



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA



LABORATORIO NACIONAL
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES



PROGRAMA DE
INFRAESTRUCTURA DEL
TRANSPORTE

Experiencia costarricense en diseño, aseguramiento de la calidad y construcción de bases estabilizadas con cemento

Publicación técnica

Volumen 1. Número 1. Marzo, 2012



Información técnica del documento

1. Informe LM-PI-PU-001-12	2. Copia No. 1
3. Título y subtítulo: EXPERIENCIA COSTARRICENSE EN DISEÑO, ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD Y CONSTRUCCIÓN DE BASES ESTABILIZADAS CON CEMENTO	4. Fecha del Informe Junio, 2012
7. Organización y dirección Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica Tel: (506) 2511-2500 / Fax: (506) 2511-4440	
8. Notas complementarias	
11. Nivel de seguridad: Ninguno	12. Núm. de páginas: 23
13. Preparado por: Ing. Tania Ávila Esquivel, Investigador. Fecha: / /	
14. Revisado por: Ing. Fabián Elizondo, Sub-Coordinador PITRA, LanammeUCR Ing. Víctor Cervantes Calvo, Auditor Técnico, PITRA, LanammeUCR Ing. José Manuel Sáenz Scaglietti, Director de Diseño, CACISA	
15. Aprobado por: Ing. Guillermo Loría Salazar, PhD., Coordinador General PITRA. Fecha: / /	

Tabla de contenidos

Introducción	04
Reseña histórica del suelo-cemento	04
Definición de suelo-cemento	05
Clasificación	05
Experiencia costarricense	06
Antecedentes	06
Conceptos Básicos	06
El agrietamiento de las bases estabilizadas con cemento	08
Otros aspectos relevantes	10
Bases mejoradas con cemento	11
Hallazgos de unidad de auditoria del PITRA-Lanammeucr	13
Comentarios finales	17
Índice de Figuras	
Figura 1. Colocación de sacos de cemento para estabilización in situ.	06
Figura 2. Extendido de sacos de cemento para estabilización in situ.	08
Figura 3. Mezcla del cemento con el suelo.	09
Figura 4. Compactación de la base estabilizada.	11
Figura 5. Base estabilizada con cemento.	11
Índice de Tablas	
Tabla 1. Tipos de agrietamiento asociados a la resistencia a la compresión a los 7 días	08
Tabla 2. Resumen de hallazgos en procesos de construcción de bases estabilizadas con cemento	14-17

Introducción

La estabilización es un tratamiento que se aplica a los suelos, a los materiales granulares o capas de subrasante, adicionándoles un ligante que puede ser o no bituminoso (productos químicos, aceites, asfalto, emulsión asfáltica, cal, cemento) para mejorar sus características mecánicas, especialmente la capacidad portante, resistencia a los agentes atmosféricos, estabilidad volumétrica, etc.

La estabilización con cemento generalmente se emplea para cambiar alguna de las características físicas del material tratado (ej. el índice de plasticidad) o bien para aumentar la resistencia del suelo y así mismo incrementar las cargas de tránsito y obtener mezclas con un mejor comportamiento ante la erosión y los cambios abruptos de temperatura.

El tratamiento se puede realizar en planta o in situ y el proceso implica la adición del estabilizante, la mezcla con el suelo o el material que se quiere mejorar y el proceso de compactación.

Su aplicación se puede llevar a cabo en vías, caminos rurales, zonas peatonales, aeropuertos, áreas extensas (parqueaderos, campos deportivos, etc.), vías férreas, etc.

El cemento es un material que tiene propiedades de adhesión y cohesión para unir materiales inertes y conformar masas mucho más sólidas. En sus procesos de aplicación se requiere del agua para completar el proceso químico de hidratación que implica el fraguado del polvo de cemento y el posterior endurecimiento, constituyendo finalmente una masa sólida y resistente.

De los diferentes tipos de cemento, el Portland es el más utilizado y su uso se patentó en 1824 en Inglaterra. Los componentes principales son los silicatos de Calcio y el Aluminio que básicamente se encuentran en las limolitas y las arcillas o esquistos.

Dentro de sus múltiples usos se encuentra el concreto común, concretos de alta resistencia que requieren

un cemento de grano más fino, mortero, lechadas y el suelo cemento que es considerado un aporte de gran importancia porque permite utilizar el suelo como un material de construcción que no sólo se encuentra al alcance de todos sino que es un recurso renovable muy económico.

Reseña histórica del suelo-cemento

El primer uso que se le dio al suelo cemento fue como material para pisos y muros. Posteriormente se aplicó en caminos en zonas donde la escasez de material de buena calidad era evidente. En la segunda guerra mundial se descubrió que su uso en pistas para aeropuertos era posible y además presentaba resultados excelentes bajo grandes cargas, de esta manera se introdujo en los pavimentos. Las primeras metodologías de diseño se basaron en las investigaciones realizadas por EEUU, Europa y Rusia. Los primeros usos del suelo cemento en forma científica se realizaron hacia 1910 en EEUU e Inglaterra.

Hacia 1917 se realizó en Inglaterra una mezcla de cemento con suelos arcillosos en unas carreteras en el condado de Wiltshire. En 1921 se realizan algunas estabilizaciones con cemento y suelos arcillosos en California, Estados Unidos. En 1935, en Carolina del sur, Estados Unidos, tras haber creado laboratorios perfectamente dotados y una metodología científica rigurosa, se realizó la primera estabilización con suelo-cemento con técnicas modernas. Durante la segunda guerra mundial, se aplicó la nueva técnica en aeropuertos con resultados excelentes y a costos muy favorables. Una vez terminó la guerra y tras observar el buen estado en el cual quedaron estas pistas tras sufrir bombardeos y las inclemencias del clima, la estabilización con suelo-cemento se popularizó de manera acelerada en los países desarrollados. En 1951 el suelo-cemento se utilizó como protección de presas de tierra y enrocado en algunos tramos de prueba.

A partir de este momento y tras los buenos resultados que se obtuvieron se autorizó su aplicación en presas, en los Estados Unidos.

Actualmente esta técnica tiene muchísimos usos como son protecciones de costas marítimas, muros de contención, cimentación de estructuras, etc. En Colombia, esta técnica ha tenido gran acogida en el campo de los Pavimentos debido a la deficiencia de materiales óptimos, que se presenta en algunas zonas del país y desde luego el beneficio económico que representa.

Definición de suelo-cemento

En los diferentes países y entidades encargadas del estudio del cemento se tienen variadas definiciones del “suelo-cemento”, sin embargo la más aceptada es la de la Portland Cement Association, que dice: “El suelo-cemento es una mezcla íntima de suelo, convenientemente pulverizado, con determinadas porciones de agua y cemento que se compacta y cura para obtener mayor densidad. Cuando el cemento se hidrata la mezcla se transforma en un material duro, durable y rígido. Se le usa principalmente como base en los pavimentos de carreteras, calles y aeropuertos.”

Algunos estudiosos dicen que el verdadero nombre de la técnica debe ser “suelo tratado con cemento” ya que el proceso no implica una gran rigidez en el resultado final del tratamiento.

Clasificación

Suelo-cemento compactado: su proporción en peso varía entre 4 y 25% aproximadamente. Se le da dureza compactándolo. Es el más utilizado y puede realizarse con:

- Suelos limosos
- Suelos arcillosos
- Suelo granular limpio
- Mezcla de suelos finos y gruesos arcillosos y limosos

A mayor cantidad de suelo fino mayor es el consumo de cemento.

Suelo-cemento plástico: según la PCA, es: “La mezcla de cemento con un suelo fino muy húmedo en estado plástico. Cuando se le coloca tiene la consistencia de un mortero plástico. Frecuentemente se usa en zonas difíciles donde no es posible compactar. Requiere una cantidad de cemento mayor que el tipo compactado, esto es, mayor del 10% y no se compacta”

Suelo modificado con cemento: según la PCA es: “Una mezcla, dura o semidura, íntima de suelo pulverizado, agua y pequeñas cantidades de cemento que se compacta. Por lo tanto se distingue del suelo-cemento compactado exclusivamente en la menor cantidad de cemento que se le adiciona. La cantidad de cemento en peso varía entre 1 y 4%. Se le utiliza especialmente cuando se requiere:

- Obtener mayor resistencia del suelo, aunque no muy alta
- Compactar el terreno en condiciones más favorables
- Hacer más impermeables determinados suelos”

Experiencia costarricense

Antecedentes

Las bases estabilizadas fueron una solución para el desarrollo de la red vial, utilizando los diversos tajos o bancos de materiales que se encontraban cercanos a las construcciones. Se usaba una granulometría muy fina que se mezclaba en forma artesanal con el cemento, esta circunstancia hacía que la estabilización pudiera definirse como un tratamiento superficial que no aportaba valor estructural a las bases, con una “receta mágica” de una capa de 15 cm, que al poco tiempo mostraba signos de deterioro lo cual, unido a la carencia de mantenimiento, daba como producto no una falla del proceso de estabilización, sino una carencia en el desarrollo de la metodología, la cual se implementó simplemente para cumplir con el objetivo de desarrollar la red vial.

Figura 1. Colocación de sacos de cemento para estabilización in situ.



Imagen con fines ilustrativos

Conceptos Básicos

En teoría, se logra la estabilización de un material cuando al adicionar el cemento, el agua y la energía de compactación dicho material aumenta sus propiedades de resistencia mecánica, disminuye la plasticidad, y es estable ante los

procesos de meteorización bajo las condiciones de clima a que está expuesto en el pavimento. Obviamente las cargas del tránsito inducirán un proceso de falla acorde con las leyes de fatiga que rigen a estos materiales.

Es de suma importancia definir cuáles son las diferencias básicas entre lo que se conoce en el país como: Base “estabilizada”, “mejorada” y “reforzada”. Actualmente Costa Rica adolece de especificación general para las dos últimas técnicas mencionadas, y se han dejado sus características a lo que se denominan “especificaciones especiales”. Dicha carencia de especificaciones ha provocado que muchas de las decisiones de diseño sean empíricas y que no hayan ítemes de pago y de control/aseguramiento de la calidad bien definidos. A continuación se presenta la definición de las técnicas derivadas de la discusión durante el foro “Bases Estabilizadas con Cemento” ver referencia de Acosta y otros.

Base estabilizada: Técnica que corrige deficiencias de un material que, usado sin cemento, no cumple especificaciones, por su dureza o que pueden experimentar problemas con índice plástico y límite líquido, los cuales son controlados por el cemento.

Base mejorada: Corrige deficiencias de agregados que tienen condiciones granulométricas que pueden experimentar problemas con índice plástico y límite líquido, los cuales son controlados por el cemento.

Base reforzada: Procura que un material de agregados triturados para base, que cumplen con su granulometría y rigidez, se refuerce con cemento para mejorar el módulo y en consecuencia reducir el espesor de la capa de rueda.

Base recuperada: Es el tratamiento de un espesor de material compuesto por la capa de rodadura y un porcentaje de la base existente en un pavimento que, una vez escarificados y pulverizados se les adiciona un ligante (cemento o asfalto de algún tipo) para reconstituir el

material resultante de manera que cumpla nuevamente con la función de una base.

El cemento se puede incorporar al material de base para mejorar propiedades como: la resistencia mecánica, la resistencia a las condiciones del clima (especialmente ante altos índices de saturación), los indicadores de plasticidad o la degradabilidad (meteorabilidad) de los agregados; además permite el reciclado de pavimentos existentes severamente deteriorados, así como el uso de materiales que no cumplen con las especificaciones técnicas para base granular. Esto es especialmente importante en zonas donde no se cuenta con buenas fuentes de agregados.

Para su correcta aplicación se debe determinar en laboratorio la óptima combinación del agregado, el agua, el cemento y la energía de compactación. Los cuatro parámetros son de mucha importancia para garantizar el mínimo costo y un exitoso desempeño de la base estabilizada y del pavimento, lo que conlleva también la disminución del potencial de agrietamiento. Adicionalmente los procedimientos constructivos y de control de calidad son elementos fundamentales para lograr dichos objetivos. Específicamente, el incremento en la energía de compactación permite usar menor cantidad de cemento para alcanzar una resistencia determinada, con la consecuente disminución del índice de contracción y un menor costo del aditivo. Por lo tanto es muy apropiado estudiar con mayor profundidad la compactabilidad de los agregados. Precisamente dicha compactabilidad depende de la textura, forma, dureza y graduación de los agregados. Al analizar en laboratorio la razón de variación de la densidad en función de la energía, se puede determinar comparativamente la “facilidad de compactación” de distintos materiales (gravas, tobas, suelos arenosos, pavimentos triturados), usando como humedad de compactación la envolvente de los óptimos de las curvas Próctor. Precisamente el poder aplicar una alta energía de compactación permite construir bases estabilizadas de alta resistencia, usando porcentajes relativamente bajos de cemento. Físicamente, el límite de la energía óptima de compactación lo definen la dureza de los agregados y la capacidad real de los equipos en el campo.

El porcentaje óptimo de agua es aquel con el cual se logra la máxima resistencia y no necesariamente coincide con la cantidad de agua que se requiere para alcanzar la máxima densidad Próctor. Como regla general se ha observado que en las gravas de baja plasticidad, para alcanzar la máxima

resistencia se requiere un contenido de agua ligeramente superior al del óptimo de compactación, y para materiales de valores altos de IP sucede lo contrario. Esta regla no se puede aplicar a ciegas y se requiere hacer los estudios de laboratorio en cada caso.

En Costa Rica hay una amplia experiencia acumulada en este campo, y adicionalmente se incursionó en el uso de la cal para la construcción de capas de base que se denominaron como toba-cal, sin dejar de lado importantes experiencias en la estabilización de suelos con cal.

Las gravas de buena calidad, no plásticas (NP), requieren bajos porcentajes de cemento para alcanzar las resistencias especificadas, esto hace menos fácil lograr un proceso constructivo homogéneo si se utiliza el método de mezcla in situ; y en caso de aumentar el cemento a un punto óptimo se puede lograr una mezcla más homogénea, sin embargo un exceso de la cantidad requerida provocará que los valores de resistencia se incrementen con el consecuente problema de agrietamiento. Por lo anterior, para el caso de gravas o agregados limpios, se recomienda el uso de la mezcla en planta que permite una mejor homogenización del proceso de mezclado. Cuando los agregados a estabilizar poseen algún grado de plasticidad, la cantidad de cemento a adicionar suele ser mayor esta condición permite obtener resultados aceptables con los métodos de proceso in situ, sin embargo con el mezclado en planta se asegura la homogenización de los materiales. A escala de laboratorio también se han logrado interesantes resultados utilizando simultáneamente cemento y cal (50% de cada uno), con lo que se logra más bajos índices de contracción de fraguado (menor agrietamiento del pavimento) y mejor desempeño de materiales con altos índices de plasticidad. Hace falta la experimentación en el campo para determinar la viabilidad técnica y económica de esta alternativa.

La incorporación de fibras sintéticas tiende a disminuir el efecto de agrietamiento pero encarece su construcción y la podría hacer menos competitiva.

La gama de posibilidades de uso de la técnica de estabilización con cemento es muy amplia, por ejemplo:

1. Para mejorar los índices de plasticidad y la capacidad de soporte (CBR) de los materiales (suelos y agregados). En el rango de valores altos de plasticidad la cal suele ser más efectiva. Algunas recomendaciones para aplicar la alternativa del cemento son:

- a) Que el IP sea menor que 30 para suelos arenosos.
- b) Que el IP sea menor a 20 y el LL menor a 40 para suelos de grano fino (más limosos).
- c) Para agregados tipo gravas que el porcentaje que pasa la malla 4 sea mayor a 45, y que adicionalmente el $IP \leq 20 + (0.25)(50 - \%pas.No.4)$.
- d) Para materiales que contengan menos de un 35% pas. No.200, y que el IP sea menor a 20.
- e) En el caso de los suelos tipo A-4, A-5, A-6, y A-7 (clasificación AASHTO), suele ser más conveniente estabilizarlos con cal.

2. Para incorporar en el pavimento agregados que no cumplen especificaciones para base granular.

3. Permite construir capas de base de alta resistencia y altos valores de módulo, brindando un importante aporte estructural al pavimento. Inclusive se puede colocar una capa asfáltica de rodamiento de poco espesor sometida a esfuerzos de compresión, con el consecuente incremento en la capacidad a fatiga del paquete estructural. Los valores de resistencia a compresión a 7 días pueden oscilar entre 20 kg/cm² a más de 100 kg/cm². Los valores de módulo retrocalculados suelen oscilar en un rango de 5000 kg/cm² (bases agrietadas) a más de 70000 kg/cm² (bases muy rígidas).

4. Permite utilizar materiales degradables (meteorizables). Esta técnica se ha usado en Costa Rica, pero conviene mejorar los ensayos y especificaciones para garantizar la estabilización en el largo plazo.

5. Especialmente en climas lluviosos aportan una alta resistencia a la socavación en bordes y esquinas en las losas de los pavimentos de concreto, lo cual sumado a los altos módulos de estas bases permiten diseñar losas de concreto de menor espesor, superando con mucho el desempeño que en este caso (climas lluviosos) presentan las bases granulares.

6. En condiciones de alta saturación la resistencia de la base tiende a aumentar, lo que la hace muy apropiada en zonas de alto nivel freático o de alta precipitación.

7. Estas bases no presentan los problemas de deformación permanente, típicos de las bases granulares. Estructuralmente tiene una respuesta elástica ante las cargas del tránsito, diferente a la respuesta no lineal de las capas granulares (módulo dependiente del nivel de esfuerzos). El CR-77 recogía un buen pliego de especificaciones para estabilizaciones con cemento y con cal, en materia de bases estabilizadas, contó con experimentación realizada con los

materiales propios del país. En consecuencia, la actualización de esta normativa debe partir de la experiencia nacional, que es muy basta, teniendo como uno de sus referentes el CR-77, tanto para el cemento como para la cal.

Figura 2. Extendido de sacos de cemento para estabilización in situ.



Imagen con fines ilustrativos

El agrietamiento de las bases estabilizadas con cemento

El agrietamiento por contracción ha sido una de las grandes preocupaciones en torno a esta tecnología. Con agregados de buena calidad se obtienen fácilmente altos valores de resistencia y de módulo aun utilizando bajos porcentajes de cemento, ambos parámetros están directamente ligados con el fenómeno del agrietamiento, pero no son los únicos. Dependiendo del espesor y ancho de la capa, las grietas transversales suelen presentarse en espaciamientos que oscilan entre 3 y 7 metros. En función de la resistencia a compresión a 7 días se puede estimar cualitativamente, el agrietamiento de las bases estabilizadas con cemento según el siguiente criterio:

Tabla 1. Tipos de agrietamiento asociados a la resistencia a la compresión a los 7 días.

Resistencia a la compresión, 7 días	Tipo de Agrietamiento
$R_c 7 \leq 20 \text{ kg/cm}^2$	Agrietamiento muy leve o imperceptible
$20 \text{ kg/cm}^2 \leq R_c 7 \leq 30 \text{ kg/cm}^2$	Agrietamiento de muy leve a leve
$30 \text{ kg/cm}^2 \leq R_c 7 \leq 40 \text{ kg/cm}^2$	Agrietamiento de leve a moderado
$40 \text{ kg/cm}^2 \leq R_c 7 \leq 55 \text{ kg/cm}^2$	Agrietamiento de moderado a alto
$R_c 7 \geq 60 \text{ kg/cm}^2$	Agrietamiento de alto a severo

El agrietamiento de la base estabilizada, especialmente a un nivel igual o inferior al aquí señalado como moderado, no afecta negativamente, ni la vida útil ni el desempeño a largo plazo de la estructura del pavimento, siempre y cuando el diseño en laboratorio así como el proceso constructivo y de control de calidad de la base se haya ejecutado correctamente. Desde luego se supone que el diseño estructural y el mantenimiento del pavimento se realizan de forma adecuada.

Además se manifestó que la propensión al agrietamiento también tiene relación con la granulometría del material que se estabiliza, en general, a mayor contenido de agregados gruesos (porcentaje retenido en el tamiz # 4) menor será la formación de fisuras para un mismo contenido de cemento. Sin embargo se enfatizó que esta teoría todavía requiere de investigación para poder establecer los límites y, consecuentemente, formular una especificación en este sentido.

Cuando se aumenta la energía de compactación y se controla la dosificación del agua alrededor del punto de máxima resistencia (no necesariamente coincide con el de máxima densidad), dicho potencial de agrietamiento disminuye.

Si se construye la base con valores de resistencia a 7 días mayores a 45 kg/cm², puede optarse por la alternativa de hacer un ranurado similar al de las losas de hormigón. De esta forma se logra un patrón de grietas uniforme y además las esquinas serán siempre en ángulo recto, evitando fallas de esquina y de bordes en la base estabilizada agrietada.

Además de lo indicado sobre la energía de compactación y dosificación del agua, otras recomendaciones para lograr un control adecuado del agrietamiento son las siguientes:

- Garantizar un proceso constructivo de calidad uniforme. Para esto se requiere el mezclado en planta y la colocación con máquina extendidora. La calidad, costo, aporte estructural y garantía de desempeño a largo plazo de la base estabilizada con cemento justifican perfectamente esta exigencia.

- El diseño en laboratorio de la estabilización debe cumplir con una normativa que garantice la óptima calidad de la estabilización, en función de las propiedades de los materiales a estabilizar.

- Una vez construida la base se debe sellar de inmediato para garantizar un buen curado. Se debe evitar realizar la cura haciendo riegos con agua. Sin embargo se discutió la

posibilidad de efectuar la cura con agua durante un par de días como máximo y luego sellar.

- Posterior al sellado se inicia el proceso de fraguado y por lo tanto no se debe abrir al tránsito vehicular (incluido la maquinaria del proyecto). Para definir el día de apertura al tránsito hay que hacer el cálculo estructural en función del incremento diario de resistencia, de modo que los camiones no provoquen una falla estructural de la capa. Un acelerador de fraguado podría adelantar la apertura al tránsito. Además se discutió la conveniencia de considerar la composición del material estabilizado ya que es ventajoso “micro-fracturar” las bases granulares reforzadas con cemento, lo cual podría permitir la apertura al tráfico a una temprana edad (24 a 48 horas). Por otro lado, cuando se trata de materiales donde predomina la matriz fina (% pasando # 4 > 50%), es conveniente que la base desarrolle al menos el 70% de la resistencia especificada antes de abrirlo al tránsito.

- Si se coloca la capa asfáltica después de los 30 días de construida la base, al colocar el riego de liga en la dosificación óptima se sella también cualquier fisura pequeña que se halla formado, esto disminuye la posibilidad de que las grietas se reflejen a la capa de rodamiento.

- Conviene colocar una primera capa asfáltica de rodamiento delgada, y antes de los 5 o 6 años, colocar una segunda capa de rodamiento. La colocación de sucesivos riegos de liga y de capas de rodamiento expuestas solamente a esfuerzos de compresión disminuye el reflejo de las grietas por contracción de fraguado. Evidentemente este proceso de construcción por etapas debe estar debidamente contemplado en el análisis estructural del pavimento.

Figura 3. Mezcla del cemento con el suelo



Imagen con fines ilustrativos

Otros aspectos relevantes

1. El control de calidad de la resistencia en el campo debe hacerse moldeando cilindros. Aun cuando hayan pasado más de 28 días, al extraer núcleos con broca de diamante se podría alterar la muestra en virtud de la vibración que se presenta al cortar con la broca las partículas duras del agregado. Este fenómeno es más significativo en la bases de menor resistencia y con agregado de mayor dureza.

2. Si la ruta es nacional, colocar la base con niveladora no es una técnica recomendable, debido a que el producto final es más heterogéneo en cuanto a resistencia y espesor para el tránsito que circulará la vía. Además hay que tener en cuenta que la extracción de núcleos para determinar si el promedio de resistencia y su dispersión es o no aceptable (criterio de aceptación o rechazo) puede presentar importantes limitaciones. No obstante en caminos secundarios de la red cantonal, por tener un menor flujo de vehículos, sí podría permitirse el mezclado con niveladora asegurando la mayor homogeneidad del proceso de mezclado.

3. En el momento que inicia el fraguado la base debe estar sellada, por lo tanto no da tiempo para corregir espesores con la motoniveladora. Esta es otra razón por la cual se debe colocar el material con extendedora; definitivamente se logra un “producto final” de mejor calidad y hay más certeza de cumplir las especificaciones técnicas del proyecto.

4. El control de humedad en el material a estabilizar es un aspecto muy importante. La dosificación correcta del agua solo se puede controlar haciendo la mezcla en planta. En el laboratorio se debe determinar el porcentaje de agua con el que se logra la máxima resistencia.

5. El equipo de compactación debe ser capaz de compactar de forma homogénea todo el espesor de la capa. Se han encontrado bases estabilizadas que solo fueron compactadas suficientemente en los primeros 12cm de su espesor. Para esto se requiere, previo a iniciar su construcción, poner a punto un tramo de prueba de compactación.

6. Para el diseño estructural del pavimento se presentan modelos de predicción de falla por fatiga que muestran gran dispersión. Por tanto conviene calibrar un modelo propio que tome en consideración las características de los materiales y las condiciones propias del país.

7. Para lograr lo anterior se requieren estudios de campo o en pista de ensayo a escala natural. En el laboratorio se hace difícil moldear especímenes tipo vigas para hacer estudios de fatiga.

8. También se hace difícil determinar en el laboratorio el índice de contracción de estos materiales, especialmente

por la dificultad de moldear los especímenes para tal fin. De modo que los estudios sobre el agrietamiento de estas bases se debe fundamentar, al menos por ahora, en estudios de campo; aunque hay investigadores que están tratando de estudiar dicho fenómeno en el laboratorio.

9. Cuando se tritura un pavimento para convertirlo en una base estabilizada con cemento, lo propio es llevar el material a una planta mezcladora y proceder a su construcción como de la misma forma que una base estabilizada convencional. Es muy entendible la premura de abrir el paso a los vehículos tan pronto como sea posible, así como el impacto en los costos que ello implica, pero no se puede obviar la pérdida de calidad y de vida útil del pavimento cuando no se siguen los procedimientos idóneos.

10. Si se transporta el material triturado a la planta mezcladora se puede compactar y conformar la superficie sobre la cual se apoyará la nueva base a colocar. Esto permite una mejor compactación de la parte inferior de la base estabilizada, de lo contrario se compactaría contra una superficie escarificada y relativamente suelta. Esto explica las deficiencias de compactación que suelen detectarse en la parte inferior de estas capas cuando se estabilizan in situ, especialmente si el espesor sobrepasa los 25 cm.

11. Adicional a lo señalado en el punto anterior, en la interfase entre la superficie escarificada y la base estabilizada a colocar se puede presentar exceso de agua libre (alto nivel freático, subdrenajes inexistentes o en mal estado, subbases con alta plasticidad en periodo de lluvias), con el consecuente efecto nocivo en la compactación y la resistencia de la base estabilizada (especialmente en la parte inferior de la capa). En general, cuando la estabilización del pavimento triturado se hace in situ, se torna más difícil lograr el control de la dosificación del agua que establece el diseño hecho en el laboratorio, así como la uniformidad de los demás parámetros de calidad.

12. Cuando se realiza la trituración de un pavimento asfáltico deteriorado, normalmente se hace difícil cumplir con la especificación del porcentaje de finos pasando la malla No.4 (en algunos casos también el tamaño máximo de partícula). Este parámetro depende de aspectos como: espesor y rigidez de la capa asfáltica, granulometría de la base (si es granular), diseño del rotor de trituración (número, tamaño y espaciado de los dientes de trituración), velocidad de rotación y de avance de la trituradora, número de pasadas del triturador (aunque normalmente después de la tercera pasada muy poco se logra modificar la granulometría. Esto pone en evidencia la importancia de hacer un adecuado diseño de la estabilización previo a iniciar los trabajos de construcción definitivos.

13. En nuestro medio se han observado algunos problemas de compactación de pavimentos triturados y estabilizados in situ, sobre todo en la parte inferior de la capa.

14. En algunos países (Francia por ejemplo) se ha experimentado con capas estabilizadas con cemento al nivel de la subbase, esto con el fin de aprovechar su alta rigidez dentro del paquete estructural, procurando de esta forma resolver el problema del agrietamiento.

Figura 4. Compactación de la base estabilizada



Imagen con fines ilustrativos

Bases mejoradas con cemento

Durante el desarrollo del foro “Bases Estabilizadas con Cemento” surgió como parte de las definiciones de las diversas técnicas aplicadas en el ámbito nacional, la denominada Base mejorada con cemento, de la cual se presenta un detalle de los temas discutidos. Para realizar el trabajo de mejoramiento de una base con cemento se requieren los siguientes insumos: agregados, agua, cemento y energía de compactación, precisamente los mismos que se requieren para una base estabilizada. Si se controla correctamente el agua y la compactación, con un porcentaje de cemento relativamente bajo es posible construir una base estabilizada o reforzada (de acuerdo a lo definido en la sección 2.2) con excelentes propiedades mecánicas y de durabilidad a largo plazo. En cuyo caso el incremento del costo justifica holgadamente la opción de la base estabilizada.

Si se agregan bajos porcentajes de cemento (por ejemplo menos del 3%), para hacer el trabajo de mejoramiento de la base, es muy difícil lograr “un producto” homogéneo salvo si la mezcla se hace en planta, con el consecuente

perjuicio en la calidad de la base, y pérdida de eficiencia de la inversión realizada, consecuencia del uso ineficiente de los insumos y de la tecnología.

Desde el punto de vista del desempeño del pavimento es muy importante la calidad de la base, por lo tanto no se debe construir esta capa si no se define de previo un marco de especificaciones que se fundamente en estudios técnicos que garanticen cuál será el desempeño a largo plazo de los materiales, y cuáles son sus parámetros físico-mecánicos, condición que sí cumplen por ejemplo las bases granulares o estabilizadas. En consecuencia tampoco es posible hacer el análisis estructural que se requiere para diseñar la intervención a realizar; lo cual es absolutamente necesario para elegir la mejor alternativa de proyecto y con ello garantizar al país el uso eficiente de los recursos. Este es un compromiso absolutamente inherente a la Ingeniería.

Para la contratación de un ítem de obra es muy importante definir sus especificaciones técnicas, así como los criterios de aceptación o rechazo, estos son aspectos fundamentales de la contratación de obras así como del control y aseguramiento de la calidad. Suele suceder que el trabajo de “mejorar” una base tiene un fundamento empírico o intuitivo, y no permite actuar con rigurosidad en asuntos tan importantes con el control y aseguramiento de la calidad, pues no cuenta con parámetros técnicos y objetivos para determinar el cumplimiento de las especificaciones que se deben cumplir. Es propio de la Ingeniería desarrollar y aplicar tecnologías bien fundamentadas que garanticen el uso eficiente de los recursos, en el caso de las bases mejoradas esa premisa es cuestionable.

Figura 5. Base estabilizada con cemento



Imagen con fines ilustrativos

Algunos proyectos estabilizados con cemento en Costa Rica

Algunos proyectos que han aplicado esta tecnología:

- Pozón-Caldera
- Río Naranjo-Bijagua-Canalete
- Nicoya-Sámara
- Parrita-Quepos
- Taras-La Georgina (en los tramos más deteriorados)
- San Ramón-Barranca
- Parrita-Quepos
- Tárcoles-Jacó-Loma (estabilización de agregados degradables)
- Río Convento-Buenos-Aires
- Ciudad Colón-Puriscal
- San Gerardo-Copey
- San Josecito-Atenas (toba-cal)
- Alajuela Carrizal (toba-cal)
- Sardinal-Santa Elena
- Frailes-Tarbaca (estabilización de agregados degradables)
- Entre otros.

También se ha aplicado mucho esta técnica en calles de urbanizaciones y patios de estacionamiento.

El tramo Ciudad Colón-Puriscal es un claro ejemplo de la eficacia de una sobrecapa asfáltica colocada sobre un pavimento con base estabilizada severamente agrietada.

En un tramo del proyecto San Ramón-Barranca (1999), se aplicó fibra para evitar las grietas por contracción, los resultados de laboratorio resultaron favorables.

En el proyecto Curridabat-Tres Ríos, se colocó una subbase con material del tajo de Tirrases, el cual llevaba una base negra; en este caso, la subbase falló, provocando que la base se reventara antes de que se estrenara la carretera. Todo el material se recogió, se pasó por un quebrador, se estabilizó con cemento en planta y hasta la fecha, esta carretera no ha dado problemas. Este es un ejemplo de base estabilizada controlada con planta en sitio y aplicación con niveladora, lo cual facilitó los procesos.

Tramo San Isidro-Río Convento, donde se tiene una base granulada con cemento, colocada con acabadora, la cual fue rígida (resistencia 35-40kg/m²) pero esta tecnología permitió una economía de costos tal que se logró construir el boulevard de cinco carriles en San Isidro.

Nicoya-Sámara, desarrollado en 1990, donde no había materiales de calidad cercanos, por lo que se optó por mejorar la subbase, controlando los índices de contracción y estabilizando también la base. Todo el proceso se realizó en planta y resultó exitoso, manteniendo hoy día condiciones estructurales satisfactorias.

Otra experiencia interesante es el trayecto San Ramón-Barranca, específicamente en la pendiente entre Barranca y Esparza, donde el pavimento “se arruga”, percibiéndose una deformación (especie de grada). Al respecto, este efecto se estimaba en función de un problema de mezcla asfáltica; sin embargo, se determinó que el problema venía desde la base, por lo que se usó una base estabilizada y se colocó una fibra sintética para mejorar la capacidad estructural en una condición donde el tránsito era un factor detonante.

Hallazgos de unidad de auditoria del PITRA-LanammeUCR

El grupo auditor del PITRA-LanammeUCR ha encontrado algunas situaciones que deben corregirse tanto a nivel de concepción de proyectos, normativa técnica, así como de la construcción propia de bases estabilizadas con cemento. A continuación se enumeran algunos de estos hallazgos, y luego se resumen en la Tabla 2.

La carencia de especificación de bases mejoradas, facilita el hecho de que no se tengan que cumplir resistencias mínimas.

Es importante considerar la homogeneidad del material que se va a estabilizar puesto que puede variar mucho a lo largo del tramo, y se utiliza un mismo diseño para todo, independientemente si el material cambia.

Se ha acostumbrado a preparar la base in situ, en el mejor de los casos con recuperadora y a la vez la homogenización con cemento, pero en otros, colocando sacos de cemento en la carretera, esparciéndolos y mezclando con la niveladora. La homogenización de esta manera no es efectiva y depende mucho de la pericia del operador.

La granulometría de la base que se va a estabilizar muchas veces no cumple, por lo que se trata de hacer cumplir pasando de nuevo a la recuperadora. Ese ha sido el caso de muchos proyectos en donde a pesar de que era el material de base fue extraído de tajo, no se mantuvieron sus características al ser colocado. En este caso era mejor que se cumpliera la granulometría desde el tajo y que se homogenizara en planta para mayor control.

Muchas veces se coloca la base, se estabiliza y se deja desprotegida por mucho tiempo, aparte de que no se restringe el paso del tránsito hasta que agarre cierta resistencia. Esto hace que se deteriore y cuando se va a poner la capa asfáltica, la regularidad no sea muy buena y esto se refleja en el acabado de la capa de rodamiento asfáltica.

Cuando se protegen con emulsión o una capa de sello, igual se dejan por mucho tiempo hasta que se va deteriorando la

superficie, el agua penetra, se hacen huecos grandes. Estos luego se tapan con material granular, dejando una capa heterogénea, y luego se coloca la capa asfáltica cuando ya está reparada con este material. En casos, ha pasado que estos huecos se tapan con mezcla asfáltica, colocando una capa de pre-nivelación y luego la capa de rodamiento final, lo que encarece el proyecto y genera menor calidad.

En algunos casos, se le dosifica más cemento de lo que requiere porque se cree que entre mayor sea, queda más resistente. En muchos casos el sobrepasar la resistencia máxima no ha sido una voz de alarma desde el punto de vista del desempeño del material, sin embargo, esto conlleva problemas de contracción, que posteriormente se reflejan en grietas que afectan la capa de ruedo colocada encima. De ahí la recomendación de la Tabla 2 de construir juntas en las capas con mayores resistencias a la compresión.

Se da el caso que se colocan espesores muy delgados de base, por ejemplo 15 cm. Históricamente, éstos espesores no han sido adecuados en cuanto al desempeño, y menos si no se homogenizan adecuadamente.

Es importante que se planifique bien la época cuando se va a ejecutar la obra, para que no se tenga que experimentar aguaceros repentinos cuando aun la base no ha adquirido una resistencia inicial adecuada. En este sentido, con mucho más razón es importante sellarla oportunamente, además de cuidar el calor de hidratación.

Muchas veces no se le da el bombeo necesario, ya que se le aplica hasta cuando se coloca la capa de rodamiento. Esto afecta en dos aspectos primordiales: primero que el tiempo que se quede expuesta la base, ya sea con sello o no, el agua de escorrentía la puede deteriorar mayormente si no existe un bombeo adecuado que ayude a evacuar el agua de la superficie rápidamente; y segundo, que la capa de rodamiento no tendría un espesor uniforme si se trata de corregir esto hasta el final de la obra.

FASE DEL PROYECTO	COMENTARIOS
DISEÑO DE MEZCLA	
<p>1. Se realizan cambios al diseño original de la BE al considerar como variable:</p> <p>a. Variabilidad en la granulometría producida por la recuperadora</p>	<p>Punto a. Si no se controla el cumplimiento de especificaciones del material a estabilizar, previo a la colocación del material, es un hecho que se van a presentar variabilidad en la granulometría. Por otra parte se refuerza el hecho de que la recuperadora no es un equipo diseñado para quebrar el agregado y mediante el cual se pueda alcanzar la granulometría deseada.</p> <p>La variabilidad de la granulometría es de esperar en casos cuando lo que se estabiliza es el material-suelo existente en la ruta, de igual forma el diseño se debe adecuar a estas condiciones.</p>
<p>2. La BE-25 se diseña para una resistencia de 40 kg/cm² (7.1% de cemento=2.7 sacos/m³)</p>	<p>Especificación CR-77:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Valor mínimo: 21 kg/cm² • Valor promedio: 30 kg/cm² <p>Esto se traduce en consumo de más cemento que tiene implicaciones en costos del proyecto, así como problemas de rigidez excesiva de la capa. Un mayor contenido de cemento produce mayor rigidez que implica mayor susceptibilidad al agrietamiento por retracción y fatiga.</p>
CALIDAD	
<p>1. Se coloca material con sobretamaño = incumplimiento de especificaciones de granulometría</p>	<p>Se permite la colocación del material sin verificar el cumplimiento de especificaciones de granulometría.</p>
	
<p>2. El control de calidad del contratista no es efectivo para realizar ajustes al diseño de mezcla cuando se obtienen resistencias muy superiores al valor promedio o al valor de diseño.</p>	<p>Obtención de resistencias a la compresión a los 7 días muy superiores al valor mínimo y promedio de especificación. Ej:</p> <p>a. Datos de control de calidad del contratista: 70% de los valores superiores a 40 kg/cm². Valores máximos de 69 kg/cm².</p> <p>b. Datos de LanammeUCR: 89% de los valores de resistencia son mayores a 40 kg/cm²</p>
<p>3. La verificación de la calidad por parte de la Administración es débil y en algunos casos inexistente.</p>	<p>La Administración no cuenta con su propia información de respaldo y la que se genera a través de cuadrillas de técnicos, no cuenta con el respaldo de la acreditación de ensayos.</p>

CONSTRUCCIÓN	
<p>1. Se utiliza la recuperadora para eliminar el sobretamaño y llegar a cumplir la granulometría</p>	<p>Se considera que el riesgo que asume la Administración por aceptar la colocación de material que incumple la especificación es muy alto, aunque posterior al proceso de recuperadora, se tomen muestras para determinar el cumplimiento. Además esto implicar variabilidad en la granulometría, eventuales problemas de compactación por existir mayor cantidad de material grueso que interfiere con la compactación de partículas más finas. La adecuada densidad de las partículas finas es importante porque es donde se produce la mayor acción cementante.</p>
<p>2. Protección de la base estabilizada</p>	<p>La base estabilizada no se protege con la capa selladora según se establece en las especificaciones. Aun cuando se coloca este sello, también ocurre que esta superficie queda expuesta durante meses antes de que se le coloque la carpeta asfáltica, por lo que se deteriora. Por otra parte, la colocación de la capa selladora no se realiza en estricto apego a las especificaciones (equipo, dosificación material bituminoso y material de secado, compactación) Sección 409 CR-77.</p>
	
<p>3. Restricciones al tránsito</p>	<p>Se da la apertura al tránsito sin aplicar las recomendaciones que indican las especificaciones (CR-77)</p> <p>308.06 Restricciones de tránsito: “No deberá permitirse el tránsito de vehículos durante las operaciones de mezclado (en el caso contemplado en el artículo 307.03 c), distribución y compactación inicial de la mezcla. El tránsito de vehículos durante el proceso de compactación deberá ser regulado en cuanto a velocidad y vías de circulación para evitar sobre compactaciones localizadas en surcos”.</p>
<p>4. Método de incorporación del cemento-(mezclado de la base producida en sitio)</p>	<p>De acuerdo con resultados heterogéneos de resistencia a la compresión, tanto de control de calidad como del LanammeUCR, se considera que este es un factor que influye en la variabilidad de resultados. Adicionalmente se han detectado problemas de homogenización de la BE.</p>
	

<p>5. Irregularidades superficiales de la BE (diferencias en la conformación de la superficie)</p>	<p>En algunos casos esas irregularidades se “corrigen” con la colocación de mezcla asfáltica para “nivelar” la superficie.</p>
	
<p>DESEMPEÑO</p>	
<p>1. Deterioros prematuros:</p>	
<p>a. Agrietamiento en la BE</p>	
	
<p>b. Agrietamiento transversal</p>	
<p>13+070</p> 	
<p>c. Huecos en la línea de centro de la BE</p>	<p>Los huecos en la BE se bachean con mezcla asfáltica.</p>
	

d. Problemas en el manejo del drenaje	
NORMATIVA	
1. No hay una especificación de valor máximo de resistencia a la compresión.	La PCA en la “Guide to Cement-Treated Base (CTB)” (p.7), establece un rango de valores de resistencia a la compresión: a. Mezclado en sitio: 21 a 28 kg/cm ² b. Mezclado en planta: hasta 55 kg/cm ² Adicionalmente indica que se pueden obtener resistencias más altas dependiendo de los requerimientos del proyecto. En todo caso, la principal razón para limitar la resistencia es minimizar el agrietamiento por contracción causado por altos contenidos de cemento y agua.
GESTION ADMINISTRATIVA	1. En algunos proyectos no existe formalmente la figura de verificación por parte de la Administración. 2. De igual forma los contratos de inspección y la topografía inician posterior a la orden de inicio de las obras.
USO OTRAS ALTERNATIVAS	
1. Mezclado en planta	No se considera esta opción.
2. Prefisuración	Dado que en nuestro país ha aumentado la utilización de bases estabilizadas, esta técnica se considera el mejor método para controlar e incluso eliminar la reflexión de fisuras (por retracción y cambios volumétricos) en la superficie del pavimento. En países como Francia (1998), Alemania (2001) y España (2002) han incluido esta técnica en sus catálogos de secciones de pavimentos.

Algunas inquietudes del grupo auditor del PITRA-LanammeUCR se indican a continuación:

1. En términos de costos, se plantea si el CONAVI ha estimado cuán más elevado es el proceso de producción de la base estabilizada producida en planta.
2. En proyectos de carreteras de menor importancia por qué no considerar otras alternativas de construcción. Por ejemplo se proponen paquetes estructurales “robustos” (con base estabilizada) en rutas de bajo volumen.

Comentarios finales

1. Las bases estabilizadas con cemento han mostrado ser una alternativa muy importante para la construcción de pavimentos. Su aporte estructural, la variabilidad de materiales en las distintas zonas del país, el clima lluvioso y la presencia de zonas con niveles freáticos altos favorecen la aplicación de esta tecnología.

2. Con esta tecnología se pueden construir capas de base de alta capacidad estructural, pero además muy competitivas en cuanto a durabilidad y estabilidad volumétrica a largo plazo.

3. Estas bases son las más resistentes ante la deformación permanente que inducen los camiones, especialmente cuando se colocan capas asfálticas de rodadura de poco espesor; lo cual implica una alternativa de construcción por etapas, opción válida ante los limitados presupuestos disponibles.

4. El uso de una adecuada técnica constructiva y la combinación óptima del agua, el cemento y la energía de compactación son fundamentales para lograr bases de alta calidad y excelente desempeño, minimizando de esta forma el agrietamiento por contracción de fraguado.

5. El control y aseguramiento de la calidad en este tipo de bases tiene características muy específicas, por lo tanto el pliego de especificaciones debe tener en cuenta esta circunstancia.

6. Conviene ampliar la investigación en cuanto al uso de fibras para controlar el agrietamiento, así como la experiencia en el uso de esta técnica de estabilización para tratar agregados degradables, ambas alternativas ya fueron usadas en diferentes proyectos en Costa Rica.

7. El estado del arte de esta tecnología en nuestro medio permite visualizar importantes espacios en los cuales se puede avanzar con esta técnica, por ejemplo en tópicos como: métodos constructivos, control y aseguramiento de la calidad y pago de obra, reconstrucción de pavimentos existentes, actualización y adaptación de especificaciones técnicas, estudio de los modelos de deterioro, criterios técnicos para minimizar el efecto del agrietamiento, formulación de criterios técnicos para el diseño estructural, análisis comparativo de costos y desempeño, evaluación del uso simultáneo de cemento y cal en las bases estabilizadas, etc.

8. Conviene evaluar con detalle el tema de las bases mejoradas con cemento, sometiéndolo a un proceso de análisis técnico-científico de ingeniería, para derivar las recomendaciones y decisiones que corresponda.

9. Resulta conveniente procurar siempre adaptar la tecnología y las especificaciones técnicas a la realidad del contexto nacional. Las condiciones propias de costos, características de las materias primas, tecnologías disponibles, características del tránsito, condiciones de clima, etc., han mostrado la pertinencia de esta vía para el desarrollo de la tecnología vial.

10. Cuidar la colocación del material y de efectuar cortes en pegas y bordes, ya que es necesario evitar los bordes inclinados; además de mojar la superficie, con el fin de que la compactación en los bordes sea buena, ya que caso contrario el centro no quedará bien compactado.

11. Es conveniente hacer ensayos de durabilidad y abrasión.

En cuanto al control de calidad:

- El control de calidad implica:
- Paño de prueba
- Control granulometría
- Control calidad de cemento ya sea en sitio o en planta
- Medición del agua adicionada
- Elaboración de pastillas para falla a 7 días
- Control de compactación al 100% (Ensayo Proctor)
- Control tiempo después de adicionar el agua (no compactar después de dos horas)
- Curado con membrana o agua
- No abrir el tránsito antes de 7 días.

Bibliografía

1. Acosta, C; De León, R; Herrera, E; Loría, L & Sáenz, J.M. “Foro sobre Bases Estabilizadas con Cemento”. LanammeUCR, Universidad de Costa Rica. (2011). San José, Costa Rica.
2. Arce, M. “Bases Estabilizadas con Cemento: Algunos comentarios sobre sus ventajas e inconvenientes”. Boletín Técnico del PITRA. Volumen 2, N° 19. (Agosto 2011).
3. Figueroa, S & Reyes, F. “Estabilización con Cal y Cemento”. Universidad Javeriana, Colombia.



LanammeUCR

Universidad de Costa Rica

Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

C.P. 11501-2060

San José, Costa Rica

Tel.: (506) 2511-2500

Fax: (506) 2511-4440

E-mail: direccion.lanamme@ucr.ac.cr

Web: <http://www.lanamme.ucr.ac.cr>