,50 kilómetros de vía afirmada en regular estado, donde se ubica la localidad de Soritor; seguidamente se recorre hacia el lado derecho 2,66 kilómetros de vía afirmada en estado regular, en sentido Soritor – Rioja, encontrándose el desvío hacia el acceso de la cantera Tumba, posteriormente se recorre hacia el lado izquierdo 1250 metros de vía afirmada en estado regular llegando así al acceso de la cantera. Este acceso se encuentra a lado izquierdo de la vía y es una vía afirmada de 398 metros de longitud.

A fin de determinar los estratos a explotar, rendimientos y potencia de las canteras, se realizaron (calicatas), seguidamente se efectuó el muestreo y registro de los materiales encontrados en la cantera, estos fueron almacenados en sacos de polipropileno y trasladados a laboratorio para su respectivo análisis.



Figura N° 05: Vista panorámica de la cantera Tumba



Figura Nº 06: Vista panorámica de la extracción de materiales de la cantera Tumba



Figura Nº 07: Vista de una de las calicatas efectuadas en la cantera Tumba

Trabajos de laboratorio

Con la finalidad de definir las características de los suelos y de la cantera Tumba, las muestras de campo fueron sometidos a una serie de ensayos cuyos certificados se encuentran en el Anexo N° 04, y que a continuación se mencionan:

- Análisis granulométrico por tamizado (MTC E 107)
- Material que pasa malla N° 200 (MTC E 202)
- Determinación del Límite Líquido de los suelos (MTC E 110)
- Determinación del Límite Plástico é Índice Plástico de los suelos (MTC E 111)
- Método para determinar la humedad en los suelos (MTC E 108)
- Proctor modificado (MTC E 115)
- California Bearing Ratio en laboratorio (MTC E 132)
- Equivalente de arena (MTC E 114)
- Abrasión los ángeles (MTC E 207)
- Durabilidad al Sulfato de Sodio y Sulfato de Magnesio (MTC E 209)
- Impurezas orgánicas en finos (MTC E 213)
- Sales solubles totales (MTC E 219)
- Método de ensayo normalizado para la determinación cuantitativa de sulfatos solubles en suelos y agua subterránea (NTP 339.178)
- Método de ensayo para la determinación cuantitativa de cloruros solubles en suelos y agua subterránea (NTP 339.177)
- Potencial de hidrógeno (pH) (MTC E 129)

Se realizaron ensayos de proctor, CBR y Ascensión Capilar, para evaluar el comportamiento de los tres aditivos propuestos (Terrasil, Con Aid y Sistema Consolid).



Figura N° 08: Ensayo de análisis granulométrico por tamizado a las muestras de suelo.

Se visualiza la prueba de Ascensión Capilar, para un tiempo de 5 horas. Si observamos de izquierda a derecha, podemos notar que la ascensión capilar para el testigo con aditivo Terrasil es nula, seguidamente está el testigo con aditivo Con Aid que tiene una ascensión capilar de 8 cm, consecutivamente se encuentra el testigo estabilizado con el aditivo Sistema Consolid que al igual que el primer testigo, su ascensión capilar es nula, finalmente se encuentra el testigo sin ningún aditivo (estado natural), donde se observa que la ascensión capilar llegó a los 12 cm.



Figura Nº 09: Ensayo CBR a las muestras estabilizadas (Suelo + Aditivo), para determinar cuál de los aditivos propuestos tiene mayor capacidad de soporte.

Trabajos de gabinete

En base a la información obtenida en campo y los resultados de los ensayos de laboratorio, se efectuaron los siguientes trabajos:

- De la evaluación superficial de la vía, con las medidas de las fallas de campo, se calculó el Índice de Condición del Camino no Revestido (URCI). Los valores que se deducen son números que van de "0" a "100"; "100" significa que la falla no tiene ningún impacto sobre la condición del camino, y "0" significa que el camino está completamente fallado.

- Elaboración del resumen de ensayos de suelos, cálculo de la sensibilidad de los suelos, el perfil estratigráfico de suelos, resumen de ensayos de la cantera Tumba, rendimiento de la cantera y diagrama de ubicación de la cantera.
- La sectorización de la vía según sus propiedades físicas
- Evaluación de los suelos susceptibles a la deformación y expansión
- Análisis de la humedad de los suelos
- Análisis del agua subterránea
- Análisis de los suelos orgánicos y turbas
- Análisis de los materiales encontrados y los que dicen las especificaciones técnicas.
- Análisis de los ensayos de CBR y ascensión capilar a una muestra de suelo perteneciente al estudio, análisis del proceso de aplicación de los aditivos en campo y evaluación de los costos de cada uno de ellos, para finalmente elegir técnicamente el mejor aditivo.
- Diseño del pavimento, conformado por una capa de suelo estabilizado y un recubrimiento bituminoso, para mejorar la transitabilidad de la carretera y así en el futuro se aumente el tráfico y se tenga que recategorizar la vía de estudio; todo esto traerá como consecuencia el beneficio económico y comercial del distrito de Jepelacio.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

4.1. DESCRIPCIÓN DE LA VÍA DE ESTUDIO

La vía SM 100, que une a la ciudad de Moyobamba, con la localidad de Jepelacio, actualmente tiene como superficie de rodadura una capa granular de 12,262.795 metros. Los estudios de Suelos, Canteras y Pavimentos se efectuaron entre julio y septiembre del 2014. La carretera en mención, políticamente, se ubica en la Región San Martín, en la Provincia de Moyobamba. Según la clasificación del Dr. Javier Pulgar Vidal expuesta en su "Geografía del Perú", la zona del proyecto se encuentra en la región Rupa-Rupa.

La región Rupa-Rupa, "quemante, caliente", también llamada selva alta o ceja de selva, es según Javier Pulgar Vidal, una región en la vertiente oriental de los Andes peruanos entre los 400 msnm y los 1,000 msnm. Su clima es caluroso y en invierno la temperatura no baja nunca de 15 °C, disminuyendo conforme se sube a las alturas templadas. Es la zona del Perú con mayor pluviosidad. El término selva alta es usado también con un significado extendido (todos los bosques del flanco oriental andino) que incluye la yunga oriental. Se considera que sería la región más lluviosa del Perú, alcanzando un máximo de 8000 mm de precipitación

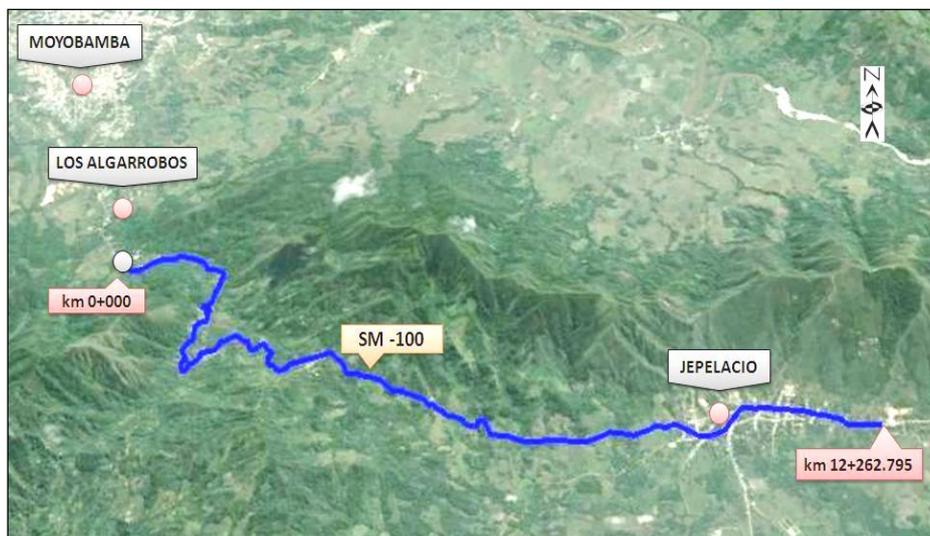


Figura Nº 10: Croquis de la ruta

4.2. RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN SUPERFICIAL DE LA VÍA

La carretera en estudio se encuentra entre Moyobamba y Jepelacio. En la selva hay amplias terrazas con superficies llanas o suavemente onduladas, así como también colinas muy erosionadas, como las que atraviesa la vía.

La geomorfología general en esta zona es ondulada, con presencia de pequeñas colinas y quebradas.

En los sectores del prisma vial donde se presentan cortes a media ladera, en muchos de ellos se ha observado afloramientos de agua desde el talud superior, especialmente en los sectores:

- km 6+050 – km 6+600 (L.I.)
- km 9+480 – km 9+700 (L.I.)
- km 11+600 – km 12+262.795 (L.I.)



Figura N° 11: Afloramiento de agua desde el talud superior, km 9+650

En la localidad de Jepelacio hay quebradas por donde ya se han presentado deslizamientos de agua y lodo. Estos sectores son:

- km 10+600 – km 10+800
- km 11+350 – km 11+480

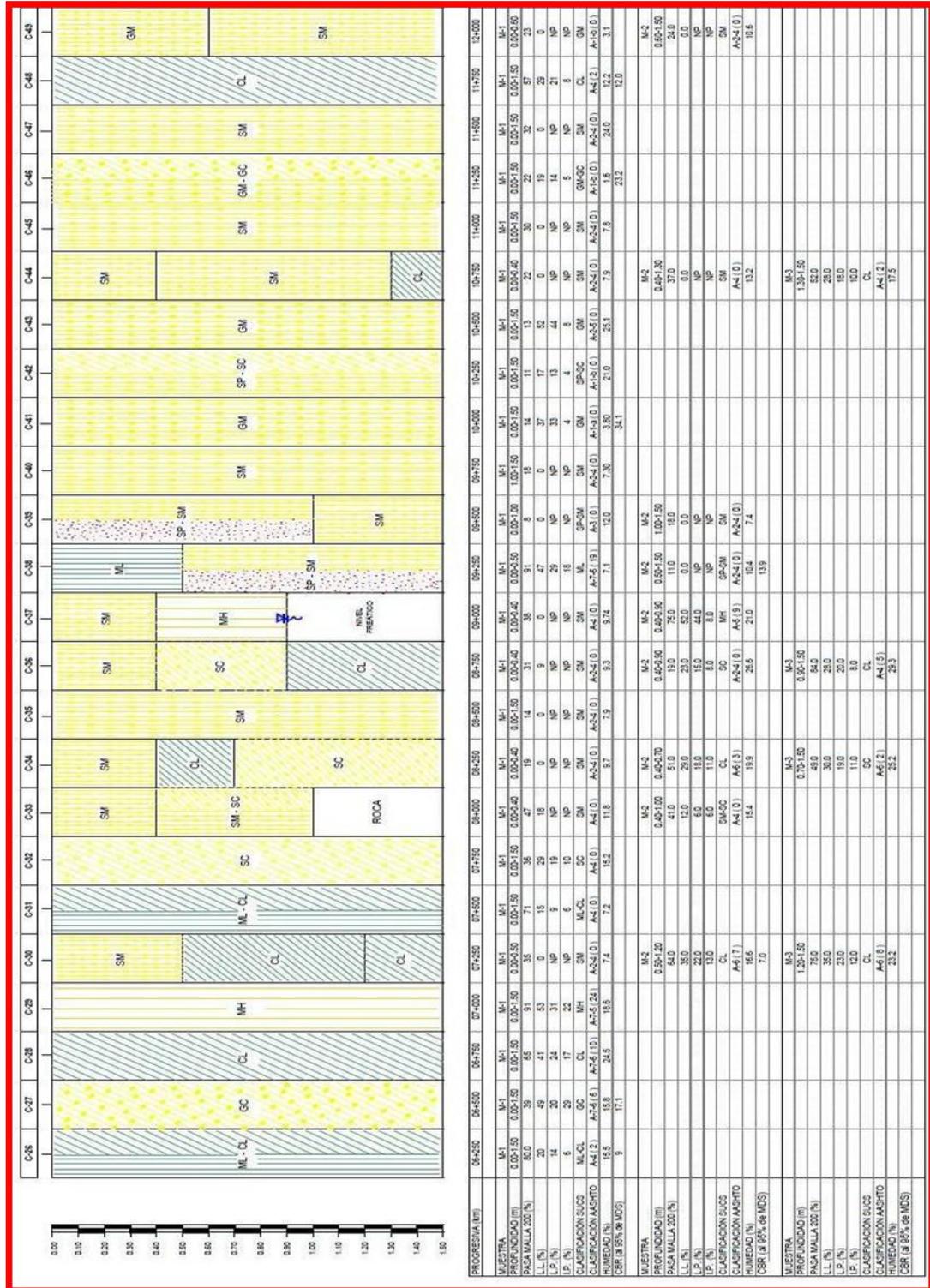
Es recomendable que se construyan badenes en estos sectores para un mejor mantenimiento de la vía.

Se ha efectuado la evaluación del estado superficial de la actual plataforma, los resultados de las mediciones efectuadas en julio del 2014 del estado de condición de la superficie de rodadura se resumen en el siguiente Cuadro:

Tabla N° 01: Resumen de Evaluación de suelo - URCI

SECCIÓN (km)	TIPO DE FALLA																					URCI	CALIF.	
	81			82			83			84			85			86			87					
	L	M	H	L	M	H	L	M	H	L	M	H	L	M	H	L	M	H	L	M	H			
0+000 - 1+000	3 0 0			5 0 0							x			5 0			2 0			1 0 0			80	Muybueno
1+000 - 2+000	1 0 0			4 2 0							x			8 5			3 4			8 0 0	5 0		80	Muybueno
2+000 - 3+000	2 0 0			3 0 0							x			9 0			2 0			9 0 0	1 0 0		63	Bueno
3+000 - 4+000	2 0 0			2 5 0			1 0 0				x			6 0			4 0			7 0 0	1 5 0		66	Bueno
4+000 - 5+000	3 5 0			1 0 0			5 0				x			3 0			3 0			8 0 0	5 0		80	Muybueno
5+000 - 6+000	3 0 0			2 0 0			2 0				x			4 0			5 0			7 0 0	4 0		80	Muybueno
6+000 - 7+000	5 0 0			2 5 0			5 0 0				x			1 2 0			4 0			7 0 0	3 0 0		75	Muybueno
7+000 - 8+000	3 0 0			1 5 0			1 0 0				x			4 0			5 0			6 0 0	3 0 0		81	Muybueno
8+000 - 9+000	4 0 0			3 0 0				3 0 0				x		4 5			5 0			4 0 0	5 0 0		70	Bueno
9+000 - 10+000	2 0 0			3 0 0			1 0 0					x		5 0			2 0			6 0 0	3 0 0		73	Muybueno
10+000 - 11+000	5 0 0			5 0 0			1 0 0				x			4 0			5 0			3 0 0	7 0 0		68	Bueno
11+000 - 12+262.795	5 0 0			7 0 0			1 0 0				x			3 0			6 0			1 0 0	8 0 0		72	Muybueno

Sin embargo se debe señalar que la evaluación se efectuó en temporada donde las precipitaciones pluviales eran escasas. Debido al tipo de superficie de rodadura (arenoso), y a su espesor mínimo en algunos sectores, se puede predecir que la calificación puede empeorar drásticamente en temporada de lluvias.



4.3.2. SECTORIZACIÓN DE LA VÍA DE ESTUDIO

A continuación se efectúa la descripción de los materiales encontrados en la plataforma vial y el suelo natural, la cual se empleará para la sectorización de la vía en función a sus propiedades físicas.

Tabla Nº 02-A: Resumen de la totalidad de suelos

SECTOR	MATERIALES GRANULARES (%)							MATERIALES FINOS (%)			
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				
TODA LA VÍA	3	7	1	17	2	5	2	28	6	15	14
	10		27				63				

Como se observa en toda la carretera hay preponderancia de los suelos finos arcillosos – limosos, tipo A-4, A-6 y A-7; le continúa en importancia los granulares tipo A-2-4.

Como se observa en toda la carretera hay preponderancia de los finos arcillosos – limosos, tipo A-4, A-6 y A-7; le continúa en importancia los granulares tipo A-2-4.

Se ha observado que los suelos de la sub rasante presentan alta densificación.

En el siguiente cuadro se presentan la totalidad de los suelos encontrados, agrupados en función a la preponderancia o mayor presencia de algunos de ellos. La base de esta información, los ensayos de laboratorio, se encuentra en los anexos correspondientes, y su distribución puede ser apreciada en el Perfil Estratigráfico.

Tabla Nº 03: Sectorización de la vía

SECTOR	PORCENTAJE DE SUELO										
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				
km 0+000 - km 3+000	0	0	0	14	0	0	0	41	16	15	14
km 3+000 - km 8+000	2	5	0	2	0	11	4	27	1	25	23
km 8+000 – km 12+262.795	7	16	4	40	7	0	0	18	2	4	2

Así también se tienen sectores de aporte de material granular como los señalados a continuación:

Tabla Nº 04: Aporte de material granular

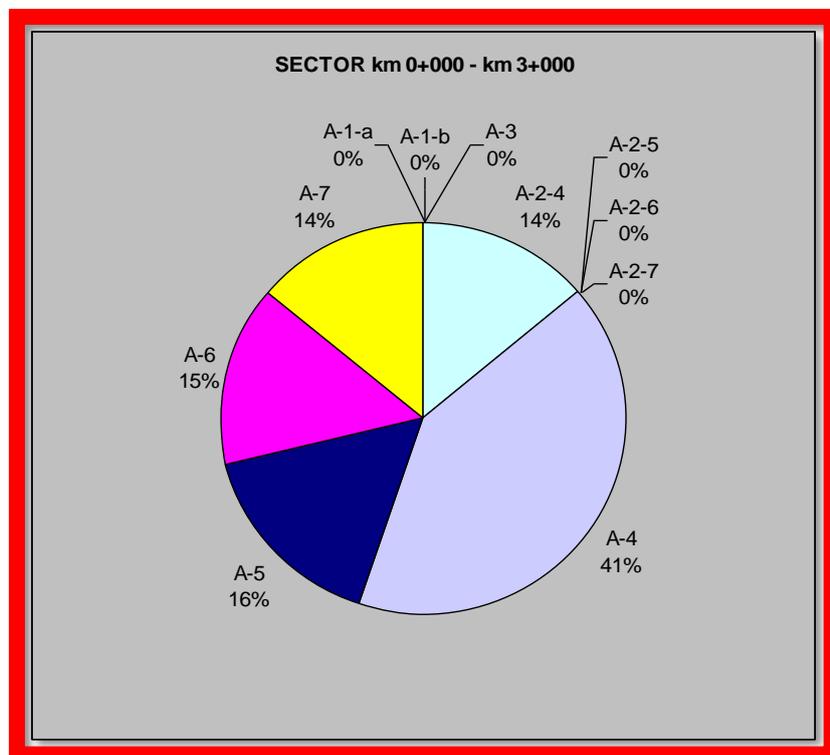
SECTOR	ESPESOR PROMEDIO (cm)
SECTOR 1: km 0+000 - km 3+000	0
SECTOR 2: km 3+000 - km 8+000	0
SECTOR 3: km 8+000 - km 12+262.795	40

A continuación se efectúa una descripción general de los materiales encontrados en la sub rasante, así como su estado natural:

Subsector km 0+000 – km 3+000. Este subsector presenta una capa superficial de limos y arcillas; encontrándose en algunos casos arena limosa muy pequeña, que en la mayoría de los casos se ha perdido por las lluvias y el tráfico.

Subyacente a esta capa de rodadura encontramos material fino limo arcilloso tipo A-4, A-6 y A-7 (CL, ML, CL-ML, MH en el sistema SUCS), cuyas plasticidades se encuentran entre 4% y 24%.

Los suelos de la sub rasante presentan humedades altas, encontrándose mediana a alta densificación.



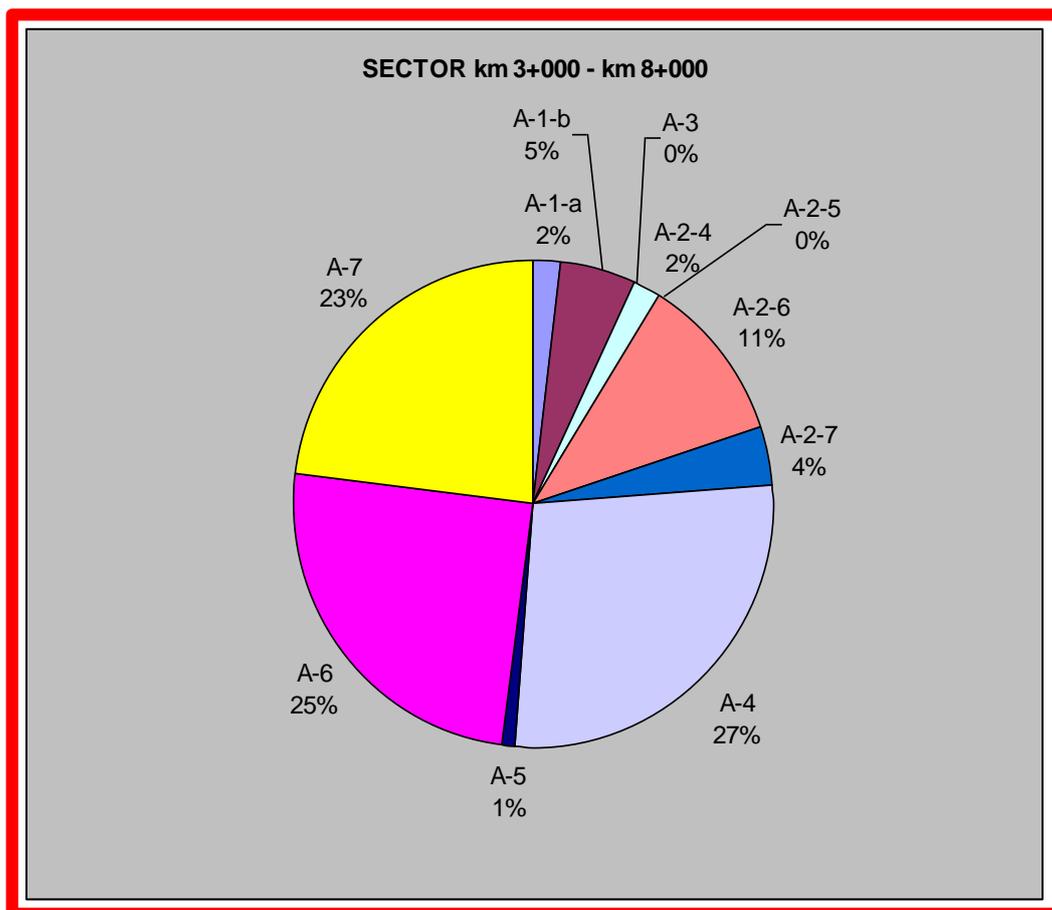
Distribución de suelos en el Sector: km 0+000 – km 3+000

El 86% de los materiales corresponde a los suelos finos arcillosos; y el 14% corresponde a arenas de grano medio y fino.

Subsector km 3+000 – km 8+000. La superficie de rodadura presenta intermitentemente una capa granular está caracterizada por presentar un material gravoso tipo A-1-a, A-1-b, A-2-4 y A-2-6 (GP-GM, GM, SM en sistema SUCS), con espesores variables entre 0,15m y 0,30m. La plasticidad en esta capa es nula (N.P.) variando hasta 14%. En otros sectores se ha perdido la capa afirmada y está aflorando el suelo natural.

Subyacente a esta capa encontramos en mayor proporción arcillas y limos de mediana y alta plasticidad del tipo A-6 y A-7 (ML, CL, CH y MH en SUCS) con plasticidades variables entre 6% y 32%; también se ha encontrado capas de limos A-4 (ML en el sistema SUCS), con plasticidades nulas N.P.

La densificación encontrada también varía entre media y alta.



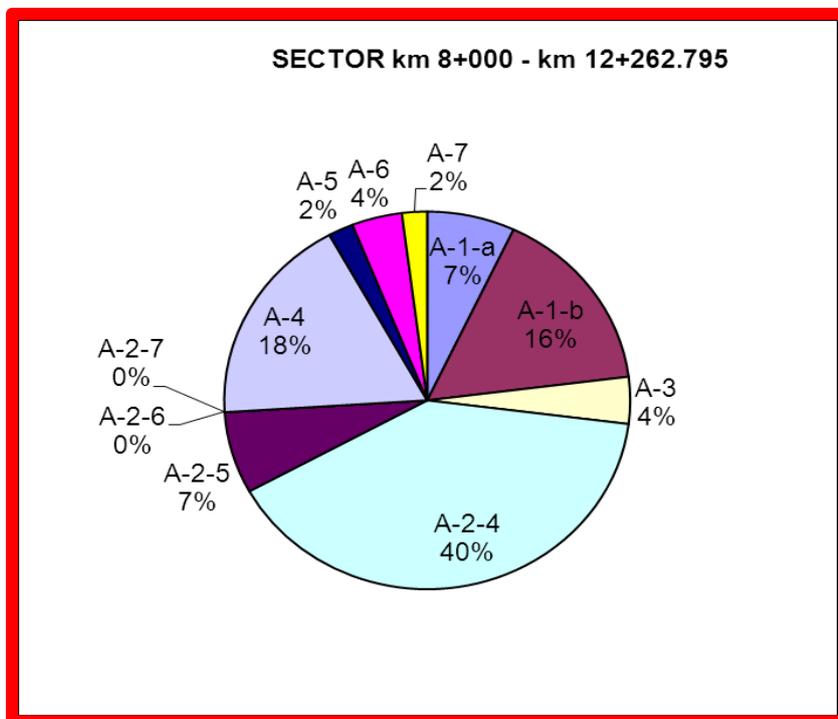
Distribución de suelos en el Sector: km 3+000 – km 8+000

En este sector, el 76% de los materiales corresponde a los suelos finos limo-arcillosos; hay un 17% que corresponde a arenas de grano medio y fino; mientras que un 7% es material granular.

Subsector km 8+000 – km 12+262.795. Este sector presenta preponderantemente arena en su superficie, apreciándose en algunos sectores bolonerías de 4" de diámetro. Estos materiales clasifican como A-2-4, A-1-a, A-1-b (SM, SP-SM, y GM-GC en el sistema SUCS), con espesores no menores de 0,40m. La plasticidad en esta capa es variable entre nula (N.P.) y 8%. Se han encontrado sectores puntuales con arcillas y limos A-7-6 y A-4 respectivamente (ML y CL según SUCS).

La capa inferior, es decir el suelo natural es también arenosa de semejantes características a la capa superior, clasificando como A-2-4, A-1-a y A-1-b; también en pequeña proporción se han encontrado sectores puntuales donde se tiene arcillas A-5, A-6 y limos A-4 (MH, CL y ML en el sistema SUCS), de plasticidad variable entre 8% y 18%.

La densidad de estas capas es media. La humedad es de mediana a alta. Se ha encontrado el nivel freático en la progresiva km 9+000 (Prof.: -0.90m).



Distribución de suelos en el Sector: km 8+000 – km 12+262.795

En este sector, el 74% de los materiales corresponde a los suelos granulares (gravas y arenas), y un 26% corresponde a suelos finos.

4.3.3. CAPACIDAD DE SOPORTE DE LOS SUELOS

En función a las propiedades de los suelos encontrados, y tomando como cantidad mínima de ensayos CBR (ASTM D 1883), uno por cada 2 kilómetros, se han efectuado estos ensayos para establecer la capacidad relativa de soporte de la carretera en estudio. Los resultados obtenidos en los ensayos son los siguientes:

Tabla Nº 05: Resumen de ensayos de CBR en suelos
 (Fuente: Perfil Estratigráfico, Anexo Nº 2)

PROGRESIVA (km)	PROFUNDIDAD (m)	TIPO DE SUELO (SUCS/AASHTO)	CBR (al 95% de MDS)	CBR (al 100% de MDS)
0+000	0.00 – 1.50	MH / A-5(8)	11.0	21.3
2+250	0.00 – 1.50	CL / A-7-6(22)	3.0	6.1
3+000	0.00 – 1.50	SM-SC / A-2-4(0)	16.0	34.6
4+000	0.00 – 1.50	SM / A-2-6(0)	15.1	31.8
6+250	0.00 – 1.50	ML-CL / A-4(2)	9.0	18.7
6+500	0.00 – 1.50	GC / A-7-6(6)	17.1	34.8
7+250	0.50 – 1.20	CL / A-6(7)	7.0	13.6
9+250	0.50 – 1.50	SP-SM / A-2-4(0)	13.9	27.8
10+000	0.00 – 1.50	GM / A-1-a(0)	34.1	67.9
11+250	0.00 – 1.50	GM-GC / A-1-b(0)	23.2	46.0
11+750	0.00 – 1.50	CL / A-4(2)	12.0	25.7

Para determinar el valor de la capacidad de soporte del suelo se emplean métodos estadísticos que permiten obtener el valor representativo de la carretera estudiada, según el método de diseño empleado. Los más empleados en estudios definitivos son: The AsphaltInstitute (USA), emplea los percentiles, el cual es función del tráfico proyectado (diseño), como se indica a continuación.

Tabla Nº 06: Percentil de Diseño

NIVEL DE TRÁFICO (EAL)	PERCENTIL DE DISEÑO (%)
10 ⁴ o menor	60,0
Entre 10 ⁴ y 10 ⁶	75,0
10 ⁶ o más	87,5

Los valores obtenidos son empleados con el procedimiento para el diseño del pavimento mediante el método del Instituto del Asfalto.

Mientras que el método AASHTO, emplea el promedio de los valores CBR obtenidos en diferentes condiciones ambientales.

De acuerdo al estudio de tráfico, obtenido del Consorcio Selcas, se ha obtenido un EAL de 141752 repeticiones de ejes simples acumulados equivalentes a 8.2 Tn, con el cual se obtendría un Percentil 75%.

En los estudios que desarrolla el Ministerio de Transportes y Comunicaciones, emplea el procedimiento de la AASHTO, es decir el promedio aritmético.

Para el presente estudio consideramos adecuado tomar un punto medio entre ambos criterios, como lo es el Percentil 60%, lo cual involucra tomar más áreas de diseño que AASHTO, quedando una menor porción para efectos de mejoramientos.

Por lo tanto en función a la sectorización efectuada se han definido los CBRs de diseño, los cuales se indican a continuación:

Tabla Nº 07: CBR de Diseño

SUBSECTOR (km – km)	CBR (%) al 95% de MDS
0+000 – 3+000	9,66
3+000 – 8+000	9,60
8+000 – 12+262.795	15,81

4.4. RESULTADOS DEL ESTUDIO DE LA CANTERA TUMBA

4.4.1. UBICACIÓN DE LA CANTERA TUMBA

Se ubica fuera de la vía estudiada (SM-100). Se recorre desde la progresiva km 0+000, uno 3,0 kilómetros de vía asfaltada en sentido Jepelacio – Moyabamba, llegando así a la carretera marginal de la selva, la cual se toma en sentido Moyabamba – Rioja, recorriendo esta vía asfaltada unos 10,5 kilómetros; posteriormente se recorre hacia el lado izquierdo 11,50 kilómetros de vía afirmada en regular estado, donde se ubica la localidad de Soritor; seguidamente se recorre hacia el lado derecho 2,66 kilómetros de vía afirmada en estado regular, en sentido Soritor – Rioja, encontrándose el desvío hacia el acceso de la cantera Tumba, posteriormente se recorre hacia el lado izquierdo 1250 metros de vía afirmada en estado regular llegando así al acceso de la cantera. Este acceso se encuentra a lado izquierdo de la vía y es una vía afirmada de 398 metros de longitud.



	Carretera Marginal de la Selva (10,50 kilómetros de vía asfaltada)
	Vía asfaltada (3,0 kilómetros)
	Vía afirmada (15,81 kilómetros)
	Vía en estudio (Afirmado), Ruta SM -100

Figura Nº 12: Diagrama de ubicación de Cantera Tumba

Las coordenadas UTM que delimitan la cantera Tumba son:

Tabla Nº 08: Vértices del área de la Cantera Tumba

VÉRTICE	COORDENADAS UTM		VÉRTICE	COORDENADAS UTM	
	ESTE	NORTE		ESTE	NORTE
V1	264468	9321832	V21	264268	9322218
V2	264469	9321844	V22	264270	9322205
V3	264460	9321856	V23	264275	9322184
V4	264437	9321871	V24	264281	9322167
V5	264420	9321885	V25	264285	9322146
V6	264399	9321911	V26	264288	9322127
V7	264389	9321929	V27	264291	9322103
V8	264377	9321964	V28	264298	9322085
V9	264369	9321995	V29	264302	9322086
V10	264353	9322028	V30	264310	9322035
V11	264339	9322083	V31	264318	9322009
V12	264330	9322125	V32	264332	9321981
V13	264321	9322170	V33	264338	9321951
V14	264311	9322202	V34	264352	9321913
V15	264307	9322229	V35	264372	9321879
V16	264306	9322241	V36	264393	9321855
V17	264298	9322243	V37	264413	9321839
V18	264286	9322245	V38	264430	9321827
V19	264276	9322241	V39	264446	9321818
V20	264267	9322231	V40	264456	9321820
			V41	264464	9321825

4.4.2. DESCRIPCIÓN DE SUS MATERIALES

Los agregados gruesos son de forma subredondeada y de textura áspera. Estos materiales granulares no tienen plasticidad, y clasifican como grava pobremente gradada (GP). Son de color marrón, el tamaño máximo es 8", siendo los más preponderantes de 3". La resistencia de los agregados gruesos al desgaste en la Máquina de los Ángeles es de 13%; mientras que su Equivalente de Arena es 80%.

**Tabla N° 09: Resumen de ensayos de la Cantera Tumba
(Fuente de ensayos: Laboratorio JBO Ingenieros S.A.C.)**

RESUMEN DE LOS ENSAYOS	
Clasificación en el sistema SUCS	GP
Clasificación en el sistema AASHTO	A-1-a (0)
Material pasante la malla N° 200	3%
Límite líquido	NP
Índice plástico	NP
Equivalente de arena	80%
Abrasión con la máquina de los ángeles	13%
Peso específico aparente de la arena	2.670 gr/cm ³
Absorción de la arena	0.13%
Peso específico aparente de la piedra	2.752 gr/cm ³
Absorción de la piedra	1.12%
Durabilidad al sulfato de magnesio de la arena	7.80%
Durabilidad al sulfato de magnesio de la piedra	6.90%
Impurezas orgánicas	Aceptable
Contenido de sales solubles totales de la arena	0.0870%
Contenido de sales solubles totales de la piedra	0.0772%
Contenido de sulfatos solubles de la arena	0.0580%
Contenido de sulfatos solubles de la piedra	0.0480%
Contenido de cloruros solubles de la arena	0.00136%
Contenido de cloruros solubles de la piedra	0.00125%
Potencial de hidrógeno de la arena	7.2
Potencial de hidrógeno de la piedra	7.6
Adhesividad de los ligantes bituminosos Riedel - Weber	Parcial 4
Máxima densidad seca	2.146 gr/cm ³
Óptimo contenido de humedad	8.20%
CBR (0.01") al 100% de la MDS	80.5%

4.4.3. VOLUMEN, USOS Y TRATAMIENTOS

Después del cálculo del área de la cantera, se determinó el volumen bruto, utilizable y desechable:

Tabla N° 10: Volúmenes de la Cantera Tumba (Fuente Propia Anexo 5)

Volumen bruto	30779.40 m ³
Volumen utilizable	23084.55 m ³
Volumen desechable	7694.85 m ³

Para la presente Tesis, los usos que se plantea son: Estabilización de suelos y recubrimiento bituminoso (Slurry Seal), sin embargo, la cantera Tumba también cumple las especificaciones para el uso de Concreto de cemento portland.

El uso, y el rendimiento por cada uso es el siguiente:

Tabla N° 11: Usos y rendimientos de la Cantera Tumba (Fuente Propia Anexo 5)

Estabilización de suelos.....	75 %
Recubrimiento bituminoso.....	14 %

Los tratamientos que se deben efectuar son los siguientes:

Estabilización de suelos: Zarandeo de los agregados por la malla 2", para que cumpla los requerimientos de gradación.

Recubrimiento bituminoso: Zarandeo para emplear sólo la arena natural por la malla N° 4.

Para la extracción de materiales se debe emplear excavadoras de rueda, cargadores frontales, y zarandas.

Periodo de extracción: La extracción de los agregados puede efectuarse en periodo de estiaje (noviembre a mayo).

Propietario: Propiedad privada, se gestiona autorización ante propietario Sr. Giancarlo Gárate Paredes, Gerente GAPARD GROUP EIRL

4.5. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE ESTABILIZACIÓN

Para la elección del aditivo que será utilizado en la estabilización de suelos de la vía SM-100: Moyobamba - Japelacio, se realizaron pruebas de laboratorio de ascensión capilar del agua en los suelos estabilizados y ensayo de CBR para determinar la capacidad de soporte.

Para la ejecución de los ensayos se tomaron muestras de la C-13/M-1, cuya clasificación AASHTO es A-2-4 (0) y su índice de plasticidad es 4%.

Para las dosificaciones de los aditivos se siguieron las recomendaciones de los fabricantes, estas las podemos visualizar en las fichas técnicas de los aditivos (Anexo N°7). A continuación se muestran las dosificaciones utilizadas para la presente tesis.

Tabla N° 12: Dosificación de los aditivos (recomendación de fabricante)

ADITIVO	DOSIS NORMAL	ESTADO ADITIVO
CON AID	0.044 l/m ³	Líquido
TERRASIL	0.750 l/m ³	Líquido
CONSOLID: Consolid C444	0.08l/m ³	Líquido
Solidry	0.75% peso suelo	Sólido (Polvo)

4.5.1. ASCENSIÓN CAPILAR

Se determinó el óptimo contenido de humedad del suelo natural + aditivo, para cada uno de los aditivos propuestos, seguidamente con esta cantidad de agua, se compactaron testigos de suelo + aditivo. Los testigos de 10 cm de diámetro y 12 cm de alto, fueron colocados sobre una bandeja con arena húmeda y limpia cuyo coeficiente de uniformidad es menor a 2, la característica de esta arena es permitir que el agua fluya fácilmente, debido a que sus partículas son uniformes y generan muchos vacíos.

Finalmente se realizaron lecturas en tiempos determinados, de la ascensión capilar en los testigos de suelo + aditivo, pudiendo así descartar el aditivo Con Aid, ya que su comportamiento ante la ascensión capilar es muy baja.

Por otro lado el comportamiento de la mezcla con los aditivos Terrasil y Sistema Consolid funcionó satisfactoriamente, pues al pasar de 2 días, la ascensión capilar en los dos casos es casi nula.

Tabla N° 13: Cuadro de Ascensión Capilar del agua en los suelos estabilizados

DESCRIPCIÓN			ASCENSIÓN CAPILAR DEL AGUA (cm)			
			SUELO + TERRASIL	SUELO + CON AID	SUELO + SISTEMA CONSOLID	SUELO NATURAL
FECHA	HORA	TIEMPO	0,750 l/m ³	0,044 l/m ³	C444 : 0,08l/m ³ + SD: 0,75%	--
01/11/2014	07:00 horas	0.00 min	0.0	0.0	0.0	0.0
01/11/2014	07:15 horas	15.00 min	0.0	3.0	0.0	5.0
01/11/2014	07:30 horas	30.00 min	0.0	5.0	0.0	8.0
01/11/2014	08:00 horas	1.00 hrs	0.0	6.0	0.0	10.0
01/11/2014	09:00 horas	2.00 hrs	0.0	7.3	0.0	10.5
01/11/2014	12:00 horas	5.00 hrs	0.0	8.0	0.0	12.0
01/11/2014	19:00 horas	12.00 hrs	0.0	9.0	0.0	12.0
02/11/2014	07:00 horas	1.00 día	1.0	11.0	1.0	12.0
03/11/2014	07:00 horas	2.00 día	1.0	12.0	1.0	Saturado
04/11/2014	07:00 horas	3.00 día	2.0	12.0	2.0	Saturado
05/11/2014	07:00 horas	4.00 día	2.5	12.0	2.0	Saturado
06/11/2014	07:00 horas	5.00 día	2.5	Saturado	2.5	Saturado

Fuente de ensayos: Laboratorio JBO Ingenieros S.A.C (Anexo N° 7)



Figura N° 13: Ascensión capilar en 24 horas

Por tanto respecto a la prueba de Ascensión Capilar del Agua en los testigos de suelo + aditivo, se concluye que el aditivo químico Con Aid queda descartado.

4.5.2. ENSAYO DE CBR (CALIFORNIA BEARING RATIO)

Para efectuar el ensayo de CBR con los aditivos químicos propuestos se procedió de la siguiente manera:

Para el ensayo con el aditivo Con Aid, en primer lugar se obtuvo el óptimo contenido de humedad de la mezcla suelo + aditivo, seguidamente con la cantidad de agua que este suelo necesitó para llegar a su máxima densidad seca, se compactó tres testigos con diferente número de golpes (56, 25 y 13), después se dejaron curando al medio ambiente durante 7 días, posteriormente se sumergieron en agua por 4 días y finalmente fueron sometidos a la penetración.

Para el ensayo con los aditivos Terrasil y Sistema Consolid, se procedió de la misma manera que con el aditivo Con Aid.

En la siguiente tabla podemos ver de manera resumida, los resultados del ensayo de CBR con los aditivos propuestos.

Tabla N° 14: Cuadro resume del ensayo de CBR a los suelos estabilizados

IDENTIFICACIÓN	% Pasa N°200	IP (%)	CLASIFICACIÓN		PROCTOR MODIFICADO		CBR (%) 2.5 mm de Penetración		CBR (%) 5.0 mm de Penetración	
			SUCS	AASHT O	MDS (gr/cm3)	OCH (%)	100% MDS	95% MDS	100% MDS	95% MDS
Natural	30	4	SM-SC	A-2-4 (0)	1.931	10.00	34.6	16.0	45.8	22.1
Suelo + Aditivo Con Aid	--	--	--	--	2.094	10.40	48.0	24.0	53.6	26.8
Suelo + Aditivo Terrasil	--	--	--	--	2.111	10.70	56.3	28.1	70.8	35.2
Suelo + Consolid C444 + Solidry	--	--	--	--	2.111	10.70	60.0	31.3	70.8	36.0

Fuente de ensayos: Laboratorio JBO Ingenieros S.A.C (Anexo N° 7)

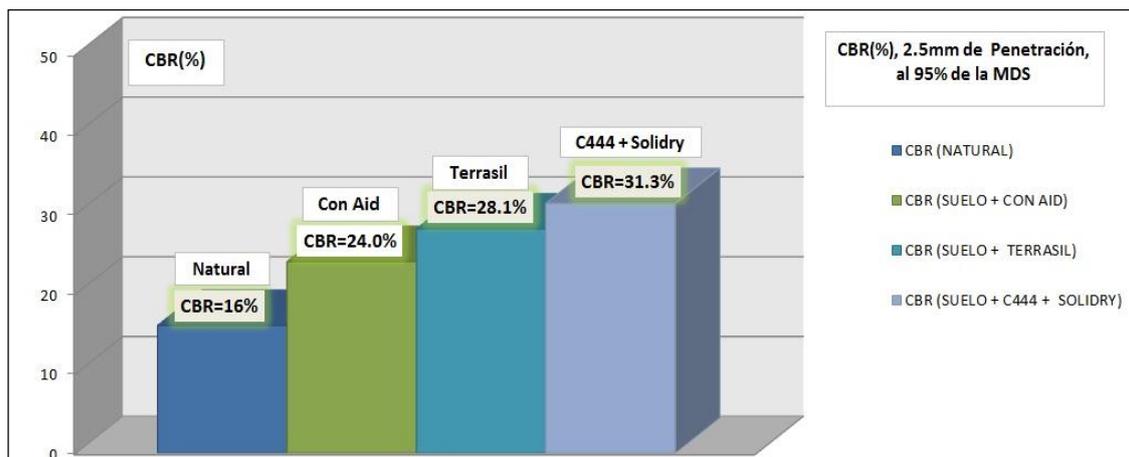


Figura N° 14: Gráfico explicativo de la evolución del CBR

Como se puede apreciar en la figura N° 29, los aditivos de mejor comportamiento son el aditivo químico Terrasil y el Sistema Consolid, dejando de lado al aditivo Con Aid, ya que a pesar de que incrementó el CBR del suelo en 8%, en la prueba de Ascención capilar quedó descartado.

4.5.3. ELECCIÓN TÉCNICA DEL MEJOR ADITIVO

Finalmente se evaluaron procedimientos de aplicación y costos, solo de los aditivos, Terrasil y Sistema Consolid, ya que el aditivo Con Aid quedó descartado en pruebas de laboratorio.

En el siguiente cuadro se muestra la comparación en procedimiento de aplicación los aditivos:

SISTEMA CONSOLID		TERRASIL	
Procedimiento de aplicación		Procedimiento de aplicación	
<p>1.- En primer lugar se debe remover y homogenizar la capa del suelo a tratar a una profundidad de 15cm, de manera que posteriormente se pueda lograr una buena mezcla de los aditivos del Sistema CONSOLID.</p>		<p>1.- En primer lugar se debe remover y homogenizar la capa del suelo a tratar a una profundidad de 15cm</p>	
<p>2.- Regar el producto CONSOLID C444 en todo el ancho de la vía. Luego se mezcla hasta lograr el riego homogéneo de todo el suelo a estabilizar.</p>		<p>2.- Se debe realizar un riego inicial en todo el ancho de la subrasante, con 1: 300 de TERRASIL y agua.</p>	
<p>3.- La segunda etapa comienza con la distribución de las bolsas de SOLIDRY (polvo blanco en bolsas de 25 Kg) sobre la superficie a tratar.</p>		<p>3.- Se vertirá el líquido estabilizador (TERRASIL diluido en agua) sobre el suelo a estabilizar. Mezclar por 30 minutos el suelo estabilizado con Terrasil hasta conseguir y observar una buena homogenización.</p>	
<p>4.- Luego se distribuye Solidry esparciéndolo sobre toda el área.</p>		<p>4.- Una vez terminada la mezcla, se inicia la compactación final con el rodillo pata de cabra y/o la aplicación del rodillo vibrador liso.</p>	
<p>5.- Se procede a mezclar todo el material aplicado a muy baja velocidad para evitar el viente de Solidry. Ésta mezcla la podemos realizar con motoniveladora o recicladora.</p>		<p>5.- Se debe realizar un topping o riego final con 1: 300 de Terrasil y agua, para completar el proceso de estabilización y de impermeabilización. Terminando así el proceso de aplicación del sistema.</p>	
<p>6.- Una vez terminada la mezcla, se inicia la compactación final con el rodillo pata de cabra y/o la aplicación del rodillo vibrador liso. Terminando así el proceso de aplicación del sistema.</p>			

Tabla N° 15: Comparación de Aditivos Sistema Consolid y Terrasil

(Fuente: Fabricantes de aditivos)

Se realizaron solicitudes de cotización a las empresas de los aditivos a usar en la investigación y de las cuales tenemos los siguientes resultados:

Tabla N° 16: Costos generales de los aditivos

Fuente: Fabricantes de aditivos

COSTOS DE LOS ADITIVOS

SISTEMA CONSOLID TERRASIL

C444 + SOLIDY

Dosificación

C444: 0.08 l/m³

SD: 15 kg/m³ 0.75 l/m³

63.81 soles / m³ 39.72 soles / m³

Después de los resultados obtenidos en laboratorio, los procedimientos de aplicación de los aditivos y los costos, podemos llegar a concluir que el mejor aditivo a emplear es el TERRASIL, debido a su buen comportamiento en la ascensión capilar del agua, el incremento considerable del CBR, su aplicación sencilla y su bajo costo respecto al aditivo Sistema Consolid.

4.6. RESULTADOS DEL DISEÑO DE PAVIMENTOS

Para efectos del diseño, se ha empleado la metodología expuesta en el Manual de Diseño de Carreteras no Pavimentadas de Bajo Volumen de Tránsito del Ministerio de Transportes y Comunicaciones. Parámetros que definen la estructura del pavimento son los de resistencia de los suelos, expresados en CBRs, así como las cargas que imponen los tráficos de los diferentes sectores. El diseño del pavimento se efectuará con los resultados de ensayos de laboratorio, los que se convertirán en el sustento técnico para la estructura que se está definiendo como mejor alternativa. Debe tenerse en cuenta, sin embargo, que el diseño que se está efectuando es para un cambio de estándar, es decir no es una estructura de pavimento definitiva y convencional. Se han efectuado los estudios de los bancos de materiales existentes en la zona del proyecto. Los materiales en general presentan agregados gruesos redondeados con pocos finos. Con la finalidad de mejorar, especialmente la adherencia entre las partículas de los agregados, y por consiguiente su CBR, se han efectuado ensayos de mejoramiento de agregados adicionándole aditivos estabilizadores.

4.6.1. MATERIALES PARA EL PAVIMENTO

La cantera Tumba fue seleccionada para la conformación del pavimento, ya que como se puede visualizar en el resumen de ensayos de cantera (Anexo N° 4), sus materiales cumplen con las Especificaciones Técnicas Generales para la Construcción EG-2013 del MTC, para el uso de estabilización de suelos con aditivos químicos y el uso de recubrimiento bituminoso.

Según lo demostrado en el Ítem. 4.5.3 el aditivo que impermeabiliza de una manera correcta al suelo, que su vez le eleva el CBR, cuya aplicación es sencilla y que tiene menor costo respecto a otros, es el aditivo Terrasil, el cual será usado para estabilizar las capas del pavimento.

4.6.2. MEJORAMIENTO DE LOS AGREGADOS CON ADITIVO TERRASIL

Con la finalidad de mejorar, especialmente la adherencia entre las partículas de los agregados, y por consiguiente su CBR, se han efectuado ensayos de mejoramiento de agregados adicionándole el aditivo estabilizador de suelos Terrasil; este aditivo está compuesto por organosilanos, que forman enlaces de Silicio y Oxígeno en la superficie del suelo estabilizado, por ello, una vez estabilizado el material, además de elevar el CBR, repele el agua (hidrófobo) disminuyendo la permeabilidad del suelo.

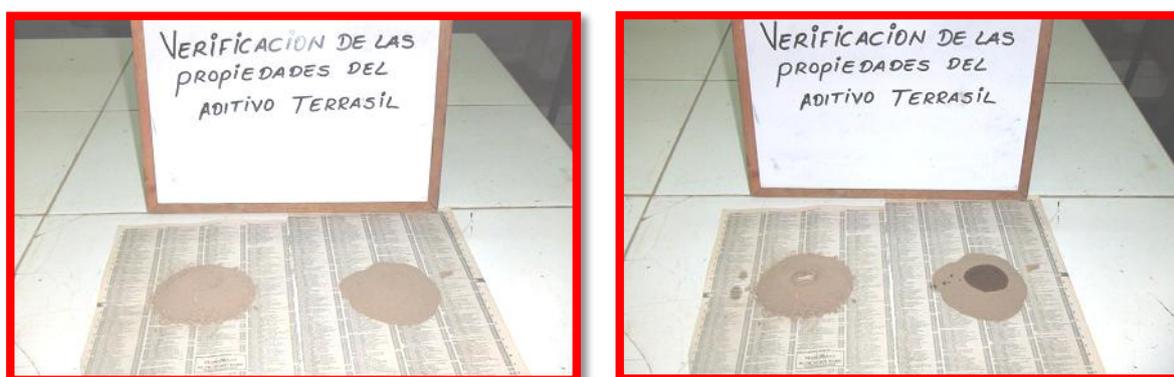


Figura N° 15: Verificación de propiedad hidrófoba del aditivo Terrasil

Como se observa en la Tabla N° 17, se está empleando los agregados de la cantera Tumba mezclados con el suelo de subrasante; limo arcillosos en los sectores 1 y 2; y arenosos en el sector 3. Los CBRs mostrados corresponden a resultados de los ensayos de estabilización efectuados en laboratorio, estos certificados se encuentran adjuntos en el Anexo N° 8.

Tabla N° 16: Resumen de ensayos de CBR de suelos estabilizados con aditivo Terrasil

IDENTIFICACIÓN	IP (%)	CLASIFICACIÓN		PROCTOR MODIFICADO		CBR (%) 2.5 mm de Penetración		CBR (%) 5.0 mm de Penetración	
		SUCS	AASHTO	MDS (gr/cm3)	OCH (%)	100% MDS	95% MDS	100% MDS	95% MDS
Sector 1 : 1 Cantera Tumba + 1 Suelo Arcilloso + 0.75 l/m3 Aditivo Terrasil	NP	GM	A-4 (0)	2.105	6.70	105.2	51.3	134.4	66.4
Sector 2 : 1 Cantera Tumba + 1 Suelo Arenoso Limoso + 0.75 l/m3	NP	GM	A-1-b (0)	2.169	6.50	100.0	50.8	113.9	58.5
Sector 3 : 0.5 Cantera Tumba + 2 Suelo Arenoso Limoso + 0.75 l/m3 Aditivo Terrasil	NP	SM	A-1-b (0)	2.115	8.40	70.0	35.3	77.7	39.2

Fuente de ensayos: Laboratorio JBO Ingenieros S.A.C (Anexo N° 8)

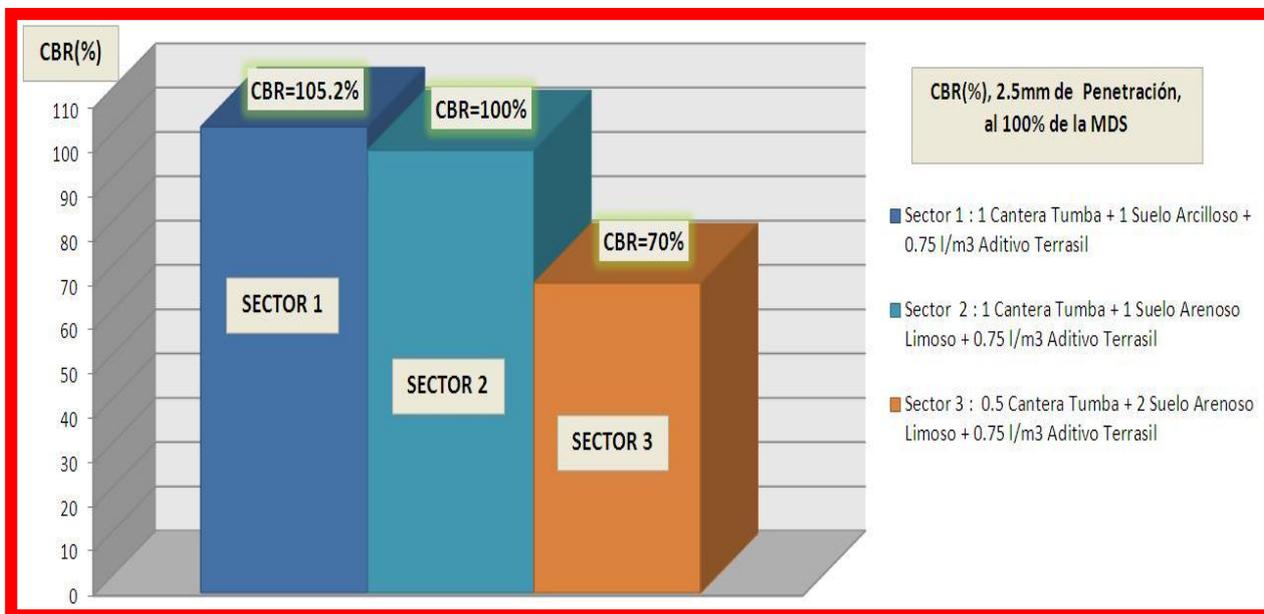


Figura N° 16: Gráfico de resultados de CBR por sector

4.6.3. METODOLOGÍA DE DISEÑO DEL PAVIMENTO DEL MTC

El Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú ha elaborado un Manual para el diseño de pavimentos afirmados para las condiciones que se presentan en la carretera de estudio. En el mismo se establecen estructuras preconcebidas en función al Manual NAASRA (Nacional Association of Australian State Road Authorities) que actualmente es el AUSTROADS (17).

Si bien en el manual del MTC se establece que el tráfico mayor considerado en esta metodología es de IMD = 200 vehículos, en el manual original NAASRA no hay restricciones al respecto.

La ecuación básica de diseño empleada es la siguiente:

$$t = \left[219 - 211x(\log CBR) + 58x(\log CBR)^2 \right] x \log\left(\frac{DESA}{120}\right)$$

Dónde:

t : Espesor de capa granular (mm)

CBR : Valor CBR de diseño (%)

DESA (ESAL): Número de repeticiones de carga de ejes simples equivalentes a 8,2Tn

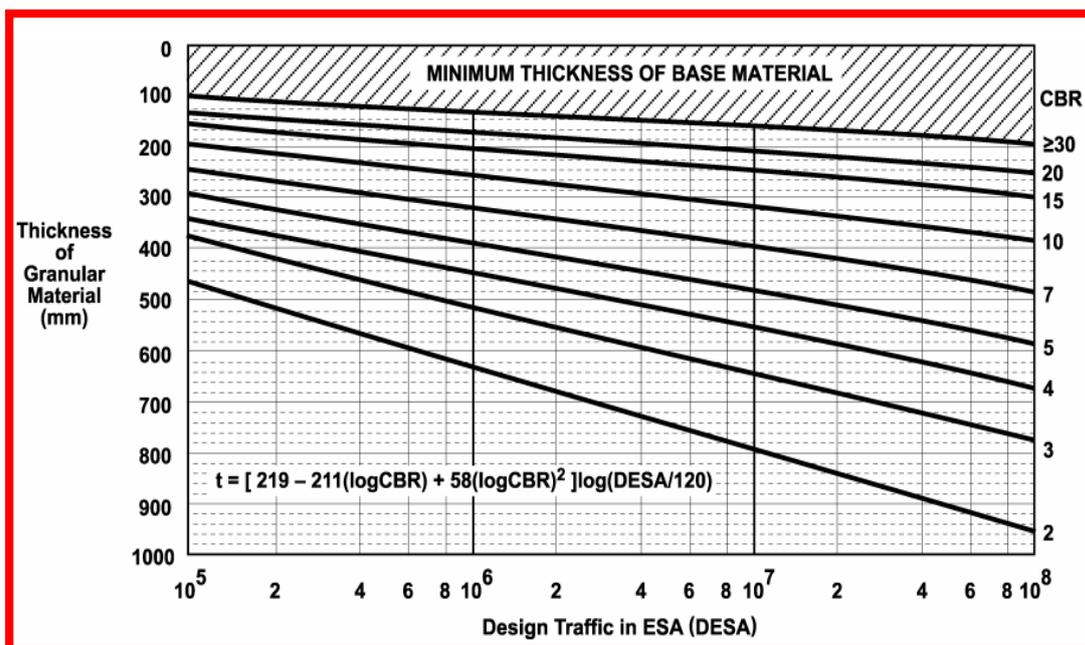


Figura Nº 17: Nomograma para estimar el espesor "t" de la capa granular (Fuente: Austroads)

4.6.4. PARÁMETROS DE DISEÑO

Capacidad de soporte del suelo

Los valores de CBR obtenidos en el estudio de suelos son:

Tabla Nº 17: CBR de suelos de fundación

SUBSECTOR (km – km)	CBR (%) al 95% de MDS
0+000 – 3+000	9.66
3+000 – 8+000	9.60
8+000 – 12+262.795	15.81

Tráfico

Del Estudio de Tráfico, efectuado por el Consorcio Selcas se ha tomado la información correspondiente a las repeticiones de carga acumuladas equivalentes a ejes simples de 8.2 tn, para el periodo de 5 años:

$$ESAL_{8.2} = 141752 \text{ repeticiones}$$

Coeficientes estructurales de capas

Para definir los coeficientes estructurales para el diseño del pavimento nos estamos basando en Item 2.3.5 Layer Coefficients, de la Guía de Diseño AASHTO (Figura 33).

$$a_2 = 0,0482/\text{cm} \quad \text{Material de afirmado cuyo CBR es 50\%}$$

Los coeficientes estructurales de las capas estabilizadas, se han tomado del ítem 2.3.5 Layer Coefficients, de la Guía de Diseño AASHTO, para una sub base granular.

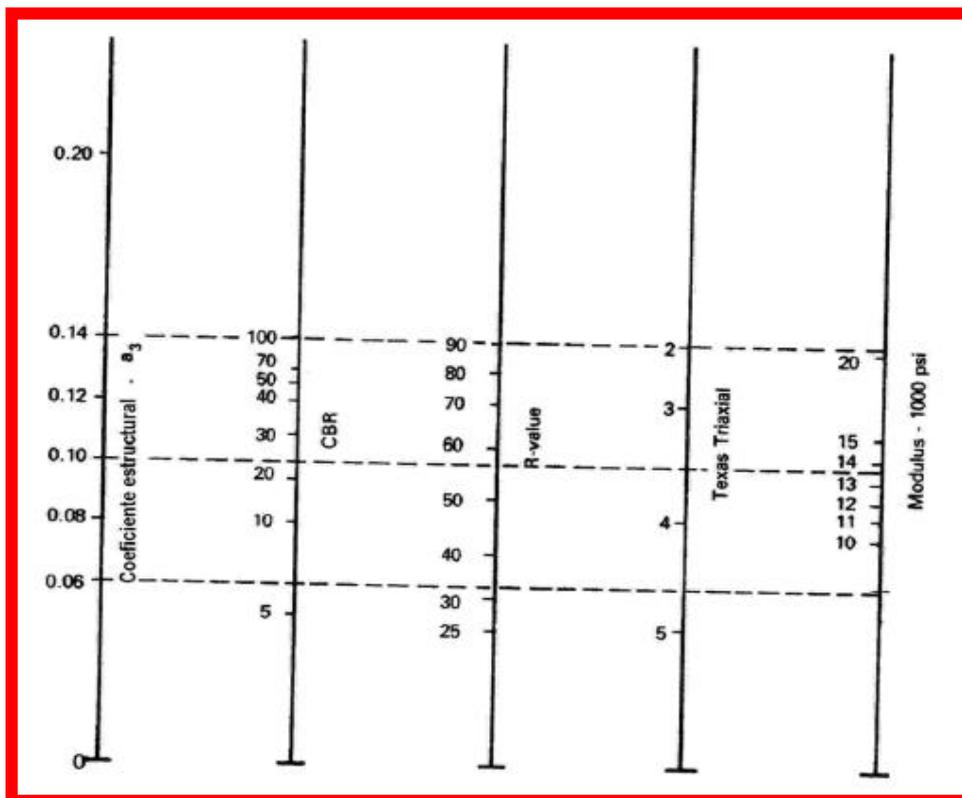


Figura Nº 18: Nomograma para estimar el Coeficiente estructural a_3 para una subbase granular

Para mi propuesta técnica se ha desarrollado una serie de ensayos de laboratorio, que se adjuntan en el Anexo 08. Los coeficientes obtenidos son los siguientes:

- $a_1 = 0,0$: Recubrimiento bituminoso
- $a_2 = 0,055/cm$: Mezcla de suelo natural y material de cantera (CBR = 80%) en dosis 1:1, estabilizado con aditivo químico cuyo CBR es 100%.
- $a_2 = 0,056/cm$: Mezcla de suelo natural y material de cantera (CBR = 80%) en dosis 1:1, estabilizado con aditivo químico cuyo CBR es 105%.
- $a_2 = 0,052/cm$: Mezcla de suelo natural y material de cantera (CBR = 80%) en dosis 2:0.5, estabilizado con aditivo químico cuyo CBR es 70%.

4.6.5. DISEÑO ESTRUCTURAL DEL PAVIMENTO

Número estructural requerido

Para obtener el Número Estructural (SN) requerido se ha empleado la metodología del MTC. Se ha considerado para establecer el Coeficiente Estructural la mezcla de la Cantera Tumba con arcilla (de 20% a 30%) para darle las características de un material de afirmado. Finalmente se ha considerado un CBR de 50%, que sería el producto de la mezcla de ambos materiales.

Tabla Nº 18: Cuadro se muestra el resumen de los cálculos de SN requerido.

SECTOR	ESPEJOR MÉTODO MTC (cm)	CBR (%)	COEFICIENTE ESTRUCTURAL	SN REQUERIDO
SECTOR 1: km 0+000 - km 3+000	22	50	0.0482	1.06
SECTOR 2: km 3+000 - km 8+000	22	50	0.0482	1.06
SECTOR 3: km 8+000 - km 12+262.795	20	50	0.0482	0.97

Propuesta técnica

Con el mejoramiento de las propiedades (especialmente la de resistencia) de los suelos el aditivo químico Terrasil, se plantea la siguiente estructura de pavimento:

Tabla Nº 19: Cuadro se muestra el resumen de los SN propuestos

SUBSECTOR	ESPEJOR POR CAPA ESTABILIZADA (cm)		ESPEJOR TOTAL CAPA ESTABILIZADA (cm)	RECUBRIMIENTO BITUMINOSO (cm)	SN
	MATERIAL DE SUBRASANTE	APORTE DE CANTERA			
SECTOR 1: 0+000 - km 3+000 km	10	10	20	1	1.12
SECTOR 2: km 3+000 - km 8+000	10	10	20	1	1.11
SECTOR 3: km 8+000 - km 12+262.795	20	5	25	1	1.29

CAPÍTULO V

DISCUSIONES

5.1. INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS DEL ESTUDIO DE SUELOS

Como se observa los suelos naturales encontrados a lo largo de la carretera son en su mayoría limos y arcillas, con características físico mecánicas desfavorables, y que corresponden aproximadamente al 63% de los materiales. Desde el punto de vista de la clasificación de suelos AASHTO, estos corresponden a los suelos finos A-4, A-5, A-6, y A-7.

Se han determinado las zonas críticas en la vía, desde el punto de vista de la susceptibilidad a la deformación y expansión, humedades altas, suelos orgánicos y presencia de aguas subterráneas. A continuación se explicará de una manera más detallada dichos puntos.

5.1.1. SUELOS SUSCEPTIBLES A DEFORMACIÓN Y EXPANSIÓN

Las arcillas plásticas, por sus características innatas, se expanden considerablemente cuando se le agrega agua y luego se contraen con la pérdida de ésta. Las precipitaciones pluviales en la zona de estudio así como las aguas sub superficiales que afloran por las laderas, y hacen que sectores de la plataforma vial se encuentre húmeda, y en algunos casos saturados. Por lo tanto, se analizará la susceptibilidad del suelo ante la acción del agua.

La gran mayoría de los suelos son arcillosos por lo que son susceptibles a sufrir asentamientos y deformaciones.

Para el análisis nos hemos valido del concepto de Índice de Liquidez (I_L), el cual se define mediante la siguiente expresión:

$$I_L = \frac{\omega - LP}{IP}$$

Dónde:

w = Contenido de humedad del suelo

LP = Límite plástico del suelo

IP = Índice plástico del suelo

Se considera que los valores cercanos a cero se encuentran pre consolidados y por lo tanto ofrecen resistencia. Cuando el I_L es superior a 1, entonces el suelo puede ser amasado, en otras palabras se encuentra en estado plástico y deformable. Cuando el I_L es negativo, significa que no contiene mucha humedad, y por lo tanto, por más plástico que sea el suelo, no es deformable.

En el siguiente cuadro se resume el análisis efectuado. Como se observa una parte de nuestros suelos son No Plásticos, por lo tanto no es aplicable esta teoría y sólo es deformable por exposición permanente al agua; representando aproximadamente el 29% de los suelos analizados. El 54% de los suelos tienen valores de I_L comprendidos entre 0 (cero) y negativos; es decir no hay situación de riesgo. El 11% de los suelos plásticos, durante los trabajos de campo, se encontraban en estado susceptible a deformación.

Tabla Nº 20: Análisis de Índice de Liquidez

No Aplica	$I_L \leq 1$	$I_L > 1$
28%	64%	8%

Los lugares con estos suelos de características desfavorables son los siguientes:

Tabla Nº 21: Resumen del Índice de Liquidez

PROGRESIVA (km)	PROFUNDIDAD (m)	I_L
0+500	0.00-1.50	2.7
2+000	0.00-0.70	1.2
5+500	0.30-1.50	1.7
7+500	0.00-1.50	3.1
8+000	0.40-1.00	1.6
8+750	0.40-1.50	1.2
10+250	0.00-1.50	2.0

En lo que corresponde a los suelos expansivos ubicados en la zona del proyecto, para su ubicación y definición nos hemos valido de los siguientes parámetros como referencia establecidos por Holtz y Gibbs (Bureau of Reclamation de EEUU) (4), el cual está basado en los límites de consistencia del suelo:

Tabla Nº 22: Parámetros del Potencial Expansivo

POTENCIAL DE EXPANSIÓN	ÍNDICE DE PLASTICIDAD (%)	LÍMITE LÍQUIDO (%)
Muy Alto	> 32	>70
Alto	23 - 32	50 - 70
Medio	12 - 23	35 - 50
Bajo	< 12	20 - 35

Al igual que el caso anterior los suelos carentes de plasticidad (NP) y los suelos de Bajo Potencial de Expansión corresponden al 72%; los que presentan un potencial de expansión Media son el 23%, y los que presentan un Alto y Muy Alto Potencial de Expansión representan el 5%.

Tabla Nº 23: Resumen del Potencial Expansivo

No Aplica	B	M	A / MA
28%	50%	17%	5%

A continuación se identifican los lugares donde se ubican los suelos con Alto (A) y Muy Alto (MA) Potencial de Expansión:

Tabla Nº 24: Lugares del Potencial Expansivo

PROGRESIVA (km)	PROFUNDIDAD (m)	POTENCIAL DE EXPANSIÓN
2+500	0.00-1.20	Alto
4+750	0.30-1.50	Muy Alto
5+750	0.00-0.30	Alto
6+500	0.00-1.50	Alto

5.1.2. INFLUENCIA DE LA HUMEDAD EN LOS SUELOS

Debido a que los suelos en su gran mayoría son arcillosos, la influencia de la humedad es muy alta. En tal sentido se ha efectuado un análisis de la humedad existente en el suelo natural. Para tal efecto, en el siguiente gráfico se observa la variación de la humedad, versus los Límites Líquidos de los suelos (color marrón).

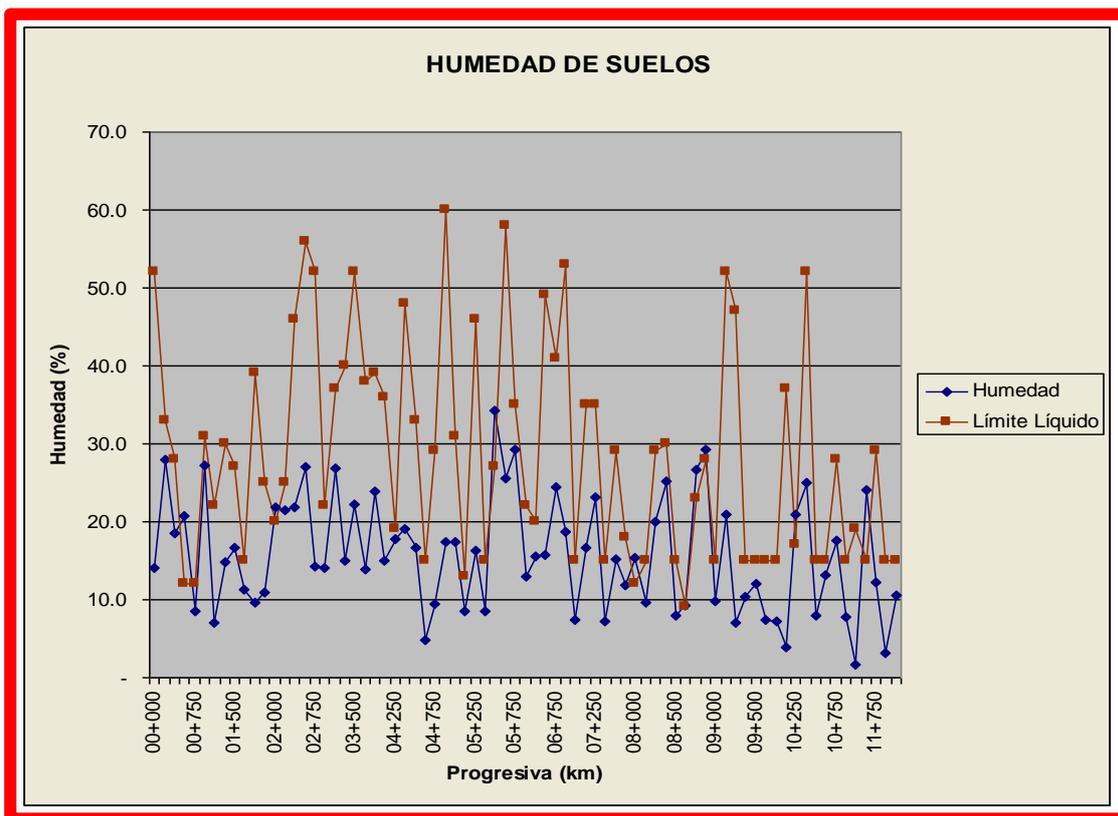


Figura Nº 19: Gráfico Humedad vs Límite Líquido de los suelos

Como se observa, la mayor parte de las humedades graficadas se encuentran por debajo del límite líquido, es decir no se encuentran saturados. En los siguientes puntos si se supera el límite líquido:

Tabla Nº 25: Lugares de Alta Humedad

PROGRESIVA (km)	PROFUNDIDAD (m)	LÍMITE LÍQUIDO (%)	HUMEDAD NATURAL (%)
0+500	0.5	12	20.7
2+000	0.7	20	21.9
5+500	0.5	27	34.3
8+000	0.4	12	15.4
8+750	0.9	28	29.3
10+250	0.5	17	21.0
11+500	0.5	15	24.0

5.1.3. SUELOS ORGÁNICOS Y TURBAS

En las perforaciones de estudio no se han ubicado suelos orgánicos y turbas, tal como se aprecia en las vistas fotográficas y resultados de ensayos de laboratorio.

5.1.4. AGUA SUBTERRÁNEA

Durante las perforaciones de estudio efectuadas entre julio y septiembre del 2014, se ha ubicado aguas subterráneas en:

Tabla N° 26: Ubicación de Agua Subterránea

UBICACIÓN (km)	PROFUNDIDAD (m)
9+000	-0.90

Si bien es cierto que el punto ubicado es mínimo se debe tener en cuenta que estos trabajos se efectuaron en temporada de escasas precipitaciones pluviales; lluvias que aumentan considerablemente entre los meses de diciembre y abril.

Además de lo señalado se han encontrado en la carretera los siguientes sectores donde brotaba agua desde el talud superior hacia la plataforma vial:

- km 5+890 - km 6+046, lado izquierdo
- km 9+460 - km 9+593, lado izquierdo
- km 11+412 - km 11+627, lado izquierdo
- km 11+627 - km 11+827, lado izquierdo

Con la finalidad de que esta agua no cause daño al pavimento, se recomienda efectuar el diseño de subdrenes interceptores, a colocarse en sentido transversal al talud.

5.1.5. SECTORES DE MEJORAMIENTO

En el siguiente cuadro se resumen los sectores establecidos para mejoramiento, y se efectúa el análisis para definir los sectores a mejorarse.

Tabla N° 27: Cuadro resumen de lugares de mejoramiento de suelos

CRITERIO	SECTOR	PROFUNDIDAD	ANÁLISIS
Índice de Liquidez	0+500	0.00 – 1.50	Mejorar
Índice de Liquidez	2+000	0.00 – 0.70	Mejorar
Índice de Liquidez	5+500	0.30 – 1.50	Mejorar
Índice de Liquidez	7+500	0.00 – 1.50	Humedad baja (0.50m). Estable. No se trata.
Índice de Liquidez	8+000	0.40 – 1.00	Capa superior (SM) es estable. No se trata.
Índice de Liquidez	8+750	0.40 – 1.50	Capa superior (0.50m) (SM) es estable. No se trata.
Índice de Liquidez	10+250	0.00 – 1.50	Mejorar
Expansión de suelos	2+500	0.00 – 1.20	Mejorar
Expansión de suelos	4+750	0.30 – 1.50	Capa superior (GC) es estable. No se trata.
Expansión de suelos	5+750	0.00 – 0.30	Mejorar
Expansión de suelos	6+500	0.00 – 1.50	Mejorar
Humedad alta	0+500	0.5	Mejorar
Humedad alta	2+000	0.7	Mejorar
Humedad alta	5+500	0.5	Mejorar
Humedad alta	8+000	0.4	Capa superior (SM) con baja humedad. No se trata.
Humedad alta	8+750	0.9	Capa superior (SM) con baja humedad. No se trata.
Humedad alta	10+250	0.5	Mejorar
Humedad alta	11+500	0.5	Mejorar
Suelos con CBR por debajo de diseño	1+950 - 3+600		Mejorar
Suelos con CBR por debajo de diseño	4+200 - 4+400		Mejorar
Suelos con CBR por debajo de diseño	4+750 -5+200		Mejorar
Suelos con CBR por debajo de diseño	5+500 - 6+000		Mejorar
Suelos con CBR por debajo de diseño	9+000 - 9+300		Mejorar
Suelos con CBR por debajo de diseño	11+500 - 12+262.795		Mejorar

5.2. INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS DEL ESTUDIO DE CANTERAS

Del estudio de canteras, se ubicó a la cantera denominada Tumba, que es de origen fluvial, sus materiales tienen un color marrón, el tamaño máximo es 8", siendo los más preponderantes de 3". La resistencia de los agregados gruesos al desgaste en la Máquina de los Ángeles es de 13%, su Equivalente de Arena es 80% y clasifican como grava pobremente gradada (GP).

Como uno de los objetivos de esta tesis es emplear pavimentos con suelo estabilizado, los usos para la cantera Tumba son: Estabilización con aditivos químicos y recubrimiento bituminoso.

Tomando como referencia las Especificaciones Técnicas Generales para Construcción EG-2013 del MTC (10), se puede afirmar y sustentar que los agregados de la cantera Tumba cumplen los rangos de calidad, para el uso que se está planteando.

5.3. INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS

Se propusieron tres aditivos: Terrasil, Con Aid y Sistema Consolid.

Para la evaluación de sus ventajas en la estabilización de suelos, se realizaron pruebas de ascensión capilar y ensayo de CBR; también se hicieron comparaciones en el proceso de aplicación del aditivo en campo y finalmente se evaluó el beneficio/costo.

Para un mejor entendimiento sobre los resultados, se muestra el siguiente cuadro, donde se califica con los términos Bueno, Regular y Malo, al resultado de las pruebas y evaluaciones que se hicieron en el Item 4.5.

Tabla Nº 28: Cuadro de calificación de los aditivos

ANÁLISIS	ADITIVO		
	TERRASIL	CON AID	SISTEMA CONSOLID
PRUEBA DE CAPILARIDAD	BUENO	MALO	BUENO
ENSAYO DE CBR	BUENO	REGULAR	BUENO
APLICACIÓN EN CAMPO	BUENO	BUENO	REGULAR
COSTO	BUENO	BUENO	REGULAR

Después de los resultados obtenidos en laboratorio, los procedimientos de aplicación de los aditivos y los costos, podemos llegar a concluir que el mejor aditivo a emplear es el TERRASIL, debido a su buen comportamiento en la ascensión capilar del agua, el incremento considerable del CBR, su aplicación sencilla y su bajo costo respecto al aditivo Sistema Consolid.

5.4. INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS DEL DISEÑO DE PAVIMENTOS

5.4.1. VERIFICACIÓN DE LA CAPACIDAD ESTRUCTURAL DEL PAVIMENTO

Tabla N° 29: Cuadro de verificación de SN

SUBSECTOR	Verificación SN	
	Diseño MTC	Total Propuesto
SECTOR 1: km 0+000 - km 3+000	1.06	1.12
SECTOR 2: km 3+000 - km 8+000	1.06	1.11
SECTOR 3: km 8+000 - km 12+262.795	0.97	1.29

Como se puede apreciar, los Números Estructurales (SN) propuestos con la estabilización de los materiales son mayores a los Números Estructurales requeridos. Por lo tanto se cumple con la condición estructural.

5.4.2. PROPUESTA DE PAVIMENTO BÁSICO

En función a los resultados obtenidos, la propuesta técnica de solución básica se resume a continuación:

Tabla N° 30: Cuadro de propuesta de Pavimento Básico Final

SUBSECTOR	ESPESOR POR CAPA ESTABILIZADA (cm)		ESPESOR TOTAL CAPA ESTABILIZADA (cm)	RECUBRIMIENTO BITUMINOSO (cm)
	MATERIAL DE SUBRASANTE	APORTE DE CANTERA		
SECTOR 1: km 0+000 - km 3+000	10	10	20	1
SECTOR 2: km 3+000 - km 8+000	10	10	20	1
SECTOR 3: km 8+000 - km 12+262.795	20	5	25	1

- Previamente se deberán efectuar los mejoramientos de suelos

Tabla N° 31: Cuadro de recomendaciones para el mejoramiento de suelos

SECTOR (km-km)	CAUSA	RECOMENDACIÓN
0+400 - 0+800	IL; Humedad alta	Previo perfilado y compactado de la subrasante, colocar la siguiente estructura: <ul style="list-style-type: none"> - Agregado sin estabilizar= 20cm - Agregado estabilizado= 15cm - Recubrimiento bituminoso= 1cm
1+950 - 2+600	IL; Humedad alta Suelo con CBR debajo de diseño	Previo perfilado y compactado de la subrasante, colocar la siguiente estructura: <ul style="list-style-type: none"> - Agregado sin estabilizar= 20cm - Agregado estabilizado= 15cm - Recubrimiento bituminoso= 1cm
3+000 - 3+600	Suelo con CBR debajo de diseño	Previo perfilado y compactado de la subrasante, colocar la siguiente estructura: <ul style="list-style-type: none"> - Agregado sin estabilizar= 15cm - Agregado estabilizado= 12cm - Recubrimiento bituminoso= 1cm
4+200 - 4+400	Suelo con CBR debajo de diseño	Previo perfilado y compactado de la subrasante, colocar la siguiente estructura: <ul style="list-style-type: none"> - Agregado sin estabilizar= 15cm - Agregado estabilizado= 12cm - Recubrimiento bituminoso= 1cm
4+800 - 5+100	Suelo con CBR debajo de diseño	Previo perfilado y compactado de la subrasante, colocar la siguiente estructura: <ul style="list-style-type: none"> - Agregado sin estabilizar= 15cm - Agregado estabilizado= 12cm - Recubrimiento bituminoso= 1cm

SECTOR (km-km)	CAUSA	RECOMENDACIÓN
5+650 - 5+850	Sensibilidad expansión ; Suelo con CBR debajo de diseño	Previo perfilado y compactado de la subrasante, colocar la siguiente estructura: - Agregado sin estabilizar= 15cm - Agregado estabilizado= 12cm - Recubrimiento bituminoso= 1cm
6+450 -7+100	Sensibilidad expansión ; Suelo con CBR debajo de diseño	Previo perfilado y compactado de la subrasante, colocar la siguiente estructura: - Agregado sin estabilizar= 15cm - Agregado estabilizado= 12cm - Recubrimiento bituminoso= 1cm
8+900 - 9+300	Suelo con CBR debajo de diseño	Previo perfilado y compactado de la subrasante, colocar la siguiente estructura: - Agregado sin estabilizar= 12cm - Agregado estabilizado= 12cm - Recubrimiento bituminoso= 1cm
10+200 - 10+350	IL; Humedad alta	Previo perfilado y compactado de la subrasante, colocar la siguiente estructura: - Agregado sin estabilizar= 12cm - Agregado estabilizado= 12cm - Recubrimiento bituminoso= 1cm
11+500 - 12+262.795	Suelo con CBR debajo de diseño	Previo perfilado y compactado de la subrasante, colocar la siguiente estructura: - Agregado sin estabilizar= 12cm - Agregado estabilizado= 12cm - Recubrimiento bituminoso= 1cm

- Se está previendo la estabilización de los suelos de la sub rasante, para lo cual se escarificará en la profundidad señalada en el diseño, se retirará agregados superiores a 2".
- Luego se aportará material granular del río Tumba.
- Se batirá y homogenizará el material de sub rasante con la cantera Tumba.
- Se efectuará un primer riego para sello impermeabilizante sobre la sub rasante, con la siguiente dosificación: proporción 1:300 (1kg de aditivo Terrasil en 300lts de agua) y Rend. 3 l/m².
- A la capa granular se le adicionará el aditivo Terrasil (0,75 lt/m³), se batirá, humedecerá y compactará. Se batirá, humedecerá con agua hasta llegar al Óptimo Contenido de Humedad y compactará.
- Los espesores señalados en la Tabla N° 31, corresponden a espesores compactados.
- Se efectuará un segundo riego para sello impermeabilizante sobre la capa estabilizada, con la misma dosificación que el primero.
- Se imprimirá con emulsión asfáltica y se colocará una capa de recubrimiento bituminoso, la cual será formulada con emulsión asfáltica de rotura lenta y arena natural de río.

5.4.3. MANTENIMIENTO DE LA VÍA

Con la finalidad de mantener y/o recuperar la serviciabilidad de la vía, después que este proyecto se haga realidad, se recomienda el mantenimiento de la vía, el cual lo podemos dividir en dos etapas que se explican a continuación.

Etapa de mantenimiento periódico: Con la finalidad de recuperar la serviciabilidad de los sectores incluidos en la conservación con solución básica, se efectuará el mantenimiento periódico a las vías, al quinto año de servicio, consistente en:

- Limpieza de la superficie de rodadura empleando barredoras mecánicas.
- Reparación de fallas.
- Colocación de una capa de recubrimiento bituminoso.

El recubrimiento bituminoso se formulará con emulsión asfáltica de rotura lenta y con arena natural de río.

Etapa de mantenimiento rutinario: El mantenimiento rutinario se efectuará antes y después de las actividades de colocado el pavimento

Se consideran las siguientes actividades:

- Eliminación de derrumbes y/o remoción de obstáculos manual.
- Limpieza de obras de arte (alcantarillas, drenajes, tuberías, pontones, puentes vehiculares y peatonales, viaductos, túneles, etc.).
- Limpieza de cunetas y zanjas de coronación.
- Remoción de derrumbes localizados, en material común o conglomerados (de hasta 200 m³ por evento), incluido el acarreo a los botaderos autorizados.
- Tratamiento de fisuras y grietas, sellos.
- Bacheo
- Parchados
- Reparaciones de alcantarillas, cunetas, cunetas de coronación, badenes.
- Reposición y/o reconformación y/o colocación de muros secos.

5.5. COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Tabla Nº 32: Comparación de Tesis

ANGEL A. BARRUETA GUITIERREZ	ADA NANCY O'DIANA QUIROZ
TESIS	TESIS
ESTUDIO DE SUELOS Y DISEÑO DE PAVIMENTOS EN LA CIUDAD DE PUCALLPA	EVALUACION DE PAVIMENTO CON SUELO ESTABILIZADO UTILIZANDO ADITIVOS QUIMICOS , EN LA ZONA DE SELVA BAJA Caso: SM-100: EMP.PE-50N (MOYOBAMBA) – JEPELACIO, PROVINCIA DE MOYOBAMBA, REGIÓN SAN MARTÍN
PROBLEMA	PROBLEMA
Las características físicas y mecánicas de los suelos arcillosos de la ciudad de Pucallpa, problema para el desarrollo social.	La falta del desarrollo económico del Distrito de Jepelacio, por la falta de transitabilidad de su carretera hacia el centro de Moyabamba.
OBJETIVOS	OBJETIVOS
Establecer las características físicas y mecánicas de los suelos arcillosos de la ciudad de Pucallpa; realizar la estabilización de los suelos con cal, y finalmente analizar el tráfico en la ciudad para dimensionar un pavimento flexible.	Emplear pavimentos con suelo estabilizado con aditivos químicos, para mejorar la transitabilidad de la carretera SM-100 (Moyobamba – Jepelacio), dando continuidad al crecimiento del tráfico que a su vez concluirá en un desarrollo económico de la zona.
COMENTARIO:	
En la tesis de Barrueta A., evaluó las características físicas y mecánicas de los suelos de Pucallpa, los estabilizó con cal y finalmente diseño el pavimento; si bien es cierto la cal es un estabilizador que reacciona con los suelos arcillosos, Alonso Montejo en su libro Ingeniería de Pavimentos (5), menciona que si la plasticidad del suelo a estabilizar es menor de 15%, es probable que los resultados del ensayo de CBR, no cumplan con las especificaciones. Así mismo, la cal no tiene la propiedad de impermeabilizar a la capa estabilizada, como la tiene el aditivo Terrasil que se usó en la presente tesis. Los aditivos químicos se han vuelto una mejor opción para la estabilización de suelos, ya que con una mínima cantidad dosificada, impermeabilizan al suelo y elevan su CBR considerablemente.	

Tabla Nº 33: COMPARACION DE RESULTADOS CON OTRO ADITIVO QUIMICO

REFERENCIAL: JACKELYN AYUQUE MENDOZA	TESISTA: ADA NANCY O'DIANA QUIROZ
TESIS COMPARATIVA	TESIS DESARROLLADA
USO DE ADITIVOS ORGÁNICOS EN LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LAS VÍAS TERRESTRES EN LA PROVINCIA DE PADRE ABAD - UCAYALI	EVALUACION DE PAVIMENTO CON SUELO ESTABILIZADO UTILIZANDO ADITIVOS QUIMICOS , EN LA ZONA DE SELVA BAJA Caso: SM-100: EMP.PE-50N (MOYOBAMBA) – JEPELACIO, PROVINCIA DE MOYOBAMBA, REGIÓN SAN MARTÍN
PROBLEMA	PROBLEMA
Las características físicas y mecánicas de los suelos arcillosos de la ciudad de Pucallpa, problema para el desarrollo social.	La falta del desarrollo económico del Distrito de Jepelacio, por la falta de transitabilidad de su carretera hacia el centro de Moyabamba.
OBJETIVOS	OBJETIVOS
Emplear aditivos orgánicos (Zymplex PZ 22X) en la estabilización de suelos para la construcción de vías secundarias	Emplear pavimentos con suelo estabilizado, para mejorar la transitabilidad de la carretera SM-100 (Moyobamba – Jepelacio), dando continuidad al crecimiento del tráfico que a su vez concluirá en un desarrollo económico de la zona
RESULTADOS	RESULTADOS
La estabilización de suelos con Zymplex PZ 22X, da incrementos de CBR, disminuye la plasticidad, incrementa la máxima densidad seca y disminuye el óptimo contenido de humedad.	Identificación de zonas críticas de la vía, inspección de una cantera de agregados, plantear mejoramientos en la vía, con la aplicación del aditivo que mejores resultados dio en la evaluación, diseño de pavimento a nivel de solución básica.
COMENTARIO:	
En la Tesis de Ayuque J., se evalúa directamente a un estabilizador de suelos (Zymplex PZ 22X), describiendo las ventajas de elevar el CBR, disminuir la plasticidad, incrementar la densidad, etc. Sin embargo es importante saber si este aditivo tiene propiedad hidrófoba (no figura en sus resultados), ya que la aplicación de este aditivo en zonas donde el nivel freático es alto, o el índice de pluviosidad es alto pondría traer problemas al pavimento.	

CONCLUSIONES

- De la evaluación superficial de la plataforma vial, se concluye que la vía tiene una clasificación de "Bueno" a "Muy bueno"; sin embargo se debe señalar que la evaluación se efectuó en temporada donde las precipitaciones pluviales eran escasas; debido al tipo de superficie de rodadura (arenoso), y a su espesor mínimo en algunos sectores, se puede predecir que la calificación puede empeorar drásticamente en temporada de lluvias.
- Se ha efectuado el estudio de suelos, para lo cual se han realizado perforaciones de estudio cada 250 metros, la carretera presenta una vía afirmada donde se tiene como suelo natural, principalmente suelos finos (arcillas en su mayoría) y arenosos. Según la preponderancia de suelos o mayor presencia de alguno de ellos se ha efectuado una sectorización de la vía:

Sector 1	km 0+000 - km 3+000
Sector 2	km 3+000 - km 8+000
Sector 3	km 8+000 – km 12+262.795

- En el ítem 5.1. Interpretación de los resultados de estudio de suelos, se han efectuado diversos análisis del estado del suelo (susceptibilidad a deformación y expansión, influencia de la humedad, suelos orgánicos y aguas subterráneas). Así es como se han establecido los sectores de la carretera que requieren de mejoramiento.
- Del estudio de canteras, se ubicó a la cantera denominada Tumba que es de origen fluvial; el objetivo general de la presente tesis es emplear pavimentos con suelo estabilizado, entonces los usos para la cantera Tumba vendrían a ser: Estabilización con aditivos químicos y recubrimiento bituminoso. Después de los resultados de los ensayos solicitados a laboratorio y tomando como referencia las Especificaciones Técnicas Generales para Construcción EG-2013 del MTC (10), se puede afirmar y sustentar que los agregados de la cantera Tumba cumplen los rangos de calidad y rendimiento para cada uno de los usos asignados.
- Como uno de los objetivos de esta tesis es emplear pavimentos con suelos estabilizados, se ~~propuso en un inicio tres aditivos que de acuerdo a la experiencia son los que mejores~~

- resultados de resistencia CBR han dado (Terrasil, Con Aid y Sistema Consolid); estos aditivos fueron analizados desde el punto de vista de ensayos de laboratorio (Capilaridad y CBR), procedimientos de aplicación en campo y costos de los aditivos por metro cúbico de material a estabilizar; de los análisis efectuados se puede concluir que el aditivo Terrasil es el que mejor resultados ha tenido y el cual se ha utilizado en la estabilización de los suelos de la presente tesis.
- Uno de los objetivos del presente trabajo es dar una solución económicamente aceptable que permita una sola inversión inicial y luego un mantenimiento periódico y rutinario, para un periodo de diseño de 5 años. Para lograr ese objetivo se han estabilizado mezclas de material de aporte (Cantera Tumba) y material de la sub rasante con aditivos químicos, obteniendo resultados de CBRs y ascensión capilar satisfactorios. Se ha optado por esta alternativa, pues si no hay un aporte de material de cantera al suelo natural, se tendría que colocar una estructura más robusta, debido a que el CBR de los suelos de fundación son muy bajos. Si se hubiera optado por una solución tradicional, además de tener espesores superiores de afirmado a los planteados en esta tesis, ésta requeriría de un mantenimiento anual, rutinario, de perfilado y compactado de estas capas en toda la vía, debido a su deterioro superficial por medio ambiente y tránsito, lo que obligatoriamente interrumpiría el tránsito vehicular, ocasionando incomodidad y perjuicio económico a los usuarios. Además de ello como parte del mantenimiento periódico, cada dos años se tendría que aportar un nuevo material de afirmado para reponer el desgaste.
- A continuación el cuadro resumen de la propuesta técnica y económicamente aceptable, que mejorará la transitabilidad de carretera Moyabamba – Jepelacio, para dar continuidad al crecimiento del tráfico que a su vez concluirá en un desarrollo económico de la zona.

SUBSECTOR	ESPESOR POR CAPA ESTABILIZADA (cm)		ESPESOR TOTAL CAPA ESTABILIZADA (cm)	RECUBRIMIENTO BITUMINOSO (cm)	SN PROPUESTO	SN REQUERIDO
	MATERIAL DE SUBRASANTE	APORTE DE CANTERA				
SECTOR 1: km 0+000 - km 3+000	10	10	20	1	1,12	1,06
SECTOR 2: km 3+000 - km 8+000	10	10	20	1	1,11	1,06
SECTOR 3: km 8+000 - km 12+262.795	20	5	25	1	1,29	0,97

RECOMENDACIONES

- De la evaluación superficial de la vía, se han registrado sectores del prisma vial donde se presentan cortes a media ladera, en muchos de ellos se ha observado afloramientos de agua desde el talud superior, con la finalidad de que esta agua no cause daño al pavimento, se recomienda efectuar el diseño de sub drenes interceptores, a colocarse en sentido transversal al talud.
- Se recomienda utilizar el aditivo Terrasil en una dosificación de 0.75 l/m³, pues con esta dosis se trabajó en laboratorio y se obtuvo buenos resultados.
- Es recomendable mezclar material de aporte (Cantera Tumba) y material de la sub rasante con aditivos químicos, ya que si no hay un aporte de material de cantera al suelo natural, se tendría que colocar una estructura más robusta, debido a que el CBR de los suelos de fundación son muy bajos.
- En el Ítem 5.4.2. se muestran las recomendaciones para la conformación del pavimento básico.
- En el Ítem 5.4.3. se muestran las recomendaciones para el mantenimiento periódico y rutinario de la vía, para un periodo de diseño de 5 años.

BIBLIOGRAFÍA

1. Barrueta A. Estudio de Suelos y Diseño de Pavimento en la Ciudad de Pucallpa. [Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Civil]. Lima. Universidad Nacional Federico Villarreal. 1985.
2. Mendoza J. Uso de Aditivos Orgánicos en La Estabilización de Suelos para la Construcción de Vías Terrestres en la Provincia Padre Abad – Ucayali. [Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Civil]. Lima. Universidad Nacional Federico Villarreal. 2007.
3. Ministerio de Transportes y Comunicaciones. Manual de Ensayos de Materiales para Carreteras EM-2000. Lima: Ed Fondo Editorial ICG; 2010.
4. Braja M. Fundamentos de la Ingeniería Geotécnica. Ciudad de México: Ed Thomson Learning; 2001.
5. Montejo A. Ingeniería de Pavimentos, Fundamentos, Estudios Básicos y Diseño. 3° Edición. Bogotá: Ed Universidad Católica de Colombia; 2006.
6. Menéndez J. Ingeniería de Pavimentos, Materiales, Diseño y Conservación. 2° Edición. Lima: Ed Fondo Editorial ICG; 2012.
7. Rico A., Del Castillo H. Ingeniería de Suelos en Vías Terrestres. Ciudad de México: Ed Limusa S.A.; 2008.
8. Bowles J. Manual de Laboratorio de Suelos en Ingeniería Civil. Bogotá: Ed Mc Graw-Hill Latinoamericana S.A.; 1981.

9. AASHTO. Design of Pavement Structures 1993. Washington: American Association of State Highway and Transportation Officials; 1993.
10. Ministerio de Transportes y Comunicaciones. Especificaciones Técnicas Generales para Construcción EG-2013. Lima: Ed Fondo Editorial ICG; 2013.
11. Brem Environmental Solutions. Fundamentos Técnicos del Estabilizador Terrasil. Lima: Ed Zydex; 2010.
12. Consolid Technologies S.A.C. Argumentos Técnicos Viables del Sistema Consolid. Lima: Ed Fondo Editorial ICG; 2010.
13. Con AID CBR-Plus. Estabilizador Con Aid Super. Bogotá: Ed Plexus S.A.; 2010.
14. Comité Técnico de Normalización de Geotecnia. Normas Técnicas Peruanas. Lima: Indecopi; 2002.
15. American Section of the International Association for Testing Materials. Normas Técnicas ASTM. Washington: Ed ASTM International; 2000.
16. Ministerio de Transportes y Comunicaciones. Manual de Diseño de Carreteras No Pavimentadas de Bajo Volumen de Tránsito. Lima: Ed Fondo Editorial ICG; 2009.
17. Austroads. Guide to Pavement Technology, Pavement Structural Design. Sydney: Ed Austroads Ltd. 2012.

ANEXOS

TEORÍA COMPLEMENTARIA E IMÁGENES

PRODUCTOS ASFÁLTICOS ADECUADOS PARA LA ESTABILIZACIÓN

La estabilización de suelos es un proceso que se realiza a temperatura ambiente, lo que exige el uso de un asfalto que, bajo tal condición, presente una consistencia apropiada para la mezcla con el suelo.

Esta característica se logra con 2 productos asfálticos:

- Emulsión asfáltica.
- Asfalto espumado.

EMULSIÓN ASFÁLTICA (Conceptos complementarios)

- Dispersión homogénea de pequeños glóbulos de cemento asfáltico cubiertos por un emulsificante, dentro de una fase continua acuosa.
- Emulsificante es un producto que disminuye la tensión entre el asfalto y el agua, permitiendo que el asfalto se mantenga disperso en el agua en forma de pequeños glóbulos.
- Las moléculas del emulsificante tienen un extremo de naturaleza orgánica que es afín con el asfalto y otro cargado eléctricamente que manifiesta afinidad por el agua. Si esta carga es negativa, la emulsión es **aniónica**, mientras que si es positiva, la emulsión se denomina **catiónica**.
- Las **emulsiones catiónicas** exhiben un comportamiento satisfactorio frente a la mayoría de los agregados pétreos, motivo por el cual son las más utilizadas.
- El tipo y cantidad del agente emulsificante determinan en gran medida la velocidad con la cual se produce la rotura de la emulsión (separación de las dos fases).

- Existen emulsiones de rotura rápida (RR), de rotura media (RM) y de rotura lenta (RL).
- Las emulsiones apropiadas para la estabilización de suelos son las de **rotura lenta**.

ASFALTO ESPUMADO

- El asfalto espumado se forma por la inyección de una pequeña cantidad de agua fría (del orden de 2% del peso del asfalto) y aire comprimido a una masa de cemento asfáltico caliente.
- Al entrar el agua en contacto con el asfalto caliente se convierte en vapor, el cual queda atrapado dentro de diminutas burbujas de asfalto, formándose una espuma de gran volumen.
- Después de algunos segundos, la espuma se enfría y el vapor en las burbujas se condensa causando el colapso y la desintegración de la espuma. Entonces, el cemento asfáltico recupera tanto su volumen inicial como sus propiedades geológicas originales.

CARACTERIZACIÓN DEL ASFALTO ESPUMADO:

- El asfalto espumado se caracteriza mediante 2 parámetros empíricos:

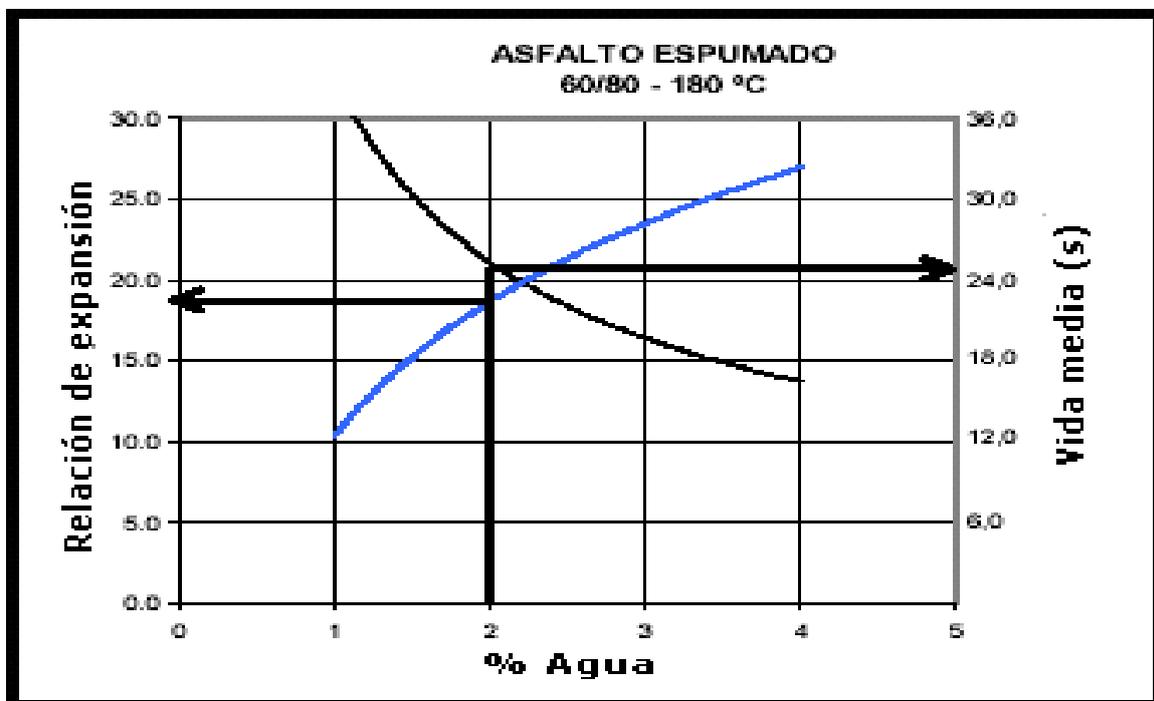
—**Relación de expansión:** Relación entre el volumen máximo del asfalto en su estado espumado y el volumen del asfalto una vez que la espuma ha colapsado completamente.

—**Vida media:** Es el tiempo requerido (en segundos) para que la espuma baje hasta la mitad del volumen máximo alcanzado.

- Una Relación de Expansión alta permite esperar una menor viscosidad del cemento asfáltico y, por lo tanto, una mejor dispersión en el suelo o material pétreo con el cual se mezcla.

- Una Vida Media prolongada, implica un mayor tiempo disponible para la realización de la mezcla con el suelo o agregado, mientras el cemento asfáltico aún permanece en forma de espuma.
- Se considera que el mejor espumado es aquel que optimiza tanto la Relación de Expansión como la Vida Media.

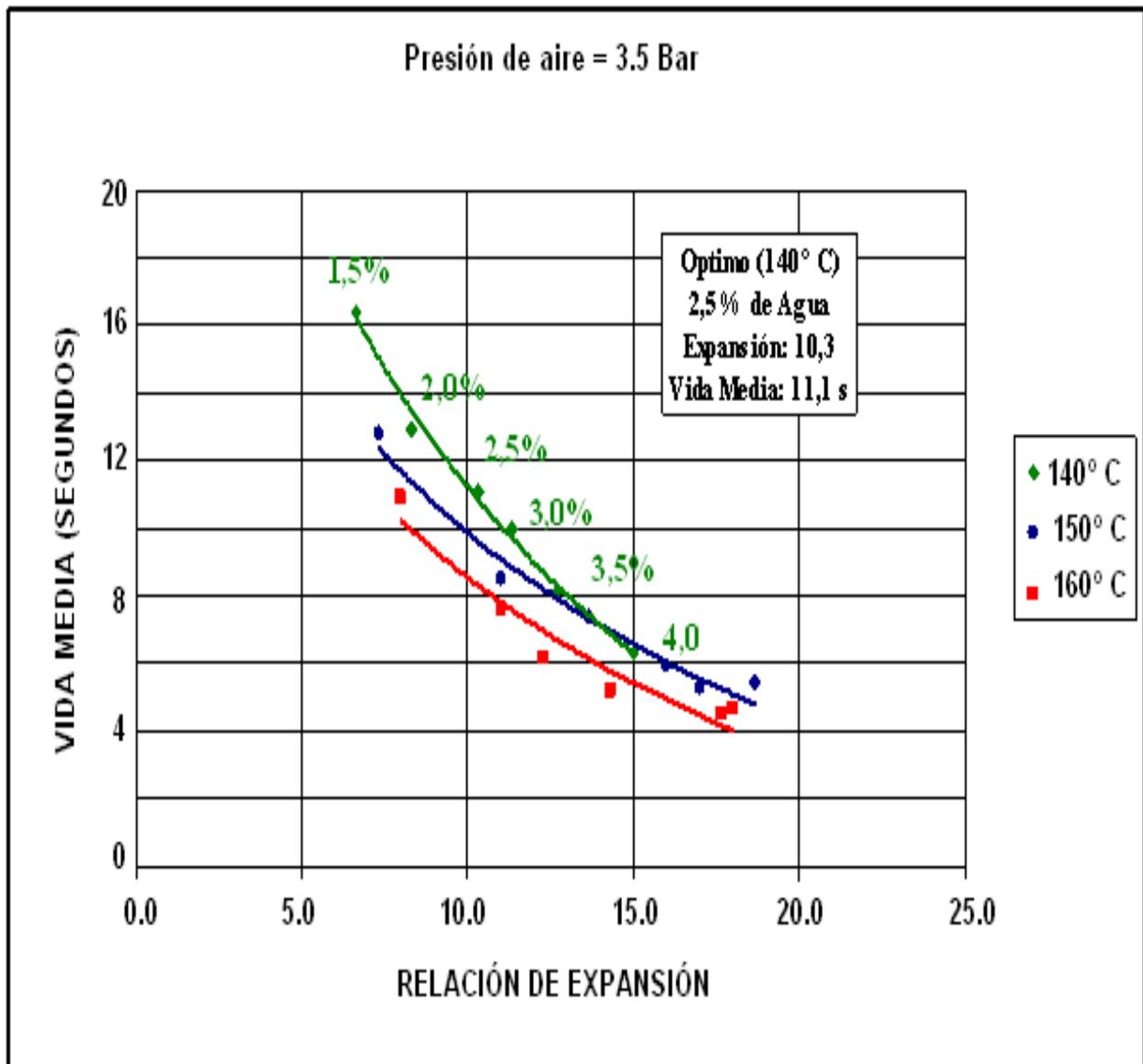
Optimización de la Relación de Expansión y de la Vida Media de un asfalto espumado



- La Relación de Expansión y la Vida Media se encuentran muy influenciadas tanto por la cantidad de agua inyectada, como por la temperatura del asfalto durante el proceso de espumado.
- A mayores temperaturas de espumado y mayor cantidad de agua se incrementa la Relación de Expansión pero se reduce la Vida Media.

- Las Especificaciones del INVÍAS exigen:
 - Relación de Expansión ≥ 10 .
 - Vida Media ≥ 10 segundos.

Influencia de la temperatura y del contenido de agua sobre la Relación de Expansión y sobre la Vida Media de un asfalto espumado



MECANISMOS DE LA ESTABILIZACIÓN CON ASFALTO

Suelos de grano fino:

- El mecanismo básico envuelto en la estabilización de estos suelos con asfalto es el de **impermeabilización**.
- Como el suelo posee cohesión, la función del asfalto es formar una membrana que impide la penetración del agua, previniendo cambios de volumen del suelo y reducciones en su resistencia y su módulo de elasticidad.

Materiales granulares:

- En la estabilización de materiales granulares donde ya existe aporte friccional, el asfalto involucra dos mecanismos:
 - Impermeabilización:** Crea una membrana que previene o dificulta la entrada del agua, reduciendo la tendencia del material a perder resistencia y módulo en presencia de agua.
 - Adhesión:** Brinda al agregado la cohesión de la cual carece, aumentando la resistencia al corte y a la flexión, así como el módulo elástico.

FACTORES QUE AFECTAN EL RESULTADO DE UNA ESTABILIZACIÓN CON ASFALTO

- Algunos de estos factores coinciden con aquellos que afectan otros tipos de estabilizaciones: (1) tipo de estabilizante, (2) tipo y gradación del suelo, (3) densidad de la mezcla compactada y (4) curado y/o condiciones de envejecimiento de la mezcla.
- Otros factores, por el contrario, son típicos de este tipo de estabilizaciones, debido al carácter termo - viscoelástico del asfalto:

- Temperatura de ejecución de los ensayos.
- Velocidad de aplicación de las cargas en los ensayos.

SUELOS ESTABILIZADOS CON ASFALTO ESPUMADO

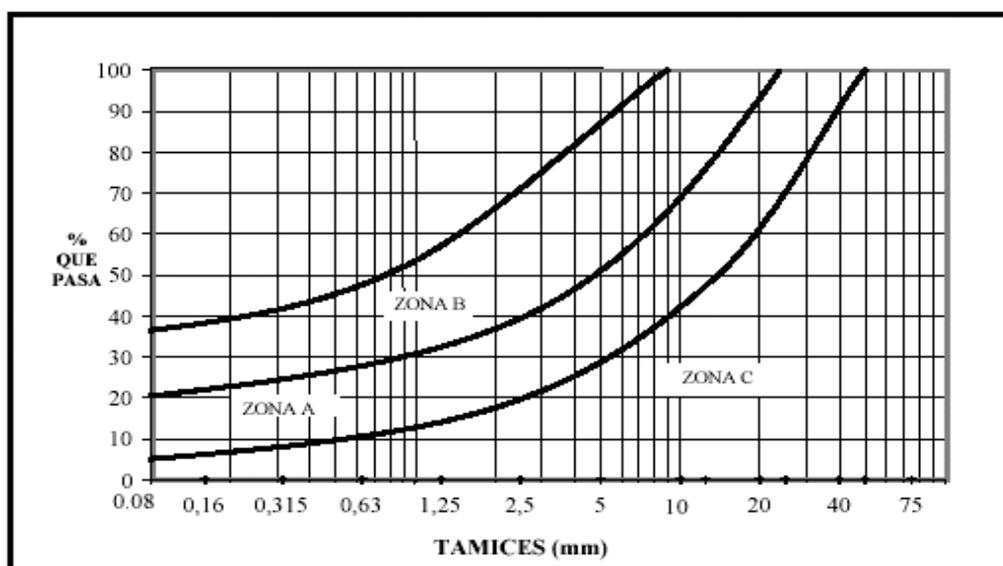
• SUELOS ADECUADOS PARA ESTABILIZAR CON ASFALTO ESPUMADO

Granulometría

Ackeroyd & Hicks establecieron 3 zonas en la gráfica de granulometría, fijando la conveniencia de los suelos para ser estabilizados con asfalto espumado:

- Zona A:** el material es adecuado para estabilización en vías de tránsito pesado.
- Zona B:** el material es apropiado para estabilización en vías de tránsito liviano, pero su comportamiento puede ser mejorado con la adición de fracciones gruesas.
- Zona C:** el material es deficiente en finos y no responde bien al tratamiento, por lo que no es adecuado para estabilizar.

Envoltentes de gradación sugeridas para mezclas con asfalto espumado (Ackeroyd & Hicks)



Plasticidad

- Las mezclas con asfalto espumado admiten una cantidad limitada de finos plásticos, aconsejándose que su IP no sea mayor de 6.
- Si se excede este valor, resulta recomendable un tratamiento previo con cal o cemento.

IP	CANTIDAD RECOMENDADA DE CAL O CEMENTO (% en peso del suelo seco)
≤ 10	1.0
10 - 16	1.5
≥ 16	3.0

DISEÑO DE LA MEZCLA



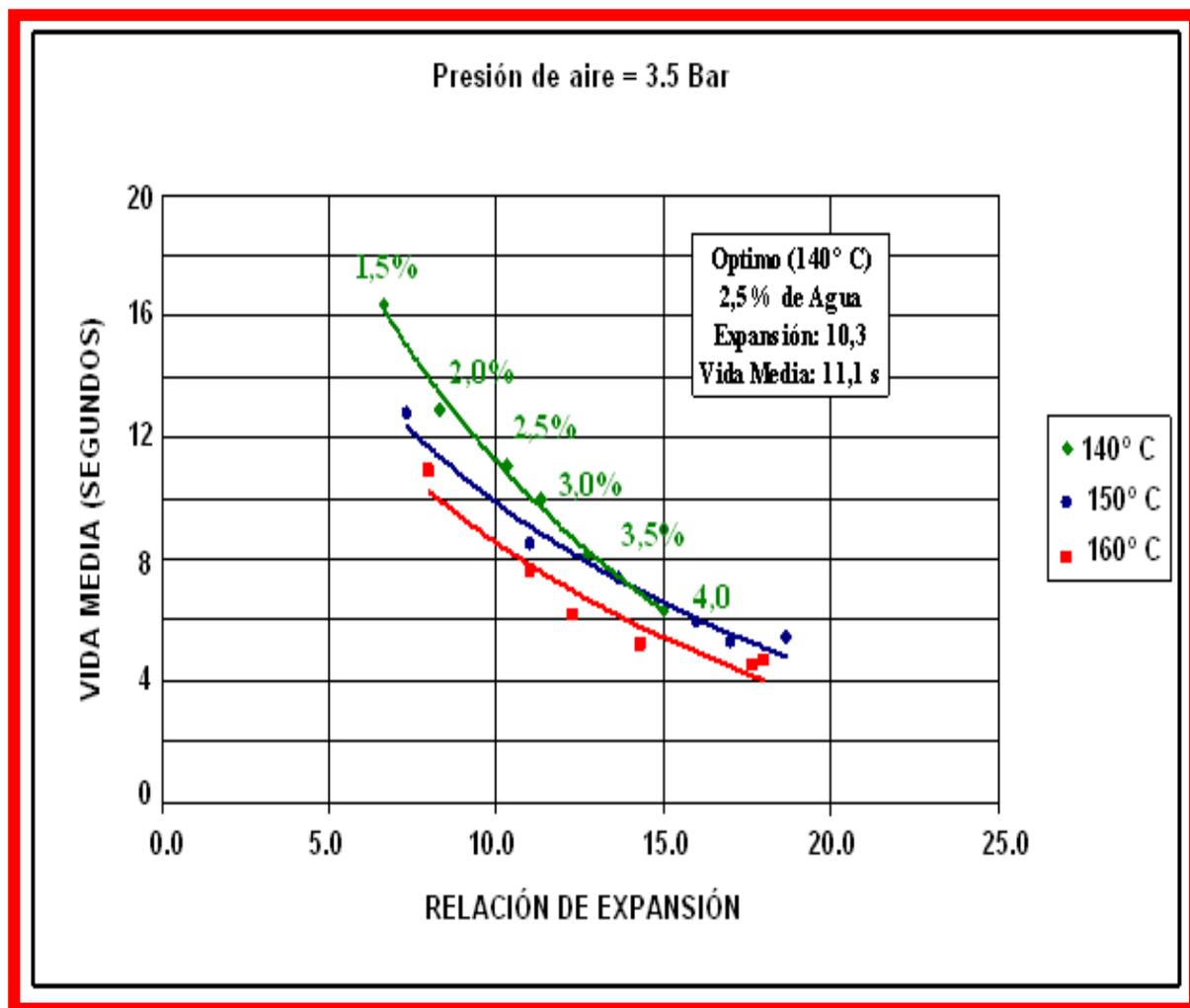
1. Optimización de las propiedades del asfalto espumado:

- Consiste en determinar, en una planta portátil de laboratorio, el porcentaje de agua que optimiza las propiedades de espumado del asfalto, de manera de asegurar los valores de «Expansión» y «Vida Media» exigidos por las especificaciones.

Planta de laboratorio WLB 10 para espumar asfalto



Determinación del contenido de agua para optimizar el espumado



2. Determinación del contenido óptimo de humedad:

- Se requiere agua para espumar el asfalto, para ablandar el material, romper los grumos que puedan existir y para permitir una mejor dispersión del asfalto durante las operaciones de mezclado y de compactación en el laboratorio y en el campo.
- Insuficiente agua reduce la trabajabilidad de la mezcla dando como resultado una mala dispersión del ligante, en tanto que su exceso alarga el tiempo de curado, reduce el cubrimiento de los agregados así como la densidad y resistencia de la mezcla compactada.
- De acuerdo con investigaciones de Mobil Oil, el contenido óptimo de humedad para la mezcla y compactación tiene lugar en un rango entre el 70 % y el 80 % de la humedad óptima del Proctor Modificado de los agregados.

3. Elaboración de mezclas de ensayo:

- Se elaboran mezclas con 5 porcentajes diferentes de asfalto y la cantidad óptima de fluidos de compactación.
- Los porcentajes de asfalto se escogen en función de tipo de suelo que se va a estabilizar.
- Si el material contiene partículas arcillosas, se le debe adicionar cal o cemento (las normas INVÍAS lo exigen cuando el producto $IP^*pasatamiz\#200 > 72$).

Rangos típicos de contenido de asfalto en mezclas con asfalto espumado (adaptado de Bowering & Martin –1976)

TIPO DE SUELO	RANGO OPTIMO DE CONTENIDOS DE LIGANTE (%)	REQUERIMIENTOS ADICIONALES
Grava limpia bien gradada	2.0 – 4.5	
Grava bien gradada marginalmente arcillosa o grava limosa	2.0 – 4.5	
Grava mal gradada, marginalmente arcillosa	2.0 – 3.0	
Grava arcillosa	4.0 – 6.0	Modificación con cal
Arena limpia bien gradada	4.0 – 5.0	Llenante
Arena limpia bien gradada, marginalmente limosa	2.5 – 4.0	
Arena limpia mal gradada, marginalmente limosa	3.0 – 4.5	Asfalto de baja penetración; llenante
Arena limpia mal gradada	2.5 – 5.0	llenante
Arena limosa	2.5 – 4.5	
Arena limo - arcillosa	3.0 – 4.0	Posiblemente cal
Arena arcillosa	3.0 – 4.0	Modificación con cal

Elaboración de una mezcla de ensayo



4. Compactación de probetas de ensayo

- Con cada una de las mezclas se elaboran seis probetas Marshall, compactándolas con 75 golpes por cara.





5. Curado de las probetas:

- Debido a la presencia de agua que es necesario eliminar, las mezclas con asfalto espumado desarrollan su resistencia total con el tiempo, pero requieren períodos de curado menores que en el caso de las estabilizaciones con emulsión asfáltica.
- Las condiciones de curado de las probetas compactadas afectan severamente la resistencia final de las mezclas con asfalto espumado, por lo que conviene simular en el laboratorio un procedimiento reproducible en la obra.
- El asfalto se adhiere a la fracción fina creando un mortero que liga las partículas de mayor tamaño, pero no las cubre.



Probetas curadas



Sección transversal de una probeta curada

Diversos procedimientos propuestos para el curado de mezclas compactadas con asfalto espumado

PLAZO	Corto	Medio	Largo
<u>Duración en el laboratorio</u>	24 horas	48 horas	96 horas
<u>Condición del curado</u>	Dentro de los moldes	24 horas dentro de los moldes y 24 horas fuera de ellos	24 horas dentro de los moldes y 72 horas fuera de ellos
<u>Temperatura</u>	Ambiente	40° C	40° C
<u>Similitud con la obra</u> Duración después de extendida la capa Condición climática	1 día Seca	7 a 14 días Seca	30 días Seca
<u>Observaciones</u>	Es el procedimiento recomendado por la norma de ensayo INV E - 785		

6. Medida de dimensiones y pesos de las probetas:

- Se miden las dimensiones de todas las probetas y se determina su peso específico, descartando aquellas cuyo valor difiera en más de 30kg/cm² del valor medio del grupo al cual pertenecen.



7. Ensayo de tracción indirecta:

- Las probetas elaboradas con un determinado contenido de asfalto se separan en dos grupos:
 - Las probetas de un grupo se fallan por tracción indirecta con una velocidad de deformación de 50.8mm/minuto.

—Las probetas del otro grupo se colocan en un desecador de vacío donde se cubren con agua a 25°C y se aplica vacío de 50mm de mercurio por una hora, fallándose posteriormente como las del primer grupo.

Ensayo de tracción indirecta

$$RTI = \frac{2P}{\pi LD}$$



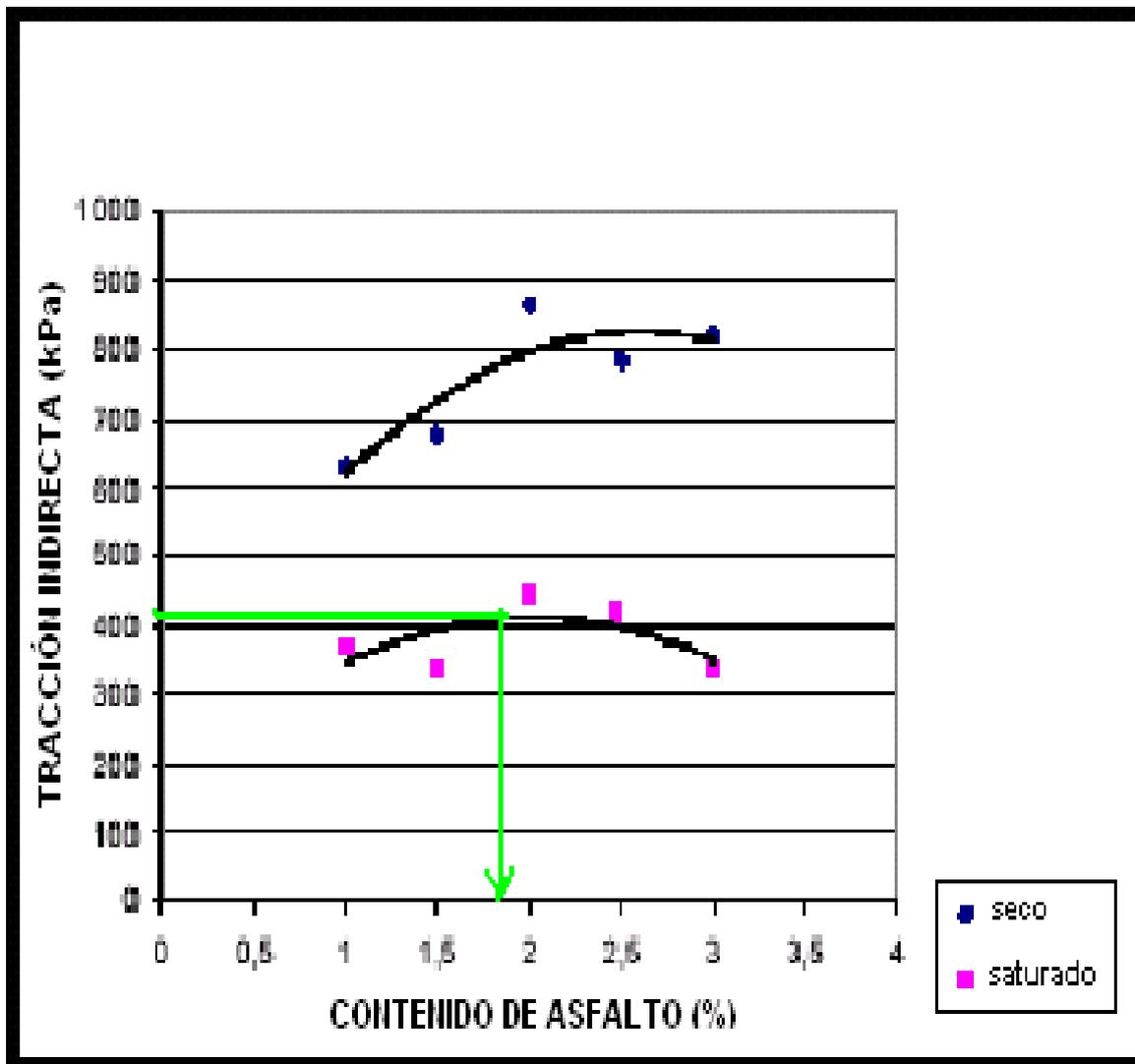


- Se elaboran gráficas que muestren la evolución de las resistencias de los 2 grupos de probetas con el contenido de asfalto y se escoge como óptimo un porcentaje de ligante que satisfaga los criterios de diseño de la mezcla.

Ejemplo (Criterios de diseño del Artículo 461 Especificaciones INVÍAS)

- Resistencia de probetas curadas en seco $\geq 2.5 \text{ kg/cm}^2$ (250 kPa)
- Resistencia tras curado húmedo $\geq 50 \%$
- El porcentaje óptimo de asfalto es aquel que cumpliendo las 2 exigencias, dé lugar a la mayor resistencia tras curado húmedo.

Representación gráfica de los resultados de un ensayo de tracción indirecta

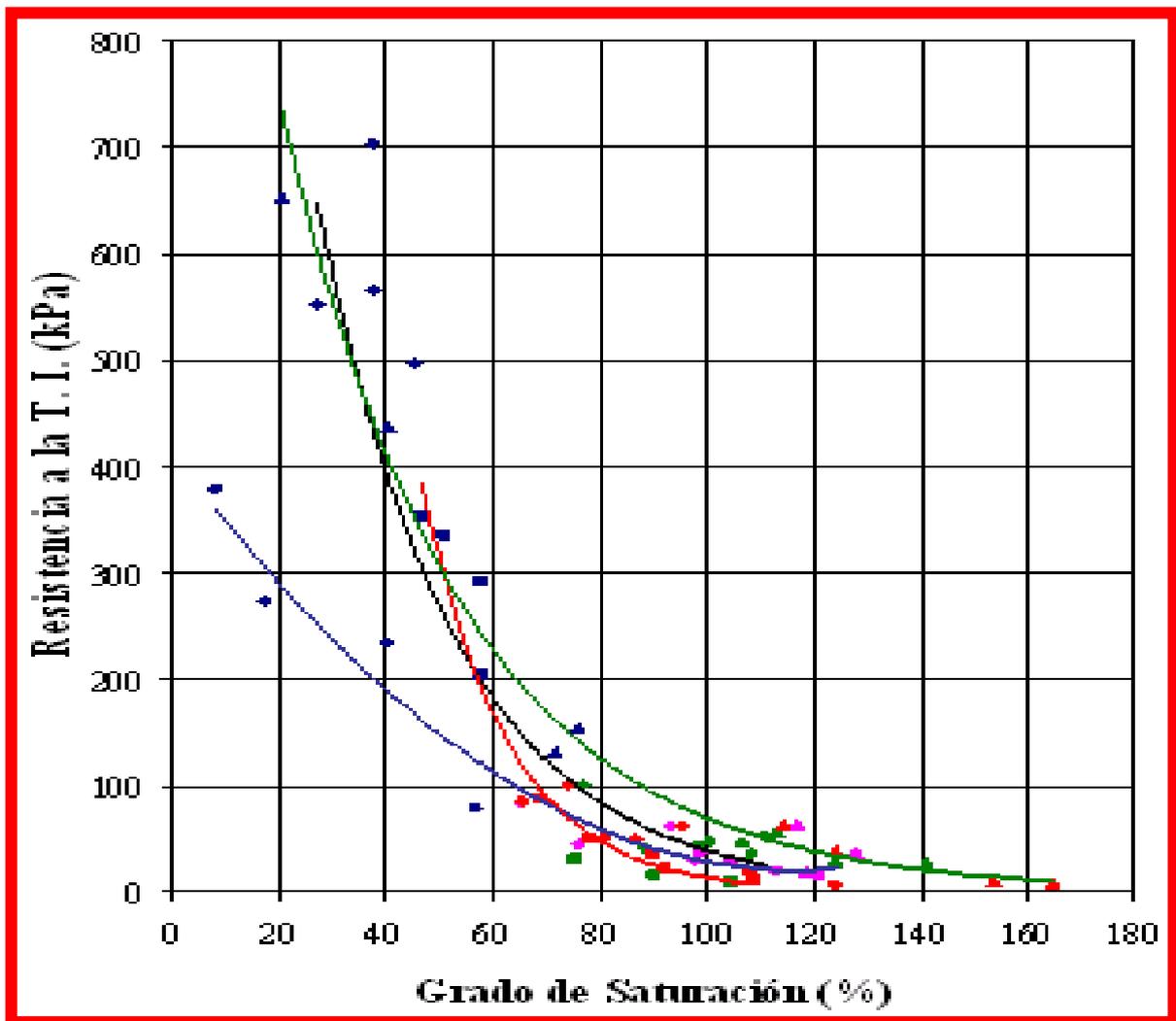


SUSCEPTIBILIDAD DE LAS MEZCLAS CON ASFALTO ESPUMADO A LA ACCIÓN DEL AGUA

- Debido a los bajos contenidos de ligante y los altos volúmenes de vacíos que contienen, estas mezclas resultan muy susceptibles a la acción del agua.

- La susceptibilidad al agua es inversamente proporcional al grado de curado que ha alcanzado la mezcla en el momento de la exposición.
- Consecuentemente, es necesario proteger las mezclas de la acción del agua durante su período inicial de vida o simular en el laboratorio unas condiciones de exposición consecuentes con las de la obra.

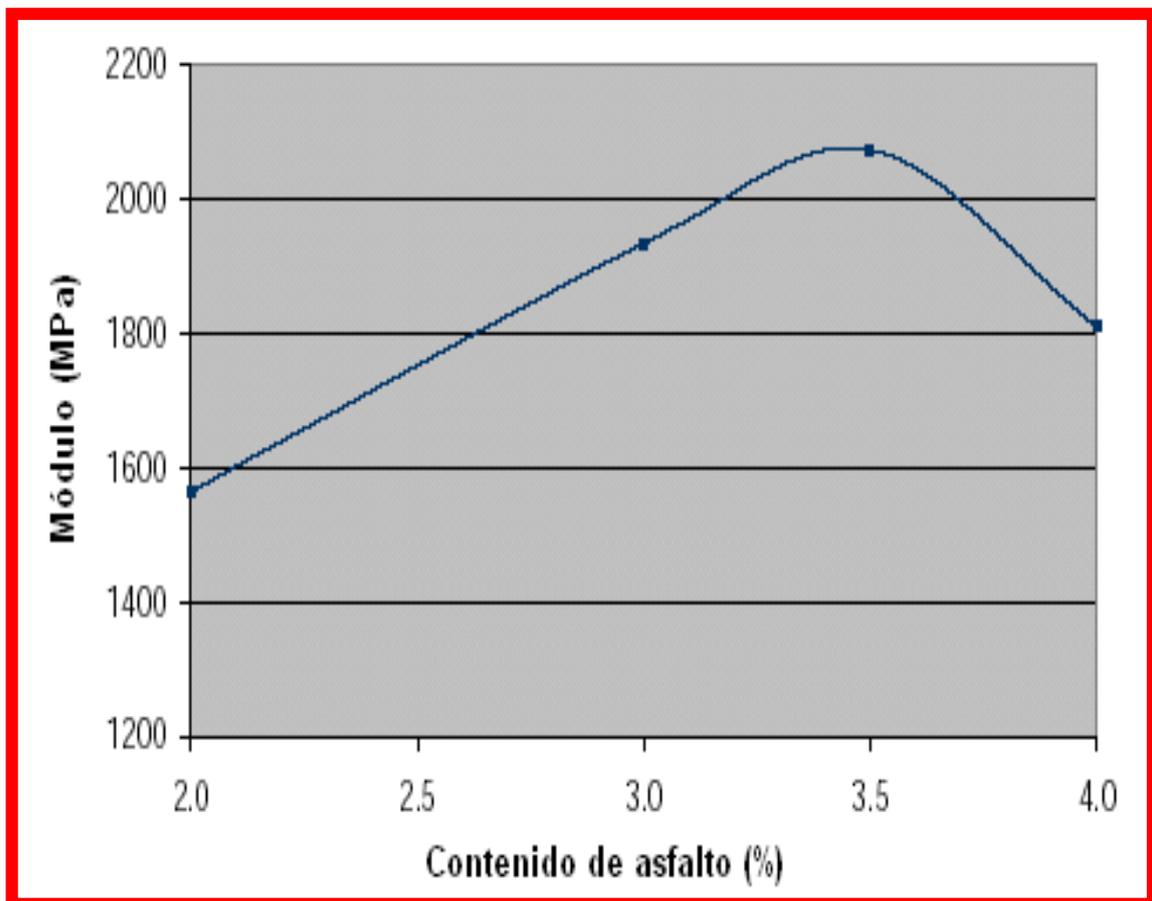
Influencia del grado de saturación de las probetas sobre la resistencia a tracción indirecta (Campagnoli & Ríos, 2000)



CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES ESTABILIZADOS CON ASFALTO ESPUMADO, CON FINES DE DISEÑO DE PAVIMENTOS

Módulo dinámico:

- Sigue leyes de comportamiento similares a las que presentan las estabilizaciones con emulsión asfáltica, es decir, depende del período de curado, de la rata de carga, del nivel de esfuerzo y de la temperatura.
- El módulo final se obtiene en un plazo menor que en el caso de estabilizaciones con emulsión, debido al menor contenido de agua de la mezcla.
- La tendencia de evolución del módulo con el contenido de asfalto es similar a la que presenta la resistencia de la mezcla.



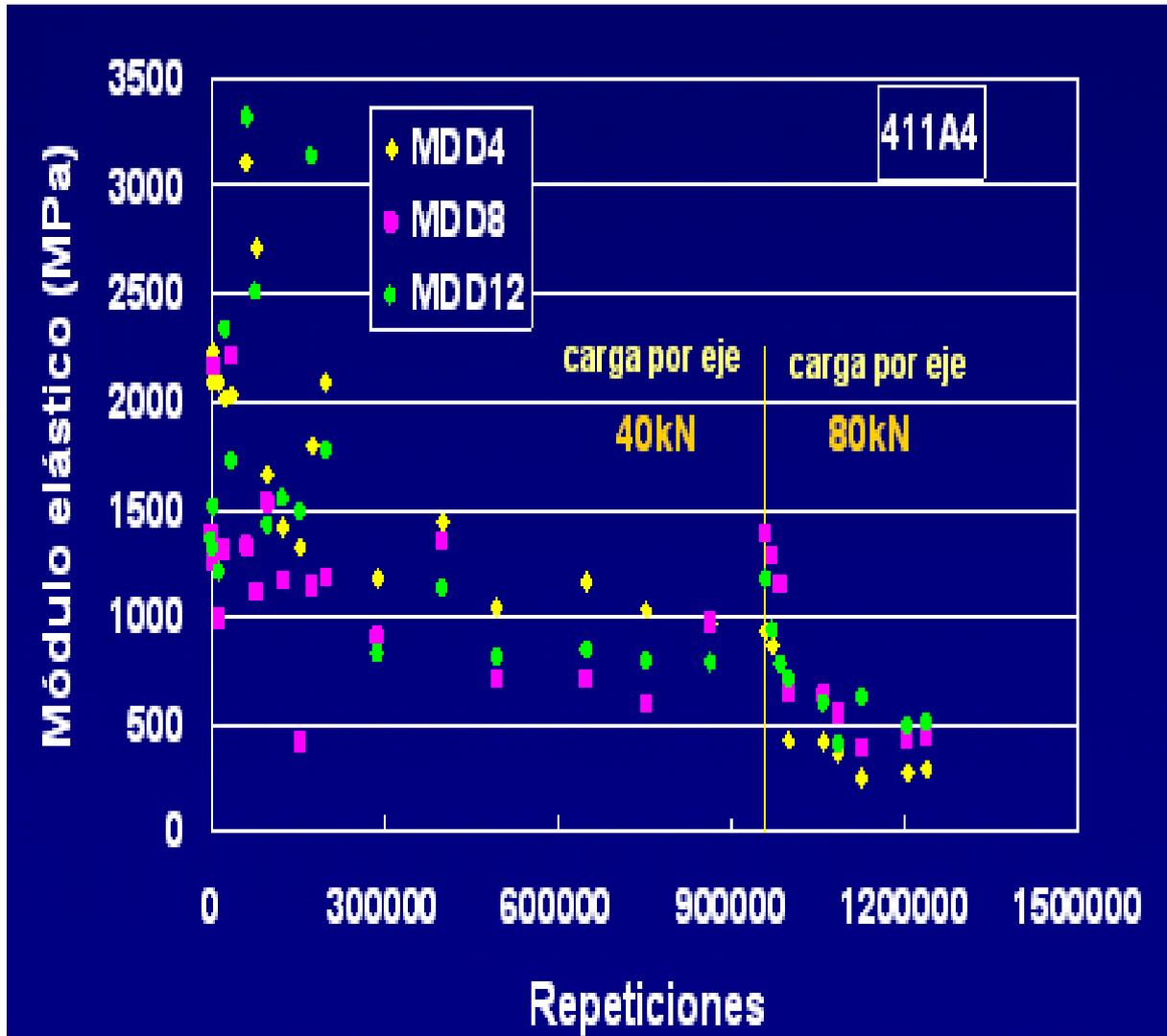
Valores de resistencia a la tracción indirecta y de módulo dinámico para mezclas del área de Bogotá (Santamaría, 2000)

RESISTENCIAS A TRACCIÓN INDIRECTA DE TRES MEZCLAS					
<i>MEZCLA</i>	<i>% DE ASFALTO</i>	<i>RESISTENCIA A LA TRACCIÓN INDIRECTA (KPA)</i>		<i>HUMEDAD DE COMPACTACIÓN</i>	<i>DENSIDAD (g/cm³)</i>
		<i>SECA</i>	<i>HUMEDA</i>		
<i>0/20</i>	<i>3.6</i>	<i>550</i>	<i>550</i>	<i>4.7</i>	<i>2.038</i>
<i>0/14</i>	<i>4.3</i>	<i>511</i>	<i>602</i>	<i>4.9</i>	<i>2.105</i>
<i>MDC-2</i>	<i>4.8</i>	<i>550</i>	<i>550</i>	<i>4.7</i>	<i>2.000</i>

MÓDULOS A 18° C PARA DIFERENTES FRECUENCIAS

<i>Identificación</i>	<i>MODULOS DINÁMICOS (MPa)</i>		
	<i>25 Hz</i>	<i>10 Hz</i>	<i>1 Hz</i>
<i>0/20 P- 1</i>	<i>4341</i>	<i>3511</i>	<i>3172</i>
<i>0/20 P- 2</i>	<i>2214</i>	<i>1923</i>	<i>1860</i>
<i>0/14 P- 1</i>	<i>3843</i>	<i>3353</i>	<i>3011</i>
<i>0/14 P- 2</i>	<i>2346</i>	<i>2274</i>	<i>2219</i>
<i>MDC P- 1</i>	<i>3387</i>	<i>3206</i>	<i>2768</i>
<i>MDC P- 2</i>	<i>3280</i>	<i>3213</i>	<i>2673</i>

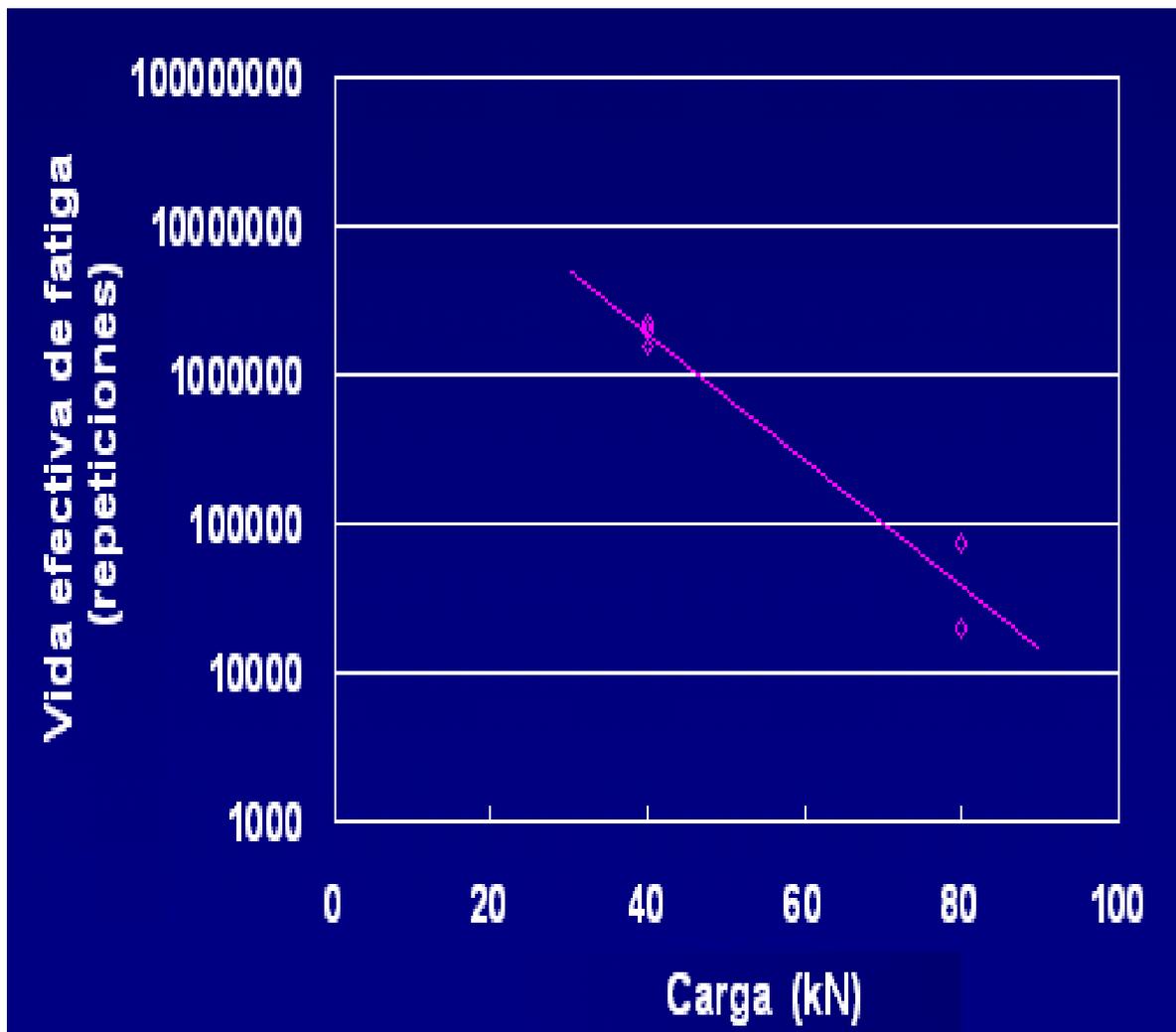
**REDUCCIÓN DEL MÓDULO DINÁMICO A CAUSA DE LA APLICACIÓN DE CARGAS
 (Long, 2001)**



Vida efectiva de fatiga:

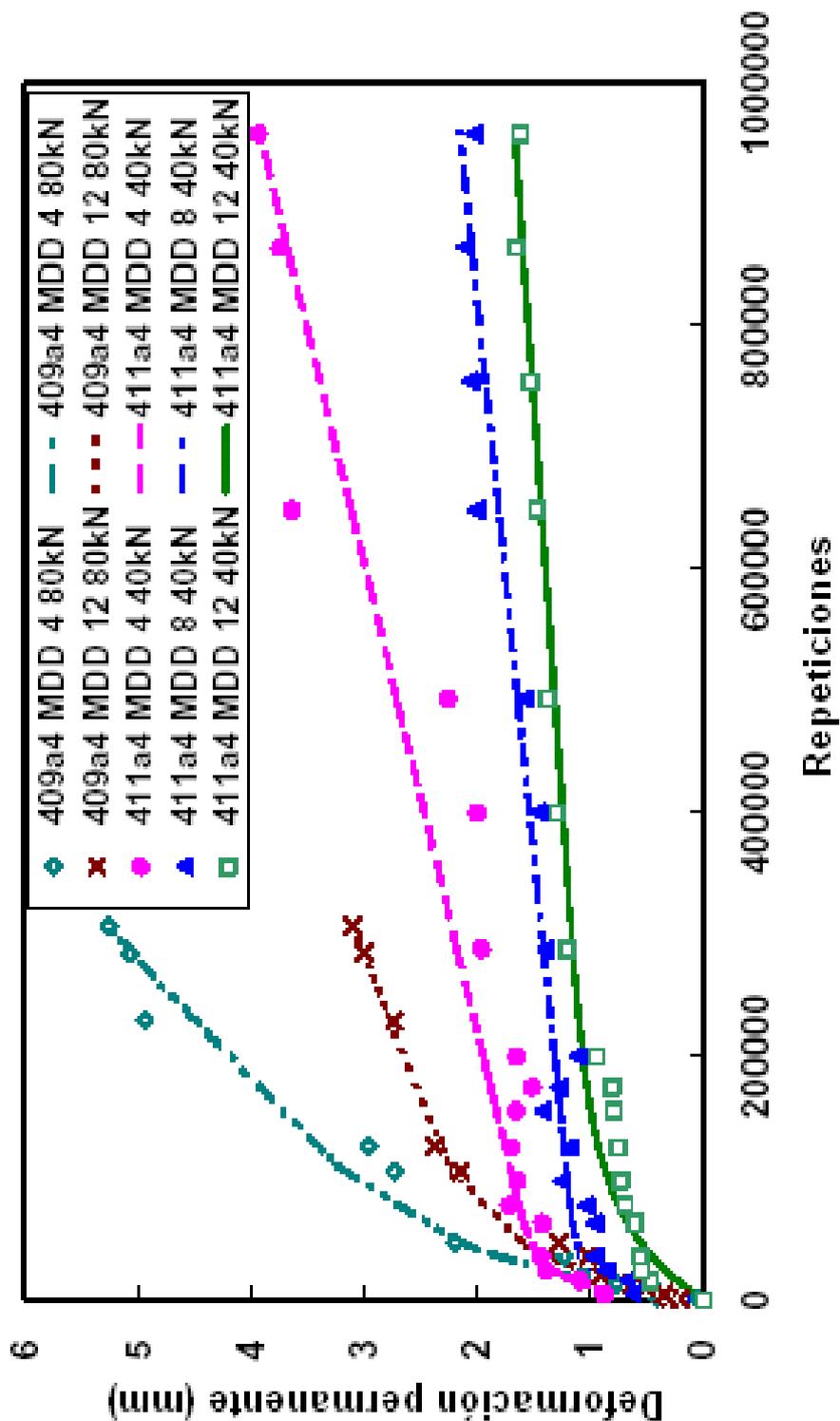
- Se conoce como tal, el número necesario de repeticiones para reducir el módulo de la mezcla hasta 400MPa.

- Al alcanzar dicho valor, se considera que la estabilización se empieza a comportar como un material granular.

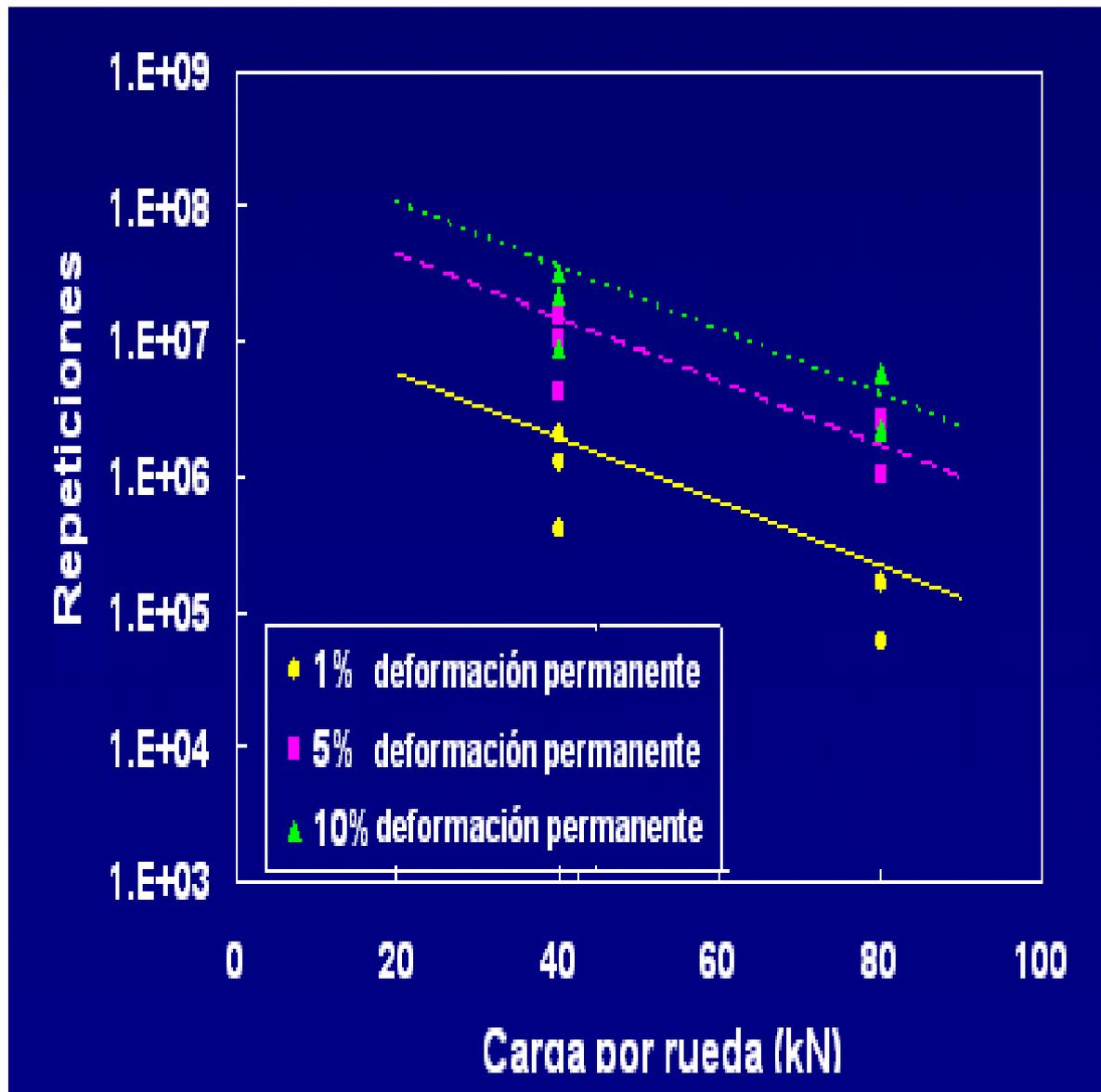


Deformación permanente:

- La mayor parte de la deformación se produce con las aplicaciones iniciales de carga.



REPETICIONES DE CARGA ADMISIBLES EN FUNCIÓN DE LA MAGNITUD DE LA CARGA APLICADA Y DEL NIVEL DE DEFORMACIÓN (Long, 2001)



RESULTADOS DE UN ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE LAS TÉCNICAS DE ESTABILIZACIÓN CON EMUSIÓN Y CON ASFALTO ESPUMADO

CARACTERÍSTICAS DE LOS AGREGADOS EMPLEADOS PARA EL ESTUDIO

TIPO DE MATERIAL	CARACTERÍSTICA				
	Pasa tamiz # 4	Pasa tamiz # 200	Índice plástico	IP*pasa # 200	Equivalente de arena
Arena gravillo arcillosa natural	63	15.2	14.5	220	18
Grava sílico calcárea procedente de trituración de bolos de río	50	5.5	NP	0	60

CARACTERÍSTICAS DE LOS PRODUCTOS ASFÁLTICOS EMPLEADOS EN EL ESTUDIO

EMULSIÓN DE ROTURA LENTA		CEMENTO ASFÁLTICO 80 - 100	
Viscosidad Saybolt Furol a 25° C, s	27	Penetración a 25° C, 0.1. mm	84
Carga de partículas	+	Punto de ablandamiento, ° C	47.0
Contenido de agua, % en volumen	39.7	Viscosidad a 100° C, mPa.s	2346
Retenido en tamiz # 20, %	0.08	Viscosidad a 120° C, mPa.s	651
% asfalto residual	60.3	Viscosidad a 135° C, mPa.s	260
% de fluidificantes	0		
Penetración del residuo, 0.1. mm	90		

RESULTADOS DE ENSAYO DE INMERSIÓN COMPRESIÓN SOBRE EL MATERIAL ARCILLOSO

PRODUCTO	DOSIFICACIÓN	RESISTENCIA A COMPRESIÓN	MATERIAL SOLO	MATERIAL +2% DE CAL	MATERIAL +2% DE CEMENTO
EMULSIÓN	5.8 %	RESISTENCIA SECA (kg/cm ²)	23.1	23.7	24.1
		RESISTENCIA CONSERVADA (%)	2.3	79.0	39.0
ASFALTO ESPUMADO	3.6 %	RESISTENCIA SECA (kg/cm ²)	0.43	17.3	14.3
		RESISTENCIA CONSERVADA (%)	0.0	81.5	18.3
	3.8 % + 0.25% DE ACTIVANTE EN AGUA	RESISTENCIA SECA (kg/cm ²)	15.5	15.2	12.3
		RESISTENCIA CONSERVADA	8.3	94.7	39.8
	3.4% + 0.25 % DE ACTIVANTE EN SECO	RESISTENCIA SECA (kg/cm ²)	19.9	16.4	11.8
		RESISTENCIA CONSERVADA (%)	13.1	82.9	37.2

Análisis de los resultados de la estabilización del material arcilloso:

Material solo

—En condición seca, el empleo de emulsión da lugar a resistencias aceptables, en tanto que al emplear asfalto espumado se requiere la incorporación de activantes.

—Todas las mezclas pierden resistencia después de inmersión en agua.

Análisis de los resultados de la estabilización del material arcilloso:

Material + 2% de cal

—Todas las mezclas dan resultados satisfactorios, siendo mayores las resistencias en el caso de la emulsión Material + 2% de cemento.

—Las resistencia en seco son satisfactorias (aunque menores que en el caso de la cal), pero las resistencias conservadas son bajas.

RESULTADOS DE ENSAYO DE INMERSIÓN COMPRESIÓN SOBRE EL MATERIAL SÍLICO CALCÁREO

PRODUCTO	DOSIFICACIÓN	RESISTENCIA A COMPRESIÓN	MATERIAL SOLO
EMULSIÓN	5.8 %	RESISTENCIA SECA (kg/cm ²)	16.5
		RESISTENCIA CONSERVADA (%)	81.2
ASFALTO ESPUMADO	3.8 %	RESISTENCIA SECA (kg/cm ²)	-
		RESISTENCIA CONSERVADA (%)	-
	3.4% + 0.25% DE ACTIVANTE EN AGUA	RESISTENCIA SECA (kg/cm ²)	9.6
		RESISTENCIA CONSERVADA	91.0
	3.5% + 0.25 % DE ACTIVANTE EN SECO	RESISTENCIA SECA (kg/cm ²)	8.8
		RESISTENCIA CONSERVADA (%)	72.7

Análisis de los resultados de la estabilización del material sílice calcáreo:

—La emulsión da lugar a una mezcla con resistencia adecuada, tanto en condición seca como en condición húmeda.

—La mezcla con asfalto espumado sin activante no presenta ninguna resistencia, debido a problemas de adherencia entre el asfalto y el agregado.

—La incorporación de activantes mejora el comportamiento de las mezclas con asfalto espumado.

COMPARACIÓN ENTRE LAS TÉCNICAS DE ESTABILIZACIÓN CON EMUSIÓN Y CON ASFALTO

EMULSIÓN ASFÁLTICA	ASFALTO ESPUMADO
No es apropiada con materiales plásticos	No es apropiado con materiales plásticos
La actividad de la fracción plástica del suelo se puede contrarrestar con una adición previa de cal	La actividad de la fracción plástica del suelo se puede contrarrestar con una adición previa de cal
El emulsificante controla problemas de afinidad asfalto - agregado	Se requiere la adición de activantes para solucionar problemas de afinidad asfalto - agregado
Muy sensibles al agua y al tránsito antes de alcanzar el curado final	Muy sensibles al agua y al tránsito antes de alcanzar el curado final
Lentitud en el proceso de curado por la gran cantidad de agua que contienen	Rapidez en el proceso de curado por la reducida cantidad de agua que contienen
Largo tiempo para colocar la capa superior	Corto tiempo para colocar la capa superior
Mayor costo unitario de la mezcla	Menor costo unitario de mezcla

