



TETĀ REMBIAPO
HA MARANDU
Motenondcha
Ministerio
OBRAS PÚBLICAS
Y COMUNICACIONES

GOBIERNO
NACIONAL

Paraguay
de la gente

Manual de Carreteras del Paraguay



UNIDAD

3

DISEÑO DE CARRETERAS

Volumen 3.4 - Diseño de Caminos de
Bajo Volumen de Tránsito

APC
ASOCIACIÓN PARAGUAYA DE CARRETERAS

WORLD ROAD
CONFERENCE
MUNICIPIO
DE LA REUNITE
COMITÉ
NACIONAL
PARAGUAYO

Revisión 2019

UNIDAD 3 VOLUMEN 3.4
Diseño de caminos de bajo volúmen de tránsito

INDICE

CAPITULO 3.4.1. INTRODUCCIÓN	1418
3.4.1.1. ANTECEDENTES GENERALES	1418
3.4.1.2. PROPÓSITO DE ESTE DOCUMENTO	1418
3.4.1.3. OBJETIVO	1419
3.4.1.4. ALCANCES	1419
3.4.1.5. ORGANIZACIÓN DE LA GUÍA	1420
CAPITULO 3.4.2. DISCUSIÓN ANTECEDENTES TÉCNICOS	1421
3.4.2.1. CONCEPTOS DE INGENIERÍA PARA LA EVALUACIÓN Y DISEÑO DE CAMINOS DE BAJO VOLUMEN DE TRÁNSITO	1421
3.4.2.2. CONCEPTOS GENERALES DE ESTABILIZACIÓN QUÍMICA	1422
3.4.2.3. CRITERIOS DE DISEÑO Y DEFINICIÓN REQUERIMIENTOS CAMINOS DE BAJO VOLUMEN DE TRÁNSITO	1425
CAPITULO 3.4.3. METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN Y SELECCIÓN ADITIVOS	1427
3.4.3.1. EVALUACIÓN Y SELECCIÓN DE ADITIVOS TRADICIONALES	1428
3.4.3.2. EVALUACIÓN Y SELECCIÓN DE ADITIVOS NO-TRADICIONALES	1431
CAPITULO 3.4.4. PROTOCOLO DE DEFINICION DE ESPESORES MINIMOS	1433
CAPITULO 3.4.5. PROTOCOLO DE ENSAYO, MONITOREO Y SEGUIMIENTO EN TERRENO	1436
CAPITULO 3.4.6. INFORMACION QUE DEBE SER ENTREGADA POR EL PROVEEDOR DEL ADITIVO	1440
CAPITULO 3.4.7. REFERENCIAS	1442
CAPITULO 3.4.8. ANEXOS	1443



INDICE DE TABLAS

Tabla 3.4_1. Resistencia mínima requerida según capa de la estructura.....	1431
Tabla 3.4_2. Correlación para obtener dato de CBR en función de tipo de material y ensayo	1437
Tabla 3.4_3. Cargas Pre-Configuradas.	1458

INDICE DE FIGURAS

Figura 3.4_1.: Fotografía de caminos colapsados durante las épocas de lluvia	1419
Figura 3.4_2. Fotografías caminos de bajo volumen pero con altas cargas de tráfico - Paraguay	1421
Figura 3.4_3. Camino sin Drenaje Lateral - Paraguay	1422
Figura 3.4_4. Evolución de la rigidez de los materiales estabilizados con cemento... ..	1426
Figura 3.4_5. Metodología General de Evaluación y Selección de Aditivos.	1428
Figura 3.4_6. Árbol de decisión para preselección de aditivos tradicionales (Adaptado de Referencias 1, 5 y 7)	1429
Figura 3.4_7. Árbol de decisión para preselección de aditivos tradicionales en función de objetivo	1430
Figura 3.4_8. Diagrama que define el peso por rueda del camión.....	1434
Figura 3.4_9. Interfase Herramienta Análisis Estructural	1435
Figura 3.4_10. Características DCP y Gráfico Tipo	1436
Figura 3.4_11. Fotografía LWD	1438
Figura 3.4_12. Muestra video georeferenciado tipo	1438
Figura 3.4_13.: Muestra de monitoreo de IRI en camino no pavimentado. Equipo Clase III.	1439
Figura 3.4_14. Casillas de Ingreso de Datos	1458
Figura 3.4_15. Datos del Proyecto.....	1458
Figura 3.4_16. Carga de Tránsito Representativa y Capacidad de Soporte Subrasante.....	1458
Figura 3.4_17. Definición de la Estructura de Pavimento. (a, b) Definidos por materiales disponibles localmente.....	1459



GLOSARIO DE TERMINOS

Estructura de un Camino:

Este término define al conjunto de capas de material que se utiliza para conformar la sección transversal de un camino y que está compuesto por la subrasante, una subbase (si aplica), una base (si aplica) y una carpeta de rodado.

Nota: Hay estructuras que pueden estar conformadas por una subrasante y una carpeta de rodado, es decir, que no poseen subbase ni base.

Aditivo:

Producto o compuesto, de origen natural, subproducto o elaborado químicamente, que se utiliza para la estabilización de materiales granulares y suelos. En este documento, este término es sinónimo de “Estabilizador” o “Producto”.

Estabilización:

En este documento el término estabilización define al procedimiento en el cual, un material no tratado (granular o suelo) es mezclado íntimamente con un producto (aditivo) con el fin de modificar las propiedades del material no tratado para efectos de cumplir con requerimientos específicos para su uso en la estructura de un camino.



CAPITULO 3.4.1. | INTRODUCCIÓN

3.4.1.1. ANTECEDENTES GENERALES

El presente documento se enmarca en el proyecto solicitado por el Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones de Paraguay (MOPC) para elaborar una **Guía de Evaluación y Selección de Aditivos Estabilizadores de Materiales Granulares y Suelos**. La guía es parte de una serie de medidas que tienen como fin mejorar el estándar de la red de caminos administrados por la Dirección de Caminos Vecinales del MOPC.

Este documento fue desarrollado en base a la experiencia de los autores y la experiencia internacional recopilada a través de la revisión de una serie de documentos emitidos en las últimas dos décadas (Ver Referencias)

La elaboración de este documento fue financiada por el BID, a través de un contrato de servicios con la empresa consultora Alta Vía y por la contraparte técnica fue realizada por la Dirección de Caminos Vecinales del MOPC.

3.4.1.2. PROPÓSITO DE ESTE DOCUMENTO

Al igual que en muchos países en desarrollo, la red de caminos vecinales o de bajo tránsito, está compuesta en muchos casos por soluciones que no cumplen con los requerimientos mínimos para garantizar el tránsito de vehículos durante todas las épocas del año. Particularmente durante el período de lluvias las estructuras de estos caminos colapsan principalmente porque la infraestructura anexa no está correctamente implementada - por ejemplo sistema de drenajes - y/o porque los materiales utilizados no son capaces de resistir las tensiones generadas por los vehículos, impidiendo el tráfico normal de estos (Ver Figura 3.4_1).

Una de las principales razones que dan origen al problema antes indicado, corresponde a la escasez (o alto costo) de materiales granulares idóneos para la construcción de caminos. En estos escenarios la utilización de técnicas de estabilización con aditivos surge como una alternativa para proveer materiales que sean capaces de resistir las sollicitaciones de tránsito.

El propósito de esta guía es entregar herramientas de ingeniería básica para el desarrollo de proyectos de mejoramiento de caminos de bajo tránsito que permitan la circulación segura de vehículos pesados en toda estación, resistir el desgaste superficial que genera en tránsito permanente de vehículos y minimizar las actividades de mantenimiento.



Figura 3.4_1.: Fotografía de caminos colapsados durante las épocas de lluvia

3.4.1.3. OBJETIVO

Esta guía tiene como objetivo definir las actividades y procesos a llevar a cabo para la evaluación y selección de aditivos utilizados para estabilizar o mejorar las propiedades de materiales granulares y suelos utilizados en la construcción de los caminos de bajo tránsito.

La guía tiene como objetivo específico proporcionar información específica sobre los aditivos disponibles, los mecanismos de estabilización, los materiales granulares y suelos donde es posible utilizarlos, ventajas y restricciones, métodos de ensayos y normativas, requerimientos de resistencia y durabilidad, entre otros elementos necesarios para cumplir con el objetivo principal.

3.4.1.4. ALCANCES

La guía propone protocolos de trabajo que permiten evaluar y seleccionar los aditivos factibles de ser utilizados como estabilizador de un material granular o suelo a ser utilizado como capa estructural de un camino, en función de los materiales disponibles, las condiciones medioambientales y los requerimientos estructurales – funcionales del proyecto. Asimismo, la guía entrega recomendaciones para el diseño del espesor de dicha capa, en función de la capacidad de soporte de la subrasante, la resistencia de las capas de la estructura y el tipo de tráfico.

Esta guía está estructurada considerando que las actividades de estabilización serán realizadas in-situ, a través de la aplicación de aditivos a los materiales existentes en un camino. La guía considera que, como etapa previa a la realización del proceso de estabilización, se llevará a cabo una etapa de evaluación a nivel de laboratorio que permitirá evaluar y seleccionar los aditivos factibles de ser utilizados, así como también las dosis que permitan cumplir con los requerimientos específicos del proyecto.

Esta guía no incluye el estudio de aditivos para supresión de polvo, no obstante mucha de la información provista sirve como apoyo para lo anterior.



Los protocolos, procedimientos y recomendaciones definidos en esta guía, son aplicables a los caminos de bajo volumen de tránsito. Es decir, se considera que estos caminos tendrán un flujo bajo de vehículos al día y su vida útil será entre 1 y 3 años.

Esta guía está desarrollada para que sea utilizada por profesionales y técnicos del área vial, incluyendo los administradores de proyectos y encargados de la toma de decisiones, ingenieros de caminos a cargo de proyectos de mejoramiento y conservación, técnicos involucrados en las tareas de evaluación de materiales y construcción, entre otros.

Esta guía fue elaborada para aquellos caminos que poseen un sistema de drenaje mínimo requerido, es decir, que poseen un terraplén o levantamiento mínimo sobre la cota de rasante y los elementos de drenaje requeridos (atravesos, alcantarillas y sumideros).

3.4.1.5. ORGANIZACIÓN DE LA GUÍA

Luego de los antecedentes generales presentados en el Capítulo 1, en Capítulo 2 se discuten antecedentes técnicos asociados a conceptos de ingeniería de caminos de bajo volumen de tránsito, conceptos de estabilización química y a los criterios que se deben exigir a los materiales estabilizados para ser utilizados como capa de la estructura de estos caminos.

En Capítulo 3 se presenta la metodología para evaluar y seleccionar los estabilizadores químicos.

En Capítulo 4 se presenta la metodología para definir los espesores mínimos a utilizar en la estructura del camino.

En Capítulo 5 se presenta el protocolo de ensayo, monitoreo y seguimiento en terreno

En Capítulo 6 se presentan los detalles de la información que debe ser entregada por cada uno de los proveedores respecto a las características de los aditivos que se comercializan.

En los Anexos se presenta información complementaria y necesaria para llevar a cabo las tareas de evaluación y selección de los aditivos, de acuerdo al siguiente esquema.

Anexo A. Métodos, Normas y Ensayos para suelos, materiales granulares y materiales estabilizados.

Anexo B. Antecedentes Aditivos Tradicionales

Anexo C. Antecedentes Aditivos No-Tradicionales

Anexo D. Metodología Análisis Estructural y Definición Espesores Mínimos Estructura



CAPITULO 3.4.2. | DISCUSIÓN ANTECEDENTES TÉCNICOS

3.4.2.1. CONCEPTOS DE INGENIERÍA PARA LA EVALUACIÓN Y DISEÑO DE CAMINOS DE BAJO VOLUMEN DE TRÁNSITO.

Los Caminos de Bajo Volumen de Tránsito (CBVT) constituyen una parte importante de la red vial interurbana de países en Latino América, presentando una gran variedad de estándares tanto geométricos como estructurales. En estos caminos (CBVT) generalmente se proponen proyectos con soluciones relativamente económicas en comparación a caminos que soportan mayores volúmenes de tránsito, sin embargo, es común ver que para este tipo de caminos la economía se traduce simplemente en una reducción de estándares sin fundamentos de ingeniería y en donde se justifica la menor inversión únicamente con argumentos económicos o administrativos.

Una problemática que se repite permanentemente en los CBVT de países en vías de desarrollo corresponde al hecho de que si bien son caminos con volúmenes de tráfico bajo (< 200 vehículos/día) el porcentaje de vehículos pesados es significativo, normalmente asociado al transporte de recursos del rubro ganadero, agrícola o minero, entre otros. Tal es el caso de lo que sucede en la región Sur-Oriental de Paraguay, donde la principal fuente de desarrollo está asociada a la industria de la Soja y Trigo, materia prima que es transportada en camiones que transitan a la carga máxima legal (Ver Figura 3.4_2). Otro aspecto que es necesario internalizar corresponde al hecho de que en estos caminos el control de cargas es casi nulo, y por lo tanto en muchas ocasiones los camiones circulan con cargas que están por sobre la máxima legal, generando tensiones en la estructura que superan en muchas veces la resistencia que son capaces de soportar las capas de la estructura.



Figura 3.4_2. Fotografías caminos de bajo volumen pero con altas cargas de tráfico - Paraguay

Lo antes señalado supone un desafío importante desde el punto de vista de la ingeniería de caminos, ya que si bien las soluciones utilizadas para bajos niveles de flujo vehicular normalmente son de baja inversión (económicas), las cargas de tráfico y el nivel de tensiones que éstas generan son las mismas que reciben pavimentos de carreteras de mayor importancia.



Esta problemática también se repite tanto con los estándares de drenaje, como los de diseño geométrico. En el primer caso, normalmente este tipo de caminos carecen de elementos de drenaje para el manejo de las aguas superficiales y subterráneas, lo cual impacta no solo el estándar superficial de los caminos, sino que también impacta significativamente la resistencia de los materiales granulares utilizados, toda vez que estos permanecen constantemente bajo condiciones de humedad (Ver Figura 3.4_3).

En el segundo caso, estos caminos normalmente son diseñados para velocidades baja de circulación, lo cual limita las posibles mejoras que puedan realizarse en el tiempo en términos de los materiales de la estructura y el aumento en la velocidad de circulación.



Figura 3.4_3. Camino sin Drenaje Lateral - Paraguay

En resumen, proveer soluciones para CBVT que garanticen el tránsito de vehículos durante todo el año (incluyendo los períodos de lluvias intensas) se transforma en una problemática muy difícil de resolver y para hacerlo es necesario ajustar la forma en que tradicionalmente se abordan estos tipos de caminos, incorporando conceptos, metodologías y herramientas de Ingeniería Básica que respondan a estos requerimientos.

3.4.2.2. CONCEPTOS GENERALES DE ESTABILIZACIÓN QUÍMICA

A. MECANISMOS Y OBJETIVOS DE LA ESTABILIZACIÓN

Desde el punto de vista de la Ingeniería de Caminos, es posible identificar 2 tipos de estabilización: a) Estabilización Mecánica, y b) Estabilización Química.

La Estabilización Mecánica cubre aspectos tales como la mezcla y compactación de materiales granulares, hasta el uso de geosintéticos y la incorporación de elementos menos convencionales. Esta temática no se discute ni analiza en esta guía, no obstante es importante considerar que la mezcla de materiales granulares u otros elementos, previo a la incorporación del aditivo, puede llegar a ser significativamente costo-eficiente para los objetivos que se buscan. Lo anterior se debe a que los aditivos pueden maximizar sus beneficios cuando el material cumple con características específicas, particularmente cuando se incorporan aditivos que reaccionan químicamente con la fracción fina de los materiales.



La Estabilización Química cubre la práctica de la incorporación de aditivos a un material granular para modificar sus propiedades mecánicas y/o propiedades de desempeño, entre las que se destacan las siguientes:

- Necesidad de aumentar la capacidad de soporte de los materiales granulares.
- Otorgar mayor estabilidad frente a la presencia de humedad y condiciones de saturación.
- Controlar todo tipo de reacción especial en los materiales granulares, tales como, control de retracción, control del efecto negativo de sales, expansiones excesivas, entre otras reacciones químicas no deseables.
- Controlar del deterioro superficial excesivo por efecto del tráfico de vehículos y el clima.
- Mejorar la trabajabilidad de materiales con altos índices de plasticidad.

En el proceso de estabilización química - a diferencia de los aditivos que son utilizados para la supresión de polvo - el aditivo se mezcla íntimamente con el material granular, de tal forma de lograr una homogenización óptima y de esta forma lograr generar los cambios a nivel físico-químico que permitan lograr el objetivo de la estabilización.

Por otra parte, el “nivel” de estabilización que se requiere lograr es variable y dependerá de los alcances del proyecto. De esta forma la incorporación de aditivo se puede utilizar como mejoramiento o como estabilización de los materiales. Por ejemplo, si lo que se requiere lograr es solamente mejorar la trabajabilidad del material existente (normalmente un material con alto porcentaje de finos de alta plasticidad y en estado húmedo) entonces la definición utilizada es la de Modificación de materiales y en estos casos las dosis de aditivos son generalmente bajas. Por otra parte si por ejemplo lo que se requiere lograr es aumentar la capacidad de soporte por un período extenso (1 o más años), entonces la definición utilizada es la de Estabilización de materiales

B. ADITIVOS Y CLASIFICACIÓN

En el contexto de la Estabilización Química de materiales granulares y suelos es posible identificar dos tipos de aditivos: a) Aditivos Tradicionales, b) Aditivos No-Tradicionales.

Se denominan aditivos tradicionales a aquellos productos que tienen suficiente respaldo técnico y experiencia empírica como para que el estudio de estos antecedentes permita llevar a cabo el proceso de estabilización de forma ordenada y con un grado de certidumbre acotado. Dentro de los aditivos considerados como Tradicionales, se encuentra el Cemento, la Cal y el Asfalto. En otros países también se considera como aditivo tradicional distintos tipos de Ceniza Volante y la mezcla de estas con cemento o cal⁽¹⁾. Para cada uno de estos aditivos se han elaborado un sinnúmero de documentos que presentan información concreta respecto a: a) los tipos de suelos y materiales granulares en los cuales pueden ser utilizados, b) los rangos de dosis que deben utilizarse, c) los efectos que producen en las propiedades de los materiales granulares, d) las restricciones de uso y e) los métodos de evaluación que deben utilizar para comprobar los beneficios, entre otros aspectos.

Nota: (1) En esta guía los diversos tipos de Ceniza Volante se consideran como aditivos No Tradicionales, básicamente por la escasa experiencia que existe en Paraguay en el uso de éstas para la estabilización.

Por otra parte, en el ámbito de los aditivos No-Tradicionales, es posible encontrar una gran variedad de productos con nombres comerciales que son definidos como aditivos o agentes estabilizadores, y en general, salvo casos específicos, no se indica ni respalda el mecanismo de



estabilización que da origen a su definición, ni tampoco el o los efectos específicos que produce su incorporación en los materiales granulares que se quiere estabilizar.

La selección y alcance relacionado a la utilización de estabilizadores no-tradicionales representa un desafío y una problemática especial de la ingeniería de caminos. Esta problemática se puede resumir de la siguiente forma basada en la experiencia de las últimas décadas:

- La variedad de productos disponibles en el mercado es significativamente amplia lo que hace difícil normalizar su uso del mismo modo que estabilizadores tradicionales. Una parte importante de aditivos corresponden a sub-productos de procesos industriales de los cuales normalmente se tiene muy poca información y otra parte menor de los productos disponibles en el mercado, corresponden a formulaciones químicas especiales las cuales en muchos casos están protegidas por patentes. En ambos casos estos productos no se encuentran normalizados en los documentos o manuales oficiales de construcción de los países en Latinoamérica.
- Algunos estabilizadores no-tradicionales se comercializan con mucho menos rigor que los estabilizadores tradicionales sin especificar claramente su origen de producción, su composición química y sus propiedades de ingeniería.
- Muchos estabilizadores químicos se promueven comercialmente como una solución de ingeniería sin distinguir claramente su alcance respecto de las diferentes posibles aplicaciones indicadas en el presente capítulo.
- Para algunos estabilizadores químicos se desconocen las propiedades mecánicas que otorga al material por lo cual no se puede dar respaldo al proyecto de diseño estructural. Los estabilizadores químicos no-tradicionales, no cuentan con el mismo nivel de experiencia, información y documentación de ingeniería que los estabilizadores tradicionales.
- La gran mayoría de los estabilizadores no-tradicionales ofrecen soluciones temporales cuya temporalidad depende de factores como tránsito, suelo y clima. En este sentido lo importante es conocer la temporalidad de cada uno de estos.
- Para algunos estabilizadores, los aspectos relativos a impacto ambiental no se encuentran debidamente abordados. Algunos de estos productos provienen de residuos secundarios de procesos industriales.

No obstante la problemática descrita, la experiencia indica que algunos estabilizadores no-tradicionales efectivamente pueden mejorar el desempeño de los materiales granulares y de esta forma proveer soluciones de corto y mediano plazo. Cuando esto último ocurre, el empleo de estabilizadores no-tradicionales puede llegar a ser costo-efectivo frente a alternativas en las cuales se ha considerado el empleo de estabilizadores tradicionales.

Por otra parte, aunque no existe suficiente respaldo técnico validado para cada uno de los aditivos no tradicionales, hoy en día en la bibliografía internacional se propone que estos sean agrupados en 7 u 8 familias según su origen (Referencias 1 y 2):

- Higroscópicos (Absorbentes de Humedad)
- Aditivos arcillosos
- Productos orgánicos derivados del petróleo
- Productos orgánicos (No derivados del petróleo)
- Emulsiones Electrolíticas
- Emulsiones de Polímeros Sintéticos
- Emulsiones Enzimáticas

Las estrategias utilizadas en diferentes países para incorporar dentro de sus normativas las alternativas de empleo de estabilizadores no-tradicionales, se han basado principalmente en la ejecución de tramos de prueba localizados, liderados por el equipo de profesionales que proveen o comercializan el aditivo, sin la realización de estudios formales a nivel de laboratorio que



definan la factibilidad de uso del aditivo en los materiales tratados ni la realización de programas de seguimiento que permitan establecer el desempeño y vida útil de las soluciones. Por lo tanto, este tipo de experiencias han quedado en el registro de las actividades realizadas por parte de la administración de la red vial, pero sin documentos concretos que permitan - con un grado de certeza aceptable - replicar estas experiencias en el resto de la red.

Para evitar esta realidad, esta guía entrega una metodología objetiva para la evaluación y selección de aditivos estabilizadores, basada – cuando es posible – en a) información específica obtenida de investigaciones objetivas y experiencias validadas, b) a través de un protocolo de evaluación a nivel de laboratorio que permita definir las propiedades y alcances de los materiales estabilizados y c) a través de un protocolo de seguimiento de los tramos de prueba que permita definir objetivamente el desempeño y vida útil de estos.

3.4.2.3. CRITERIOS DE DISEÑO Y DEFINICIÓN REQUERIMIENTOS CAMINOS DE BAJO VOLUMEN DE TRÁNSITO

Los caminos de bajo volumen de tránsito poseen una problemática especial de ingeniería y que grafica en el hecho de que si bien estos poseen bajo flujo de vehículos, en muchas ocasiones este flujo está compuesto por un gran porcentaje de vehículos pesados. Esta situación está presente particularmente en países en desarrollo y en aquellos países que son productores de materia prima agrícola, forestal, etc., tales como Paraguay, Chile, Perú, entre otros. Esta situación es crítica para el desempeño estructural de los caminos porque las capas de la estructura del camino se ven sometidas a tensiones de trabajo significativamente altas debido a que en general el diseño y dimensionamiento de estos responde a criterios y políticas que establecen un bajo nivel de inversión, lo cual se traduce en estructuras de bajo espesor y materiales de bajo soporte. Bajo este escenario, la estrategia correcta para proveer soluciones que sean capaces de resistir las cargas de tráfico durante todo el año, incluido el período de lluvias, debe considerar el análisis adecuado del nivel de tensiones que producen las cargas de los vehículos pesados en las capas de la estructura.

La guía que se presenta en este documento aborda y resuelve esta problemática a través de una sección que ayuda al usuario a definir los espesores mínimos que deben utilizarse, en función de las propiedades mecánicas de los materiales estabilizados, de la subrasante y de las cargas por eje de los vehículos pesados (ver Capítulo 4).

Asimismo, esta Guía define cuáles son los niveles de resistencia mínimo a garantizar en la capa de rodado y en las capas subyacentes, lo cual se realiza en función del ensayo CBR (California Bearing Ratio) o en función del ensayo de Compresión Simple. Para definir estos valores, se realizan las siguientes suposiciones:

- a. En la práctica, el administrador del proyecto lo que normalmente buscará realizar es estabilizar el material de la huella existente de tal forma de convertirlo en la capa resistente principal. En estos casos el camino quedará conformado por una capa estabilizada que cumplirá la función de carpeta de rodado y núcleo principal de resistencia. Según la capacidad de soporte de la subrasante, podrá o no existir una capa de subbase granular que ayude a proteger a la subrasante.
- b. Normalmente, no se colocará una superficie de protección sobre la capa estabilizada y esta quedará expuesta al desgaste que produce el tránsito.

Por lo tanto, sobre la base de los criterios definidos en los párrafos anteriores, en esta guía se establece que el valor mínimo a garantizar para la carpeta de rodado superficial será de CBR



70% evaluado en condiciones saturadas. Esta consideración se origina en el hecho de que un camión cargado a la máxima legal generará tensiones sobre la capa superficial que están cerca de los valores admisibles que proveen estos materiales.

Nota Importante: En caminos donde el tránsito de vehículos sea predominantemente liviano, entonces la resistencia de este material puede ser menor. En estos casos recomienda utilizar materiales en la carpeta de rodado que tengan una capacidad de soporte mayor a CBR 50%.

Respecto al parámetro obtenido del ensayo de Compresión Simple, es importante entender que la evolución de la capacidad de soporte de los materiales estabilizados con aditivos cementantes disminuye en el tiempo producto de los ciclos de carga. Lo anterior se origina por el hecho de que si bien estos aditivos (cemento, cal, o sus derivados) producen enlaces cementantes que permiten aumentar la resistencia, estos enlaces son frágiles y la cantidad de aditivo presente en el volumen de material granular es baja (dosis de 2 a 6% en función del peso del material granular). Por lo tanto, en la medida que la estructura es sometida a flexión debido al paso de los vehículos pesados, parte de estos enlaces se rompen, perdiéndose la resistencia generada por el aditivo. Esta situación ha sido discutida y documentada por una serie de investigaciones (Referencias 3 y 4) y sus alcances pueden ser analizados a través del gráfico que se presenta en Figura 3.4_4.

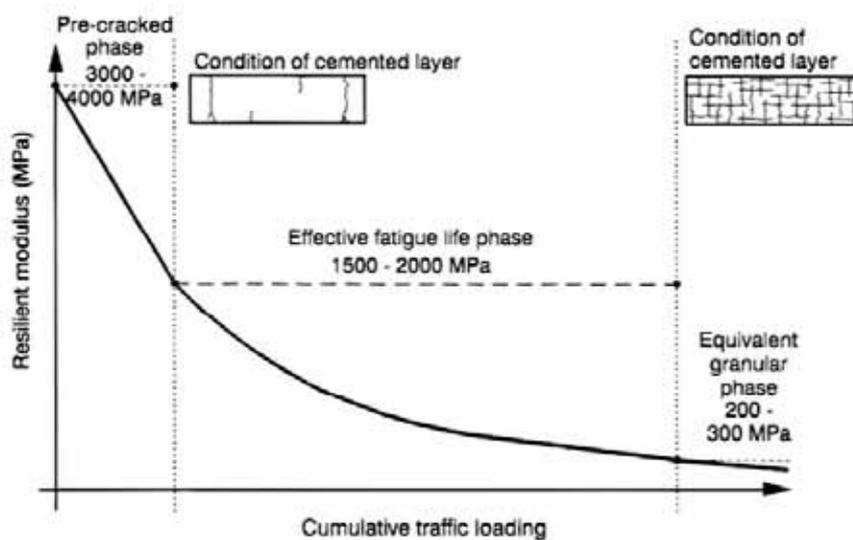


Figura 3.4_4. Evolución de la rigidez de los materiales estabilizados con cemento

La afirmación discutida en el párrafo anterior en la práctica se traduce en que la resistencia inicial evaluada a través del ensayo de Compresión Simple es significativamente superior a la resistencia representativa de este material en servicio (largo plazo). Por lo tanto, sobre la base de lo antes discutido, los materiales estabilizados que sean evaluados a través del ensayo de Compresión No Confinada, se les exigirá una resistencia mínima de 15,0 kg/cm² en condiciones de saturación.



CAPITULO 3.4.3.

METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN Y SELECCIÓN ADITIVOS

Si bien en esta guía, y en la mayoría de los casos, el objetivo primario es el de aumentar la resistencia del material granular disponible, también es posible que el objetivo de la utilización de aditivos sea otro, como por ejemplo lograr mejorar la aglomeración del material o solo modificar las condiciones de trabajabilidad de estos. Por lo tanto, una de las primeras etapas del proceso de evaluación, corresponde a la definición del objetivo de la estabilización.

En Anexo A se presentan los ensayos propuestos según los objetivos definidos y se indica además cuales son las normas y protocolos que se pueden aplicar en cada uno de los casos.

Respecto a los aditivos tradicionales y no-tradicionales, el proceso de evaluación es básicamente el mismo. No obstante, en el caso de los aditivos tradicionales, se incorpora al procedimiento una herramienta de pre-selección de los aditivos tradicionales factibles de ser utilizados y se entregan procedimientos específicos tanto para la evaluación de los materiales estabilizados como para evaluar problemas específicos que se pueden originar debido a la presencia de sulfatos, sales o materiales orgánicos. De esta forma en Sección 3.1 se presentan detalles de la metodología para los Aditivos Tradicionales, mientras que en la Sección 3.2 se presenta la metodología para los Aditivos No-Tradicionales.

Luego de la etapa de preselección de los aditivos tradicionales, se lleva a cabo la etapa de evaluación a nivel de laboratorio, para efectos de cuantificar las propiedades de los materiales estabilizados y comparar los niveles de mejoramiento que se pueden lograr con la incorporación de los aditivos. Este proceso es aplicable tanto para aditivos tradicionales como no-tradicionales. Los resultados se evalúan en función del objetivo que se busca obtener. El proceso se cierra llevando a cabo la etapa de definición de los espesores mínimos para el camino en evaluación.

La Figura 3.4_5 presenta el diagrama de los pasos a llevar a cabo para la evaluación de los aditivos y materiales tratados.

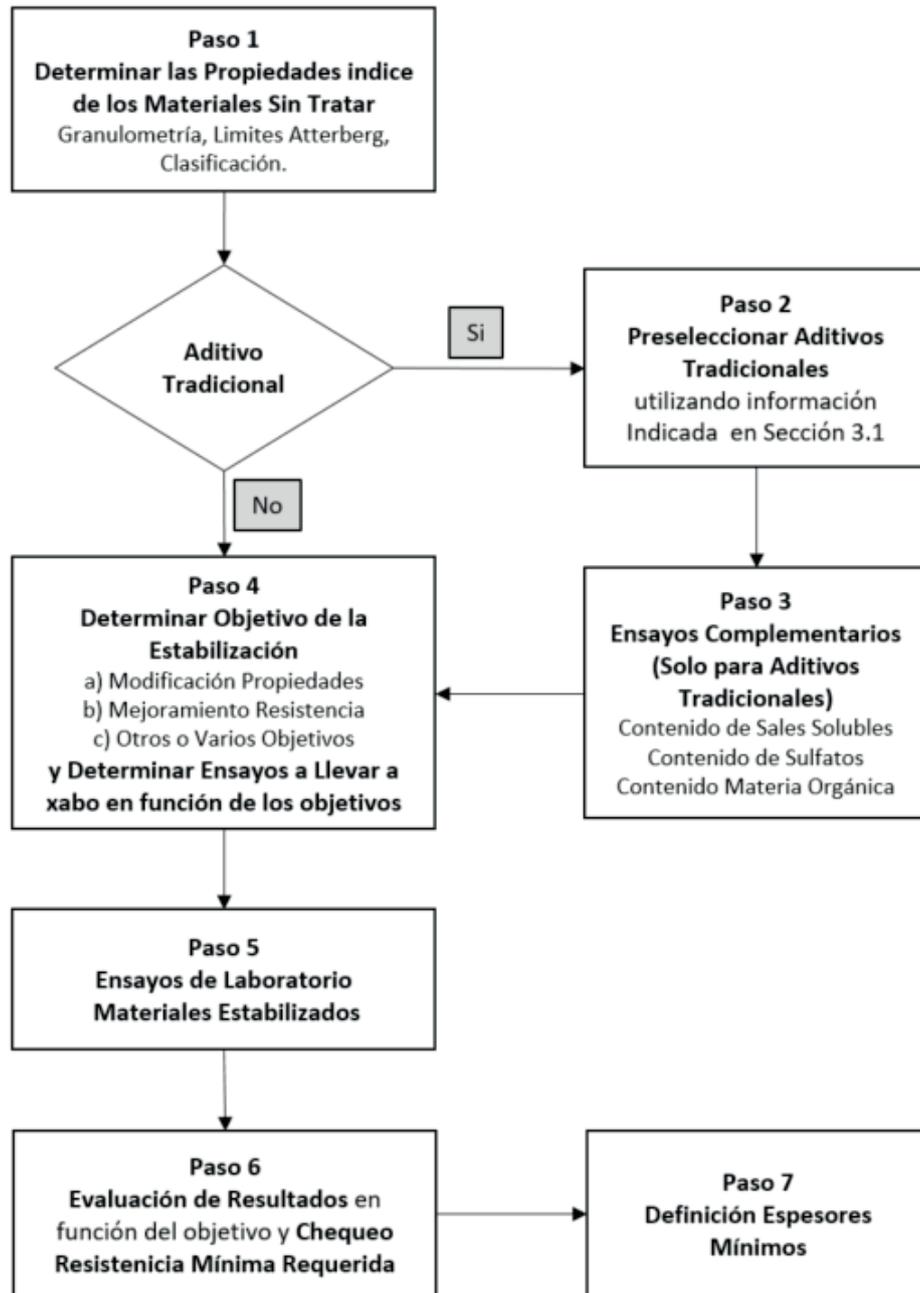


Figura 3.4_5. Metodología General de Evaluación y Selección de Aditivos.

3.4.3.1. EVALUACIÓN Y SELECCIÓN DE ADITIVOS TRADICIONALES

En esta sección se presenta la metodología de evaluación de los materiales estabilizados con aditivos tradicionales, es decir, Cemento, Cal o Asfalto. El procedimiento aquí indicado se basa en una serie de documentos internacionales (Ver Referencias 1, 5, 6 y 7) y permite pre-seleccionar los aditivos que son factibles de ser utilizados en función de las propiedades de los materiales a tratar.

En Anexo B se presentan antecedentes de cada uno de los aditivos tradicionales, indicando las principales propiedades, mecanismo de estabilización, beneficios y restricciones, entre otros aspectos importantes. En Anexo B además se presentan detalles técnicos específicos de los



ensayos a llevar a cabo para el chequeo de problemas asociados a la estabilización de estos aditivos con materiales con contenidos inadecuados de sales, sulfatos y materia orgánica.

En caso de que se requiera profundizar en cada uno de los conceptos y herramientas de evaluación asociados a la estabilización con estos aditivos tradicionales, se recomienda revisar los siguientes documentos:

- Estabilización con Cemento:
 - “Guide to Cement Modified Soils”, Portland Cement Association, USA 2008
 - “Manual de Estabilización de Suelos con Cemento o Cal”, Asociación Nacional Técnica de Estabilización de Suelos y Reciclado de Firmes”, España 2008.

- Estabilización con Cal:
 - “Lime-Treated Soil Construction Manual. Lime Stabilization & Lime Modification”, National Lime Association, USA 2004.
 - “Stabilization of Pavement Subgrades and Base Courses with Lime”. Dallas Little, 1995.
 - “Manual de Estabilización de Suelos con Cemento o Cal”, Asociación Nacional Técnica de Estabilización de Suelos y Reciclado de Firmes”, España 2008.

- Estabilización con Asfalto:
 - “TG2 - Technical Guideline: Bitumen Stabilised Materials. A Guideline for the Design and Construction of Bitumen Emulsion and Foamed Bitumen Stabilised Materials” 2nd Ed, Asphalt Academy, South Africa 2009.

PROTOCOLO DE EVALUACIÓN ADITIVOS TRADICIONALES

Paso 1: Evaluación propiedades índice de los materiales a tratar.

- Porcentaje (%) de finos pasantes malla #200 (Granulometría)
- Índice de Plasticidad (Límites de Atterberg)
- Proctor Modificado (Densidad)

Nota: Las normas de cada uno de los ensayos se presentan en Anexo A.

Paso 2: Preseleccionar aditivos factibles de ser utilizados utilizando árbol de decisión que se presenta en Figura 3.4_6.

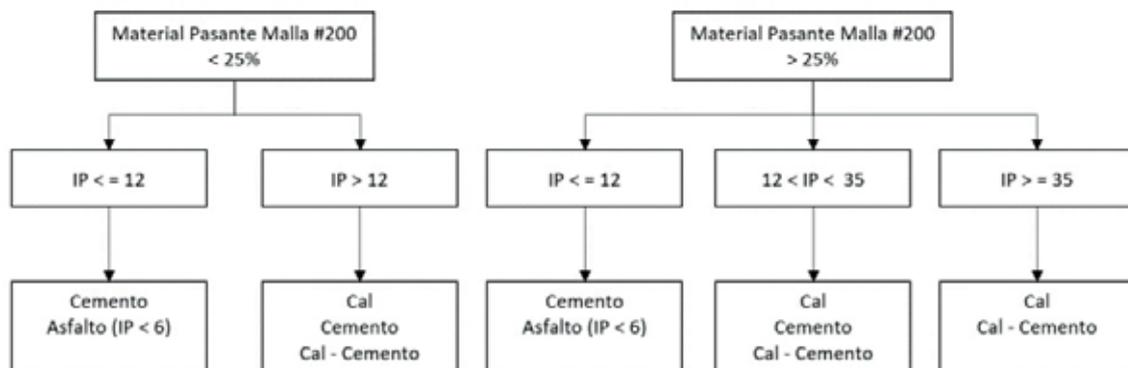


Figura 3.4_6.Árbol de decisión para preselección de aditivos tradicionales (Adaptado de Referencias 1, 5 y 7)



Alternativamente utilizar árbol de decisión para aditivos tradicionales que se presenta en Figura 3.4_7, el cual recomienda los tipos de aditivos en función del objetivo de la estabilización (Referencia 8)

	Objetivo	Tipo de Material	Método Recomendado
Estabilización de Subrasante	Mejorar capacidad de soporte	Granular grueso	SA; SC; MB
		Granular fino	SA; SC; MB
		Arcillas de bajo IP	SC; CMS; LMS; SL
		Arcillas de alto IP	SL; LMS
	Impermeabilización y erosión por lluvia	Arcillas de bajo IP	CMS; SA; CW; LMS; SL
	Control de retracción e hinchamiento	Arcillas de bajo IP	CMS; SC; CW; LMS; SL
Arcillas de alto IP		SL; LMS	
Estabilización de Base Granular (**)	Mejoramiento de materiales marginales (*)	Granular fino	SC; SA; MB
		Arcillas de bajo IP	SC; SL
	Mejorar capacidad de soporte	Granular grueso	SA; SC; MB
		Granular fino	SC; SA; MB
	Reducción del bombeo de finos	Granular fino	SC; SA; MB

(*) Materiales que no cumplen con Especificaciones Técnicas tradicionales

(**) En estos casos se asume la colocación de un sello superficial

Nomenclatura

- CMS: Suelo modificado con cemento
- CS: Cementante químico (cemento, cal)
- CW: Impermeabilizante Químico
- LMS: Suelo modificado con Cal
- MB: Mezcla de Materiales
- SA: Suelo Asfalto
- SC: Suelo Cemento
- SL: Suelo Cal

Figura 3.4_7. Árbol de decisión para preselección de aditivos tradicionales en función de objetivo

Paso 3: Evaluar propiedades complementarias de los materiales a tratar para verificar posibles restricciones.

- Contenido de sulfatos
- Contenido de material orgánico
- Contenido de Sales

Nota: Los detalles de estas restricciones se discuten en Anexo B.

Paso 4: Preparar los materiales y probetas estabilizadas siguiendo los lineamientos que se definen para los ensayos de laboratorio seleccionados, los cuales se presentan en Anexo A, y que están definidos de acuerdo al objetivo que se desea lograr a través de la estabilización.

Paso 5: Realizar ensayos de laboratorio de las propiedades mecánicas y desempeño a los materiales sin tratar y a los materiales estabilizados, de acuerdo al objetivo que se busca cumplir y utilizando los ensayos que se presentan en Anexo A.



Paso 6: Verificar si las propiedades evaluadas cumplen con los objetivos y criterios de selección definidos. Independiente si el objetivo de la aplicación de aditivos es o no mejorar la resistencia de los materiales sin tratar, los materiales utilizados en cada una de las capas deben cumplir con los criterios de resistencia mínima discutidos en Sección 2.3 de este documento y que se presentan en Tabla 3.4_1.

Tabla 3.4_1. Resistencia mínima requerida según capa de la estructura

Material utilizado en	CBR (%)	Compresión Simple (kg/cm ²)
Capa de Rodadura	70	15,0
Base Granular	50	10,0
Subbase Granular	30	6,0
Subrasante	10	2,0

Si el objetivo es modificar las propiedades del material, entonces se deben cumplir las especificaciones técnicas definidas para el proyecto particular, tales como densidad, índice de plasticidad u otro.

3.4.3.2. EVALUACIÓN Y SELECCIÓN DE ADITIVOS NO-TRADICIONALES

En esta sección se presenta la metodología de evaluación de los materiales estabilizados con Aditivos No-Tradicionales. Salvo casos muy particulares, en general no existe suficiente información técnica para recomendar un aditivo no-tradicional a partir de las características de los materiales granulares a tratar. Por lo tanto, el proceso de evaluación se lleva a cabo evaluando directamente las propiedades de resistencia y/o desempeño que se busca cumplir, utilizando los ensayos correspondientes en cada caso.

No obstante lo anterior y de forma complementaria, en Anexo C se presenta un resumen de las características, ventajas y restricciones de las distintas familias de aditivos no-tradicionales identificadas hasta la fecha en la literatura internacional.

PROTOCOLO DE EVALUACIÓN ADITIVOS NO-TRADICIONALES

Paso 1: Evaluación propiedades índice y propiedades complementarias de los materiales a tratar

- Porcentaje (%) de finos pasantes malla #200 (Granulometría)
- Índice de Plasticidad (Límites de Atterberg)
- Densidad

Paso 2: Preparar los materiales y probetas estabilizadas siguiendo los lineamientos que se definen para los ensayos de laboratorio seleccionados, los cuales se presentan en Anexo A, y que están definidos de acuerdo al objetivo que se desea lograr a través de la estabilización.

Paso 3: Realizar ensayos de laboratorio de las propiedades mecánicas y desempeño a los materiales sin tratar y a los materiales estabilizados, de acuerdo al objetivo que se busca cumplir y utilizando los ensayos que se presentan en Anexo A.

Paso 4: Verificar si las propiedades evaluadas cumplen con los objetivos y criterios de selección definidos. Independiente si el objetivo de la aplicación de aditivos es o no mejorar la resistencia de los materiales sin tratar, los materiales utilizados en cada una de las capas deben cumplir con los criterios de resistencia mínima discutidos en Sección 2.3 de este documento y



que se presentan en Tabla 3.4_ 1. Si el objetivo es modificar las propiedades del material, entonces se deben cumplir las especificaciones técnicas definidas para el proyecto particular, tales como densidad, índice de plasticidad u otro.

**CAPITULO 3.4.4.****PROTOCOLO DE DEFINICION DE
ESPESORES MINIMOS**

Con el objeto de facilitar al usuario de esta Guía el proceso de definición de los espesores de cada una de las capas a utilizar en la estructura, incluyendo aquella conformada con los materiales estabilizados, en esta sección se incluye un protocolo específico a llevar a cabo.

El protocolo de definición de los espesores toma como variables principales, el peso representativo por rueda del camión (T_x) y el nivel de soporte de la subrasante característico de los tramos del proyecto (S_x). El procedimiento de diseño de la estructura se basa en la metodología de análisis propuesta en el documento "An alternative Philosophy on the deterioration and design of low volumen roads" (Paige Green, 2015).

Esta metodología toma en consideración las tensiones máximas de trabajo que se generarán en la estructura a partir de las cargas máximas por eje esperadas. En otras palabras, esta metodología no considera el concepto de "fatiga del material", ya que se considera que son caminos con bajo flujo de tránsito y que poseen una vida útil entre 1 - 3 años.

Respecto al peso representativo por rueda del camión (T_x) se consideran 3 niveles del peso por rueda del Eje Simple Rueda Doble (Ver Figura 3.4_8):

- Peso por Rueda: 20 KN (2,0 toneladas aprox.). Corresponde a un camino local con tránsito de vehículos pesados ocasionales y mayormente tránsito de vehículos livianos.
- Peso por Rueda: 27 KN (2,7 toneladas aprox). Corresponde a un camino local con tránsito permanente de vehículo pesados, pero que en términos relativos tiene un adecuado control de pesos por eje.
- Peso por Rueda: 35 KN (3,5 toneladas aprox.). Corresponde a un camino con tránsito permanente de vehículos pesados que transportan materia prima (madera, soja, entre otros) y que evidentemente no cumplen con la normativa legal respecto a pesos máximo por eje.

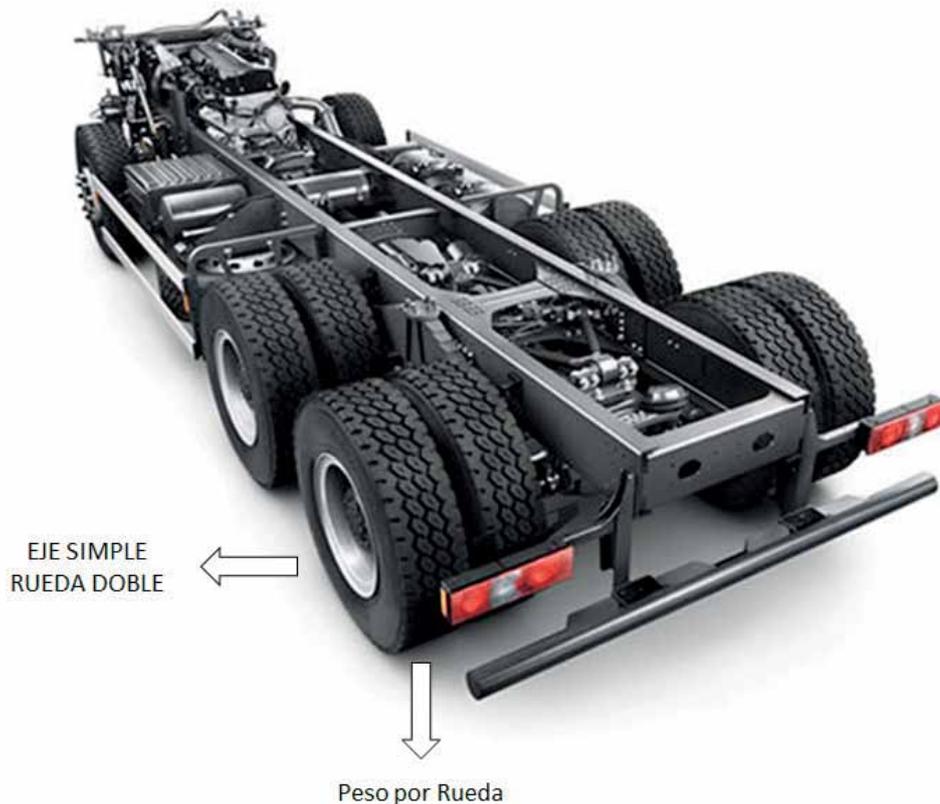


Figura 3.4_8. Diagrama que define el peso por rueda del camión

Respecto de la definición de la capacidad de soporte representativa (S_x), se deben realizar los ensayos definidos en la normativa del MOPC. La unidad a utilizar corresponderá al valor de CBR (California Bearing Ratio) el cual debe ser evaluado en condiciones de saturación. Las calicatas para la obtención de muestras de materiales para la realización de ensayos de mecánica de suelos deben ser realizadas cada 250 m como mínimo.

Una vez definidos ambos valores (T_x y S_x) se utiliza la planilla que se presenta en Figura 3.4_9, la cual corresponde a una Macro de Excel que contiene una subrutina para definir los espesores mínimos. Esta metodología establece como requerimiento mínimo el uso de material de CBR 70% en la capa superficial de la estructura. A partir de este requerimiento y los valores de soporte de subrasante, se definen los espesores de carpeta de rodado (o base) y de la subbase (en caso de requerirse). Las celdas en naranja son las que deben ser completadas o ajustadas. Esta herramienta permite realizar un análisis al centímetro con el fin de optimizar lo mayor posible el diseño de la estructura.

En Anexo D se presenta un manual de uso de la herramienta de diseño en el cual se detallan todos los pasos a seguir, los criterios utilizados y la forma de obtener los espesores mínimos.

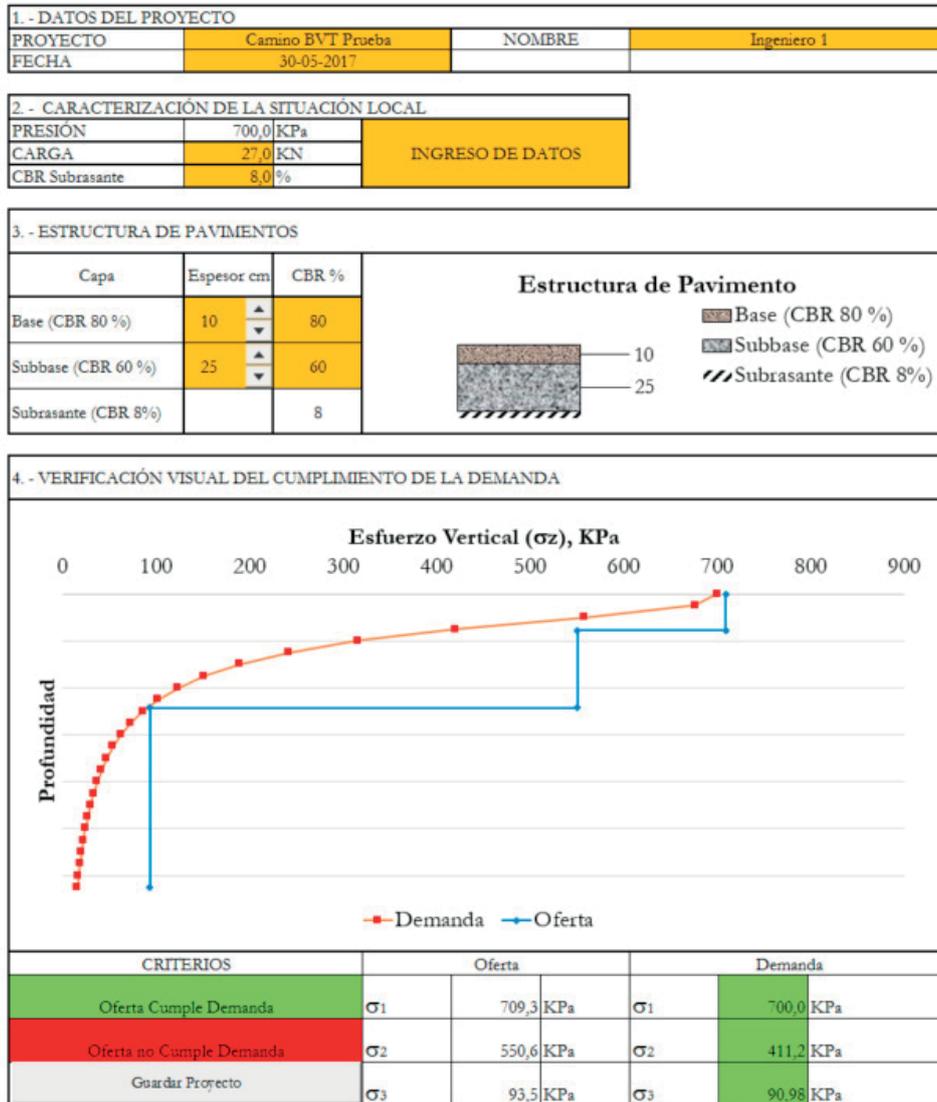


Figura 3.4_9. Interfase Herramienta Análisis Estructural



CAPITULO 3.4.5.

PROTOCOLO DE ENSAYO, MONITOREO Y SEGUIMIENTO EN TERRENO

El tramo de prueba en terreno deberá ser monitoreado utilizando principalmente ensayo de Cono Dinámico de Penetración (DCP), que utiliza un cono de ángulo 60°, un martillo de 8 kg y una altura de caída de 57,5 cm (Figura 3.4_10).

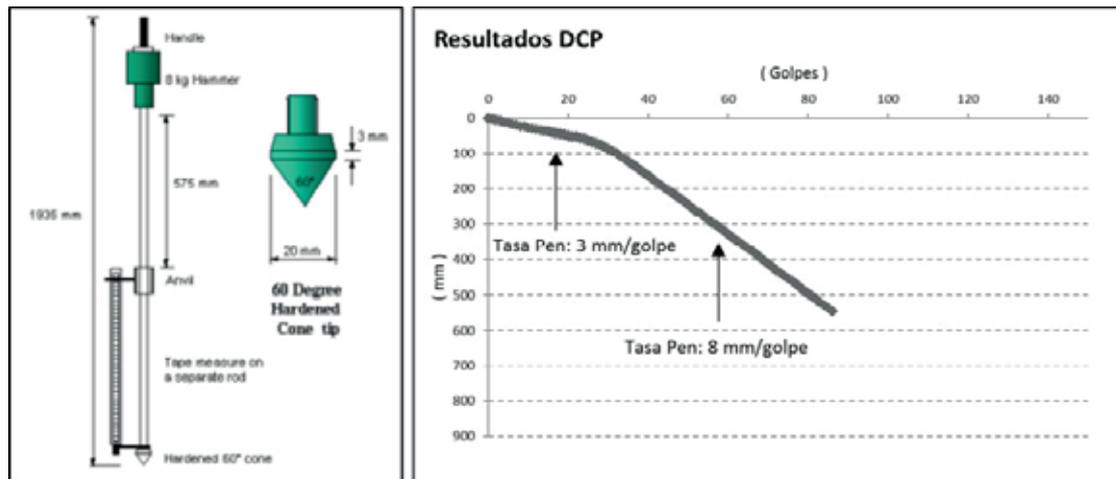


Figura 3.4_10. Características DCP y Gráfico Tipo

El ensayo deberá realizarse tanto a lo largo del tramo de pruebas como en los tramos contiguos a este que no fueron estabilizados (tramos no-tratados o tramo patrón), de acuerdo a las siguientes definiciones:

- Los ensayos, tanto en los tramos no-tratados como en el tramo tratado, deberán ser realizados en un mismo día calendario y procurando que las condiciones de humedad medioambiental sean las mismas. Es decir, si durante el día en que se realizan los ensayos comienza a llover copiosamente, entonces los trabajos deben detenerse. No existe restricción de realizar los trabajos con lluvia, pero todos los puntos ensayados deben ser realizados en las mismas condiciones de humedad.
- Los ensayos deben realizarse cada 50 m de distancia, tanto en el eje del camino como en la huella externa de cada uno de las pistas de tránsito. Los ensayos pueden realizarse a menor distancia de separación (mayor frecuencia), sin embargo, no se recomienda realizarlos a una distancia mayor a la aquí indicada.
- Los resultados deben registrarse en términos de mm/golpe promedio para cada una de las capas homogéneas identificadas y posteriormente obtener el dato de CBR utilizando una de las correlaciones que se presenta en Tabla 3.4_2.
- Cada uno de los puntos ensayados debe ser georeferenciado en el punto medio de la calzada y se debe tomar una fotografía panorámica del punto ensayado en el medio de la calzada para efectos de poder identificar posteriormente el mismo lugar de evaluación.
- El punto ensayado debe ser referenciado según la distancia (50m, 100m, 150m, etc) respecto al punto 0. Este último debe quedar claramente identificado a través de un letrero u



otro elemento de referencia que pueda ser fácilmente identificado por cualquier persona cada vez que se repita el ensayo.

- Este ensayo debe ser realizado según el siguiente programa, desde el día en que se realiza la construcción (día 0). Días 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 14, 21, 30, 45, 60, 90, 180.

Tabla 3.4_2. Correlación para obtener dato de CBR en función de tipo de material y ensayo

Investigador	Correlación	Numero de datos utilizados	Estudio Realizado en	Material Evaluado
Livneh	$\log(\text{CBR}) = 2.56 - 1.16 \log(\text{DCP})$	76	Laboratorio	Granular y Cohesivo
Livneh et. al.	$\log(\text{CBR}) = 2.45 - 1.12 \log(\text{DCP})$	135	Terreno y Laboratorio	Granular y Cohesivo
Harison	$\log(\text{CBR}) = 2.55 - 1.14 \log(\text{DCP})$	72	Laboratorio	Granular y Cohesivo
Smith and Pratt	$\log(\text{CBR}) = 2.56 - 1.16 \log(\text{DCP})$	Unknown	Terreno	Desconocido
Kleyn	$\log(\text{CBR}) = 2.61 - 1.26 \log(\text{DCP})$	2,000	Laboratorio	Desconocido
NCDOT	$\log(\text{CBR}) = 2.60 - 1.07 \log(\text{DCP})$	Unknown	Terreno y Laboratorio	Granular y Cohesivo
Norwegian Road Research (Ese et al.)	$\log(\text{CBR}) = 2.44 - 1.07 \log(\text{DCP})$	79	Terreno y Laboratorio	ABC
Webster et al.	$\log(\text{CBR}) = 2.46 - 1.12 \log(\text{DCP})$	116	Terreno	Diferentes tipos de suelos
Webster et al.	$\log(\text{CBR}) = 2.54 - 1.00 \log(\text{DCP})$	Unknown	Terreno	Material Clasif CH
Webster et al.	$\log(\text{CBR}) = 3.54 - 2.00 \log(\text{DCP})$	Unknown	Terreno	Material Clasif CL, CBR<10%

Fuente: García G, 2005

De forma complementaria, se podrá utilizar Deflectometría de impacto (FWD) para la evaluación de la capacidad de soporte de la plataforma. Se podrá utilizar tanto el deflectómetro liviano como el deflectómetro normal. Los niveles de carga utilizados deberán ser estudiados y definidos en común acuerdo con el MOPC. En caso de usar LWD (Light Weight Deflectometer) (Figura 3.4_ 11) los ensayos deben realizarse en los mismos días y siguiendo mismo calendario en que se realiza el ensayo DCP. Adicionalmente se requiere utilizar siempre el mismo plato de carga (misma área de contacto).

Como resultado de esta etapa se entregará un informe que incluya todos los resultados, de forma ordenada, con imágenes georreferenciadas de los puntos donde se realizaron los ensayos y con sus respectivas fotografías. Junto al informe se deben entregar los archivos Excel con la totalidad de los resultados registrados durante la realización de los ensayos DCP.



Figura 3.4_11. Fotografía LWD

Por otra parte en cada visita que se realice al tramo de prueba, se deberá registrar con videos georeferenciados la superficie del camino. Este registro debe realizarse colocando la cámara de video en la parte delantera de la camioneta, para registrar imágenes que permitan visualizar el estado de la superficie del camino, como la que se muestra en Figura 3.4_12. El levantamiento debe realizarse por pista, a una velocidad no mayor que 40 kph. El video debe tomarse tanto en el tramo como en los sectores contiguos a este, registrando al menos los 400 m anteriores y posteriores del tramo de prueba. Cada video debe ser almacenado con un código que indique claramente el proyecto específico, la fecha en la que se realizó, además de un comentario indicando punto de referencia para la identificación del video.

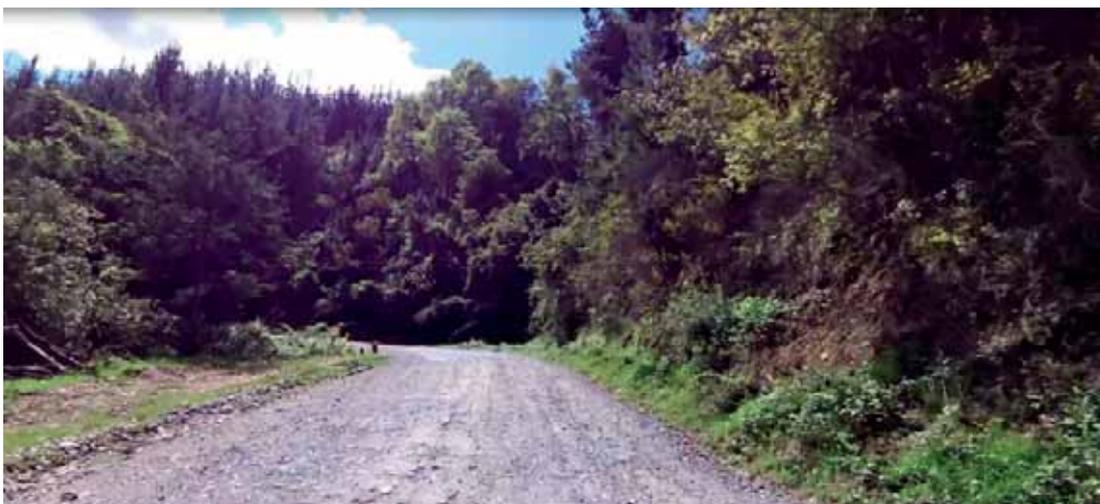


Figura 3.4_12. Muestra video georeferenciado tipo

Por último y como elemento de seguimiento complementario, se recomienda utilizar un equipo para medir IRI (Figura 3.4_13), para el cual se recomienda utilizar un equipo por respuesta (CLASE III). Se requiere realizar el levantamiento antes y después de la intervención, específicamente en los días 1, 30, 60, 90 y 180 luego de la intervención.

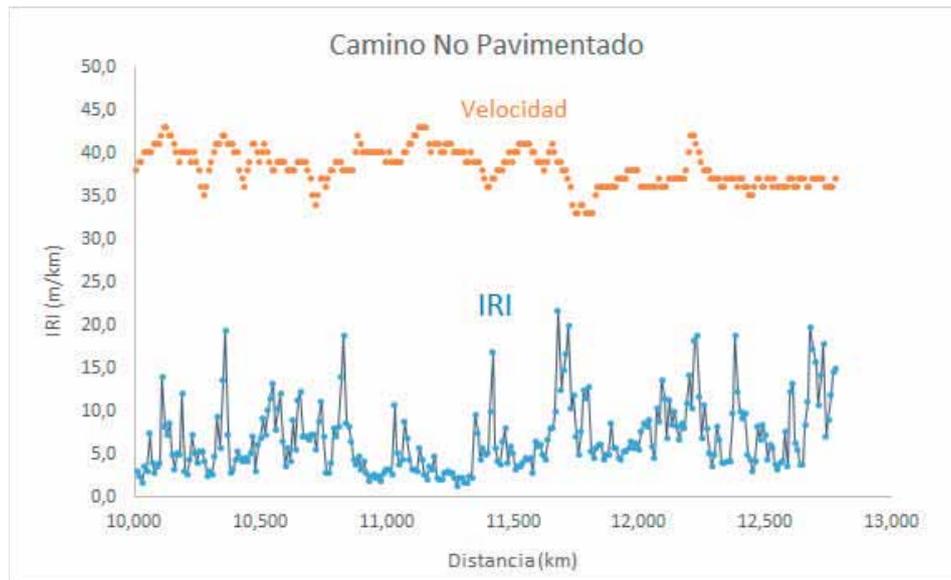


Figura 3.4_13.: Muestra de monitoreo de IRI en camino no pavimentado. Equipo Clase III.

**CAPITULO 3.4.6.****INFORMACION QUE DEBE SER ENTREGADA POR EL PROVEEDOR DEL ADITIVO**

Cada vez que el encargado del proyecto se vea enfrentado a la evaluación de un nuevo aditivo, debe solicitar a la empresa comercializadora una serie de antecedentes referentes a este. Esta información tiene como objetivo conocer, entre otros, las propiedades y bondades del aditivo, el mecanismo de estabilización, los tipos de materiales granulares con el que tiene afinidad, la metodología de diseño de mezclas que se debe llevar a cabo y sus restricciones ambientales.

La información que deben entregar en un informe es, como mínimo, la siguiente:

- a. Hoja de seguridad del aditivo, indicando las propiedades físicas y químicas del aditivo (aditivo en polvo, líquido, emulsión, color, pH, viscosidad, rango de composición o componentes químicos)
- b. Estado legal del producto químico y del proveedor. Indicar si el estabilizador químico es propietario, patentado o franquiciado. Identificación de su fabricante, junto a la relación entre la sustancia química del proveedor y el fabricante.
- c. Informe que respalde el nulo o controlado impacto al medio ambiente. Esta información debe haber sido emitida por un organismo competente, nacional o internacional.
- d. Informe que indique las condiciones de manejo y almacenamiento requeridas (tipo de contenedor, período de almacenamiento, rango de temperaturas aceptables, circulación de aire, entre otras.)
- e. Informe que indique en detalle todos los componentes del estabilizador, sin indicar necesariamente los porcentajes. En este informe se debe declarar si el aditivo posee o no aditivos de tipo cementante (cemento, cal, Cement Kiln Dust, o cualquiera que produzca reacciones puzolánicas)
- f. Informe que explique técnicamente el mecanismo de estabilización con el cual se logra la mejora del material, indicando además las propiedades que es capaz de modificar/mejorar en el material granular tratado (reducción de permeabilidad; control de expansión; repelente de agua; aumento de resistencia, etc). El informe debe indicar por ejemplo si la estabilización se logra a través de intercambio catiónico, reacciones puzolánicas, entre otros. El informe debe indicar además como se abordan posibles restricciones relacionados a la efectividad del mecanismo de estabilización, como por ejemplo cuando hay presencia de sulfatos o de materiales orgánicos que pudiesen afectar el normal desarrollo del proceso de estabilización.
- g. Informe que indique el mecanismo de dilución, además de los insumos y características necesarias.
- h. Informe que indique los detalles del procedimiento de diseño de mezcla, es decir, de todo el proceso que es necesario llevar a cabo para establecer el contenido óptimo de aditivo en un material en particular.



- i. Informe que indique el procedimiento de construcción que se debe llevar a cabo, indicando equipos, metodología de mezclado y homogenización, técnicas de curado (de requerirse), características proceso de compactación, entre otras. El informe debe estar complementado por una EETT que pueda ser entregada a una empresa constructora para llevar a cabo los trabajos sin contratiempos.
- j. Documento referencial con antecedentes de proyectos ya realizados con este aditivo.



CAPITULO 3.4.7. | REFERENCIAS

- 1) USDA, 2009. Stabilization Selection Guide for Aggregate and Native Surfaced Low Volume Roads.
- 2) New Procedure for Selecting Chemical Treatments for Unpaved Roads. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2433, Transportation Research Board of the National Academies, Washington D.C., 2014, pp. 87–99.
- 3) Halles F, Thenoux G y González A, 2013. Stiffness Evolution of Granular Materials Stabilized with Foamed Bitumen and Cement. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, N° Vol. 2363, Transportation Research Board of the National Academies, Washington D.C. pp. 105-112
- 4) Theyse H.L, De Berr M. and Rust F.C, 1996. Overview of South African Mechanistic Pavement Design Method. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, N° 1539, Transportation Research Board of the National Academies, Washington D.C.
- 5) Little D, 1995. Stabilization of Pavement Subgrades and Base Courses with Lime.
- 6) Asphalt Academy, 2009. TG2 - Technical Guideline: Bitumen Stabilised Materials. A Guideline for the Design and Construction of Bitumen Emulsion and Foamed Bitumen Stabilised Materials.
- 7) Texas DOT, 2005. Guidelines for Modifications and Stabilization of Soils and Base for Use in Pavement Structures.
- 8) FHWA, 1979. Soil Stabilization in Pavement Structures, A User’s Manual.
- 9) Paige-Green P., 2015. An Alternative Philosophy on the Deterioration and Design of Low Volumen Roads.
- 10) Asociación Nacional Técnica de Estabilización de Suelos y Reciclado de Firmes, 2008. Manual de Estabilización de Suelos con Cemento o Cal.
- 11) Portland Cement Association, 2008. Guide to Cement Modified Soils
- 12) TRB, 2005. Evaluation of Chemical Stabilizers. State of the Practice Report. Circular E-C086
- 13) National Lime Association, 2004. Lime-Treated Soil Construction Manual. Lime Stabilization & Lime Modification
- 14) TRB, 2009. NCHRP 144: Recommended Practice for Stabilization of Subgrade Soils and Base Materials. NCHRP Project 20-07.



CAPITULO 3.4.8. | ANEXOS

- Anexo A.** Métodos, Normas y Ensayos para suelos, materiales granulares y materiales estabilizados
- Anexo B.** Antecedentes Aditivos Tradicionales
- Anexo C.** Antecedentes Aditivos No-Tradicionales
- Anexo D.** Metodología Análisis Estructural y Definición Espesores Mínimos Estructura



ANEXO A. MÉTODOS, NORMAS Y ENSAYOS PARA SUELOS, MATERIALES GRANULARES Y MATERIALES ESTABILIZADOS

En este Anexo se presentan los ensayos y normas a llevar a cabo según el objetivo que se busca alcanzar.

Ensayo	Norma 1	Norma 2	Propósito / Objetivo
Granulometría	AASHTO T88	ASTM D422	Determinar propiedades de los materiales granulares. Se utilizan para clasificación de los materiales
Límite Líquido	AASHTO T89		
Límite Plástico e Índice de Plasticidad	AASHTO T90	ASTM D4318	
Clasificación de Suelos (USCS)		ASTM D2487-98	
Densidad - Proctor Modificado	AASHTO T180	ASTM D 1557	Determinar densidad máxima de los materiales
CBR (California Bearing Ratio)	AASHTO T193	ASTM 1883	Determinar capacidad de soporte
Resistencia a la Compresión Simple (Cemento)	AASHTO T208	ASTM D1633	Determinar resistencia de los materiales estabilizados con Cemento
Resistencia a la Compresión Simple (Cal)		ASTM D5102	Determinar resistencia de los materiales estabilizados con Cal
Resistencia a la Tracción Indirecta	AASHTO T322		Determinar resistencia materiales estabilizados con asfalto
Módulo Resiliente	AASHTO T292 AASHTO T307		Determinar resistencia de los materiales granulares
Resistencia a la flexión		ASTM D1635	Determinar resistencia materiales cementados
Contenido Orgánico	AASHTO T194		Determinar componentes orgánicos en suelos
Valor de pH		ASTM D4972	Determinación del pH de los suelos
Retracción Potencial	AASHTO T92	ASTM D559	Determinar coeficiente de retracción de los materiales
Expansión Potencial	AASHTO T258		Determinar coeficiente de expansión de suelos
Contenido e Sulfatos	AASHTO T290		Determinar contenido de sulfatos en suelos



ANEXO B. ANTECEDENTES ADITIVOS TRADICIONALES

Los aditivos considerados tradicionales son Asfalto, Cemento y Cal. El mecanismo de estabilización que provee el Asfalto es relativamente simple y se basa directamente en las propiedades adhesivas que este provee. Existen ciertas restricciones asociadas al tipo de material granular y en general no se recomienda su uso cuando los materiales finos son muy plásticos.

En el caso del Cemento y la Cal, el mecanismo de estabilización se basa en el intercambio catiónico y las reacciones puzolánicas. El intercambio catiónico está asociado a una disminución de la plasticidad de los suelos, mientras que la reacción puzolánica es la responsable del aumento significativo de resistencia. La ocurrencia de uno o ambos sucesos depende de la presencia de ciertos componentes tanto en el aditivo como en los materiales a estabilizar. En este último caso existen además una serie de restricciones que han sido estudiadas en detalle y que están asociadas a la presencia de sulfatos, componentes orgánicos, sales, entre otros.

En algunos casos, el objetivo de la incorporación de aditivos corresponde solo a la “modificación” de ciertas propiedades, a diferencia de los casos en que lo que se busca es la estabilización de ciertas propiedades en el largo plazo. Ambas se diferencian en la cantidad de aditivo a utilizar.

Notas importantes Curado y Acondicionamiento de Probetas.

- a. Curado de probetas: Dado que la adquisición de resistencia de las mezclas estabilizadas con Cal en general se logra en el mediano o largo plazo, es necesario que el procedimiento de curado y acondicionamiento de las mezclas sea realizado correctamente. Para el caso de las mezclas estabilizadas con Cal, la norma recomienda que el proceso de curado (acelerado) se realice colocando las probetas en un horno a 40 °C por 7 días (ASTM D5102)
- b. Acondicionamiento de probetas: La resistencia de las probetas estabilizadas varía de forma significativa según el contenido de humedad de estas al momento del ensayo. Por lo tanto para efecto de evaluar correctamente el aporte de la Cal el contenido de humedad durante el ensayo debe ser equivalente en las probetas no tratadas y en las probetas estabilizadas.

A continuación se discute brevemente los principales aspectos de los procesos de estabilización con cada uno de estos tres aditivos y se presenta el protocolo de evaluación a nivel de laboratorio.



- **ESTABILIZACION CON CAL**

El tratamiento con cal de suelos arcillosos ayuda a reducir la plasticidad (permitiendo que el suelo sea más trabajable), aumentar la densidad, controlar hinchamiento y mejorar impermeabilidad otorgando mayor estabilidad bajo agua. La estabilización con Cal en general no permite la obtención de valores altos de resistencia inicial, sin embargo permite que esta mejore en el largo plazo, pudiendo transformar un suelo de baja resistencia en un suelo con capacidad de soporte suficiente para ser utilizado como suelo de fundación y en algunos casos como capa estructural (dependiendo del tipo de material granular, clima, entre otros factores importantes). En general la Cal no se utiliza para estabilizar capas de material que estarán expuestas al tránsito, debido a la baja capacidad de resistencia a la abrasión que poseen.

El primer paso del proceso de Estabilización con Cal, corresponde al denominado Intercambio Catiónico y posterior aglomeración de las partículas de la arcilla. Básicamente lo que sucede es que las moléculas de calcio reemplazan a las moléculas de sodio (Na) presentes en la arcilla. Este intercambio favorece la pérdida de humedad y la reestructuración de las moléculas de la arcilla logrando una nueva arcilla con menor plasticidad, lo cual en sí ya significa un aumento de densidad y resistencia. Posterior a este proceso se produce la denominada Reacción Puzolánica. El calcio al entrar en contacto con las arcillas, que poseen sílice y/o aluminio, producen los componentes denominados Silicatos de Calcio y Aluminatos de Calcio, los cuales son los responsables de la generación de componentes cementantes. Este proceso puede tomar meses en materializarse, razón por la cual la evaluación de los materiales tratados con Cal debe ser adecuadamente analizado.

Para efectos de garantizar que la estabilización de largo efectivamente se produzca, se debe realizar un ensayo denominado “Consumo Inicial de Cal”, el cual establece el contenido mínimo del aditivo a utilizar si lo que quiere lograrse es el aumento permanente de la resistencia en el tiempo.

Respecto a las restricciones en el uso de la Cal, la presencia de Sulfatos o Materia Orgánica en los materiales a tratar o en el agua que se utiliza en el proceso de mezcla, puede producir efectos negativos tales como la expansión de los materiales tratados o la pérdida de resistencia en el tiempo.

PROTOCOLO DETALLADO PARA EVALUACION MEZCLAS ESTABILIZADAS CON CAL

Previo a la realización de estas actividades, se requiere llevar a cabo los Pasos 1, 2 y 3 del Protocolo de Evaluación de Aditivos Tradicionales.

Actividad 1: Definir el contenido mínimo de Cal, utilizando el ensayo de Consumo Inicial de Cal (ICL) (Eades and Grimm pH test) especificado en la norma ASTM D6276. Usar el contenido de cal definido en este ensayo para iniciar los ensayos de Resistencia en Laboratorio.

Actividad 2: Chequear el contenido de sulfatos en los suelos/materiales a estabilizar utilizando ensayo de la norma AASHTO T290. Si contenido de sulfatos es menor que 0,3% (3000 ppm) entonces se puede proceder normalmente con los ensayos de laboratorio de resistencia o trabajabilidad. Si el contenido es mayor que 0,3%, entonces se deben realizar una serie de acciones previas, las cuales se detallan en documento “Report to Support the Development of Stabilizing of Sulfate Rich Subgrade Soils and To Support the Revision of AASHTO Test Method T290”.



Actividad 3: Chequear presencia de suelos con componentes orgánicos a través del método ASTM D2974. En todos los casos se recomienda que los suelos a estabilizar no posean más de 1 a 2% de componentes orgánicos. En caso de que esto suceda se recomienda reemplazar el material por otro compatible.

Una vez realizados estos chequeos, continuar con protocolo de evaluación de aditivos tradicionales: Pasos 4, 5 y 6; preparación y ensayos de probetas en laboratorio, y chequeo de propiedades de los materiales tratados.

- **ESTABILIZACION CON CEMENTO**

La incorporación de cemento a los materiales granulares ayuda a aumentar la resistencia, controlar el hinchamiento potencial, e incrementar la durabilidad de los materiales tratados. El proceso de adquisición de resistencia es similar al que se produce en la reacción puzolánica, pero ocurre rápidamente y los materiales tratados ya adquieren resistencia a las pocas horas de incorporado el aditivo.

Salvo casos puntuales, la estabilización con Cemento no se utiliza para estabilizar capas de material que estarán expuestas al tránsito, debido a la baja capacidad de resistencia a la abrasión que poseen.

Esta guía está enfocada a la estabilización con cemento, es decir, al mejoramiento de las propiedades del material granular/suelo estabilizado, lo que es distinto a un suelo cementado. La diferencia radica en el contenido de cemento a incorporar, el cual se recomienda no supere el 3% en función del peso seco del material a estabilizar. Los materiales “cementados” usan contenidos en el rango de 5 a 7%. Estos último transforman al material granular/suelo en un material muy rígido y con otros problemas tales como las grietas por retracción.

El proceso de curado de los materiales estabilizados con cemento debe realizarse cuidadosamente y se debe garantizar que la capa tratada se mantenga húmeda al menos durante los primeros 7 días luego del proceso de construcción.

Al igual que en la estabilización con Cal, especial cuidado debe tenerse cuando se está en presencia de materiales con sulfatos o componentes orgánicos. En estos casos se deben llevar a cabo los mismos protocolos de control que los indicados para la estabilización con Cal.

Asimismo, al igual que en la estabilización con Cal, para la correcta evaluación del aporte que produce el cemento el proceso de curado y acondicionamiento de las probetas debe ser correctamente llevado a cabo.

PROTOCOLO DETALLADO PARA EVALUACION MEZCLAS ESTABILIZADAS CON CEMENTO

Previo a la realización de estas actividades, se requiere llevar a cabo los Pasos 1, 2 y 3 del Protocolo de Evaluación de Aditivos Tradicionales.

Actividad 1: Chequear el contenido de sulfatos en los suelos/materiales a estabilizar utilizando ensayo de la norma AASHTO T290. Si contenido de sulfatos es menor que 0,3% (3000 ppm) entonces se puede proceder normalmente con los ensayos de laboratorio de resistencia o trabajabilidad. Si el contenido es mayor que 0,3%, entonces se deben realizar una serie de acciones previas, las cuales se detallan en documento “Report to Support the Development of Stabilizing of Sulfate Rich Subgrade Soils and To Support the Revision of AASHTO Test Method T290”.



Actividad 2: Chequear presencia de suelos con componentes orgánicos a través del método ASTM D2974. En todos los casos se recomienda que los suelos a estabilizar no posean más de 1 a 2% de componentes orgánicos. En caso de que esto suceda se recomienda reemplazar el material por otro compatible.

Actividad 3: Chequear presencia de suelos con componentes orgánicos a través del método ASTM D2974. En todos los casos se recomienda que los suelos a estabilizar no posean más de 1 a 2% de componentes orgánicos. En caso de que esto suceda se recomienda reemplazar el material por otro compatible.

Una vez realizados estos chequeos, continuar con Protocolo de Evaluación de Aditivos Tradicionales: Pasos 4, 5 y 6; preparación y ensayos de probetas en laboratorio, y chequeo de propiedades de los materiales tratados.

- **ESTABILIZACION CON ASFALTO**

Las propiedades adhesivas del asfalto permiten mejorar la impermeabilización de los materiales tratados, aumentando además la resistencia de estos. La estabilización con asfalto se puede realizar a través de dos técnicas: Asfalto Espumado o Emulsión Asfáltica.

En esta guía se permite la utilización de asfalto en materiales/suelos con $IP < 6$; y en general no es recomendado para solucionar problemas asociados a altos contenidos de humedad y plasticidad. No obstante lo anterior, cuando se está en presencia de un material con $IP > 6$, es posible modificarlos a través de la incorporación de Cal, hasta lograr los niveles de plasticidad exigidos.

Por otro lado, aunque en esta guía se permite la utilización de asfalto en suelos con altos contenidos de finos, normalmente este aditivo es utilizado en arenas y suelos bien graduados con bajos contenidos de finos (menos de 20% de finos pasante en malla #200).

Los valores de contenido de asfalto para el proceso de estabilización, pueden variar entre 2 y 6% en relación al peso seco del material tratado. Para los ensayos de laboratorio, en el caso de utilizar emulsión asfáltica, se recomienda utilizar contenidos iniciales entre 3 y 4%. En el caso de utilizar asfalto en forma de espuma (asfalto espumado), se recomienda utilizar contenidos iniciales entre 2 y 3%.



ANEXO C. ANTECEDENTES ADITIVOS NO-TRADICIONALES

En esta sección se presentan antecedentes disponibles respecto a las distintas familias de Aditivos No-Tradicionales:

- Higroscópicos (Absorbentes de Humedad)
- Aditivos arcillosos
- Productos orgánicos derivados del petróleo
- Productos orgánicos (No derivados del petróleo)
- Emulsiones Electrolíticas
- Emulsiones de Polímeros Sintéticos
- Emulsiones Enzimáticas
- Nanopartículas

Para cada uno de estos aditivos a continuación se presenta información general de cada uno de ellos, junto a antecedentes referentes al Mecanismo de Estabilización, Dosis, Aplicación, Desempeño Esperado y Restricciones.



- **C-1. Aditivos Higroscópicos**

A. Información General

Llamados también “sales”, a este grupo pertenecen los aditivos del Tipo Cloruro de Sodio, Cloruro de Magnesio, Cloruro de Sodio. Se utilizan tanto para la mitigación de polvo como para estabilización. En ambos casos su uso aplicación se realiza en la carpeta de rodado de la estructura del camino.

Entre los nombres comerciales más comunes, se encuentran: DowFlake, RoadMaster, Dust-Off, Bischofita, RoadSalt, etc.

B. Mecanismo de Estabilización

La principal propiedad de estos aditivos es su capacidad de absorber humedad del medio ambiente (higroscopicidad) junto a la capacidad que tienen de disminuir la tasa de evaporación (Delicuescencia). La incorporación de este aditivo a la matriz granular permite que estos se mantengan “aglomerados” gracias a la presencia de moléculas de agua en la matriz. La incorporación de estos aditivos no aumenta significativamente la capacidad de soporte de los materiales, sin embargo mejora la trabajabilidad y permite el aumento de la densidad, lo cual si permite mejorar el desempeño de los materiales durante su vida útil.

Al no aumentar la resistencia o capacidad de soporte de los materiales, es condición necesaria que los materiales no-tratados por si solos cumplan con los requerimientos de capacidad de soporte definidos para la estructura del camino. Además se debe restringir el máximo porcentaje de finos a valores del orden de 15% para garantizar una adecuada textura en la carpeta de rodado,

La capacidad higroscópica de estos aditivos es distinta según el tipo de aditivo, lo cual afecta el desempeño de estos según las condiciones medioambientales. En particular mientras el Cloruro de Sodio tiene una humedad de equilibrio del orden de 78%, el Cloruro de Calcio tiene una humedad de equilibrio en el rango de 30 a 35%. Este punto de equilibrio define el tango en el cual el aditivo comienza a absorber humedad del medio ambiente, además de la tasa de absorción.

La dosis para estabilización que se utilizan están en el rango de 3 a 5% de aditivo (en peso del producto sin diluir) en función del peso del material granular compactado seco. La dosis a utilizar depende de una serie de variables entre las que destacan la humedad medioambiente del lugar donde se emplaza el proyecto (rango y promedio), además del contenido de finos y su plasticidad. En general se recomienda que los materiales a tratar posean un índice de plasticidad menor a 10 e incluso menor cuando las condiciones de operación del camino son más exigentes (presencia de curvas, velocidad de tránsito alta, entre otros)

No se recomienda su uso en sectores donde la geometría del proyecto es muy sinuosa ni en zonas con altas pendientes, salvo condiciones muy particulares en la que un estudio de ingeniería valide objetivamente su forma de uso, dosificación y restricciones.

C. Desempeño

El desempeño de estas soluciones dependerá del tráfico, las condiciones medioambientales y las propiedades del material a estabilizar. Estos aditivos son muy solubles en agua, por lo tanto



la lluvia aumenta significativamente la tasa de deterioro de estos. No obstante, aplicaciones superficiales de este mismo aditivo en forma de sello, permiten recuperar de forma rápida y efectiva el desempeño de la capa estabilizada.

El uso de estos aditivos como estabilización puede garantizar un buen desempeño en el rango de 1 año, con mantenimiento rutinario mínimo, siempre y cuando se cumplan las consideraciones aquí indicadas.

En caso que los materiales tratados sean predominantemente finos y la superficie de la capa tratada posea una baja textura, podrían generarse condiciones de resbalamiento en presencia de humedad. Por lo tanto, en el proceso de diseño de la mezcla se debe procurar lograr una granulometría que garantice una textura superficial con un coeficiente de roce mínimo para los vehículos.

- **C-2. Aditivos Arcillosos**

A. Información General

A este grupo pertenecen los siguientes aditivos: Arcilla; Bentonita; Montmorilonita. Estos aditivos corresponden a suelos naturales compuestos por minerales de arcilla, principalmente Montmorilonita.

Entre los nombres comerciales más comunes, se encuentran: Pelbron; Stabilite; VolClay. (Nombres comerciales en EEUU)

B. Mecanismo de Estabilización

La principal propiedad de estos aditivos es la cohesión, lo cual permite aglomerar naturalmente a los materiales granulares que carecen de esta propiedad. Este aditivo se adhiere a las partículas de la matriz fina del material a tratar, generando una matriz cohesiva que es capaz de mantener aglomerados los materiales granulares. Estos aditivos además tienen una alta afinidad con el agua, razón por la cual el exceso de dosis producirá problemas de estabilidad por la alta presencia de humedad.

Las dosis de estabilización que se utilizan están en el rango de 3 a 10% de aditivo (en peso del producto) en función del peso del material granular compactado seco. La dosis a utilizar depende de una serie de variables entre las que destacan la humedad medioambiente del lugar donde se emplaza el proyecto (rango y promedio), además del contenido de finos del material a tratar.

La efectividad de estos aditivos se ve afectada por la mineralogía de los materiales a tratar. Mientras que la Montmorillonita, la cual posee carga negativa, se adherirá correctamente a los materiales provenientes de piedra caliza, será repelida por los agregados ígneos que también poseen carga negativa.

C. Desempeño

La incorporación de estos aditivos no produce un aumento significativo de resistencia salvo cuando las condiciones del entorno son secas, ya que en ese ambiente el material pierde humedad y al contraerse permite el aumento de la cohesión en la matriz. Este aumento de resistencia es relativo y desaparece rápidamente cuando las condiciones de humedad vuelven a la normalidad.



La incorporación de estos aditivos permite mejorar la resistencia a la abrasión, no obstante es un mejoramiento marginal que no elimina la necesidad de mantener periódicamente la superficie. Asimismo, en caso la superficie quede expuesta al tránsito, en condiciones secas el tránsito igualmente generará emisiones de polvo lo cual se puede minimizar a través de la utilización de un aditivo supresor de polvo.

La vida útil de estas capas estabilizadas dependerá directamente de las propiedades y capacidad de soporte del material granular a tratar, la cual quedará supeditada al tipo y volumen de tránsito del proyecto.

- **C-3. Productos Orgánicos Derivados del Petróleo**

A. Información General

A este grupo pertenecen los siguientes aditivos: emulsiones asfálticas; adhesivos bituminosos; asfaltos cortados (en retirada debido a su impacto medioambiental); entre otros.

Entre los nombres comerciales más comunes, se encuentran: CSS-1; Fuel Oil; PennSuppress; Road Pro.

B. Mecanismo de Estabilización

Estos aditivos poseen por sí mismos propiedades adherentes. La incorporación de estos aditivos al material granular permite que las partículas que componen la matriz se adhieran entre sí, mejorando la resistencia y disminuyendo la afinidad al agua. La capacidad de adherencia de estos aditivos es de origen, es decir, no depende de otros materiales o procesos químicos, lo cual garantiza que las propiedades adherentes del aditivo se mantengan estables en el tiempo.

Estos aditivos funcionan muy bien con una gran cantidad de materiales granulares y suelos, en particular con un porcentaje de finos menor a 25% y con índices de plasticidad menor a 10. Las dosis utilizadas son muy amplias y dependen de las propiedades específicas del material granular a tratar.

C. Desempeño

El desempeño de los materiales tratados con estos aditivos es variable y dependerá no solo del tipo de aditivo utilizado sino también de las propiedades de los materiales a ser tratados y de las condiciones de operación del proyecto.

La incorporación de estos aditivos mejora sustancialmente la resistencia y vida útil de los materiales tratados, la cual puede superar los 5 años considerando mantenimiento periódico del tramo tratado. En general se considera que la incorporación de estos aditivos permite la reducción de la pérdida de agregado en un 50%.



- **C-4. Productos Orgánicos (No derivados del petróleo)**

A. Información General

A este grupo pertenecen los aditivos derivados de plantas y árboles que incluyen productos en base de glicerina, lignosulfonatos, productos basados en melaza y azúcar, aceites vegetales (soja, linaza o aceite de palma) y resinas de brea. Todos estos componentes poseen propiedades adhesivas propias, que no dependen de reacciones químicas adicionales.

Entre los nombres comerciales más comunes, se encuentran: Dustac; Polybinder; Dustbinder; TerraPave, entre otros.

B. Mecanismo de Estabilización

Los componentes de estos aditivos poseen propiedades adhesivas naturales que permiten la aglomeración de los materiales granulares y suelos cuando son mezclados con estos. En el caso de los Lignosulfonatos, estos tienen además propiedades higroscópicas que permiten los materiales tratados permanezcan húmedos y de esta forma aglomerados debido a la presencia de moléculas de agua.

Pueden ser utilizados con una amplia variedad de suelos, con contenidos de finos entre 8 y 30%, y con índices de plasticidad entre 8 y 20. Estos aditivos no funcionan correctamente en materiales arenosos, ya que los suelos permeables favorecen la dilución de estos componentes en presencia de agua.

C. Desempeño

El desempeño de los materiales tratados con estos aditivos es muy variable, dependiendo de las propiedades de los materiales no-tratados y de las condiciones de operación (tránsito y clima). La resistencia de los suelos tratados con estos aditivos puede llegar a duplicarse en estado seco, pero en condiciones de humedad, puede darse el caso en que el aumento de resistencia sea nula.

En general la vida útil de las capas tratadas con estos aditivos es menor a 3 años, considerando un plan adecuado de mantenimiento que debe incluir aplicaciones periódicas de riegos de conservación en la superficie utilizando una solución con aditivos.

En caso que los materiales tratados sean predominantemente finos y la superficie de la capa tratada posea una baja textura, podrían generarse condiciones de resbalamiento en presencia de humedad. Por lo tanto, en el proceso de diseño de la mezcla se debe procurar lograr una granulometría que garantice una textura superficial con un coeficiente de roce mínimo para los vehículos.



- **C-5. Emulsiones Electrolíticas**

A. Información General

A este grupo pertenecen los siguientes aditivos y sus derivados: Estabilizadores Electrolíticos; Estabilizadores Iónicos; Estabilizadores Electroquímicos.

Entre los nombres comerciales más comunes, se encuentran: CBR Plus; Road Bond EN-1; Terra-bond; TerraStone.

B. Mecanismo de Estabilización

Las emulsiones electrolíticas contienen compuestos químicos que modifican las propiedades electroquímicas de la superficie de las moléculas de los suelos. Esta modificación permite que los materiales tengan una carga eléctrica específica y en general se utilizan para que las moléculas de agua que están dentro de la estructura del suelo sean reemplazadas por otras moléculas, lo cual permite que el suelo tratado pierda su afinidad por el agua.

Muchas de las emulsiones electrolíticas son patentadas y de propiedad exclusiva, por lo que la composición exacta de estos aditivos junto al mecanismo de estabilización no es información que está disponibles públicamente y de esta forma resulta difícil agrupar o clasificar las diversas emulsiones con precisión.

No obstante lo anterior, en términos generales estos aditivos son utilizados en suelos con mínimo 10% de material fino y un índice de plasticidad mínimo de 10.

C. Desempeño

Altas dosis de estos compuestos en materiales específicos, permiten la obtención de una capa de material de mediana resistencia que en ciertas condiciones puede utilizarse como capa superficial de un camino. De acuerdo a la literatura, en general permiten aumentar la resistencia entre un 30% y 50% respecto del material no-tratado (en función del parámetro CBR). Asimismo, correctamente utilizados, permiten que la vida útil pueda llegar a ser de 3 años, considerando mantenimiento rutinario cada 6 meses.

No obstante, el rendimiento y la aplicabilidad de las emulsiones electrolíticas, además de las propiedades y desempeño de los materiales tratados, puede variar de un producto a otro. Además, los productos son frecuentemente reformulados y por lo tanto es posible que los estudios de casos específicos ya no sean representativos de un producto actual. De esta forma, se recomienda que la selección de una emulsión electrolítica sea siempre acompañada de pruebas específicas para cada uno de los materiales utilizados.



- **C-6. Emulsiones de Polímeros Sintéticos**

A. Información General

A este grupo pertenecen los siguientes aditivos: Acrilatos (homopolímeros y copolímeros); acetatos (homopolímeros y copolímeros) y vinil acrílico.

Las emulsiones de polímeros sintéticos están compuestas principalmente de polímeros de acrílico o de acetato, que son especialmente diseñados y producidos para su uso como estabilizador de suelos y materiales granulares. Estos aditivos también son obtenidos como subproductos de las industrias de pinturas y adhesivos.

Entre los nombres comerciales más comunes, se encuentran: SoilSement, Terrabond, Earthbound, Polypavement, PX-300

B. Mecanismo de Estabilización

Los polímeros que son parte de la estructura molecular de estos aditivos provocan que luego de la mezcla de estos con el material no-tratado, se forme un enlace químico entre las partículas del suelo y las partículas del aditivo, creando un material denso y resistente a la humedad.

En general, las emulsiones poliméricas se pueden usar en la mayoría de los suelos. Sin embargo, ciertos aditivos son más efectivos que otros el tipo específico de material. De acuerdo a la literatura, estos aditivos pueden utilizarse en muchos tipos de materiales incluyendo las arenas, las arcillas y los limos, y en general funcionan mejor en arenas limosas con contenidos de finos entre 5 y 20%.

C. Desempeño

La incorporación de estos aditivos a materiales granulares y suelos permite aumentar la resistencia de estos hasta un 200%. La resistencia, en términos del ensayo de compresión simple, de suelos tratados con estos aditivos puede llegar a rangos entre 50 y 150 Kg/cm².

De acuerdo a la experiencia disponible, una estructura de un camino correctamente diseñada y mantenida, que posea una capa de rodado con material estabilizado con estos aditivos puede tener una vida útil superior a 5 años. Asimismo se indica que, correctamente diseñados, este tipo de materiales estabilizados forma una capa resistente a la abrasión y que es capaz de proveer una textura que no se ve significativamente afectada en presencia de lluvia y que por lo tanto es capaz de mantener una adecuada resistencia al deslizamiento.



- **C-7. Emulsiones Enzimáticas**

A. Información General

A este grupo pertenecen los aditivos del tipo Emulsiones Enzimáticas y las Enzimas. Estos aditivos se producen a partir de materiales naturales o a partir de subproductos de la industria de procesamiento de alimentos.

Entre los nombres comerciales más comunes, se encuentran: Perma-Zyme; Terrazyme; EMC Squared, entre otros.

B. Mecanismo de Estabilización

Las emulsiones enzimáticas contienen enzimas (moléculas de proteínas) que reaccionan con las moléculas del suelo para formar un enlace cementante, el cual estabiliza la estructura del suelo y reduce la afinidad de estos por el agua.

Las emulsiones enzimáticas funcionan en una variedad de suelos siempre y cuando haya una cantidad mínima de partículas de arcilla. La literatura disponible indica que el contenido mínimo de partículas de arcilla debe ser 10% y el índice de plasticidad de estas debe ser de mínimo 8. Asimismo se indica que estos aditivos funcionan mejor en materiales con porcentajes de arcilla entre 12% - 24% y con un índice de plasticidad entre 8 y 35.

C. Desempeño

La incorporación de estos aditivos a materiales granulares y suelos permite aumentar la resistencia de estos entre un 30% y 300%.

Siempre y cuando los materiales no tratados cumplan con requerimientos mínimos de resistencia y composición, la incorporación de estos aditivos permite lograr una capa de rodado resistente que puede utilizarse como carpeta de rodado.

De acuerdo a la experiencia disponible, se indica que una estructura de un camino correctamente diseñada y mantenida, que posea una capa de rodado con material estabilizado con estos aditivos puede tener una vida útil de hasta 5 años. Durante el período de mantenimiento es posible que se requiera aplicar riegos de una solución con estos aditivos para rejuvenecer la superficie.

- **C-8. Nanopartículas**

A. Información General

Los aditivos con compuestos nanotecnológicos, tienen partículas inferiores a los 100 nanómetros y por lo general pertenecen a la familia de los Acrilatos y los Silanos.

Este tipo de aditivos iónicos, trabaja a nivel molecular de la partícula de suelo, generando cambios en la superficie y concediéndoles propiedades hidrófobas en forma permanente. Este tipo de aditivos mantiene la transpirabilidad del material tratado y mejora la adherencia con materiales bituminosos.



Estos aditivos al contener sílice en su composición, pueden ser aplicados en cualquier tipo de suelos, utilizando dosajes previamente comprobados en laboratorio que van de 0.3 a 1.5 kg/m³ de suelo compactado.

Los aditivos con nanopartículas estabilizadores de suelos más comunes, son los Organosilanos y los Nanocopolímeros, que se encuentran en el mercado con el nombre comercial de Terrasil y Zycobond.

B. Mecanismo de Estabilización

Los nanomateriales estabilizadores de suelos, trabajan sobre la superficie de las partículas del suelo, uniéndose a los radicales libres de hidrogeno de la superficie, impidiendo que las moléculas de agua sean absorbidas por el suelo generando un alto grado de impermeabilización de la misma. Esta impermeabilización impide la absorción de agua disminuyendo la susceptibilidad del mismo y reduciendo los índices de hinchamiento y absorción en los suelos.

Los cambios químicos sobre las superficies permiten una mayor densificación del suelo, aumentando los parámetros de resistencia o capacidad portante de los suelos tratados.

Las uniones generadas por los nanomateriales de la familia de los Silanos, son flexibles y otorgan resiliencia al material estabilizado; así mismo el uso de nanomateriales acrílicos, permite controlar la emisión de polvo del material tratado, actuando como un aglomerante de las partículas finas.

Con los nanomateriales se pueden realizar estabilizaciones mixtas, incorporando cantidades mínimas de cemento (1% al 3%), si las exigencias de resistencia lo ameritan.

C. Desempeño

Los nanomateriales permiten aumentar la capacidad portante de los suelos tratados en un 200% a su capacidad portante inicial. La cantidad de aditivos a colocar dependerá de los parámetros de resistencia que se requieran en las especificaciones técnicas.

Las estructuras de un camino correctamente diseñado con nanomateriales, es siempre más económica y duradera en el tiempo que las estructuras convencionales, ya que las estructuras que se estabilizan con esta tecnología quedan protegidas de las afectaciones climáticas.

Para poder tener un buen desempeño de un suelo estabilizado, tanto en laboratorio como en campo, se deben seguir los protocolos señalados por el fabricante de esta tecnología.

De acuerdo a la experiencia disponible, una estructura de un camino correctamente diseñada y mantenida, que posea una capa de rodado con material estabilizado con estos aditivos puede tener una vida útil superior a 5 años. Asimismo se indica que, correctamente diseñados, este tipo de materiales estabilizados forma una capa resistente a la abrasión y que es capaz de proveer una textura que no se ve significativamente afectada en presencia de lluvia y que por lo tanto es capaz de mantener una adecuada rugosidad para la circulación de los vehículos. Así mismo la capa de rodamiento tratada con estos materiales presenta una disminución sustancial de la emisión de polvo en temporada seca, mejorando la visibilidad del camino y mejorando las condiciones de salubridad de la poblaciones vecinas.



ANEXO D. METODOLOGÍA ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y DEFINICIÓN ESPEORES MÍNIMOS

El siguiente documento define el procedimiento que debe llevarse a cabo para el dimensionamiento referencial de caminos de Bajo Volumen de Tránsito con capas estabilizadas. Este procedimiento se apoya en una planilla Excel que posee una rutina computacional que permite definir los espesores mínimos recomendados para cada una de las capas de la estructura en función de las características del tráfico, la capacidad de soporte representativa de la subrasante y la resistencia de los materiales de la estructura.

En la planilla, los campos que se deben completar tienen fondo naranja, tal como se muestra en la siguiente figura 3.4_14.



Figura 3.4_14. Casillas de Ingreso de Datos

Ingreso de Datos del Proyecto

El primer paso consiste en completar los datos referenciales del proyecto según se muestra en la siguiente Figura 3.4_15.

DATOS DEL PROYECTO			
PROYECTO	Camino BVT Prueba	NOMBRE	Ingeniero 1
FECHA	17-04-2017		

Figura 3.4_15. Datos del Proyecto

Caracterización de la Situación Local

En esta sección se debe ingresar el Nivel de Carga representativo de los camiones pesados, utilizando el parámetro de carga por rueda en KN, además de ingresar el valor de soporte representativo de la subrasante utilizando el parámetro CBR.

CARACTERIZACIÓN DE LA SITUACIÓN LOCAL		
Carga por Rueda	32,0 KN	INGRESO DE DATOS
CBR Subrasante	3,0 %	

Figura 3.4_16. Carga de Tránsito Representativa y Capacidad de Soporte Subrasante

El espectro cargas está pre-configurado en la planilla, según se muestra en la siguiente Tabla.

Tabla 3.4_3. Cargas Pre-Configuradas.

Carga (KN)	Valor equivalente (Ton)
20	2,0
27	2,7
35	3,5

Ingreso de la Estructura de Pavimentos

En esta sección, se debe ingresar el espesor inicial y la capacidad de soporte de los materiales de cada una de las capas de la estructura.

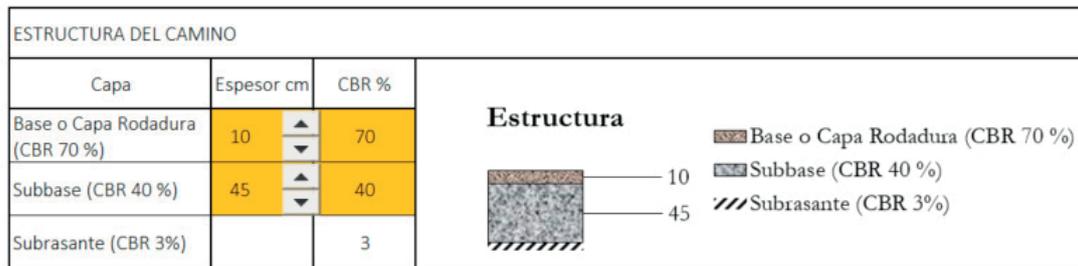
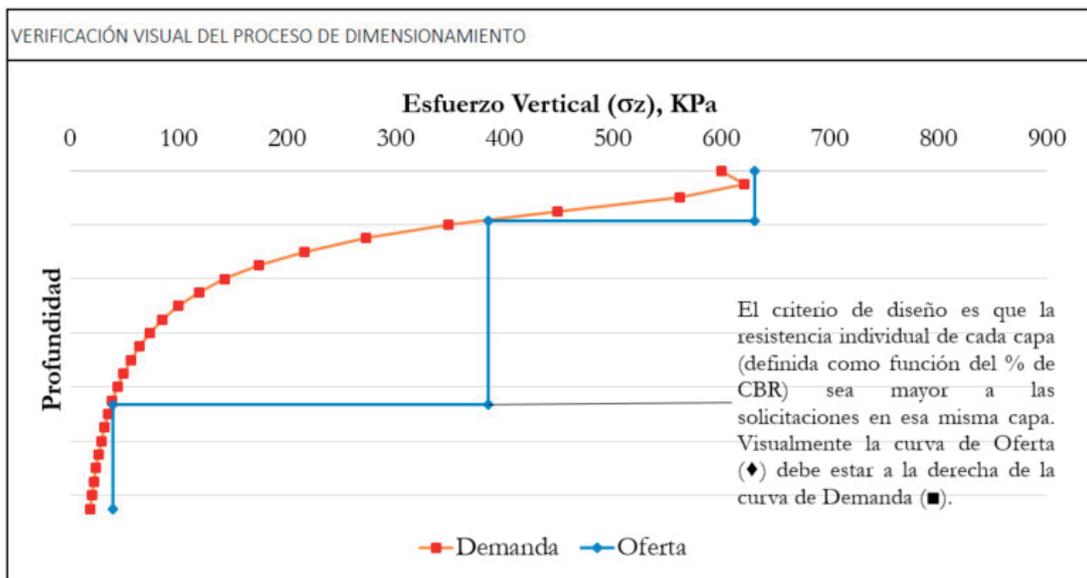


Figura 3.4_17. Definición de la Estructura de Pavimento. (a, b) Definidos por materiales disponibles localmente.

Definición de los espesores

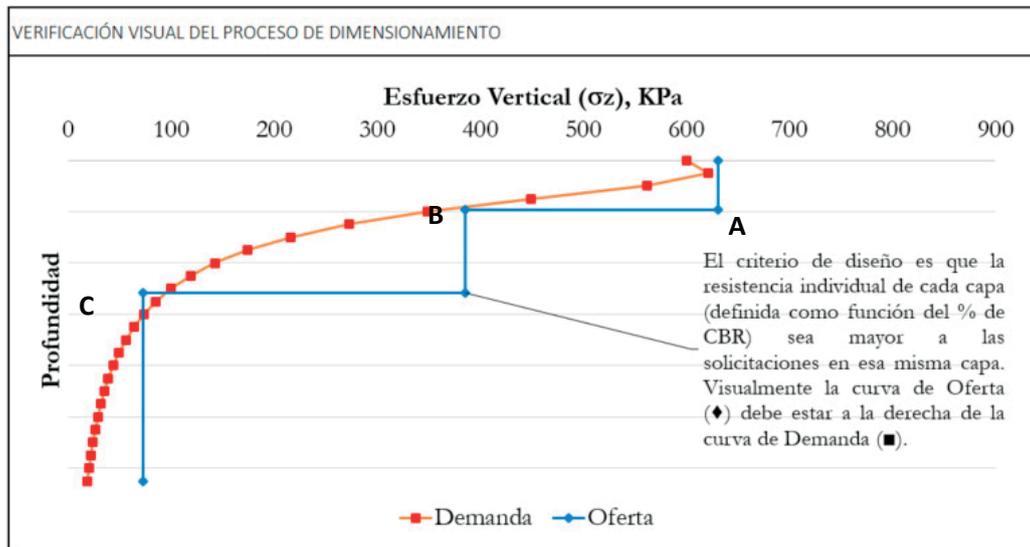
Producto de la carga de la rueda definida como representativa, la estructura se ve sometida a cierto nivel de tensiones, las cuales se representan a través de la línea roja (■) (curva de demanda) que se muestra en la siguiente Figura. A su vez, la capacidad de soporte de cada una de las capas permite definir el nivel de tensiones admisible de cada una de ellas, representada en la Figura través de las líneas azules (◆) (curvas de oferta). En términos prácticos las tensiones admisibles (oferta) deben ser mayores a las tensiones de trabajo (demanda), lo cual se traduce que las líneas azules deben estar siempre por debajo de la curva roja.



A modo de ejemplo, en las siguientes Figuras se muestra el proceso de diseño de la estructura indicada.

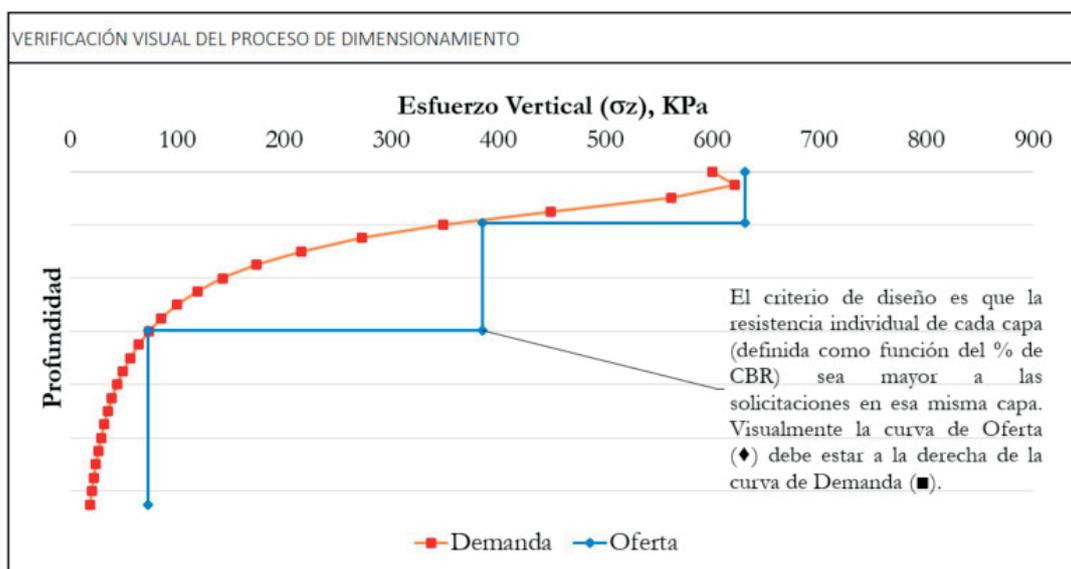
Iteracion 1.

Diseño no cumple en Puntos A y B, pero no cumple en Punto C.



Capa	Espesor cm	CBR %
Base o Capa Rodadura (CBR 70 %)	12	70
Subbase (CBR 40 %)	25	40
Subrasante (CBR 6%)		6

Solución: Aumentar espesor de la subbase a 31 cm. Diseño cumple en cada uno de los 3 puntos críticos.



Capa	Espesor cm	CBR %
Base o Capa Rodadura (CBR 70 %)	12	70
Subbase (CBR 40 %)	31	40
Subrasante (CBR 6%)		6



FICHA TECNICA

<p>1. Tipo Informe Informe Técnico</p>	<p>2. Fecha Informe 30 de Noviembre de 2018</p>
<p>3. Título del Informe Guía para la Evaluación y Selección de Aditivos para la Estabilización de Suelos y Materiales Granulares</p>	
<p>4. Autor (es) Felipe Halles; Guillermo Thenoux; Rodolfo Segovia; Fernando Paniagua.</p>	
<p>5. Resumen y Alcances</p> <p>Este documento corresponde a una Guía Referencial que establece los pasos a llevar a cabo para el desarrollo de <u>proyectos de ingeniería que incluyan la utilización de aditivos para la estabilización de una o más capas de la estructura del camino.</u></p> <p>En este documento se detallan los pasos a seguir, los ensayos a realizar, normativas y criterios a utilizar, <u>para evaluar y seleccionar aditivos</u> para su uso como estabilizadores de suelos y materiales granulares.</p> <p>Este documento fue desarrollado para su aplicación en caminos de bajo volumen de tránsito, pero con presencia de vehículos pesados.</p> <p>Este documento entrega además herramientas desarrolladas específicamente para dimensionar la estructura del camino sobre la base de las propiedades específicas de los materiales estabilizados a utilizar.</p>	