

Distribuido por:

COMCEMENTOS
COMERCIALIZADORA DE CEMENTOS

Duitama: Teléfono (8) 7611261

Sogamoso: Teléfono (8) 7720040

www.comcementos.com

MANUAL DE ESTABILIZACIÓN DE SUELO TRATADO CON CAL

ESTABILIZACIÓN Y MODIFICACIÓN CON CAL

Publicación de la Nacional Lime Association

National Lime Association

L I M E

The Versatile Chemical

Enero 2004

(La traducción fue finalmente publicada Noviembre de 2006)

Boletín 326

MANUAL DE ESTABILIZACIÓN DE SUELO TRATADO CON CAL

Prefacio

Este manual fue escrito para los contratistas de construcción que desarrollan ofertas de proyectos, planifican o conducen actividades constructivas; para ingenieros que estén preparando especificaciones sobre estabilización con cal; para inspectores de proyectos y para estudiantes de Ingeniería Civil.

Esta publicación fue escrita originalmente por el Sub Comité de Estabilización con cal de la Asociación Americana de Constructores de Carreteras y publicada en 1959 como un boletín técnico 243 ARBA. La Asociación Nacional de Cal (NLA por sus siglas en inglés) adquirió los derechos de publicación en 1965. Esta undécima edición fue revisada detalladamente en 2003.

Esta es una traducción libre del documento en inglés, que pretende dar a conocer el contenido del manual original. Se le dan las gracias a Cementos Progreso por su colaboración.

Aclaración

Este documento es una guía general y de referencia, únicamente. Está pensado para ser utilizado por personal profesional competente que pueda evaluar el significado y las limitaciones de la información suministrada y serán dichos profesionales quienes aceptarán la responsabilidad de la aplicación de la información dada. Este documento no modifica ningún requerimiento legal, ni representa ningún estándar o especificación. Ni la Asociación nacional de la cal –NLA- o sus miembros asumen ninguna responsabilidad sobre el uso de este manual. La Asociación nacional de la cal –NLA- no pretende infringir sobre ninguna patente o derechos de propiedad intelectual o inducir a terceros a hacerlo y de aquí que los usuarios de este documento son responsables de determinar cuando un método, técnica o tecnología descrita aquí esté protegido por alguna patente o cualquier otra restricción legal.

Índice

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.....Pagina 5

¿Qué es la cal?

Estabilización de suelos con cal

Modificación y secado de suelos utilizando cal

La química del tratamiento con cal

Mezclas de cal-puzolana para suelos con cantidades bajas de arcilla

CAPÍTULO II: DESCRIPCIÓN Y COMPARACIÓN DE LOS PROCEDIMIENTOS CONSTRUCTIVOS.....Pagina 11

Revisión de construcción

Ventajas y desventajas de las diferentes aplicaciones de la cal

CAPÍTULO III: DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LOS PASOS CONSTRUCTIVOS.....Pagina 13

Entrega

Estabilización de la subrasante (subbase)

1. Escarificación y pulverización inicial
2. Aplicación de la cal
3. Mezcla preliminar y adición de agua
4. Período de fraguado
5. Mezclado final y pulverización
6. Compactación
7. Curado final

Estabilización de la base

Recuperación de espesor completo
Agregado de capa de base – mezclado en planta

Cal para secado y modificación

CAPÍTULO IV: CONSIDERACIONES ADICIONALES.....Pagina 27

- Mantenimiento del tráfico
- Necesidad de la superficie expuesta
- Limitaciones climáticas
- Flexibilidad en la construcción
- La lluvia no es perjudicial

- Precauciones de seguridad al utilizar cal

 - Seguridad del trabajador
 - Seguridad del producto
 - Primeros auxilios

- Cal seca – bolsas

- Densidad bruta

- Uso de otros estabilizadores con cal

 - Estabilización de la base

 - Cal y ceniza volante o polvo de horno de cal para la construcción de subbases

- Sulfatos

CAPÍTULO V: OTROS USOS.....Pagina 34

- Aeropuertos
- Comercios
- Urbanizaciones
- Estabilización de terraplenes

Apéndices.....Pagina 38

- Apéndice A: Especificaciones
- Apéndice B: Otras publicaciones sobre suelos
- Apéndice C: Índice plástico (IP)
- Apéndice D: Tablas (para convertir el porcentaje a peso)

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

El funcionamiento a largo plazo de cualquier proyecto de construcción depende de la calidad de los suelos subyacentes. Los suelos inestables pueden crear problemas significativos en las estructuras y pavimentos (Figura 1). Con el diseño y técnicas de construcción apropiados, el tratamiento con cal transforma químicamente los suelos inestables en materiales utilizables. Adicionalmente, el soporte estructural de los suelos estabilizados con cal puede ser aprovechado en el diseño de pavimentos.



Figura 1: Ejemplo extremo de fracaso de un pavimento por suelos inestables.



Figura 2: Comparación de arcilla plástica sin tratar y arcilla tratada con cal, después de la mezcla inicial y fraguado.

La cal puede ser utilizada en el tratamiento de suelos, en varios grados o cantidades, dependiendo del objetivo. Una mínima cantidad de cal para tratamiento se utiliza para secar y modificar temporalmente los suelos. Tal tratamiento produce una plataforma de trabajo para la construcción de caminos temporales. Un mayor grado de tratamiento – respaldado por las pruebas, diseño y las técnicas apropiadas de construcción – producen la estabilización estructural permanente del suelo.

Antes de iniciar cualquier proyecto de construcción, se deben desarrollar los planos y especificaciones. Para pavimentos de carreteras, el diseño debe ajustarse al tráfico esperado, tomando también en cuenta el medio ambiente, el sitio y las condiciones de los materiales. Todos los diseños estructurales deben basarse en pruebas de laboratorio y parámetros que se ajusten a las demandas del proyecto en particular y además, proveer la alternativa más económica para el uso planeado. Este manual se enfoca en los aspectos de construcción relacionados al tratamiento de suelos con cal. Las pruebas y la

metodología de diseño de capas de suelo estabilizadas están disponibles en muchos lugares. Por ejemplo, se puede acceder al diseño de mezcla y el protocolo de pruebas, en <http://www.lime.org/SOIL3.PDF>

Se debe tomar en cuenta que el uso de cal para el secado de suelos, la modificación temporal y la estabilización permanente no está limitado a la construcción de carreteras.

En principio, este manual fue escrito para usos de pavimentos de carreteras, y así se mantiene el enfoque, ya que la mayor parte de cal para el tratamiento de suelo, se usa en la construcción de carreteras. Sin embargo, el empleo de cal para el secado de suelos, la modificación temporal y la estabilización permanente no se limita a la construcción de carreteras - ver Capítulo V para más información.

¿Qué es la cal?

Iniciaremos por indicar que para el tratamiento de suelos se puede utilizar cal viva (óxido de calcio – CaO), cal hidratada (hidróxido de calcio – Ca[OH]₂) o una lechada de cal.¹

La cal viva se produce de la transformación química del carbonato de calcio (piedra caliza – CaCO₃) en óxido de calcio. La cal hidratada se obtiene cuando la cal viva reacciona químicamente con el agua. La cal hidratada (hidróxido de calcio) es la que reacciona con las partículas arcillosas y las transforma permanentemente en una fuerte matriz cementante.

La cal más utilizada para el tratamiento de suelos es la cal alta en calcio, que contiene un máximo de 5% de óxido o hidróxido de magnesio. Sin embargo, en algunas ocasiones se utiliza cal dolomítica. La cal dolomítica contiene de 35 a 46% de óxido o hidróxido de magnesio. Con la cal dolomítica se puede lograr la estabilización, aunque la fracción de magnesio reacciona más lentamente que la fracción de calcio.

Algunas veces el término “cal” se utiliza para referirse a la cal agrícola que, por lo general, es piedra caliza finamente molida, un útil correctivo agrícola que no tiene la suficiente reactividad química para lograr la estabilización del suelo.

Otras veces el término “cal” es utilizado para referirse a los subproductos del proceso de fabricación de cal (como el polvo de horno de cal), que, aunque contienen alguna cal reactiva, generalmente sólo posee una fracción del óxido o el contenido de hidróxido del producto fabricado. En este manual, “cal” significa cal viva, cal hidratada, o la lechada de cal hidratada.

Estabilización de suelos con cal

La estabilización del suelo cambia considerablemente las características del mismo, produciendo resistencia y estabilidad a largo plazo, en forma permanente, en particular en lo que concierne a la acción del agua (Figura 3).

¹ una lechada de cal es una suspensión de cal hidratada en agua, que puede elaborarse a partir de cal hidratada o de cal viva



Figura 3: La capa estabilizada con cal soporta la erosión, ilustrando la resistencia.

La cal, sola o en combinación con otros materiales, puede ser utilizada para tratar una gama de tipos de suelos. Las propiedades mineralógicas de los suelos determinarán su grado de reactividad con la cal y la resistencia final que las capas estabilizadas desarrollarán. En general, los suelos arcillosos de grano fino (con un mínimo del 25 por ciento que pasa el tamiz 200 -75 μ m- y un Índice de Plasticidad mayor que 10) se consideran buenos candidatos para la estabilización. Los suelos que contienen cantidades significativas de material orgánico (mayor que 1 por ciento) o sulfatos (mayor que el 0.3 por ciento) pueden requerir cal adicional y/o procedimientos de construcción especiales.

Subrasante (o subbase): La cal puede estabilizar permanentemente el suelo fino empleado como una subrasante o subbase, para crear una capa con un valor estructural significativo en el sistema del pavimento. Los suelos tratados pueden ser del lugar (subrasante) o bien, de materiales de préstamo. La estabilización de la subrasante por lo general implica mezcla en el lugar y generalmente requiere la adición de cal de 3 a 6 por ciento en peso del suelo seco.²

Bases: La cal puede estabilizar permanentemente materiales que no cumplen con las características mínimas para funcionar como una base (como la grava con arcilla, gravas "sucias", o bases contaminadas en general) que contienen al menos el 50 por ciento de material grueso retenido en la malla o tamiz No. 4. La estabilización de bases es utilizada para la construcción de caminos nuevos y para la reconstrucción de caminos deteriorados, y generalmente requiere la adición de 2 a 4 por ciento de cal respecto al peso del suelo seco. La mezcla en el lugar se usa comúnmente para la estabilización de bases, sin embargo, la mezcla en planta también puede ser utilizada. La cal también se usa para mejorar las características de las mezclas de suelo y agregados en "el reciclaje de espesor completo".

² Los porcentajes de cal a utilizar deben ser determinados por un Ingeniero, utilizando un diseño de mezcla y un protocolo de prueba. En el apéndice D se muestra una tabla para convertir los porcentajes de cal en peso.

Modificación con cal y secado de suelos

Existen otros dos tipos importantes de tratamiento con cal utilizado en operaciones de construcción:

Primero, debido a que la cal viva se combina químicamente con el agua, puede ser usada con eficacia para secar suelos mojados. El calor generado por esta reacción también contribuye a secar los suelos mojados. La reacción con el agua ocurre incluso si los suelos no contienen fracciones arcillosas significativas. Cuando las arcillas están presentes, la reacción química de la cal con las arcillas, seca aún más los suelos. El efecto neto es que el secado ocurre rápidamente, dentro de un lapso de horas, permitiendo al contratista compactar el suelo mucho más rápidamente que si esperara que el suelo se secase por la evaporación natural.

El secado del suelo húmedo en obras de construcción es uno de los usos más amplios de la cal para el tratamiento de suelos. La cal puede ser utilizada para uno o varios de los siguientes casos: ayudar a la compactación, secar las áreas húmedas; mejorar la capacidad soporte; proporcionar una plataforma de trabajo para la construcción subsiguiente; y acondicionar el suelo (hacerlo trabajable) para una posterior estabilización con cemento Portland o con asfalto. Generalmente, entre 1 y 4 por ciento de cal secará un sitio mojado suficientemente para permitir que procedan las actividades de construcción.

Segundo, el tratamiento con cal puede mejorar considerablemente la trabajabilidad y la resistencia a corto plazo del suelo, de tal forma que permite que los proyectos puedan ser ejecutados más fácilmente. Los ejemplos incluyen tratamiento de suelos finos o materiales de base granular para construir caminos temporales u otras plataformas de construcción. Típicamente se utiliza del 1 al 4 por ciento de cal en peso con respecto al suelo para la modificación, que es generalmente una menor cantidad que la utilizada para la estabilización permanente de suelos. Los cambios hechos al suelo modificado con cal pueden o no ser permanentes. La diferencia principal entre la modificación y la estabilización es que, con la modificación, generalmente no se le concede ningún crédito estructural a la capa modificada con cal en el diseño de pavimento. La modificación con cal trabaja mejor en suelos arcillosos.

La química del tratamiento con cal³

Cuando la cal y el agua se añaden a un suelo arcilloso, comienzan a ocurrir reacciones químicas casi inmediatamente.

1. **Secado:** Si se usa la cal viva, la misma se hidrata inmediatamente (i.e., químicamente se combina con el agua) y libera calor. Los suelos se secan, porque el agua presente en el suelo participa en esta reacción, y porque el calor generado puede evaporar la humedad adicional. La cal hidratada producida por estas reacciones iniciales, posteriormente reaccionará con las partículas de arcilla (como se discute posteriormente). Estas reacciones subsecuentes, lentamente producirán un secado adicional porque las mismas reducen la humedad,

³ Para una discusión más detallada de la química de la estabilización puede ver Little, Estabilización de Subrasantes y Bases de pavimentos con cal, 1995.

mejorando el soporte. Si se utilizan la cal hidratada o la lechada de cal hidratada, en lugar de la cal viva, el secado ocurre sólo por los cambios químicos del suelo, que reducen su capacidad para retener agua y aumentan su estabilidad.

2. **Modificación:** Después de la mezcla inicial, los iones de calcio (Ca^{++}) de la cal hidratada emigran a la superficie de las partículas arcillosas y desplazan el agua y otros iones. El suelo se hace friable y granular, haciéndolo más fácil para trabajar y compactar (Figura 4). En esta etapa, el Índice de Plasticidad del suelo disminuye drásticamente, así como lo hace su tendencia a hincharse y contraerse. El proceso, llamado "floculación y aglomeración", generalmente ocurre en el transcurso de horas.



Figura 4. Arcilla floculada con cal.

3. **Estabilización:** Cuando se añaden las cantidades adecuadas de cal y agua, el pH del suelo aumenta rápidamente arriba de 10.5, lo que permite romper las partículas de arcilla. La determinación de la cantidad de cal necesaria es parte del proceso de diseño y se estima por pruebas como la de Eades y Grim (ASTM D6276). Se liberan la sílice y la alúmina y reaccionan con el calcio de la cal para formar hidratos de calcio-silicatos (CSH) e hidratos de calcio-aluminatos (CAH). CSH y CAH que son productos cementantes similares a aquellos formados en el cemento de Portland. Ellos forman la matriz que contribuye a la resistencia de las capas de suelo estabilizadas con cal

Cuando se forma esta matriz, el suelo se transforma de un material arenoso granular, a una capa dura relativamente impermeable, con una capacidad de carga significativa. El proceso se inicia en unas horas y puede continuar durante años, en un sistema diseñado correctamente. La matriz formada es permanente, duradera, y significativamente impermeable, produciendo una capa estructural que es tan fuerte como flexible.

Mezclas de Cal-Puzolanas para Suelos con cantidades bajas de arcilla

La cal por sí misma puede reaccionar con suelos que contienen tan poca arcilla como 7% e Índices de Plasticidad tan bajos como 10. Si el suelo no es suficientemente reactivo, la cal puede ser combinada con una fuente adicional de sílice y alúmina. Tales puzolanas incluyen la ceniza volante y la escoria de alto horno. El sílice y alúmina adicional de las puzolanas reaccionan con la cal para formar la fuerte matriz cementante que caracteriza a una capa estabilizada con cal. Las mezclas correctamente proporcionadas de cal y puzolanas pueden modificar o estabilizar casi cualquier suelo, pero comúnmente se usan para suelos con plasticidad de baja a media.

La ceniza volante es la puzolana más comúnmente usada. Esta es el residuo fino que es resultado de la combustión de carbón pulverizado en calderas de centrales eléctricas, que es transportado de la cámara de combustión a la chimenea de los gases.

El empleo de ceniza o polvo de horno de cal (LKD por sus siglas en inglés) es una alternativa cada vez más popular. El LKD es el residuo fino que resulta de la combustión de carbón y el tratamiento de caliza en un horno, para procesar la piedra en cal y que es removido de los gases de escape del horno. El LKD por lo general contiene una cantidad significativa de cal, aluminio y silicio -es en esencia una premezcla de puzolana y cal-. La cantidad de cal, silicio y aluminio en el LKD varía, principalmente dependiendo de la caliza, el combustible y el tipo de operaciones del horno usadas durante el proceso de fabricación de cal.

CAPÍTULO II: DESCRIPCIÓN Y COMPARACIÓN DE PROCEDIMIENTOS DE CONSTRUCCIÓN

Visión general de la construcción

Como la cal puede ser utilizada para tratar suelos de distintos tipos, el primer paso en la evaluación de las opciones de tratamiento del suelo es identificar claramente el objetivo.

Los pasos en la construcción implicados en la estabilización y en la modificación, son similares. Generalmente, la estabilización requiere más cal y más tratamiento y control, que la modificación. Los pasos básicos incluyen:

- escarificar o pulverizar parcialmente el suelo,
- esparcir la cal,
- adición de agua y mezcla,
- compactar a la densidad máxima práctica, y
- curado antes de la colocación de la siguiente capa o capa de protección.

Cuando se realiza la mezcla en planta (fuera del sitio del proyecto) en lugar de la mezcla en el lugar de trabajo, ya sea en la estabilización o en la modificación, sólo se aplican tres de los pasos mencionados: esparcir la mezcla cal-agregado-agua, la compactación y el curado.

Ventajas y desventajas de los diferentes métodos de aplicación de cal

La técnica de estabilización con cal utilizada en un proyecto debería estar basada en múltiples consideraciones, tales como la experiencia del contratista, la disponibilidad de equipo, la ubicación del proyecto (rural o urbano) y la disponibilidad de una fuente cercana y adecuada de agua.

Algunas ventajas y desventajas de los diferentes métodos de aplicación de cal son los siguientes:

Cal hidratada en polvo:

Ventajas: Puede ser aplicada más rápidamente que la lechada. La cal hidratada en polvo puede ser utilizada para secar arcillas, pero no es tan eficaz como la cal viva.

Desventajas: Las partículas hidratadas de cal son finas. De modo que el polvo puede ser un problema y este tipo de uso generalmente es inadecuado en áreas pobladas.

Cal viva en seco:

Ventajas: Económica porque la cal viva es una forma más concentrada de cal que la cal hidratada, conteniendo de 20 a 24 por ciento más de óxido de calcio "disponible". Así, aproximadamente 3 por ciento de cal viva es equivalente a 4 por ciento de cal hidratada, cuando las condiciones permiten la hidratación completa de la cal viva con suficiente humedad. Debido a su mayor densidad requiere de menos instalaciones de almacenaje.

El tiempo de ejecución puede ampliarse debido a que la reacción exotérmica causada por el agua y la cal viva puede calentar el suelo. La cal viva seca es excelente para secar suelos mojados. Tamaños de partícula más grandes pueden reducir la generación de polvo.

Desventajas: La cal viva requiere 32 por ciento de su peso en agua para convertirse en cal hidratada y puede haber pérdida adicional por la evaporación significativa debido al calor de hidratación. Se debe tener cuidado con el empleo de la cal viva para asegurar una adecuada adición de agua, fraguado y mezcla. Estos mayores requerimientos de agua pueden plantear un problema de logística o costos en áreas remotas sin una fuente cercana de agua. La cal viva puede requerir más mezcla que la cal hidratada seca o que las lechadas de cal, porque las partículas de cal viva, que son más grandes, primero deben reaccionar con el agua para formar la cal hidratada y luego debe ser mezclada con el suelo.

Lechada de cal:

Ventajas: Aplicación libre de polvo. Es más fácil lograr la distribución. Se aprovecha la aplicación por rociado. Se requiere menos agua adicional para la mezcla final.

Desventajas: Velocidad lenta de aplicación. Costos más altos debido al equipo extra requerido. Puede no ser práctico en suelos muy mojados. No es práctico para secar.

CAPÍTULO III: Descripción detallada de los pasos constructivos

Las siguientes recomendaciones de construcción aplican, tanto al empleo de cal hidratada como al de cal viva, en la estabilización o la modificación de subrasantes (subbases) y capas de base, y se indican como una guía general para contratistas, inspectores y quienes definen especificaciones. El aseguramiento/control de calidad se discute a lo largo del capítulo.

Entrega

Cal viva o hidratada seca

La cal viva o la cal hidratada seca, puede ser entregada en bolsas de papel o bien en pipas (Figura 5). Cuando se transporta en pipa es común que, cada carga de cal seca entregada en un sitio de trabajo lleve una boleta certificando la cantidad de cal a bordo. Además, algunas entidades requieren la certificación de las características químicas de la cal entregada.



Figura 5: Ejemplo de pipa típicamente usada para entrega de cal seca.

Ocasionalmente, la cal viva se entrega en el sitio en camiones de volteo. En este caso, requieren cubiertas de lona fuerte para prevenir la pérdida de polvo durante el tránsito.

Lechada de cal

La lechada de cal puede ser producida a partir de la cal viva o de la cal hidratada. Puede ser entregada desde una planta de mezcla central o puede producirse en el lugar de trabajo. Las instalaciones de preparación de la lechada deberían ser aprobadas por el ingeniero de proyecto. Independientemente de la ubicación, la lechada producida a partir de cal viva está caliente debido a que la reacción química entre la cal viva y el agua es exotérmica. Las lechadas elaboradas por la mezcla de cal hidratada y agua no se calientan.

La lechada puede prepararse en un tanque de mezcla, con agitación para mezclar la cal y el agua utilizando paletas deflectoras, aire comprimido, y/o bombas de recirculación. Los mezcladores utilizados en el lugar, usualmente manejan de 20 a 25 toneladas de cal viva a la vez (Figura 6).



Figura 6: Tanques mezcladores para preparar la lechada de cal en el lugar.

Un segundo método de producción de lechada, que elimina tanques de producción por lotes, implica el empleo de un mezclador compacto con motor (Figura 7). Se carga agua a una presión de 70 psi y cal hidratada, en forma continua en una proporción de 65:35 (en peso) en el mezclador, donde la lechada se produce instantáneamente. La lechada es bombeada directamente en camiones para regarla en el lugar del proyecto. El mezclador y el equipo auxiliar pueden ser montados sobre un pequeño trailer y ser transportados al lugar fácilmente, dando gran flexibilidad a la operación.

En el tercer tipo de proceso para elaborar lechada, se cargan cantidades dosificadas de agua y cal, separadamente, en el tanque del camión con la lechada siendo mezclada en el tanque ya sea con aire comprimido o con una bomba de recirculación montada en la parte trasera del mismo. El agua es medida y la cal se dosifica volumétricamente o por lotes, utilizando pesadoras.

Las lechadas de cal contienen hasta el 42 por ciento de sólidos. El porcentaje sólidos de cal puede ser medido utilizando un dispositivo simple de gravedad específica (picnómetro) para asegurar que se aplica la cantidad adecuada de cal en todas las partes del proyecto.



Figura7: Mezcladora de motor.

Estabilización de Subrasante (o Subbase)

1. Escarificación y pulverización inicial

La subrasante puede ser escarificada a la profundidad y ancho especificados (Figura 8) y luego pulverizarse parcialmente. Es deseable remover los materiales que no sean suelos y que sean mayores que 3 pulgadas, como troncos, raíces, césped y piedras.

Una subrasante escarificada o pulverizada ofrece más área de contacto superficial de suelo para la cal en el momento de la aplicación.

En el pasado era una práctica común escarificar antes de la aplicación. Hoy en día, debido a la disponibilidad de mezcladores superiores, la cal a menudo es aplicada sin la escarificación. Los camiones de cal también pueden transitar la carretera con más facilidad si está compactada, más bien que escarificada, en particular sobre suelos mojados. La principal desventaja de este procedimiento, sin embargo, se da por factores meteorológicos; cuando la cal es colocada sobre una superficie lisa, hay mayor posibilidad para la pérdida debido al viento y al proceso, particularmente si la mezcla no se realiza de inmediato. Para eliminar la pérdida hacia los lados, se puede construir un pequeño camellón, utilizando material del camino (Figura 9).



Figura 8: Escarificación antes de la aplicación de la cal.



Figura 9: Camellón utilizado para contener la cal antes de la mezcla

Si la cal viva se descarga en “volcanes”, es deseable una superficie lisa, de modo que se alcance una aplicación uniforme con la hoja de la motoniveladora. Por lo anterior, el suelo no debería ser escarificado antes de que la cal viva sea aplicada de esta manera.

Equipo: motoniveladora con escarificador o escarificador de discos; estabilizadora de suelos para pulverización inicial.

2. Aplicación de la cal

Cal viva

Existen dos formas en que la cal viva seca puede ser aplicada. La primera, los camiones autodescargables o trailers pueden distribuir la cal viva neumática o mecánicamente a la anchura completa del camión. Debido a que el flujo de cal viva granular y sin triturar es más controlable que el de la cal hidratada, resulta una práctica común usar camiones con aplicadores incorporados (Figura10).

Para el empleo de una barra de extensión neumática, la cal viva se muele ($\frac{1}{4}$ " por 0) para fluir libremente. aplicador mecánico sobre la parte posterior de un camión o trailer, o una caja separada puede manejar la cal viva menos fina - comúnmente hasta $\frac{1}{2}$ " de diámetro. La subbase puede ser escarificada para este tipo de uso. Este uso trabaja bien en condiciones de suelo muy mojadas.



Figura10: Uso de cal seca con aplicación mecánica⁴.

Para asegurar que se aplica la cantidad correcta de cal, se puede colocar sobre el suelo una bandeja o un paño de área conocida, entre las ruedas del camión que esparce la cal. La bandeja o paño, donde se recolectó la cal, se pesa para verificar que la cantidad de cal es la correcta.

Otro método para aplicar la cal viva, es por gravedad, dejándola caer formando un camellón. Es usual utilizar camiones graneleros con sistemas de compuertas inferiores neumáticas. Una motoniveladora se utiliza, ocasionalmente, para esparcir la cal viva. Se puede utilizar cal hasta un tamaño de $\frac{3}{4}$ ". Este método requiere que el área sea nivelada y esté suficientemente seca, para que el suelo no se ahuelle bajo las llantas del camión, lo que evitaría la extensión uniforme. Es difícil de medir la proporción de aplicación de cal cuando se extiende utilizando una motoniveladora. El mejor método es marcar un área en la cual se extenderá una cantidad conocida de cal y observar la motoniveladora para asegurar que es extendida uniformemente.

⁴ Foto cortesía de "Mt. Carmel Sand & Gravel"

Cal hidratada seca

La cal hidratada debe ser uniformemente extendida en el porcentaje especificado desde camiones adecuadamente equipados (Figura10). Un aplicador aprobado es preferible para la distribución uniforme. La cantidad de cal hidratada seca puede ser medida usando el mismo método que descrito encima para la cal viva.

La cal hidratada seca no debería ser extendida en condiciones de viento debido al polvo excesivo. En condiciones de viento, en áreas pobladas, o en zonas adyacentes al tráfico de vehículos pesados, la aplicación de lechada o una aplicación adecuada de cal viva pueden reducir al mínimo los problemas relacionados con el polvo.

Equipo para aplicación de cal hidratada seca: Para envíos en camión, los camiones con tanques autodescargables son los más eficientes para transportar y esparcir la cal porque no se requiere ningún manejo adicional. La descarga se realiza neumáticamente o por uno o varios transportadores de tornillo. La extensión puede ser lograda por una paleta mecánica colocada en la parte posterior u otros dispositivos.

Si se utiliza transporte de palangana, los mismos deben ser cubiertos para prevenir el polvo durante el viaje al lugar de aplicación y durante la extensión de la cal. La extensión, al utilizar transporte de palangana, deberá realizarse ajustándole un esparcidor mecánico en la parte posterior. No se recomienda descargar la cal en solo “volcán” para realizar posteriormente la extensión con motoniveladora.

Lechada de cal

En este uso, el suelo generalmente es escarificado y la lechada se aplica con camiones distribuidores (Figura 11). Debido a que la cal en la forma de lechada está menos concentrada que la cal seca, a menudo se requiere dos o más pasadas para proporcionar la cantidad especificada de sólidos de cal. Para prevenir la pérdida y la consecuente no uniformidad en la distribución de cal, la lechada se mezcla con el suelo inmediatamente después de cada pasada.

La proporción real utilizada depende del porcentaje de cal especificada para el tipo de suelo, y el porcentaje de sólidos de cal en la lechada. Los sólidos en la lechada generalmente están en el rango entre 30 y 35 por ciento, aunque existe la tecnología para aumentar los sólidos arriba del 40 por ciento para reducir el número de pasadas de por los camiones esparcidores. Los sólidos contenidos en la lechada (y, por consiguiente, la cantidad de cal disponible) pueden ser fácilmente medidos en los tanques de mezcla o en los camiones, utilizando un dispositivo de gravedad específica. Una vez que se conoce el contenido de sólidos de la lechada, las cargas pueden ser extendidas sobre áreas de extensión conocida para asegurar la cantidad correcta de aplicación.

Equipo para aplicación de la lechada: Se recomiendan camiones distribuidores con recirculación, capaces de mantener la lechada en la suspensión. Si el tiempo de viaje es corto, se pueden utilizar camiones sin bombas de recirculación. La extensión desde los camiones de tanque se lleva a cabo por gravedad o por barras de rocío a presión. Los distribuidores de presión son preferidos porque ellos proporcionan una aplicación más uniforme.



Figura 11: Ejemplo de aplicación de lechada.

3. Mezcla preliminar y aplicación de agua

Se requiere una mezcla preliminar para distribuir la cal dentro del suelo y para pulverizar inicialmente el suelo para preparar la adición de agua que inicie la reacción química para la estabilización. Esta mezcla puede iniciar con la escarificación (Figura12). La escarificación puede realizarse aún sin mezcladoras modernas. Durante este proceso o inmediatamente después, el agua deberá agregarse (Figura 13).



Figura 12: Escarificación después de extensión de cal.



Figura13: Adición de agua después la aplicación de cal seca⁵

⁵ Foto cortesía de “Mt. Carmel Sand & Gravel”

Las estabilizadoras de suelos (Ej. CAT SS-250B) pueden ser utilizadas para asegurar la mezcla cuidadosa de la cal, el suelo, y el agua (Figura 14). Con muchas estabilizadoras de suelos, el agua puede añadirse al tambor de mezcla durante el proceso (Figura15). Este es el método óptimo de adición de agua a la cal (cal viva o hidratada) y al suelo secos, durante la mezcla preliminar y la etapa de riego.



Figura14: Estabilizadora de suelos utilizada para la mezcla inicial.



Figura15: Estabilizadora de suelos con camión de agua.

Independientemente del método usado para la adición de agua, es esencial que la cantidad de agua agregada sea la adecuada para asegurar la completa hidratación y llevar el contenido de humedad del suelo 3% arriba del óptimo, antes de la compactación.

Para hidratar la cal viva seca, puede ser necesaria agua adicional. El equilibrio de la operación de estabilización con cal viva es similar al obtenido utilizando cal hidratada o lechada de cal. Un requerimiento clave cuando se utiliza cal viva es asegurar la completa hidratación previa a que la mezcla sea completada y se inicie la compactación. Es recomendable realizar verificaciones puntuales, utilizando una pala, para asegurar que en el suelo no han quedado remanentes de cal viva sin hidratar. Si se observara cantidades excesivas de cal viva (por ejemplo, debido a una pobre distribución), se requerirá agregar más agua y una mezcla adicional necesarios para asegurar la completa hidratación y un proyecto de estabilización de calidad.

Para asegurar que la sección estabilizada tiene la profundidad correcta, se pueden cavar pequeños agujeros al azar y el suelo puede ser rociado con un indicador de pH, tal como la fenoftaleína. La fenoftaleína cambia de transparente a rosada entre un pH de 8.3 y 10. El cambio en color indica que el suelo en proceso de estabilización se encuentra en el límite inferior de pH requerido. Se pueden requerir otros indicadores de pH que cambian de color a niveles más altos (por ejemplo, fenoftaleína), si existieran sospechas de que la mezcla de cal y suelo es inadecuada.

En donde están siendo estabilizadas arcillas muy plásticas, generalmente es necesario mezclar la capa de arcilla y cal en dos etapas, permitiendo un lapso de 24 a 48 horas de período de fraguado. Durante este período de fraguado, la arcilla se hace friable de modo que la pulverización pueda ser fácilmente lograda durante la mezcla final.

Después de que se completa la mezcla, la capa tratada con cal debe ser afinada y compactada ligeramente con un Rodo para reducir al mínimo la pérdida por evaporación o mojado excesivo debido a posibles lluvias durante el fraguado.

Equipo: Estabilizadora de suelos, camión de agua y “rodo patas de cabras” o compactador neumático.

4. Período de fraguado

La mezcla de suelo y cal debería fraguar suficientemente para permitir la reacción química que cambia las propiedades del material. La duración de este período de fraguado debería basarse en el juicio de ingeniería y depende del tipo de suelo. El período de fraguado, comúnmente, es de 1 a 7 días. Después del fraguado, el suelo deberá ser mezclado, de nuevo, antes de la compactación. Para suelos con Índice de Plasticidad bajos, o cuando el objetivo es el secado o la modificación, por lo general, el fraguado no es necesario.

5. Mezcla final y pulverización

Para alcanzar la estabilización completa, es esencial una adecuada pulverización final de la fracción arcillosa y la completa distribución de la cal dentro del suelo (Figura16). La mezcla y la pulverización deberían continuar hasta que el 100 por ciento de material pase el tamiz de 1 pulgada y al menos el 60 por ciento de material pase el tamiz No. 4.



Figura 16: Mezcla y pulverización.

Si se utiliza la cal viva, es esencial que todas las partículas estén hidratada y que hayan sido mezcladas. En el caso de cal viva seca, después del mezclado final, antes de la compactación, inspeccione visualmente el suelo para asegurar que la mezcla ha sido alcanzada. El uso de cal viva seca, a menudo produce manchas ligeras en el suelo, que no merecen atención ya que no son partículas sin hidratar. Si existe la duda, coloque una muestra de estas partículas en agua. Si no se disuelven, son partículas inertes. Si se disuelven, son partículas de cal, que indican que se requiere mezcla adicional antes de la compactación final.

Se puede requerir agua adicional durante la mezcla de final (antes de la compactación) para llevar el suelo a un 3 por ciento arriba del contenido de humedad óptima del material tratado.

Si hay certeza que los requerimientos de pulverización se pueden completar durante la mezcla preliminar, entonces los pasos de fraguado y mezcla final (pasos No. 4 y No. 5) pueden eliminarse.

Equipo: Estabilizadora de suelos.

6. Compactación

La mezcla suelo-cal deberá ser compactada a la densidad requerida por la especificación, comúnmente, al menos, al 95 por ciento de la densidad máxima obtenida en el ensayo AASHTO T99 (Proctor estándar). El valor de densidad deberá basarse en la curva Proctor de una muestra representativa de la mezcla de suelo-cal – y no del suelo sin tratar.

La compactación deberá iniciar inmediatamente después de la mezcla final. Si esto no es posible, los retrasos de hasta cuatro días no deberían ser un problema si la mezcla es ligeramente compactada y se mantiene húmeda mientras se lleva a cabo la compactación. Para demoras más largas, puede ser necesario incorporar una pequeña cantidad adicional de cal en el suelo.

Equipo: para asegurar una compactación adecuada, el equipo deberá adaptarse a la profundidad de la capa. La compactación puede lograrse utilizando compactador pesado de neumáticos o rodo vibratorio o una combinación de la “pata de cabra” y un compactador ligero “de almohadilla” (Figura17). Comúnmente, la superficie final de compactación se completa utilizando un rodo liso (Figura18).



Figura17: Compactadores “Pata de cabra” (arriba) y “de almohadillas” (abajo)



Figura18: Compactador de rodo liso

7. Curado final

Antes de la colocación de la siguiente capa de subbase (o capa de base), se debe permitir que la subrasante compactada (o subbase) se endurezca hasta que camiones pesados operen sin ahueclar la superficie. Durante este tiempo, la superficie de suelo tratado con

cal deberá mantenerse húmeda para ayudar al incremento de resistencia. Esto se conoce como "curando" y puede hacerse de dos maneras: (a) curado húmedo, que consiste en mantener la superficie en una condición húmeda a través de un rociado leve y compactándolo cuando sea necesario, y (b) curado con membrana, que implica el sellado de la capa compactada con una emulsión bituminosa, ya sea en una o varias aplicaciones (Figura19). Una dosificación típica de aplicación es de 0.12 a 0.30 galones por metro cuadrado.



Figura19: Imprimación con emulsión.

Estabilización de bases

La cal a menudo trabaja bien para estabilizar caminos que están siendo reconstruidos utilizando "la recuperación de espesor total". Además, esto puede ser usado mejorar la calidad de los materiales de base, particularmente aquellos que contienen cantidad excesiva de finos arcillosos. El empleo de cal, en ambos casos, puede contribuir al empleo de los materiales que de otra manera serían desperdiciados, transformándolos en materiales estructurales de alta calidad.

Recuperación de espesor completo

La recuperación de espesor completo es una alternativa atractiva cuando los caminos tienen un inadecuado material de base y necesitan reconstrucción. Pulverizando la capa de superficie y mezclándola con la base existente y la subrasante, se puede lograr una base estructuralmente mejorada para recibir una nueva capa. A menudo, la adición de un pequeño porcentaje de cal (generalmente de 2 a 3 por ciento) puede mejorar dramáticamente las propiedades de la base recuperada debido a la reacción puzolánica de los contaminantes arcilloso, cementando la matriz resultante. En algunos casos, el polvo de horno de cal o la ceniza volante con la cal son utilizados para aumentar la actividad puzolánica.

Los procedimientos de construcción son similares a los mencionados anteriormente:

- 1. Escarificación y pulverización** – Comúnmente, se utiliza una recuperadora o recuperadora-estabilizadora para romper el pavimento existente y mezclarlo con los materiales de base y subrasante hasta el espesor completo de diseño. Dependiendo del espesor del pavimento, se puede requerir más de una pasada de la máquina para reducir

el tamaño de los trozos de pavimento hasta un tamaño adecuado para la mezcla. La mayoría de las especificaciones requieren que la capa de asfalto sea pulverizado de modo que el 100 por ciento pase un tamiz de 2 pulgadas; esto hace necesario el empleo de una recuperadora. En algunas ocasiones, el camino puede ser escarificado primero utilizando una motoniveladora, un tractor con ripper o una compactadora “patas de cabra”. Máquinas recuperadoras grandes y modernas pueden pulverizar asfaltos más grueso sin que sea necesario romper la superficie inicialmente.

2. **Extensión de la cal** - Vea lo indicado anteriormente (página 17).

3. **Mezcla y adición de agua.** Es importante mezclar completamente la cal en todas partes de la nueva sección. Debe agregarse suficiente agua para asegurar que la cal se hidrata por completo (en el caso de la cal viva) y que pueda reaccionar con la arcilla de la mezcla. Los tambores de mezclado de la mayoría de los mezcladores rotatorios están equipados con accesorios tales como mangueras para conectarse a los camiones de agua. Esta es una forma común para introducir agua dentro de la nueva capa mezclada de espesor total. Si dicha característica no está disponible, la capa recuperada deberá mezclarse, después que la superficie sea mojada y la sección remezclada. Se requerir más de una aplicación de agua y de mezcla. El contenido de humedad final debería ser al menos al 2 por ciento arriba del óptimo para proporcionar suficiente agua para que las reacciones químicas de cal/suelo se lleven a cabo. Este porcentaje difiere de lo mencionado anteriormente, porque hay un porcentaje inferior de material fino en la recuperación de espesor completo que en la estabilización de arcillas.

4. **La compactación** - la compactación inicia, por lo general, se realiza tan pronto sea posible después de la mezcla, utilizando un compactador de “pata de cabra” o un compactador vibratorio “de almohadillas”. Después que la sección se afina, la compactación final puede ser alcanzada utilizando un rodo liso. El equipo deberá ser apropiado para la profundidad de la sección que está siendo construida.

5. **Curado** - Como con cualquier capa estructural estabilizada con cal, la superficie de la base recuperada deberá mantenerse húmeda hasta que esté cubierta por la capa de rodadura. Se deberá utilizar los métodos de curado con agua o con membrana de curado descritos anteriormente. La capa deberá ser curada hasta que el equipo de construcción pueda transitar sin dejar ahuellamiento.

Capa de base granular – Mezclado en planta

Pequeños porcentajes de cal (generalmente de 1 a 2 por ciento) pueden ser adicionados a la base que contiene exceso de finos; transformando a menudo los materiales fuera de especificación en bases de calidad superior. Si el exceso de finos es arcilloso, la cal reacciona con ellos puzolánicamente para transformarlos en aglomeraciones cementantes. Con finos no reactivos, la recarbonatación de la cal a menudo cementará los finos en partículas más grandes que contribuyen a la resistencia estructural de la base.

1. **Mezcla** - la cal puede ser medida en la faja transportadora del agregado de base, inmediatamente seguida de la aspersion de agua para hidratar la cal (en el caso de cal viva) y para promover su reacción química con las arcillas y otros finos. El agregado

deberá ser transportado hasta un mezclador para asegurar la mezcla adecuada antes de su almacenamiento.

2. **Colocación del material** - la base tratada deberá colocarse sobre la plataforma de terracería utilizando los métodos comunes.

3. **Compactación y curado** - Vea la discusión anterior .

Cal para secado y modificación

Generalmente, los tratamiento con cal para materiales de base granular (secado y modificación) se llevan a cabo en la planta de mezclado. Para el secado y la modificación de materiales finos de subrasante, cal y el suelo se mezclan generalmente en el lugar.

Materiales de base – Cuando se utiliza una planta de mezclado, se siguen los mismos pasos que cuando se utiliza la mezcla en planta de capa de base granular: distribuyendo la mezcla cal-agregado con un esparcidor, compactación y curando. Con la mezcla en el lugar, se aplican los cinco pasos presentados para la recuperación de espesor total (ver p. 24). Sin embargo, el período de curación para bases modificadas con cal puede evitarse, ya que no se pretende que la capa tratada desarrolle tanta resistencia como una estabilización convencional de base.

Materiales de Subrasante – se aplican los mismos pasos constructivos descritos para la estabilización de subrasante (ver p. 14), con la excepción que el período de curado se puede eliminar, y entonces la compactación puede seguir inmediatamente después de la mezcla. El grado fino de pulverización requerida para la estabilización no es esencial para la modificación. Debido a esto, la utilización de discos escarificadores es suficiente para la mezcla en condiciones sumamente húmedas, aunque aún se prefieren las estabilizadoras de suelo para condiciones más pesadas. Debido a que el objetivo del tratamiento es reducir el contenido de agua del suelo y/o mejorar temporalmente la trabajabilidad y resistencia, los requerimientos de compactación pueden reducirse debajo del 95% de densidad, sujeto a la aprobación del ingeniero de proyecto. Esto es particularmente cierto donde la modificación con cal es empleada para producir una plataforma de trabajo; en este caso, el tránsito de equipo pesado de construcción sobre la superficie (comúnmente llamado " el rodamiento de prueba ") puede ser todo lo que se requiere.

Donde la cal es usada para acondicionar un suelo de arcilla pesada para la posterior estabilización con cemento o asfalto, el procedimiento general es mezclar la cal y el suelo, sellar la capa, curar durante 24 a 48 horas, re-mezclar, y entonces, aplicar el segundo aditivo, re-mezclar, compactar y curar hasta por 7 días.

EL CAPÍTULO IV: CONSIDERACIONES ADICIONALES

Los factores siguientes deberán ser considerados tanto por ingenieros como por contratistas en el diseño y la construcción de caminos estabilizados con cal.

Mantenimiento de Tráfico

La solución ideal al problema de mantener el tráfico durante la construcción de estabilización con cal es desviar el tráfico del área de trabajo hasta que una parte de la superficie de rodadura haya sido aplicada. Si el tráfico debe ser acomodado durante el curado y antes del uso de la superficie de rodadura, existe una menor probabilidad de daño a la capa estabilizada si el número y el peso de vehículos pueden ser reducidos al mínimo. Aunque los camiones que llevan cargas de 25 toneladas puedan ser soportados adecuadamente por una base de arcilla-cal bien compactada con un día de curado, las cargas muy pesadas pueden causar hundimientos localizados en bases recién compactadas. Tal hundimiento por lo general revela una compactación inadecuada. Estos ahuellamientos o puntos débiles deben ser retrabajados y recompactados.

Necesidad de capa de rodadura

Todas las bases estabilizadas con cal requieren una superficie de rodadura o al menos una imprimación bituminosa porque una base estabilizada con cal sin protección tiene una resistencia pobre a la acción abrasiva del tráfico continuo. Caminos de transporte de construcción de acceso temporales son una excepción potencial. Sin embargo, si estos caminos deben ser utilizados pesadamente más allá de un año, se recomienda una imprimación.

Limitaciones Climáticas

La estabilización con cal requiere tiempo y un clima cálido para que se endurezca adecuadamente. La regla general es que la temperatura del aire debe ser de 40 grados Fahrenheit (60 grados centígrados) a la sombra y más, para la estabilización con cal. Cuando el uso de cal es únicamente para secar suelos y no para la estabilización permanente, la operación se puede llevar a cabo en climas más fríos. Sin embargo, en ningún caso se debe de aplicar cal a suelos congelados.

Contingencias de clima frío

Cuando se dan heladas prematuras o los trabajos se retrasan y se desarrollan entrado el invierno, el daño de una helada puede ser reducido con los siguientes procedimientos:

1. El día siguiente de la helada, vuelva a compactar la base tratada con cal. La experiencia ha enseñado que heladas posteriores e intermitentes, tienen un efecto

mínimo en la base. La primera helada normalmente causa un poco de “arrugamiento” o distorsión en la pulgada superior de la base.

2. Si ocurren descongelamientos de primavera como resultado del atraso de la construcción en el otoño, las secciones dañadas pueden ser trabajadas y compactadas nuevamente, y volverlas secciones permanentes y durables. La mayoría de la cal todavía está activa y “libre”, reaccionando fácilmente con el calor de la primavera. En el trabajo de nuevo de los suelos, puede ser deseable añadir cal para compensar una posible disminución en el ph de de la mezcla.
3. En el evento que suceda un cierre completo del Proyecto por el invierno, las subrasantes recientemente estabilizadas pueden de ser protegidas con una capa de material apropiado, por ejemplo material de préstamo.

Inicio al principio de la Primavera

El uso de cal extiende el periodo de construcción en la primavera, permitiendo que las operaciones inicien mucho antes, tan pronto como la helada ha salido de los suelos. Las heladas posteriores normalmente no causarán daño por el tiempo mínimo en que se presentan. Al principio de la primavera, la construcción puede continuar utilizando la cal, aunque los suelos estén saturados con humedad. Esto es debido al efecto secante de la cal, que permite trabajar suelos saturados para que el equipo pesado no se atasque. Sin el uso de cal, el contratista debe esperar la acción de secado de la naturaleza, causando pérdida de semanas de tiempo de construcción.

Flexibilidad de Construcción

La flexibilidad en la construcción también es posible porque las mezclas de suelo-cal pueden ser retrabajadas si las contingencias causan retrasos mientras la estabilización con cal está en progreso. Esto es cierto aún después de que la acción cementante o endurecimiento haya iniciado.

La lluvia no es perjudicial

Durante las lloviznas, la extensión de la cal, la mezcla y la compactación pueden seguir su operación normal. La extensión de cal seca utilizando una motoniveladora bajo la lluvia puede ser difícil si no se hace rápidamente, ya que la cal se humedece. También, la lluvia puede provocar pérdida de alcalinidad si la cal no está contenida en el suelo escarificado y rápidamente incorporada en el mismo. Sin embargo, una vez que la cal ha sido mezclada con el suelo, las lloviznas reducen la cantidad de agua que se requiere rociar para la compactación.

Después de la compactación, la capa tratada con cal es impermeable a la humedad y el agua de lluvia escurre en forma similar a un camino pavimentado. Esto significa que aún con lluvias fuertes, por lo general sólo se dan retrasos mínimos antes de que la capa de rodadura pueda ser aplicada (o en el caso de la estabilización de subrasante, la capa de base o subbase colocada).

Precauciones de seguridad al utilizar cal

Las directrices de seguridad que se mencionan a continuación son generales. Las precauciones para el producto de cal específico utilizado pueden encontrarse en la hoja de seguridad (MSDS por sus siglas en inglés), que está disponible con el productor de cal o proveedor.

Seguridad del trabajador

La cal, en particular la cal viva, es un material alcalino que es reactivo en presencia de humedad. Los trabajadores que manipulan cal deben ser entrenados y utilizar el equipo protector apropiado. Las aplicaciones en suelos pueden crear la exposición al polvo de cal a través del aire, lo que debería ser evitado.

Riesgos para los ojos. La cal puede causar la irritación severa de los ojos o quemaduras, incluyendo daño permanente. La protección ocular (gafas protectoras químicas, gafas de seguridad y/o careta) debería ser utilizada donde exista un riesgo de exposición a la cal. Los lentes de contacto no se deben utilizar mientras se trabaja con cal.

Riesgos para la piel. La cal puede causar irritación y quemaduras en la piel sin protección, especialmente en presencia de humedad. El contacto prolongado con la piel sin protección debe evitarse. Se recomienda la utilización de guantes protectores y ropa que cubra totalmente brazos y piernas. Se debe prestar cuidado especial con la cal viva porque su reacción con la humedad genera el calor suficiente para causar quemaduras.

Riesgos de inhalación. El polvo de cal es irritante si se inhala. En la mayoría de casos, las mascarillas antipolvo proporcionan la protección adecuada. En situaciones de alta exposición, es apropiado contar con una mayor la protección respiratoria, dependiendo de la concentración y el tiempo de exposición (consulte la MSDS para los límites de exposición aplicables).

Seguridad del Producto

Se debe tener cuidado para evitar la mezcla accidental de cal viva y agua (en cualquier forma, incluyendo sustancias químicas que contienen agua de hidratación) para evitar crear calor excesivo. El calor liberado por esta reacción puede encender materiales combustibles o causar daño térmico a propiedades o personas.

El polvo de cal puede ser removido de los vehículos utilizando trapos humedecidos con vinagre diluido. Después de la aplicación del vinagre diluido, los vehículos (sobre todo superficies de cromo) deben lavarse con agua.

Primeros auxilios

La hoja de seguridad del producto específico de cal deberá consultarse siempre para obtener información detallada de primeros auxilios. Las siguientes directrices son de carácter general.

Si ocurre contacto con la piel, limpie la cal de tal forma que la elimine de la piel y posteriormente lave la piel expuesta con grandes cantidades de agua. Si ocurren quemaduras en la piel, administre los primeros auxilios y busque la asistencia médica, si fuera necesario.

Si la cal entra en contacto con los ojos, primero deben lavarse con grandes cantidades de agua. Busque asistencia médica inmediatamente después de la administración de los primeros auxilios.

En caso de inhalación, exponga a la persona afectada al aire fresco. Busque asistencia médica inmediatamente después de administrar los primeros auxilios.

Para mayor información, consulte la hoja de seguridad y siga las instrucciones del personal médico.

Cal Seca - Bolsas

La cal envasada se utiliza algunas veces para crear una plataforma de trabajo para el equipo en suelos pobres (particularmente para el acceso y las salidas al sitio de trabajo) y para proyectos pequeños. Este método raras veces es utilizado en la construcción de grandes carreteras.

Las bolsas son entregadas en camiones de plataforma y espaciadas para la distribución requerida. Para simplificar los cálculos de espaciado, refiérase a Figuras 25 y 26. Un ejemplo hipotético que ilustra el empleo de estos gráficos es el siguiente: Asuma que el proyecto implica 1 pie de estabilización (espesor compactado), 4 por ciento de cal, un suelo que tiene una densidad compactada 110 libras/pie³, y una obra en construcción con un ancho de calzada de 16 pies (4.90 m). Usando la Figura 25, puede observarse que se requieren, aproximadamente, 40 libras de cal hidratada por yarda cuadrada (21.91 kg/m²). Usando la información de la Figura 26, puede verse que las bolsas de 50 libras (22.68kg) deben ser espaciadas 18 pulgadas entre centros sobre una línea a lo largo de la línea central de la carretera (o en dos líneas, con bolsas espaciadas a 36 pulgadas entre centros). Generalmente, en una mezcla con camellón por una motoniveladora, se utilizan una o dos líneas de bolsas; con una estabilizadora se pueden utilizar varias líneas, por ejemplo con un modelo de tablero. Como una regla de dedo, en la mayoría, para una capa estabilizada de un pie un punto en porcentaje de cal hidratada corresponde a cerca de 10 lb/yd²; 2% a 20 lb/yd², etc. Sin embargo, esto puede variar desde 8 a 14 lb/yd² por punto de porcentaje aplicado, dependiendo del tipo de suelo.

Después de que las bolsas se colocan correctamente, se cortan con un cuchillo o pala, y la cal se vierte en montones o en camellones transversales a la calzada.

Después, se nivela la cal utilizando una motoniveladora para asegurar la extensión adecuado del espaciamiento predeterminado. En trabajos pequeños, para nivelar la cal, se pueden usar otros equipos halados por tractor o camión. Generalmente se requieren dos pasadas. Inmediatamente después, la cal se rocía con agua.

Las desventajas del método de las bolsas sobre los métodos de cal a granel y lechada, incluyen el alto costo de la cal (debido al costo del envasado), mayor costo de mano de obra debido a la considerable manipulación extra, y una operación más lenta. A pesar de estas desventajas, sin embargo, la cal en bolsas puede ser práctica para proyectos pequeños, tales como calles urbanas o aceras (se controla el polvo producido), caminos secundarios, pequeñas áreas de proyectos comerciales y mantenimiento (bacheo).

Densidad bruta

Las adiciones de cal al suelo generalmente se especifican como un porcentaje en peso la densidad seca del suelo, preferentemente que de forma volumétrica. La cal hidratada es bastante ligera y voluminosa, teniendo densidades brutas entre 30 y 40 libras/pie³ (con un promedio de 35 libras/pie³). La gravedad específica de la cal hidratada alta en calcio oscila entre 2.3-2.4, y la de la cal hidratada dolomítica es de 2.7-2.9. En algunas partes los suelos típicos pesan entre 100 a 120 libras/pie³, así, la cal hidratada pesa aproximadamente un tercio del peso medio del suelo. Una aplicación del 3 por ciento de cal hidratada en peso es equivalente al 9 por ciento de cal hidratada por volumen.

La cal viva es más pesada que la cal hidratada, pesando entre 55-60 libras/pie³ en la forma de terrón y con una gravedad específica de 3.2-3.4. La cal viva clasificada de ¼" o menos típicamente pesa 65 libras/pie³.

Uso de otros estabilizadores con cal

Estabilización de bases

En áreas arcillosas desprovistas de material de base, la cal ha sido usada conjuntamente con otros estabilizadores – especialmente cemento Portland, emulsiones bituminosas o compuestos asfálticos - para proporcionar bases para caminos secundarios y calles residenciales. Debido a que estos otros aditivos no pueden ser mezclados satisfactoriamente con arcillas plásticas, se incorpora la cal (generalmente de 2 a 3 por ciento) en una primera etapa en el suelo para hacerlo friable, permitiendo así que el cemento o el asfalto se mezclen adecuadamente.

En la estabilización con asfalto de materiales de base en el lugar, un pequeño porcentaje de cal (generalmente hasta el 2 por ciento) se usa para secar el material mojado, de modo que el asfalto pueda ser mezclado correctamente, y las partículas de material puedan ser cubiertas.

Construcción de subrasantes con cal-ceniza volante o polvo de horno de cal

Cuando se añade en la cantidad adecuada, la cal sola estabilizará con eficacia la mayor parte de suelos arcilloso. Sin embargo, cuando el suelo no es suficientemente reactivo, se puede necesitar sílice y alúmina para la estabilización. El uso de polvo de horno de cal (LKD por sus siglas en inglés) o la cal-ceniza volante son dos alternativas.⁶

⁶ La variabilidad en la composición debe considerarse en el diseño y uso de cualquier material que sea sub-producto.

La alúmina, el sílice y la cal son tres de los principales componentes del polvo de horno de cal. Con el diseño apropiado, este material puede ser usado para la modificación del suelo, incluyendo la modificación de los suelos con bajas concentraciones de arcilla inferior.⁷ Si la cantidad adecuada de cal (y sílice y alúmina) está presente, el polvo de horno de cal también pueden ser utilizado para la estabilización de suelos. Los procedimientos de construcción son esencialmente los mismos como aquellos usados para la cal viva seca (ver p.17).

La ceniza volante contiene cantidades significativas de alúmina y sílice. Las combinaciones de cal-ceniza volante pueden ser añadidas al suelo de dos formas:

La cal y la ceniza volante seca pueden ser premezcladas en las proporciones apropiadas, transportadas al sitio de trabajo, luego esparcida y mezclada en el suelo. Si se utiliza cal viva, el tamaño máximo de partícula se limitada a un 1/8 a 1/4 de pulgada para asegurar que la ceniza volante de grano excesivamente fino no se segregará de la cal.

La cal y la ceniza volante también pueden ser esparcidas y mezcladas en el suelo, en dos operaciones separadas. Típicamente, la cal se esparce primero y se mezcla en el suelo con la cantidad adecuada de humedad para alcanzar un 3% arriba del contenido de humedad óptimo. Si fuera necesario, se permitirá que el suelo fragüe. Entonces, se adiciona la ceniza volante en la dosificación prescrita y se añade el agua adicional para mezcla final. Después de la mezcla de final, el suelo tratado es compactado, afinado y curado.

La ceniza volante puede ser esparcida en dos formas - seca o acondicionada con humedad. La ceniza acondicionada con humedad, típicamente, contiene de 10 a 25 por ciento de agua (en peso de ceniza volante seca), haciéndolo prácticamente libre de polvo. Generalmente, sólo la ceniza volante clase F no autocementante que cumple los requerimiento ASTM 618 es conveniente para el empleo en el estado acondicionado por humedad. Cuando se mezcla con agua, la mayor parte de ceniza volante clase C es autocementante y no puede ser fácilmente esparcida en el suelo.

La ceniza seca es esparcida utilizando el mismo equipo usado para extender la cal seca hidratada o la cal viva molida (ver p.17). La ceniza volante de clase F acondicionada con agua puede esparcirse con máquinas terminadores de asfalto (Figura 20) o con camiones esparcidores especialmente modificados (para asegurar que la ceniza húmeda no taponará los conductos durante la extensión). Como la ceniza volante normalmente es dosificada respecto al peso seco, es importante considerar apropiadamente el peso del agua cuando se utiliza la ceniza volante acondicionada por humedad. El balance de los procedimientos constructivos son esencialmente los mismos de aquellos usados para la cal viva seca (ver p. 17).

⁷ La guía general de uso del polvo de horno de cal (LKD) aparece en el estándar ASTM D5050 (ver apéndice A).



Figura 20: Máquina terminadora de asfalto utilizada para esparcir ceniza volante húmeda.

Sulfatos

La presencia de sales de sulfato solubles puede dar problemas cuando los suelos son estabilizados con cualquier aditivo a base de calcio (por ejemplo: cal, cemento Portland, ceniza volante). Se podría encontrar sulfatos en algunas regiones de Alta Verapaz, debido a la presencia natural de yeso, aunque los suelos contaminados con sulfatos industriales o materiales sintéticos bajos en yeso también puedan provocar problemas. Los sulfatos en el suelo se combinan con el calcio y alúmina de la arcilla, y con el agua, formando los minerales etringita y taumasita en una reacción sumamente expansiva. La formación de estos minerales después de la compactación puede causar deterioro significativo del pavimento y pérdida de resistencia.

Las concentraciones de sulfato en el suelo menores que 3,000 ppm (0.3 por ciento) difícilmente causen problemas. Las concentraciones de 3,000 a 5,000 ppm (0.5 por ciento) pueden ser estabilizadas fácilmente si se tiene cuidado para seguir buenas prácticas constructivas, tales como la utilización de mucha agua y permitiendo un tiempo amplio para que la mezcla de cal y suelo fragüe. Las concentraciones mayores que 5,000 ppm, frecuentemente se tratan con dos aplicaciones de cal, la primera antes de la mezcla inicial y la segunda después del período de fraguado. El contenido de humedad del suelo se lleva hasta 5 por ciento encima del óptimo, durante un día de fraguado múltiple para poder así solubilizar tantos sulfatos como sea posible y forzar a la etringita a formarse antes de la compactación.⁸ Una vez formada, la etringita es relativamente estable y es improbable que cause problemas posteriores. Después del período de fraguado, se añade cal adicional al suelo y la construcción procede de forma normal.⁹

Los sulfatos raras vez están distribuidos uniformemente en un sitio de construcción, sino que se encuentran en vetas y bolsas aisladas. La investigación que se lleva a cabo actualmente se orienta para mejorar los métodos de localización de concentraciones de sulfato en el campo para reducir el riesgo de problemas y facilitar la construcción.

⁸ Sin embargo, la investigación reciente sobre el tratamiento de sulfatos hasta 7,000 ppm para reducir el hinchamiento sugiere que se utilice un 2% por encima del contenido óptimo de humedad con una aplicación simple de cal (http://www.trb.org/am/ip/Practical_Papers.asp#1577).

⁹ Se dispone de información adicional en <http://www.lime.org/sulfate.pdf>.

CAPÍTULO V: OTRAS APLICACIONES

El tratamiento de cal se utiliza en un sinnúmero de aplicaciones tanto para la modificación como para la estabilización. Las aplicaciones no estructurales (modificación) se diseñan para secar el lodo y crear plataformas de trabajo en una variedad de construcciones. Los usos estructurales (estabilización) incluyen otros pavimentos tales como aeropuertos, estacionamientos, caminos secundarios, pistas de carreras; y otros usos como cimentaciones de edificios y estabilización de terraplenes. Las técnicas constructivas de tratamiento con cal se utilizan, esencialmente, de la misma forma descrita anteriormente para la estabilización y modificación con cal en la construcción de carreteras.

Aeropuertos

La cal tiene una historia extensa como una opción de tratamiento de suelos para la construcción de aeropuertos. Los ejemplos incluyen el Aeropuerto Internacional de Denver, el Aeropuerto Dallas Ft. Worth y Newark. Muchos aeropuertos en los Estados Unidos se amplían alargando las pistas de aterrizaje y despegue, calles de taxeo y estacionamientos (Figura 21).



Figura 21: Proyecto de estabilización en un aeropuerto.

La mayor parte de aeropuertos construyen en propiedades existentes o compran propiedades adyacentes, y por lo tanto tienen poco control sobre el terreno y las condiciones del suelo. Si se encuentran suelos con condiciones marginales o pobres, el propietario puede decidir quitar y sustituir los suelos existentes o tratarlos. Las técnicas constructivas para el tratamiento de suelos con cal, en la construcción de aeropuertos son esencialmente las mismas que aquellas para carreteras. Sin embargo, la Administración Federal de la Aviación (FAA) tiene especificaciones para los métodos de construcción y tratamiento de suelos.¹⁰

¹⁰ Ver, por ejemplo, el “FAA’s Advisory Circular for Standards for Specifying Construction of Airports, AC 150/5370-10A, Part 2, Item P-155 Lime Treated Subgrade”

Estabilización de suelos: La construcción de fundaciones bajo pistas de aterrizaje y despegue es crítica. La lechada de cal se ha convertido en la opción de tratamiento de cal más especificada debido a que la cal seca puede empolvar los aviones y el equipo mecánico.

Modificación y secado de suelo: La construcción de aeropuertos a menudo procede bajo limitaciones de tiempo. El empleo de cal para secar y modificar los suelos marginales y pobres puede ayudar en mantener los proyectos dentro de la programación durante la época lluviosa, proporcionando una plataforma de trabajo y permitiendo el retorno al trabajo de forma más rápida después de las lluvias.

Comercial

La construcción de tiendas grandes o centros comerciales con áreas de parqueo es una cada vez más común para la estabilización o modificación con cal. La localización de estas facilidades tiende a basarse en la accesibilidad del cliente, no en características de suelo. Los suelos inestables pueden estar presentes. Los sitios pueden estar en áreas bajas y húmedas. Raras vez, los sitios están nivelados o adecuados. El contratista debe cortar y llenar el sitio y compactar los suelos a las densidades especificadas. Las técnicas de estabilización/modificación son generalmente las mismas que aquellas descritos para la construcción de carreteras.

Estabilización con cal: El material excavado para construir plataformas puede ser enalado y almacenado en pilas de reserva durante unas semanas. Estos suelos tratados deberán tener un contenido de agua de 1 a 3 por ciento por encima de la óptima para asegurar que la reacción con cal tenga suficiente agua para completarse. Esta práctica ahorra tiempo de construcción debido a que el fraguado ocurre en las pilas de reserva del material. El material tratado y fraguado puede ser compactado sin demoras al tiempo que se regresa al lugar de la construcción.

Las calles y las áreas de estacionamiento tienen que ser diseñadas para acomodar el tráfico de vehículos esperado. Ignorar la naturaleza de los suelos subyacentes crea el potencial para fallas del pavimento. La estabilización con cal puede proporcionar buenas fundaciones de pavimento y reducir el espesor de las capas que lo componen.

Modificación con cal: El tiempo de terminación para proyectos comerciales es una restricción principal. Los proyectos tienden a enfocar las fechas de apertura que corresponden a compras estacionales, tales como días festivos y el verano. En muchas ocasiones, el contratista encuentra que tiene que trabajar durante la época lluviosa. La cal puede ser usada para secar el suelo demasiado húmedo, antes de la compactación. La modificación con cal puede utilizarse para mantener una plataforma de trabajo firme que elimine la humedad. Esto ayudará a mantener a los trabajadores, equipo y materiales, libres de lodo; reducir las demoras por mal clima y ayudará a mantener el proyecto dentro de la programación.

Urbanizaciones

El desarrollo de las actividades inicia con el establecimiento de vías de acceso y facilidades relacionadas, seguidas de la construcción de aceras, calles y viviendas. La estabilización con cal puede utilizarse para construir fundaciones estructurales para

edificaciones, aceras y calles. La modificación con cal ofrece una técnica de construcción conveniente para reducir al mínimo los efectos del clima y suelos de mala calidad. A menudo, la construcción de urbanizaciones continúa a lo largo de todas las estaciones, húmeda o seca, porque el capital necesario requiere de programas ajustados de ejecución. La capacidad de reducir los retrasos es una manera de aumentar las utilidades. Los procedimientos de tratamiento de suelos son similares a aquellos descritos anteriormente.

Construcción de calles: El contratista inicia trabajando calles y facilidades. En algunas urbanizaciones el trabajo inicial consiste en la excavación de zanjas para alcantarillas, agua, gas y electricidad. Al excavar estas zanjas se corre el riesgo que las mismas se conviertan en áreas con lodo y muchas veces impasables. Una forma de mitigar este problema es utilizar la cal en la fase inicial de la construcción para modificar el suelo y luego usar tratamientos adicionales para secar el material de los rellenos de las zanjas. Los suelos estabilizados también pueden ser utilizados como fundación para el pavimento final (Figura 22). Los suelos bajo las aceras también pueden ser estabilizados para reducir al mínimo los hundimientos.



Figura 22: Compactación de suelo estabilizado con cal en una urbanización.

Casas individuales: El contratista puede usar la cal para modificar y estabilizar el área de acceso y la plataforma de la casa, lo que creará un área de trabajo libre de lodo, para recibir los materiales de construcción y colocar los equipos. Cuando la construcción se ha completado, la casa tendrá un acceso y fundación de mejor calidad, con menor probabilidad de asentamientos y grietas.

Estabilización de terraplenes

A menudo, los materiales de préstamo muy húmedos son usados para construir terraplenes. El tratamiento con cal puede utilizarse para estabilizar estos suelos, cuando son utilizados por primera vez o como parte de la reparación de un terraplén que ha fallado. Por lo general, el suelo inestable se transporta a un área de mezcla, donde se puede utilizar el equipo de construcción para llevar a cabo las operaciones descritas anteriormente (Figura 23). Para suelos con un alto contenido de arcilla, se utiliza cal; mientras que para suelos con contenido bajo de arcilla, se utilizan mezclas de cal-puzolanas (por ejemplo, ceniza volante). Estos suelos tratados, deberán tener un

contenido de agua de 1 a 3 por ciento del óptimo, para asegurar que la reacción con la cal tiene suficiente agua para completarse. Después de la mezcla, la adición de agua y el fraguado, el material es devuelto al terraplén, afinado y compactado según las especificaciones (Figura 24). A medida que el fraguado ocurre en las pilas de reservas de materiales, se ahorra tiempo de construcción. El material con cal se compacta sin demoras mientras se devuelve al terraplén.

Para terraplenes donde es prioritario el secado de los suelos, el suelo a menudo es tratado con la cal después de que es traído al terraplén. El suelo no tratado se coloca en capas, típicamente 8 a 12 pulgadas de espesor. Cada capa se trata con cal y se mezcla, reduciendo el contenido de humedad del suelo. La capa se compacta y otra capa de suelo se coloca y el proceso se repite hasta que se completa el terraplén. De nuevo, es importante asegurar que existe una humedad adecuada, en particular si se utiliza cal viva. Si se usa cal viva, es esencial que todas las partículas hayan sido hidratadas.



Figura 23: Mezcla preliminar de cal y suelos de terraplén en el área de mezcla.



Figura 24: Devolución de suelos tratados del área de mezcla al terraplén.

APÉNDICES

Apéndice A: Especificaciones¹¹

Materiales:

1. [ASTM C977 Standard Specification for Quicklime and Hydrated Lime for Soil Stabilization](#)
2. AASHTO M216 Lime for Soil Stabilization
3. [ASTM C593 Standard Specification for Fly Ash and Other Pozzolans for Use With Lime](#) (aplicaciones a la estabilización de suelos y cal para construcción)
4. [ASTM C618 Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete](#)
5. [ASTM D5050 Guide for Commercial Use of Lime Kiln Dusts and Portland Cement Kiln Dusts](#)

Ensayos y muestreo:

6. [ASTM D6276 Standard Test Method for Using pH to Estimate the Soil-Lime Proportion Requirement for Soil Stabilization](#)
7. [ASTM D3155 Standard Test Method for Lime Content of Uncured Soil-Lime Mixtures](#)
8. [ASTM D5102 Test for Unconfined Compressive Strength of Compacted Soil-Lime Mixtures](#)
9. [ASTM D 698 Test Methods for Laboratory Compaction of Soil Using Standard Effort](#)
10. [ASTM D 1557 Test Methods for Laboratory Compaction of Soil Using Modified Effort](#)
11. AASHTO T 99 Standard Proctor Test
12. AASHTO T 180 Modified Compaction Test
13. AASHTO T 294 Conventional Resilient Moduli Test
14. [ASTM D4318-00 Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, & Plasticity Index of Soils](#)
15. [ASTM D3551 Lab Preparation of Soil-Lime Mixtures Using a Mechanical Mixer](#)
16. [ASTM D3668 Test Method for Bearing Ratio of Laboratory Compacted Soil-Lime Mixtures](#)
17. [ASTM D3877 Standard Test Methods for 1-Dimensional Expansion, Shrinkage, & Uplift Pressure of Soil-Lime Mixtures](#)
18. [ASTM D5093 Standard Test Method for Field Measurement of Infiltration Rate Using a Double-Ring Infiltrometer with a Sealed-Inner Ring](#) (puede ser utilizada par mezclas de suelo-cal)
19. [ASTM D6236 Standard Guide for Coring and Logging Cement- or Lime-Stabilized Soil](#)

Otro:

20. [ASTM E1266 Standard Practice for Processing Mixtures of Lime, Fly Ash, and Heavy Metal Wastes in Structural Fills and Other Construction Applications](#)

¹¹ Las especificaciones listadas son internacionales. En 2003, la "Federal Highway Administration" creó un sitio web para acceder a las especificaciones federales para carreteras, en <http://fhwapap04.fhwa.dot.gov/nhswp/index.jsp>.

Apéndice B: Publicaciones de Estabilización de Suelo de la Nacional Lime Association (actualizadas a Noviembre de 2006)

Más información está disponible en los informes siguientes:

“Technical Brief: Mixture Design and Testing Procedures for Lime Stabilized Soil,” Resumen de diseño y procedimientos de preparación durable y a largo plazo para la estabilización con cal en capas de suelos que agencias, Ingenieros de diseño, y personal de lavatorios pueden usar con confianza para condiciones de suelos y exposición medio-ambiental en los Estados Unidos. (2006), <http://www.lime.org/Oct2006VerMixDesign.pdf>

“Lime Stabilization and Mechanistic-Empirical Pavement Design,” por Jagannath Mallela, Harold Von Quintus, y Kelly Smith: Manual que guía cuando considerar y incluir subastes estabilizadas con cal en diseños que se están evaluando con instrumentos mecanísticos empíricos (2004), <http://www.lime.org/MechEmpPavement.pdf>.

Evaluación de las propiedades estructurales de suelos estabilizados con cal y agregados por Dallas N. Little:

- Volume 1, “Summary of Findings”: formato tabulado que resume documentación de laboratorio y de campo de las propiedades estructurales de los suelos estabilizados con cal. (1999), <http://www.lime.org/SOIL.PDF>.
- Volume 2: Datos e información de soporte del volumen 1 (copia dura, 1999), <http://www.lime.org/publications.html>.
- Volume 3, “Mixture Design and Testing Protocol (MDTP)”: Diseño sistemático y procedimiento de ensayos para estabilización con cal para asegurar que se alcancen las propiedades estructurales (2000), <http://www.lime.org/SOIL3.PDF>.
- Volume 4, “Example Illustrating the MDTP”: caso histórico que ilustra el diseño mecanístico y análisis utilizando el Volumen 3 MDTP para referir las propiedades estructurales de subrasante, subbase y base tratadas con cal (2001), <http://www.lime.org/AMDTP.pdf>.

“Stabilization of Pavement Subgrades & Base Courses with Lime”: texto avanzado en usos geotécnicos de estabilización con cal, mecanismos de reacción, propiedades ingenieriles y costo del ciclo de vida. Incluye hallazgos de investigaciones de las principales universidades (copia dura, 1995), <http://www.lime.org/publications.html>.

“Technical Memorandum: Guidelines for Stabilization of Soils Containing Sulfates”: Discusión detallada y guía para el uso de cal en suelos con sulfatos. (2001), <http://www.lime.org/sulfate.pdf>.

“Lime Dries Up Mud”: Panfleto de resumen técnico sobre secado de suelos húmedos para formar una plataforma de trabajo estable para resistir más humedad. (1998), <http://www.lime.org/mud.pdf>.

“Fact Sheet on Lime Stabilization and Modification”: Revisión de los procedimientos y beneficios del tratamiento de suelos con cal. (actualizado en 2001), <http://www.lime.org/soil2.pdf>.

Para acceder a estas publicaciones, ver: <http://www.lime.org/publications.html>. Para contactar una empresa productora de cal, ver <http://www.lime.org/usstate.html>.

Apéndice C: Índice de Plasticidad (PI)

El Índice de Plasticidad (IP) es una medida de cuanta agua puede absorber un suelo antes de disolverse en una solución. Mientras más alto es este número, el material es más plástico y más débil. Los suelos plásticos que contienen arcilla tienen IPs de 10 a 50 ó más. Generalmente, la cal reaccionará con tales suelos para reducir significativamente el IP y creará un material con resistencia estructural. Suelos con IPs menores que 10, generalmente, no reaccionan tan fácilmente con la cal, aunque existen excepciones.

El IP se mide por dos pruebas simples en la mecánica de suelo: el límite líquido y el límite plástico; la diferencia entre los dos es el Índice de Plasticidad - ver ASTM D4318-00 "Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils."

Estas pruebas se realizan sobre el material que pasa el tamiz de 425 mm (No 40). Cada prueba mide el contenido de humedad del suelo en ciertas condiciones. Para las pruebas se requiere de equipo de laboratorio tal como un horno secador y balanzas, para ambos ensayos. La prueba de límite líquido usa un aparato simple. La prueba de límite plástico requiere el rolado a mano de suelo de un hilo de suelo, amasándolo, haciéndolo rodar otra vez, y repitiendo el procedimiento hasta que el hilo de suelo se disgregue. El contenido de humedad en esta etapa es el límite plástico.

Apéndice D: Gráficas (convirtiéndose el por ciento al peso y el espaciado de bolso)

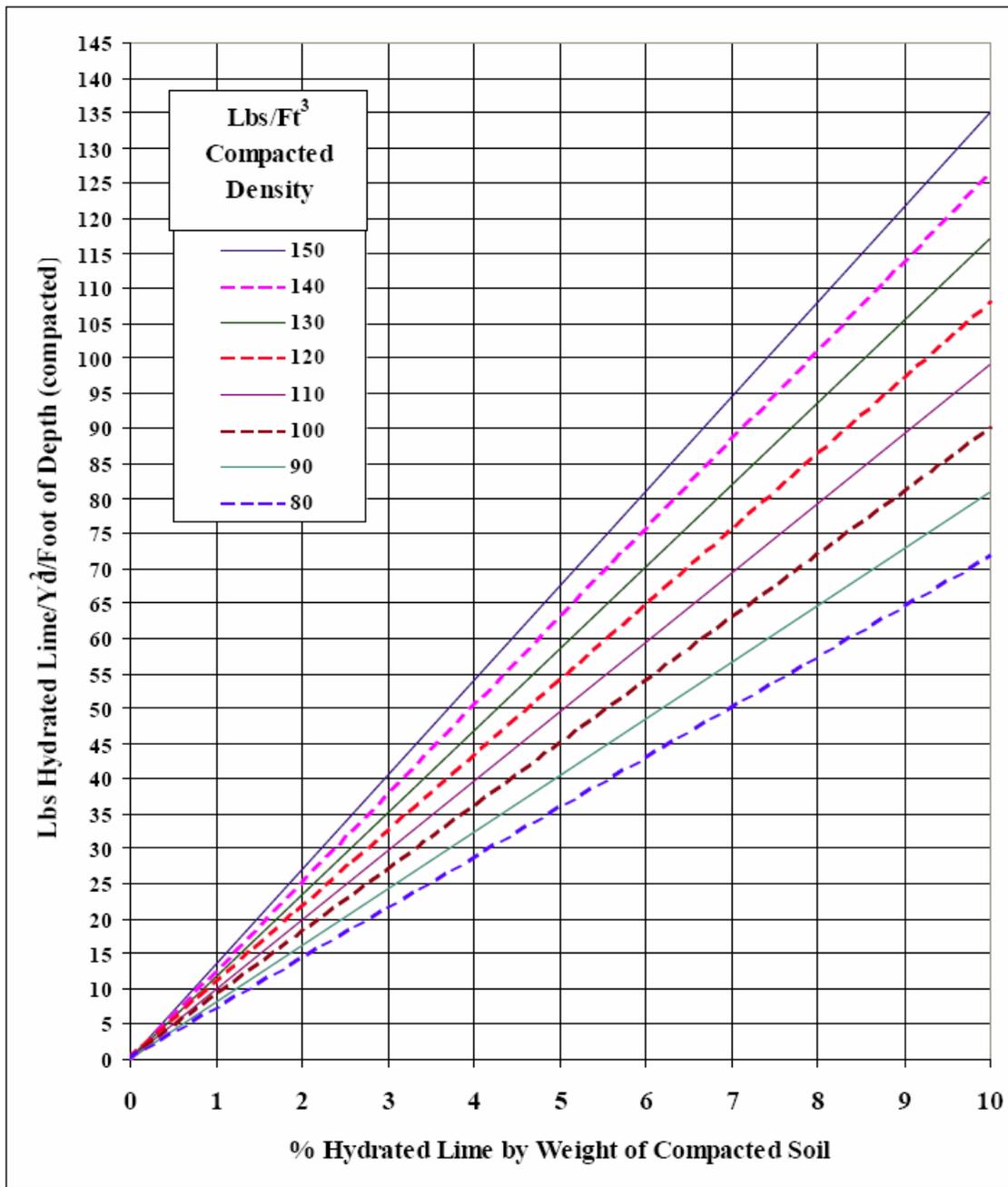


Figura 25: Conversión gráfica para dosificación de Uso de Cal hidratada

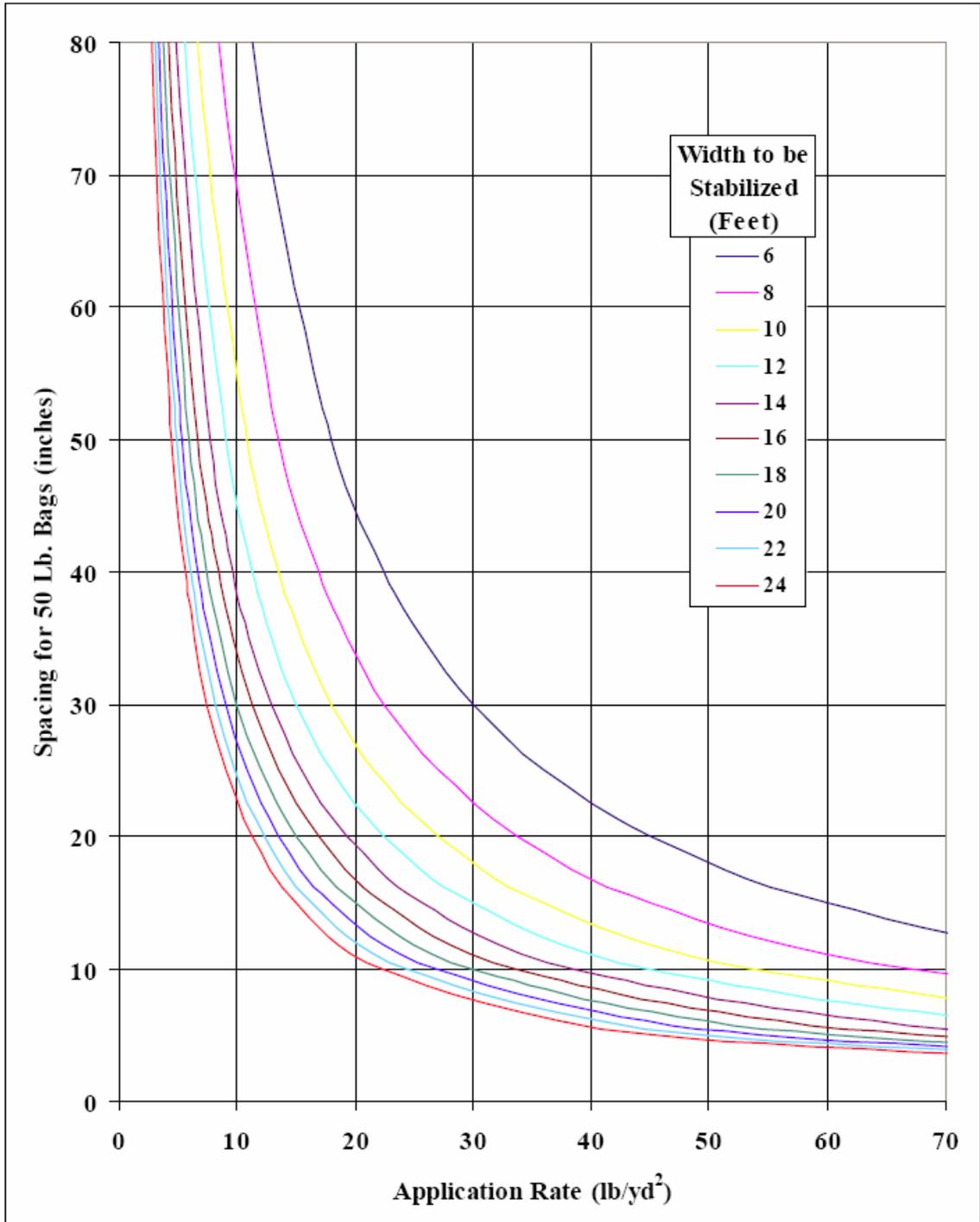


Figura 26: Espaciado de Bolsas