

BOLETIN DE INYECCION A PRESION DE LECHADA DE CAL

Publicado por la Asociación Nacional de Fabricantes de Cal

BOLETIN DE INYECCION A PRESION DE LECHADA DE CAL

Publicado por la Asociación Nacional de la Cal .

P R E F A C I O

La Asociación Nacional de la Cal ha seguido con interés el crecimiento y desarrollo que ha tenido en los últimos veinte años la estabilización de suelos por medio de inyección. Inicialmente hubo escepticismo acerca del uso de esta técnica, pero a medida que se han ido desarrollando mejores procedimientos y equipo, y se ha obtenido una mayor experiencia en su empleo, en el gremio de ingenieros, ha habido una creciente aceptación de la estabilización por medio de inyección. Si bien la Asociación no pretende entender plenamente todos los mecanismos que hacen funcionar a este sistema, el que se haya comprobado que sirve en muchos casos cuando se le aplica debidamente, se considera como un hecho innegable. Este nuevo boletín es el esfuerzo conjunto de Robert S. Boynton, ex Director Ejecutivo de la NLA (As. Nal. de la Cal), Kenneth A. Gutschick Técnico de la NLA, Paul Wright, Presidente de Woodbine Corporation en Fort Worth, Texas, y J. R. Blacklock, Profesor de Tecnología de la Ingeniería en la Universidad de Arkansas en Little Rock, Arkansas. Estos hombres contribuyeron para hacer que esta publicación sea precisamente una guía técnica, informativa y útil para el uso de este sistema. Todas las ilustraciones y fotografías fueron proporcionadas por la Woodbine Corporation.

P R O L O G O

La estabilización por medio de la Cal tiene un historial de cuando menos 5000 años en pavimentación y en la construcción; aun en épocas y lugares en donde la ingeniería se ha usado con destreza, por ejemplo en el uso de suelos estabilizados con cal en la Inglaterra Sajona (23).

En los cien años venideros habrá un crecimiento importante en la estabilización por medio de la cal debido a la ventaja económica que se obtiene. Prestando atención principalmente, a mejorar las técnicas actuales. La estabilización se requiere fundamentalmente, por la necesidad de utilizar suelos de baja calidad, por estar ya utilizados los mejores. Se espera que el consumidor mayor siga siendo la industria de la construcción de carreteras y ferrovías, pero la construcción de casas-habitación puede tener un papel significativo y creciente (23), y el mantenimiento, reparación y renovación de los sitios ya existentes requerirán una parte mayor del presupuesto en donde es necesaria la estabilización de suelos.

En 1976 la ASCE patrocinó un estudio para determinar las diez investigaciones más deseables sobre estabilización. Un grupo selecto de autoridades en la estabilización, fueron escogidas de todo el mundo y cada una de ellas fue invitada a emitir opiniones acerca de las investigaciones más deseables para los próximos 50 y 100 años; después, cada una de ellas fue evaluada y catalogada de acuerdo con el consenso general, tomando en cuenta su conveniencia y factibilidad

Se determinó que las diez investigaciones más deseables en estabilización de suelos fueron :

- 1.- Evaluación en el lugar (in situ) de los parámetros del suelo.
- 2.- Empleo de desperdicios sólidos como materiales de construcción.
- 3.- Equipo ambulante para construir caminos utilizando los suelos nativos en el lugar.
- 4.- Tratamiento en el lugar, para controlar suelos expansivos.
- 5.- Técnicas de perforación para evaluar los rellenos con lechada.
- 6.- Estabilización de deslizamientos con lechadas químicas.
- 7.- Redes horizontales de refuerzo para formar terraplenes en suelos blandos.
- 8.- Instalación in situ (en el lugar mismo) de elementos reforzadores del suelo.

- 9.- Equipo de compactación con características variables controladas mediante retroalimentación, obtenida del suelo.
- 10.- Compactación de depósitos en el suelo marino.

Es interesante que varios de los 10 puntos antes mencionados están cubiertos - directa o indirectamente con la tecnología discutida en este boletín, más específicamente, el artículo 2 que cubre el empleo de cenizas volátiles, el 4 - la inyección de LSPI y de L/FA., el artículo 6 que cubre la estabilización de pendientes (o laderas) con LSPI y L/FA, y los artículos 7 y 8 que indirectamente se refieren al sellado de juntas con cal y con lechada elaborada con cal y cenizas volátiles.

De manera directa este boletín se dirige a la implementación de estas tecnologías con la Inyección a Presión de Lechada de Cal y de Inyección Cal y Cenizas Volátiles (LPSI y L/FA en inglés) como métodos de inyección en estabilización del suelo. El crecimiento constante en estos dos campos en la estabilización de suelos, en los últimos veinte años, ha llevado al desarrollo de procesos - nuevos para la estabilización de suelos expansivos y otros materiales inestables. Debido a la gran variedad de suelos, a la cantidad de agua que presentan, así como de los materiales estabilizadores, ha resultado evidente que el proceso de la estabilización "in situ" requiere de un nivel muy alto en el - desarrollo tecnológico, tanto como fue necesario considerarlo en un principio. La mayor parte de las investigaciones técnicas han sido auspiciadas por la - Woodbine Corporation de Forth Worth, Texas, cuya colaboración ha sido básica - desde 1968, en el adelanto hacia un procedimiento más técnico a este proceso. Además, la estabilización por inyección ha sido tema de investigación en la - Universidad de Texas en Arlington y en la Universidad de Arkansas en Little - Rock. Básicamente en 1974 la principal investigación fue proporcionada para la Administración Federal de Ferrocarriles, y el "Manual para la Estabilización de Vías Férreas por medio de la Inyección a Presión de la Lechada de Cal" se publicó en 1977 (5).

A medida que crece el uso de la inyección de lechada de cal y de cal con ceniza, se prevé que seguirán desarrollándose nuevos equipos, procedimientos y - pruebas. La estabilización por inyección ha sido, en los últimos veinte años, una tecnología en creciente desarrollo y todo hace suponer que continuará de - desarrollándose. La estabilización por inyección a presión ha probado ser una - alternativa viable para muchos usos y casos que plantean un verdadero desafío, de tal manera que hoy en día los ingenieros pueden sentirse capacitados para - diseñar cimientos estructurales estabilizados con mucha mayor confianza gracias a la inyección con LSPI y L/FA.

I N T R O D U C C I O N

En la actualidad, de los principales problemas que se presentan en la construcción, ninguno ha causado tanta destrucción y daños costosos como los ocasionados por los suelos arcillosos expansivos, empleados en los sistemas de cimentación. Se estima que actualmente los daños causados a varias estructuras por los suelos expansivos de arcilla, superan los cinco mil millones de dólares al año (24).

Este boletín describe un procedimiento de estabilización de suelos llamado Inyección a Presión de Lechada de Cal (LSPI) que ha probado ser efectivo para estabilizar los suelos de cimentación expansivos, empleados en la construcción. El procedimiento LSPI requiere de la inyección de lechada de cal hidratada bajo presión a profundidades de 1 a 3 m., (3 a 10 pies) y ocasionalmente hasta de 13 m., (40 pies). La lechada se introduce siguiendo los caminos de menor resistencia, porque bajo la aplicación de presión, es forzada lateralmente y verticalmente a introducirse en fisuras, hoyos, cercenados por raíces de árboles, etc., formando una red de juntas de cal en forma de sábanas de cal y capas de tierra. Después de la colocación, la cal reacciona con la arcilla de la superficie interna de la grieta, incrementando la resistencia y reduciendo la actividad de la humedad, minimizando así el movimiento del suelo y sus efectos dañinos.

A N T E C E D E N T E S

Hay suelos arcillosos expansivos en muchas partes de los Estados Unidos y estas arcillas que se dilatan en general causan graves problemas en los caos de climas cíclicos de humedad y sequía. En tiempos de sequía los suelos arcillosos se encogen y desarrollan fisuras en tensión debidas a la falta de humedad; en tiempos de lluvia abundante se hinchan y expanden. En muchas regiones los suelos pueden atravesar numerosos ciclos climáticos de sequía y humedad al año. Cada ciclo ahonda más y más las fisuras de tensión en la masa del suelo, haciendo que el daño sea cada vez mayor con el correr del tiempo. El cambio de volumen que resulta de ello, que puede llegar a ser de hasta un 30% en expansión lineal o en contracción, que puede llegar a perjudicar a las estructuras erigidas en este tipo de suelo inestable, dando lugar a horrendas rajaduras y fallas estructurales muy costosas.

De los distintos tipos de arcilla que se encuentran en los Estados Unidos, la montmorillonita es la más destructiva; sin embargo, es afortunadamente la que mejor responde a la estabilización por medio de la cal. Las arcillas de illita y de kaolinita, que son menos destructivas, también reaccionan con la cal, pero generalmente en menor grado. Además de las arcillas expansivas, los suelos de arcilla plástica, así como las arcillas que se dispersan y las arcillas colapsables, también han causado considerables problemas de construcción. Típicamente, las arcillas plásticas tienen baja resistencia y son muy inestables en condiciones de alta humedad. Los suelos con alto contenido de materia orgánica en descomposición, son similares a los inestables. Muchos tipos de suelos orgánicos también reaccionan con la cal y por ende son sujetos a mejorarse por medio del LSPI. Los siguientes ejemplos son típicos de problemas originados por suelos arcillosos expansivos :

CUARTEADURAS EN MUROS DE MAMPOSTERIA .- En muchos casos se han cuarteado considerablemente y en algunas ocasiones se llega a una situación peligrosa.- En general, las cuarteaduras siguen las juntas de mortero a manera de escalón y a menudo rompen a través de las unidades de la mampostería. Estas cuarteaduras con mucha frecuencia no pueden ser reparadas satisfactoriamente dando por resultado una pérdida de valor en la propiedad.

CUARTEADURAS EN LAS LOSAS DEL PISO .- En construcciones en que la losa forma parte integral de la cimentación, las losas del piso a veces se cuarteán y sufren bufamientos tan notorios que las puertas y las ventanas no pueden abrirse, se cuarteán los muros interiores y la superficie del piso se distorsiona enormemente. Los pisos construídos sobre cimientos extendidos en traveses y plines se han visto igualmente dañados por arcillas que se expanden -- (10).

FALLAS EN LA ESTABILIDAD DE TALUDES .- Las cuarteaduras que se forman como consecuencia de los ciclos de humedad y de sequía pueden ocasionar disminución de resistencia y estabilidad en los terraplenes (o diques de tierra). Las fallas de taludes suceden en carreteras, en plataformas y ferrovías, ocasionando costos de mantenimiento excesivos, pérdida de propiedades y riesgos a la seguridad pública.

FALLAS EN EL PAVIMENTO Y EN LA LOSA.- En las carreteras, pistas de aeropuertos, así como en otros pavimentos hechos con losas a menudo se cuarteán tanto, que se hace necesaria una reconstrucción casi completa (28, 29). Los problemas típicos, tales como rajaduras en la superficie, baches, hoyancos y superficies bufadas y disparejas, generalmente son ocasionadas por humedad que penetró en las arcillas del suelo subyacente y causó expansión destructiva.

La inyección a presión de lechada de cal (LSPI) se fue desarrollando a principios de los años 1960, para corregir estos problemas de la arcilla profunda y desde entonces ha estado muy en uso en muchas partes de los Estados Unidos.

El procedimiento es costeable para preparación en construcciones de cimentaciones nuevas (fig. 4a.), así como para tratamiento en reparación y rehabilitación de estructuras ya existentes (fig. 4b) (47). Para trabajos de rehabilitación, la LSPI tiene la ventaja de no ser destructiva a las estructuras existentes y también puede ser aplicado con un mínimo de alteración a la continuidad del servicio, como en ferrovías y carreteras.

Cuando los suelos de cimentación son arcillas expansivas, el ingeniero de suelos generalmente recomendará un sistema estructural que aisle completamente el piso de las arcillas subyacentes. Aunque este procedimiento es acaso el más digno de confianza, también es caro. Así pues su empleo se ve limitado a una porción relativamente pequeña del total de los proyectos de construcción. Las consideraciones de orden económico requieren del ingeniero que considere otras alternativas que resolver el problema que se plantea con los suelos arcillosos expansivos, que permitan el empleo del sistema más económico de piso. La elección de las alternativas se verá frecuentemente regida por factores locales, tales como disponibilidad de ciertos materiales y contratistas, así como por las preferencias personales y la experiencia adquirida por el ingeniero proyectista y por los resultados que se obtengan del estudio de laboratorio. El costo prohíbe algunas alternativas; por ejemplo, la estabilización por medio de la cal en una capa de 1.20 (4 pies) puede resultar más costosa que un piso estructural. Otras alternativas requieren mucho tiempo, por ejemplo inundar un sitio de construcción a fin de que se expandan las arcillas. Y algunos de plano no son tan efectivos, por ejemplo el método de cavar hoyos como para clavar postes, llenando los hoyos con lechada de cal.

Una técnica comúnmente usada ha sido de abrir caja para sustituir la arcilla por un material inerte (es decir, no sujeto a expansiones y contracciones).

La profundidad de la caja es del orden de 0.60 a 1.20 m (2 a 4 pies), siendo 1 m (3 pies) lo más común. Este método es considerablemente más confuso que el LSPI, es además menos satisfactorio porque se forma un depósito de materiales permeables debajo, en el terreno de cimentación, permitiendo un fácil incremento de la humedad a las arcillas subyacentes. La debida colocación del relleno requiere de una atención muy minuciosa, y el control de calidad del material puede ser difícil. Además, con el método de excavar más de lo necesario, volviendo a llenar con otro material, el trabajo puede sufrir retardos bastante largos si llueve después de abrir la excavación de la caja y antes del relleno. La LSPI provee de mayores economías al permitir el uso de materiales locales para construir el terraplén, formando la subrasante antes de la inyección. En muchos lugares, particularmente en zonas urbanas, la baja calidad de los materiales de préstamo aunado a su alto costo, han eliminado esta alternativa como la viable.

La figura 5 compara el costo de LSPI con el del método de abrir caja y sustitución del material en la zona de Dallas-Fort Worth. El corte de la segunda tiene como base la remoción de 1 m (3 pies) de material del sitio de construcción, reemplazándolo con 1 m (3 pies) de material seleccionado, de bajo índice plástico, colocando en capas compactadas de 15 a 20 cm (6 a 8 pulgadas). El precio de la LSPI está basada en una doble inyección a 2.10 m (7 pies) de profundidad. Examinando los precios para un trabajo de 45,000 pies cuadrados, el método de sustitución del material costaría aproximadamente 49,500 Dólares comparado con 20,700 Dólares de una doble inyección de cal.

La tabla 1 muestra una comparación de precios usando de 0.90 a 1.20 m (3 a 4 pies) de sustitución por material seleccionado contra los precios de LSPI basados en el promedio, en vigor en 1985 en el Metroplex (área urbana). Dallas-Fort Worth.

En los últimos años la LSPI ha sufrido muchas inovaciones en equipo, materiales, aditivos y diseño, mejorando la calidad, su rendimiento, extendiendo sus aplicaciones y reduciendo costos (48, 49, 50).

Otras aplicaciones de esta técnica de estabilización siguen apareciendo a medida que se desarrolla mejor equipo para el uso de materiales alternos y a que la inyección de la construcción y la tecnología del diseño han mejorado (fig. 6).

En los últimos años la ceniza volátil, como aditivo, ha adquirido un empleo creciente en la estabilización por inyección de cal a presión. El procedimiento de inyección a presión de lechada de cal mezclada con ceniza volátil, se ha denominado inyección de cal ceniza volátil (L/FA) (8,25,31). (Hay patente para la inyección en el suelo de cal-ceniza volátil; patente de la cual es propietaria la Woodbine Corp. de Fort Worth, Texas).

En general con el uso de la L/FA se obtiene un mayor incremento en la resistencia a la compresión en suelos limosos y arenosos con respecto a la que se obtiene con la lechada de cal sola. En muchos suelos bien drenados, con pocos minerales reactivos, la cal por si sola generalmente no es efectiva. Con una mezcla apropiada de cal y ceniza, la estabilización por inyección puede con buen éxito hacerse extensiva a ese tipo de suelos.

Una ventaja de la inyección de L/FA es que la ceniza, siendo un residuo industrial, es relativamente barata; aproximadamente de 20 a 40 por ciento del costo de la cal por tonelada. Así pues, para algunos "suelos problema" ofrece una solución económica al proveer una lechada de bajo costo. Este ahorro es importante en construcciones que requieren rellenarse huecos grandes con relación a los deslizamientos a los terraplenes y cimentaciones para vías ferreas con huecos profundos en el balasto (7, 8).

Otro empleo de la lechada de cal con ceniza es la de usarse como cimbra para pavimentos de concreto y cimentaciones. La lechada viscosa y pesada que se usa comúnmente para estos trabajos, casi siempre contiene cemento portland y arena, pero si en su lugar se empleara mortero de cal y ceniza, las reparaciones pueden llevarse a cabo con mayor economía. El mortero hecho con mezcla de cal y ceniza ha sido bombeado en proporciones de (agua) de 1.2 Kg., sólidos (cal y ceniza) por litro de agua. (10 lts. por galón).

La inyección a presión aumenta la resistencia de los terraplenes por la adición de un refuerzo a la tensión, cerrando grietas y haciendo que la resistencia máxima del terraplenado y la resistencia del subsuelo del cimiento se combinen, reduciendo así los posibles efectos de fallas ulteriores. La reparación de las grietas es imprescindible para la renovación, ya que la resistencia del terraplén no puede contribuir a la estabilidad de sus taludes si está agrietado. Se pueden formar grietas en los terraplenes debido a excesivos esfuerzos de tensión, comienzan en la cimentación y pasan inadvertidas hasta que el terraplén empieza a fallar. El método de inyección a presión ha sido desarrollado para tratar grietas y planos de falla in-situ, aun los que estan ocultos a la vista por haberse ocasionado comenzando por abajo, por la base (ver fig. 7).

La escarificación del material, su conformado y renivelación no remedian las grietas de tensión existentes en la masa no perturbada, y las grietas con -
tinuaran propagándose en los nuevos materiales.

DESCRIPCION DEL PROCEDIMIENTO DE INYECCION A PRESION

El procedimiento de inyección a presión de mortero de cal (LSPI) consiste en bombear al subsuelo una lechada de cal hidratada y agua en una proporción de entre 22 y 36% de cal y sólidos. Las inyecciones se aplican verticalmente - en el suelo en agujeros espaciados del orden de 1.5 m (cinco pies) uno de - otro, formando cuadrados; este es el prototipo común. Después de inyeccio - nes iniciales, generalmente se aplica una segunda y hasta de una tercera inyección, situadas diagonalmente respecto a las inyecciones anteriores. La - profundidad de la inyección podrá varias según las condiciones específicas - del lugar en el que se efectúen; así por ejemplo, la profundidad típica bajo los pavimentos suele ser de entre 1 y 1.50 m (3 y 5 pies); bajo las cimenta - ciones de edificios, de 2.10 a 3.00 m (7 a 10 pies); y de 3 a 12 m (10 a 40 - pies) para ferrovías, terraplenes y otras zonas con problemas profundos. Las unidades móviles típicas de inyección que se emplean para estabilizar - los cimientos de edificios y otros trabajos de poca profundidad, hasta de - 3 m (10 pies), pueden verse en las figs. 8 y 9. Un equipo de inyección - standard está dotado de cuatro tubos de inyección que pueden ser empujados - hidráulicamente dentro del suelo. La terminal en punta de cada uno de estos tubos tiene un diseño de perforaciones que dispersa la lechada en los 360 - grados del círculo en todo el espesor en que se aplica la inyección - - - - (fig. 10).

La presión de la lechada y el flujo se obtienen mediante una bomba adecuada, que va montada en el tanque de mezclado de la lechada (fig. 4a) el cual está equipado con un agitador mecánico y tiene una capacidad de mezclado entre - 9 y 12 Ton. (20,000 y 25,000 libras) de cal hidratada (aproximadamente la - carga de un camión) con 60,000 litros (16,000 galones) de agua. La lechada - de cal resultante de dicha mezcla se bombea a presiones de entre 3.5 a 14 - kg/cm (50 a 200 pies) a través de una manguera de alta presión conectada al equipo de inyección. La lechada se inyecta a intervalos regulares de profun - didad hasta el punto de rechazo o bien en un lento y continuo proceso de - compresión hasta llegar al punto en que la cantidad especificada ha sido in - yectada.

La lechada, siguiendo vías de menor resistencia, es forzada lateralmente y verticalmente en las fisuras, claros, juntas como las formadas por la estratigrafía, fisuras originadas por resequedad, grietas producidas por esfuerzos de tensión agujeros cavados por raíces de árbol y otras oquedades disponibles, formando una red de cordones de cal a través de la masa del suelo. Frecuentemente es necesario hacer unas segundas y unas terceras inyecciones a fin de obtener una mayor distribución de juntas de lechada de cal en todo el suelo. Estas aplicaciones sucesivas se aplican espaciándolas diagonalmente respecto a los agujeros de las inyecciones anteriores y se bombean hasta el punto de rechazo o bien hasta que se ha inyectado una cantidad predeterminada. Los cordones de cal resultantes se convierten en barreras de humedad que impiden variaciones de humedad y agregan un esfuerzo a la tensión y a la compresión en toda la masa de suelo estabilizada. La lechada que escapa a la superficie durante la inyección es también una ventaja, ya que esta cal en la superficie se mezcla con los 10 ó 15 cm (4 ó 6 pulgadas) superiores del suelo y levemente compactados sirve como una plataforma de trabajo.

La cantidad de cal requerida para el tratamiento LSPI puede variar considerablemente, dependiendo de las propiedades del suelo, la profundidad de la inyección, la permeabilidad de la masa del suelo y el grado de estabilidad requerido. Un valor típico de lechada requerido tiene un rango de entre 9.6 y 13.6 Kg/m³ (0.6 a .85 libras por pie cúbico) para una sola inyección y alrededor de 16 y 14 Kg/m³ (1.00 a 1.50 libras por pie cúbico) para una inyección doble.

El procedimiento de inyección de cal con ceniza volátil (L/FA) utiliza la mayor parte del equipo y procesos de la LSPI. El tanque mezclador de la lechada de cal se carga en primer lugar con poca lechada de agua y cal y después se incorpora espolvoreando la ceniza dentro del tanque, mientras la mezcla se sigue agitando (fig. 11). Puesto que la cal y la ceniza volátil forman una mezcla puzolánica, debe ser bombeada de inmediato en el suelo para evitar que se adhiera al tanque o que pierda su fraguado original. A veces se mezclan aditivos tales como aceleradores o retardadores con la L/FA para aumentar su rendimiento (40,44). Las mezclas de lechada que comúnmente se usan, una parte de cal y 2 a 4 de ceniza volátil, medidas por peso, dependiendo de la calidad de la ceniza volátil, de las propiedades del suelo y de las condiciones del proyecto.

En muchas reparaciones la inyección a presión se aplica formando grandes bolsas al rellenar las cavidades para restituir al suelo una adecuada capacidad y estabilidad.

La inyección de L/FA es en muchos casos un método viable para el rellenado de oquedades estabilizando al suelo simultáneamente. Pudiera ser que la lechada de cal y ceniza volátil se agrietara o se cuarteara, debido a alguna deflexión por exceso de carga, pero esta posee la capacidad inherente de unir las grietas gracias a un fenómeno autocicatrización que ocurre también en los morteros a base de cal (2). De manera semejante a las mezclas de cal y arcilla, las lechadas de cal y ceniza volátil se endurecen con el tiempo y la temperatura, y generalmente más rápido que los suelos de cal y arcilla.

En algunos proyectos es deseable utilizar en etapas una combinación de ambos, de cal e inyecciones a presión de cal y ceniza volátil. Un período de entre 24 y 48 horas generalmente se usa entre aplicaciones sucesivas de inyecciones. La inyección a presión de cal o de cal y cenizas volátiles no debe llevarse a cabo, en tiempo de intenso frío, ni tampoco a 4°C. (40°F) o a temperaturas menores. Cuando las temperaturas son marginales, la elevada temperatura que se obtiene en la lechada haciéndola con cal viva, es una ventaja (fig. 12).

Ambas mezclas la de la cal, y la de cal con ceniza volátil se pueden emplear indistintamente en el método de inyección a presión; y la elección, de cual de las dos emplear, es una decisión de ingeniería basada en las condiciones del lugar de trabajo y de los resultados que en cada caso individual hayan dado las pruebas. Cuando son necesarias múltiples inyecciones para obtener un tratamiento más concentrado, el uso conjunto de la inyección a presión de la cal y de la cal con ceniza volátil, con un tiempo de intervalo entre cada operación de inyectado, es el método conveniente que debe emplearse en muchas ocasiones.

MATERIALES DE INYECCION

CAL - Se recomienda únicamente la cal hidratada comercial, de alta pureza, que cumpla con los requisitos marcados por la ASTM o las especificaciones del Departamento de Carreteras. Aunque casi toda la inyección a presión se ha llevado a cabo con cal hidratada con alto contenido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})^2$), la cal dolomítica (de alto contenido de magnesio) ($\text{Ca}(\text{OH})^2 \cdot \text{MgO}$) también puede ser empleada, como en una estabilización convencional de cal ordinaria. En ambos casos son necesarias pruebas de laboratorio, para evaluar tanto el suelo, como la cal.

La lechada de cal puede ser preparada en el lugar de trabajo. En un tanque se mezclarán una cantidad medida de agua, con la cal hidratada o, recientemente se ha introducido cal viva (CaO) en una lechada de cal mediante una mezcladora de aspas portátil (fig. 12). Existe una patente para mezclar cal viva e inyectar la consiguiente lechada, que adquiere una alta temperatura, en el suelo; patente que es propiedad de la Chemical Lime Company de Ft. Worth, Texas. Con lechada recién elaborada con cal viva, el calor retenido de la hidratación acelera la reacción cementante entre la cal y el suelo, fenómeno deseable en trabajos efectuados en zonas de climas fríos.

AGUA - El agua para la lechada deberá ser limpia, fresca y no contener materiales que dañen las reacciones químicas de la cal con el suelo, tales como mucha acidez, altos contenidos de sulfatos, etc. La cal desde luego neutralizará rápidamente la acidez, pero a costa de dicha reacción neutralizadora, una parte de la cal se verá desperdiciada.

La presencia de sulfatos impide la reacción (puzolánica) de la cal (o del Calcio: Ca) con la sílice y cuando se emplea agua altamente sulfatada para "apagar" cal viva, anula la calidad de la lechada de cal resultante. Para ser empleada con la cal, el contenido de sulfato/sufito del agua no deberá exceder de 500 mg./l y la acidez en el agua, medida según el pH, deberá ser mayor de 6.5.

Por el contrario, el agua dura y agua salada, con alto contenido de iones de cloro, han sido empleadas con éxito en la preparación de la lechada y para apagar la cal viva, pero su uso puede corroer el equipo y puede ocasionar un fraguado instantáneo.

Aditivo.- Generalmente en la fabricación de la lechada se usa un aditivo humectante, abatidor de tensión superficial y para facilitar una mejor penetración de la lechada en la masa del suelo, Generalmente se emplea un aditivo no tóxico a razón de aproximadamente una porción por cada 3500 de agua.

Ceniza Volátil.- La ceniza volátil es una puzolana artificial, que se obtiene por precipitado electrostático del sistema de combustión del carbón. El ingrediente primario de la ceniza volátil es el sílice, que reacciona químicamente con la cal, aun en condiciones normales del ambiente (Temperatura, etc.), formando compuestos cementantes silíceos. Puede ocurrir una segunda reacción cuando se encuentra presente aluminio, formando aluminato de calcio. A diferencia de la cal comercial con calidad buena y uniforme, la ceniza volátil varía considerablemente de calidad, siendo un material residual, muchas veces vendido a muy bajo precio por el productor o por el proveedor. Así pues, hay muchas cenizas volátiles que son de baja calidad o muy marginales para la inyección a presión, sin el uso de ciertos aditivos para acrecentar su reactividad. Una impureza dañina, por ejemplo, es el carbón orgánico, que resulta principalmente del carbón no quemado. Cuando el contenido orgánico alcanza más del 5%, tiende a retrasar la reacción puzolánica, requiriendo así más elevados porcentajes de cal y de aceleradores.

Así pues cada ceniza volátil debe ser puesta a prueba para comprobar su reacción con la cal y sus resultados de durabilidad, en presencia del agua. La durabilidad es en sí el más importante criterio para evaluar una ceniza volátil, como viable.

LA ESTABILIZACION DE CAL Y LOS MECANISMOS DE LA L S P I

La reacción de la cal en el suelo, está ampliamente comprobada y documentada en numerosos trabajos de la literatura técnica respectiva (14, 15. 43). Hoy en día se usa mucha cal en la estabilización superficial de suelo, en las cuales, se esparce uniformemente sobre una capa del camino bien escarificada, a razón de 3 a 6 por ciento, en peso con respecto al peso del suelo. Se añade entonces agua y el suelo, cal y agua con mezclados por un disco rotativo o algún otro mezclador adecuado. Después de curarse por un período de uno a cinco días, el material tratado con la cal se vuelve a mezclar, después de lo cual se compacta con rodillos vibratorios o pata de cabra y la siguiente capa de material de base o revestimiento es colada. La cal puede ser aplicada como la comercial hidratada seca, granular seca o cal viva en trozos, o bien como lechada húmeda de cal apagada o hidratada. (Para mayor y más completa información sobre la estabilización por medio de cal, véase el Boletín No. 326 de la Asociación Nacional de la Cal. ("Manual de Construcción de Estabilización con Cal").

El método antes mencionado, convencional para la estabilización de superficies por medio de cal, es aplicable en el tratamiento de capas relativamente delgadas, de 15 a 45 cm (6 a 8 pulgadas) de espesor. Para problemas del suelo localizados a gran profundidad, el empleo de la estabilización convencional resultaría prohibitivamente costoso ya que requeriría estabilizar muchos estratos o capas de suelo.

En la estabilización superficial con cal no se humedece previamente ni profundamente el suelo, como lo logra la inyección a presión de lechada de cal (LSPI). Cuando se emplea en nuevas construcciones sobre suelos plásticos arcillosos, la LSPI actúa humedeciendo y predilatando al suelo, tendiendo a retener posteriormente el alto contenido de humedad gracias a su red de juntas de cal que forman barreras resistentes a la humedad.

Cuando los suelos arcillosos expansivos son inyectados con lechada de cal, se obtiene un número de cambios, que en conjunto mejoran las características de ingeniería de la masa del suelo. Estas ventajas incluyen :

EFFECTO ESTABILIZADOR DE LAS JUNTAS DE CAL - La formación de juntas relativamente delgadas de cal o de cal con ceniza volátil (juntas de estabilización) ayuda a estabilizar el contenido de humedad de la masa del suelo así tratado.

Estas juntas de estabilización sirven como barreras contra la humedad e impiden el movimiento de humedad capilar así como el de la humedad estacional a través del suelo.

Estas juntas también ayudan a retener la humedad de la lechada que se inyectó en el suelo. Al encapsular de esta manera grandes volúmenes de arcilla, se reduce enormemente el potencial de cambio de volumen del suelo. Un significativo aumento de fuerza puzolánica ocurre en la interface de las grietas estabilizadas y el suelo arcilloso circundante.

PRE - DILATADO (prehinchado) - El contenido de humedad en el suelo aumenta aproximadamente de 2 a 3 % después de la inyección inicial y tiende a disminuir con las inyecciones subsiguientes, se han escrito algunas especificaciones indicando un cierto contenido de humedad (generalmente del orden de la mitad del límite de líquido); de manera que pueden ser necesarias inyecciones adicionales. Es opinión de algunos ingenieros que mientras más se haya predilatado un suelo, menor probabilidad hay que ocurran algunas dilataciones destructivas una vez que la estructura ha sido emplazada, ello en el supuesto que pueda ser retenida la humedad en la masa del suelo subyacente a dicha estructura. Parece ser que el predilatado de la arcilla no ocasiona una pérdida significativa en la capacidad de sustentación, lo que es una ventaja secundaria de la inyección LSPI o L/FA. Por otra parte, la predilatación llevada a cabo únicamente con agua, puede traer como consecuencia una pérdida inaceptable de capacidad de sustentación, y no existe ningún mecanismo para hacer que el nivel de humedad logrado se mantenga constante.

DESPLAZAMIENTO - Después que se han formado las juntas de estabilización, algo de la cal se desplaza (emigra), y modifica el suelo adyacente a las juntas, proporcionando un incremento gradual en su resistencia. La teoría de cimentación difusa de Stocker, indica que la reacción de la cal en suelos, produce muchos grupos en zonas de baja concentración de calcio, aparte las de la cal original.

generalmente se piensa que cualesquiera efectos puzolánicos benéficos que puedan resultar de la técnica de inyección, tendría lugar a lo largo de las juntas de cal, donde hay una abundancia de calcio capaz de reaccionar con los suelos adyacentes. Blacklock reporta que muestras barnizadas con cal tuvieron un incremento en resistencia de entre 60 a 200% cuando estaban barnizadas con 1 al 5% de cal, para simular juntas de cal (6). Menciona que "el método LSPI de estabilización y reforzamiento de suelos da por resultado la formación de una red de hojas delgadas y de juntas. Estas hojas y juntas de lechada de cal reaccionan con el suelo adyacente formando membranas impermeables, relativamente resistentes a la tensión, enclavadas en la masa del suelo. El efecto de estas membranas es controlar el movimiento de la humedad y reforzar y continuar las porciones subdivididas de la masa del suelo."

PENETRACION DESDE LA SUPERFICIE - El líquido del mortero de cal (el agua de la lechada) tiene un pH en una gama que va de 11.9 a 12.4. Así pues, cuando la lechada se inyecta en el suelo y las partículas de cal se depositan a lo largo de las fracturas a medida que se forman las juntas de cal, la parte acuosa de la lechada es jalada hacia el suelo entre las juntas ya sea por la succión del suelo mismo o por mecanismos de difusión. Es posible, que el suelo entre las juntas se vea no sólo impregnado con agua de la lechada, sino además que sus predominantes iones de sodio se verán intercambiados.

Este concepto está basado en la teoría de la consolidación o cimentación difusa de Stocker, que explica que la resistencia de la masa del suelo atrapada entre las juntas de cal, aumenta con el tiempo, aunque no esté en contacto directo con las partículas de cal.

El trabajo de Petry (31) también ha evaluado cambios que ocurren en la masa del suelo entre las juntas de cal y ha llegado a la conclusión que con los distintos sistemas de inyección se obtienen importantes cambios estabilizando el contenido de agua, reducción de la plasticidad y de propiedades de expansión, en mejoría de la concentración de calcio en el agua de los poros entre las juntas de cal, y en una significativa estabilización del suelo contra los movimientos de la superficie al estar expuestos durante un año a los cambios de clima.

EFEECTO ESTABILIZADOR EN GRIETAS, CON CAL/CENIZA VOLATIL - Las juntas de cal con ceniza volátil, tienden a ser más fuertes y más gruesas que las juntas de cal sola, ofreciendo la mayoría de los beneficios estabilizadores de las juntas de cal, aunque proporciona al mismo tiempo, un mayor refuerzo a la compresión y al desgarramiento, especialmente en suelos debidamente compactados, en suelos con grietas muy abiertas y en suelos que contengan agregados no cohesivos (ver figuras 15 y 16).

EVALUACION DE SUELOS SUSCEPTIBLES PARA ESTABILIZARLOS POR INYECCION -
El uso de las pruebas estandar para suelos de la ASTM para evaluar lugares aptos -
para la estabilización por medio de la inyección no son recomendables. En los úl -
timos diez años, los ingenieros contratistas de LSPI así como los que han partici -
pado, han trabajado en el desarrollo de métodos especializados para predecir el - -
éxito de la aplicabilidad de la LSPI en sitios adecuados a ello (5, 6, 7, 9, 13, -
18, 25, 41, 42). Algunas de estas pruebas son modificaciones de las ASTM, para -
comprobar el efecto estabilizador de las juntas de cal, mientras que otros han sido
desarrollados específicamente para este propósito.

Las pruebas de compresión y de esfuerzo cortante, deben de ser usadas para evaluar
los sitios que tengan suelos de baja resistencia; las pruebas de dilatación debe -
rían ser usadas para evaluar sitios con posibles problemas de asentamiento.
Otras pruebas estandar de clasificación, que dan un índice indirecto de propieda -
des del suelo, tales como la de Límites Attenberg, deberían ser usadas únicamente -
como pruebas preliminares, y no deberían usarse en lugar de pruebas de resistencia
o de expansión.

PRUEBA DE SUELOS PARA LECHADA DE CAL Y PARA LECHADA DE CAL CON -
CENIZA VOLATIL - Las pruebas de suelo para la estabilización por medio
de lechada de cal son una parte importante de la tecnología LSPI. El propó -
sito del programa de pruebas es determinar si el LSPI mejorará suficien -
temente los suelos problema y servirá como guía en la preparación de las especi -
ficaciones del inyectado. Estas pruebas suministrarán datos que ayudarán a cuan -
tificar el grado de beneficio que es posible esperar en un sitio determinado -
si se lleva a cabo la estabilización por inyección; hay que tener en cuenta, -
sin embargo, que no es posible pretender obtener una correlación de uno-a-uno
(1:1) entre las pruebas de laboratorio y los resultados de campo.

Al desarrollar y refinar las pruebas de "evaluación de la LSPI", los inge -
nieros han hecho una importante contribución a los ensayos para la LSPI. Los
procedimientos de la LSPI, se llevan a cabo tratando muestras de suelo con -
lechada de cal, a modo que se forme un barniz o bien una junta, se curan y -
luego se prueban. Los resultados de las pruebas efectuadas en el barniz o en
la junta de las muestras estabilizadas con cal se somete a comparación con -
los valores obtenidos en muestras de control del mismo suelo sin tratamiento.
La cantidad de sólidos y de cal seca, que se usa en las pruebas de compati -
bilidad LSPI es, de costumbre, del orden del uno por ciento del peso de suelo -
seco. Se ha podido determinar que esta es la cantidad máxima de cal inyecta -
da en una sola etapa de inyección de LSPI espaciada 1.50 m (5 pies) centro a
centro. Las pruebas de laboratorio también pueden ser usadas para evaluar la
necesidad de una inyección LSPI en dos etapas, basada en inyecciones espacia -
das a 1.50 m centro a centro en un esquema de puntos diagonales.

Los resultados de laboratorio se pueden entonces usar como información básica
para la preparación de las especificaciones apropiadas al trabajo.

Todas las pruebas de "evaluación LSPI" que se recomiendan, son de hecho -
adaptables a estas situaciones. Las muestras barnizadas con cal, o con jun -
tas estabilizadas con cal, pueden ser empleadas en las pruebas de expansión, -
de consolidación y de comprensión.

Este método de someter a prueba las muestras ha sido desarrollado por la - -
Woodbine Corp. y por el Prof. James Blacklock en la Universidad de Arkansas -
(5, 6, 7, 9, 18, 27). El método de barnizado de cal o de junta inalterados o
alterados o bien con tierra ya sometida a otras pruebas; las muestras someti -
das al tratamiento con la cal, se comparan con las muestras de suelo sin tra -
tamiento; ambas servirán para evaluar la reactividad del suelo con la cal y -
así hacer posible predecir la resistencia, la dilatación y la mejoría que se
obtendrá con el tratamiento.

Al igual que con la LSPI, el propósito del programa de pruebas de la L/FA es determinar si la lechada de L/FA mejorará suficientemente las condiciones del sitio elegido y para hacer una guía para la preparación de las especificaciones apropiadas. Aunque las pruebas sugeridas proporcionarán datos que indicará el beneficio que se obtiene en el sitio, no es posible obtener una correlación exacta entre los resultados de las pruebas de laboratorio y el índice preciso del éxito lograble en el campo. Los procedimientos de estas pruebas, que intentan simular los resultados de campo de la L/FA, se llevan a cabo, tratando muestras de suelo con lechada de L/FA de modo que se formen juntas y después dejándolo curar para probarlo. Los resultados de las pruebas de las muestras tratadas con L/FA, se someten a comparación con las muestras de control para evaluar los beneficios potenciales de la estabilización por inyección.

El programa de pruebas de ingeniería para evaluar la inyección LSPI y la L/FA utiliza varios ensayos. Describiremos estas pruebas en los siguientes párrafos: (los detalles de estos métodos de prueba se pueden obtener de la oficina de la Asociación Nacional de la Cal en Arlington, Virginia) :

PRUEBA DE LA COMPRESION POR MEDIO DE BARNIZADO ESTABILIZADOR - En la figura 17 se muestra un espécimen de suelo estabilizado con barniz para probarlo a la compresión. El propósito de probar a la compresión el suelo estabilizado con barniz de cal o con cal y ceniza, es el de determinar el aumento de la resistencia a la compresión, mediante el refuerzo proporcionado por la superficie estabilizada por dicho barniz. La prueba de la compresión por medio del barnizado con cal fue originalmente reportado por Blacklock (6). Las muestras pueden ser preparadas y curadas de manera idéntica a las muestras tratadas.

PRUEBA DE LA COMPRESION POR MEDIO DE JUNTAS ESTABILIZADAS - Son de dos tipos las muestras de compresión por medio de juntas estabilizadas (1), junta en grieta recta (fig. 18), y (2) junta de ángulo (fig. 19). La muestra de junta recta fue proyectada para evaluar la fuerza del componente de refuerzo de la junta estabilizada a la compresión, mientras que la muestra de junta de ángulo se proyectó para evaluar al componente de refuerzo de la junta estabilizada al desgarramiento. Comúnmente, los resultados de ambas pruebas se emplearán en la reparación de grietas posibles o ya existentes en terraplenes que tengan falla.

Estos especímenes pueden prepararse con muestras inalteradas pero la experiencia indica una preferencia por usar suelos remoldeados. Estos también se pueden barnizar para permitir la evaluación de las combinaciones de cortante, tensión y resistencia a la compresión que se obtiene con el tratamiento.

PRUEBA DE CONSOLIDACION EN SUELOS ESTABILIZADOS CON BARNIZ -
 El espécimen de suelo estabilizado con barniz para la prueba de consolida -
 ción ilustrada en la figura 20, tiene el propósito de evaluar el asentamien -
 to que se obtiene con la estabilización por medio de inyección en el suelo -
 del terraplén. Esta muestra se prepara cortando muestras inalteradas y lue -
 go aplicándoles una barnizada de estabilizador tanto a la superficie supe -
 rior como a la inferior de las muestras.

PRUEBA DE DILATACION EN JUNTAS ESTABILIZADAS - La muestra de -
 dilatación en junta estabilizada que se ilustra en la figura 21 tiene el -
 propósito de evaluar la reducción de la dilatación en las juntas tratadas -
 con cal y con cal y ceniza. Esta muestra se prepara amasando el suelo y -
 colocándole el mortero de lechada en el centro.

PRUEBA DEL MATERIAL - Además de las seis pruebas de estabilización -
 de suelo discutidas arriba, es también necesario poner a prueba todos los ma -
 teriales con los que se van a trabajar. Es un hecho ya sabido que la cení -
 za volátil presenta numerosas variaciones en su rendimiento. Las pruebas -
 de juntas y de barnizado ayudarán a evaluar las características de estos -
 rendimientos; conviene no obstante evaluar por separado los materiales de -
 obra por medio de pruebas de cubos o cilindros para probarlos a la compre -
 sión. La evaluación que arrojan estas pruebas son tiempo, temperatura y -
 variables en la resistencia para diferentes tiempos de mezclado, diferentes -
 proporciones de mezcla así como para diferentes marcas y fuentes de aprovisio -
 namiento de dichos materiales.

PRUEBAS DE BACHEO EN EL CAMPO - En muchos casos puede ser ventajo ---
 so llevar a cabo una prueba de bombeo en la fase de proyecto inicial con objeto
 de determinar el volumen de lechada con una sencilla o doble tracción. También
 puede ser aconsejable cavar una zanja para observar el flujo de la lechada en -
 las paredes laterales de la zanja, especialmente en casos de fisuras y abertu -
 ras disponibles en la masa de tierra para ceptar la lechada. Este tipo de da -
 tos también se pueden obtener mediante muestras contenidas en tubos Shelby y -
 radiografiadas para detectar fisuras, grietas y otras anomalías que pueden -
 aceptar la lechada.

PRUEBAS DE SOBRECARGA - Para ciertos sitios donde el problema es la consolidación, puede ser provechoso inyectar en un tramo del terreno mismo (predeterminado para la prueba), y luego sobrecargándolo para observar el efecto, haciendo lo mismo en algún otro sitio de control - éste no tratado y cotejar los resultados efectivos en varios sitios, permitiendo evaluar los sistemas de LSPI y de L/FA.

EL PROCESO DE DECISION

El último asunto a que se enfrenta el ingeniero que está considerando el uso del LSPI es : ¿Mejorará la calidad de la masa del suelo la inyección de lechada de cal y, en caso de que sí sea, qué tanto lo mejorará? . Al compilar los datos con los cuales fundamentar una respuesta a esta interrogante, el ingeniero debe considerar todos los datos disponibles, comenzando con la exploración de la superficie del sitio elegido y culminando con la evaluación de todos los datos obtenidos de las pruebas idóneas.

En zonas como el Metroplex de Dallas/Fort Worth se han llevado a cabo un extenso empleo de la estabilización por LSPI en los últimos quince años con un área tratada estimada de más de 32 millones de m² (350 millones de pies cuadrados). Esta experiencia provee a los ingenieros con un muy alto nivel de confianza - basado en la significativa experiencia empírica evidenciada en el éxito de la LSPI en las zonas tratadas. Los ferrocarriles tienen la capacidad única de obtener resultados de campo casi inmediatos dado el servicio continuo de trenes sobre sectores de la vía férrea tratados con la LSPI.

La interpretación de los datos obtenidos de las pruebas idóneas no es de ninguna manera una tarea sencilla; y ello porque los mecanismos por los cuales la LSPI estabiliza el suelo son complejos. Además algunas de estas pruebas simulan las condiciones de campo mejor que otras. Por ejemplo, las pruebas por barnizado y por juntas simulan mejor el tratamiento de la tierra in-situ que las pruebas de tierra amasada. Así pues los incrementos en la resistencia debidos a la adición de lechada de cal a muestras de suelo remoldeado deben ser interpretados conjuntamente con otros datos. La existencia de fisuras y grietas se debe tener en consideración ya que es poco probable que la lechada de cal sea transportada muy lejos o muy adentro en la masa del suelo de no haber vías aptas para dicho flujo.

Más aun, cualquier mejoría observada en las pruebas, no es sino una mejoría en las cantidades medidas en un laboratorio, en una muestra de suelo. La muestra de suelo no es modelo exacto de la masa del terreno.

Por ejemplo, los efectos de las grietas en las muestras no necesariamente duplican las que se encontrarán en el campo.

Además, las muestras tratadas que indiquen ciertas mejorías no revelarán - otras, como las obtenidas por estabilización de la humedad y en la disminución del crecimiento de grietas. Así pues los resultados de las pruebas de estabilización medio de barnizado y de juntas estabilizadas será generalmente conservador.

No hay un método único de obtener una respuesta directa de "sí" o de "no" para todos los sitios en donde la LSPI pueda ser aplicable; sin embargo, - las pruebas y otras evaluaciones esbozadas en este boletín podrá proveer - importantes datos de ingeniería para ayudar en el proceso de las decisiones a tomar.

CASOS HISTORIA DE APLICACIONES DE L S P I

Desde 1960 ha habido muchos proyectos interesantes así como prestigiosos, - en los cuales se ha llevado a cabo con éxito la inyección de cal o de cal - ceniza volátil hecha a presión. Los casos ilustrativos que a continuación se exponen harán ver la versatilidad de esta técnica de estabilización y, así es de esperarse, darán ideas para soluciones viables a otros complejos problemas de construcción.

AEROPUERTO REGIONAL DE DALLAS

FORT WORT

El aeropuerto regional de D/FW, que fue construido al principio de los años 70, se edificó sobre una formación arcillosa conocida como el Vado del - - Aguila. Esta formación es sumamente expansiva y causa enormes daños a los edificios y a las estructuras pavimentadas a menos que se le estabilice o - que se le trate de alguna otra manera. Los edificios de la terminal, al - gunas zonas del camino central, los hoteles, la oficina de correos y todos - los edificios auxiliares fueron estabilizados usando LSPI. Las especifici - caciones para todos los edificios terminales y para la mayoría de los demás edificios requirió inyecciones espaciadas a cada 1.50 m (5 pies) seguidas - por inyección de agua sola para obtener un contenido específico de humedad. Esta técnica de estabilización y de predilatación ha probado ser muy efec - tiva para controlar la dilatación y en eliminar variaciones en la carga de - los cimientos. En total, se estabilizaron más de 5 millones de m² (5 mi - llones de pies cuadrados) en las zonas de cimentación del conjunto del ae - ropuerto regional de D/FW, empleando LSPI.

TERRAPLEN DEL FERROCARRIL CHICAGO NORTH WESTERN

Un caso típico de muchos proyectos exitosos en los que se han usado la LSPI para estabilizar terraplenes altos es la línea ferroviaria Chicago North - western Railroad (C&NW) cerca de Des Moines, Iowa (33). El terraplén tiene una altura de 7.5 m (25 pies) aproximadamente; 3 m (10 pies) de arcilla - que a su vez se encuentra sobre arenas medianamente compactadas. El aumento de tráfico ferroviario, añadido al incremento de las cargas por eje, produjo un asentamiento excesivo en el terraplén.

Por años, el terraplén había desafiado prácticamente todos los intentos por resolver el mantenimiento y corregir el crónico problema de la inestabilidad (fig. 22).

Entre los métodos correctivos que se probaron sin éxito por la C&NW estuvo el de ampliar a 3.5 m (12 pies) a cada lado en la sección con lechada de cemento e inyección de mortero de cal a poca profundidad; se logró una mejora temporal por ocho meses además con la instalación de tubo de drenaje galvanizado perforado, de 25 cm (10 pulgadas) y la construcción de bermas. En un período de siete años se añadieron aproximadamente unos 200 carros de ferrocarril de cascajo para rellenar las zonas más hundidas del terraplén, dando por resultado bolsas de lastre a una profundidad de entre 2.4 y 3 m (8 y 10 pies). El peso del balasto en la arcilla suave y en los estratos subyacentes tendía a empujar hacia afuera la base, dando como resultado chips en el extremo de la pendiente, a 10.5 a 15 m (35 - 40 pies) de distancia de la línea central de los rieles. Era bastante común que la vía férrea estuviera entre 7.5 y 10 cm., bajo nivel el paso de un tren a una velocidad de 8 a 16 Km/hora.

En las dos primeras etapas se inyectó la lechada de cal a una profundidad de 4.00 mts., en tres inyecciones simultáneas con un período de curado de 2 a 3 días entre una y otra; en la segunda etapa las inyecciones se efectuaron a un nivel intermedio de las primeras inyecciones. La tercera etapa consistió en una única penetración a 13.00 mts., de profundidad por la parte interior de uno de los rieles y a distancias de 3 mts., una de la otra. Al atravesar la línea de 300 mts., lineales, el equipo regresaba inyectando por la parte interior del otro riel, pero comenzando las inyecciones a 1.5 mts., de distancia de la última inyección efectuada (en la proximidad del otro riel). De esta manera, se efectuó una inyección diagonal de 12.20 mts., de profundidad, zigzagueando los rieles cada 1.5 mts., (fig. 23).

Se emplearon más de 300 toneladas de cal en este tramo de 300 mts., de línea ferroviaria. Las inyecciones hechas a 12.2 mts., de profundidad se llevaron un promedio de una tonelada de cal por cada agujero.

Cuando se efectuaban las inyecciones a 4.00 mts., de profundidad, la lechada del relleno que iba a dar a las zanjias a cada lado del terraplén. Tres semanas después de que fue llevado a término el proyecto, la línea ferroviaria pudo asumir de nuevo las velocidades normales de 80 km/hora por hora del ferrocarril dentro de sus horarios; se detuvieron los asentamientos del terreno y del subsuelo. De 1976 en adelante, el movimiento requerido por esta línea ferrocarrilera ha sido mínimo.

ESTABILIZACION DE DIQUE - LION OIL CO. (CIA. PETROLERA LION)

En un proyecto para mejorar y reducir el alto costo de mantenimiento del estanque de lodos y de la represa de nivelación de la Lion Oil Company en El Dorado Arkansas, se consideró necesario reforzar un dique de tierra que separaba el estanque de lodos de la represa niveladora, según se ilustra en la fig. 24.

La deseada mejora requería que se drenaran los 3 mts., de profundidad de la represa niveladora y volviendo a formar la represa de tierra y soportar con sacos o arpillar la represa liberada.

El dique de tierra humedo estaba tan débil que al drenarlo se temió que se viniera abajo debido a la presión lateral del estanque de lodos. Las perforaciones de prueba revelaron una arena arcillosa con un contenido de humedad promedio del 25% y una resistencia cohesiva al corte de apenas 1.01 de tonelada por m².

Se decidió reforzar el dique con una inyección a presión en tres etapas hecha con cal y cal con cenizas (46). Dicho tratamiento además incrementaría la impermeabilidad del relleno del dique (fig.25).

EL PLAN DE INYECCION INCLUYO :

PRIMERA ETAPA .- Cuatro inyecciones simultáneas de lechada de cal a 3 mts., de profundidad, equidistantes 1.50 mts., de centro a centro hechas alrededor del dique, abarcando 180 mts., lineales.

SEGUNDA ETAPA .- Inyecciones de lechada de cal mezclada con ceniza a 3 mts., de profundidad, espaciados diagonalmente entre las inyecciones de la primera etapa.

TERCERA ETAPA .- Inyecciones de lechada de cal, igual que en la 1ª.- etapa y espaciadas entre las inyecciones previas.

Las pruebas de terreno efectuadas después de las inyecciones, transcurrido un lapso de tres semanas, revelaron incrementos de entre cuatro y seis veces de los valores de N., y los de cohesión al corte del suelo tratado en comparación con el suelo no tratado; esto a pesar de que el dique ahora contenía igual humedad o más (2% más), que antes del tratamiento. Al drenar la represa y habiéndola dragado y vuelto a conformar después de cinco semanas de curado, no hubo transminación a través de las paredes de la represa y el dique resistió la presión lateral de la laguna y aguantó una draga de 75 toneladas, que se empleó para excavar la represa.

ESTABILIZACION DE RELLENO - SALVAMENTO DE UN EDIFICIO COMERCIAL

En 1968 se construyó, en una zona de Fort Worth Texas que anteriormente había sido usada como una zona de relleno sanitario un edificio comercial en una superficie de 1,800 m². La profundidad de los desperdicios bajo el edificio variaba de 2.5 a 3 mts. La cimentación de este edificio consistía en pilotes que llegaban más abajo del estrato de basura, hasta el subsuelo natural. Como resultado de esto, las paredes exteriores se encontraban en condiciones satisfactorias; sin embargo, el firme había sido colado en grava y había tenido un asentamiento de hasta 35 cms., dando como resultado la pérdida de todos los locales comerciales menos uno.

Después de estudiar varias soluciones el problema, el dueño optó por un programa de inyección mediante inyección a presión de lechada de cal con ceniza, como el único método económicamente factible para rescatar su edificio y dejarlo nuevamente disponible para el uso. El trabajo de rescate fue llevado a cabo en tres fases, como sigue :

1ª. FASE .- Alrededor del perímetro del edificio en centros distanciados a 15 mts., uno del otro y a una profundidad de 3 mts., se efectuó una inyección "en cortina". Una segunda serie de inyecciones se efectuaron entre las primeras inyecciones, pero a 15 mts., de la pared. El objetivo de la primera fase era establecer una cortina de relleno que contribuyera a contener las subsiguientes inyecciones, a efectuarse dentro de la zona construida.

2ª. FASE .- Se perforaron agujeros en el firme de concreto a centros equidistantes de 3 mts., y toda la extensión bajo dicho firme se llenó con lechada de cal y ceniza. Se empleó una lechada de 5 kg. de sólido por cada litro de agua. La inyección a presión se efectuó hasta el punto de rechazo, que era visiblemente observable en los agujeros adyacentes, ya que había una oquedad de entre 15 y 20 cms., debajo del firme. En algunos casos se puede detectar flujo de la lechada a 6 mts., de distancia de los agujeros inyectados.

En las primeras etapas de la inyección salió gas metano de los tubos de inyección, mismo que al ser encendido lanzaba llamaradas de entre .80 y 1 mt., de altura. A medida que avanzaba la inyección disminuían las llamaradas de metano hasta que por fin dejó de haber ignición.

3ª. FASE .- Por último, se bombeó una lechada más pesada, en proporción de 7 Kgs., de sólido por cada litro de agua, entre la loseta del firme y el subsuelo estabilizado, con lo cual se llenó el hueco y se llenó (Por presión hidráulica), la loseta del firme al nivel de su configuración original. Resultado : La loseta del firme ha resistido el asentamiento por más de cinco años desde que se llevó a término el proyecto, y no han vuelto a haber fugas de metano. El edificio está ahora totalmente ocupado.

PROYECTO DE DESAGUE - DOW CHEMICAL CO.

En 1975 se llevó a cabo un proyecto de inyección de una combinación de cal y cal con ceniza para la Dow Chemical Co. de Freeport, Texas. Para poder construir cuatro tanques de filtrado hechos de concreto de 36 mts., era necesario excavar un área de 100 X 100 mts., a una profundidad de 4.5 mts., bajo el nivel del mar. Los primeros intentos de excavación se vieron frustrados por una casi inmediata infiltración del agua del suelo. La Dow contrató los servicios de una empresa geotécnica para estudiar el problema.

Su conclusión fue que, la causa del exceso de agua era una lente de arena de entre 15 a 30 cms., que variaba en profundidad entre los 1.8 a 2.5 mts., que estaba acarreado el agua de un río cercano.

Debido al alto costo del piloteo, la compañía decidió evaluar otros métodos para desaguar. Se escogió una combinación del sistema de cal y lechada de cal con ceniza por el considerable ahorro que se lograría.

Las primeras inyecciones se hicieron en perforaciones de 3 mts., de profundidad y distanciadas entre sí de 1.5 mts., usando lechada de cal. Después de un período de curado de 48 horas, se hizo una segunda serie de inyecciones en dos direcciones en ángulo recto respecto de las primeras (estableciendo un cuadrículado de 75 cms., de lado).

La segunda serie de inyecciones consistió en una lechada de cal con ceniza a razón de .1 kg., de cal y .02 kg., de ceniza, como material sólido, por cada litro de agua. Estas inyecciones se efectuaron alrededor de una orilla de 22-mts., de perímetro.

Se inyectó toda el área para incrementar la resistencia de los suelos saturados arcillosos para que pudieran aguantar las grúas de excavación en el término que tomara la misma. La segunda serie de inyecciones de cal con ceniza se efectuaron con el propósito de impedir el flujo de agua a la junta de arena.

Después de un período de curado de 10 días volvió a empezar la excavación y el contratista pudo controlar la fuga de una pequeña cantidad de agua con la ayuda de dos pequeñas bombas accionadas por gasolina. El gerente del proyecto declaró que el haber optado por la inyección a presión había logrado un ahorro de 75,000 Dólares. Con base en este exitoso resultado, la Dow usó la Inyección a Presión para estabilizar varios kms., de subsuelo de su tramo ferrocarrilero.

SELLADO DE FUGAS DE GAS METANO Y NIVELACION

DE FIRME SOBRE TERRENO

Un edificio de 5,000 mts., cuadrados construido en Mesquite, Texas, que había sido construido sobre un viejo relleno sanitario, fue clausurado por el Jefe del Departamento de Bomberos debido al exceso de gas metano en el interior del edificio. Dicho edificio quedó vacante y económicamente se había convertido en una pérdida total para el propietario. El propietario intentó desalojar el gas metano instalando una serie de tubos por todo el edificio, con los tubos atravesando el firme hace el relleno y hacia ambas a través del techo. Se usaron ventiladores para forzar el gas a salir por los tubos (figura 26).

Se instaló otra serie de tubos en el perímetro exterior del edificio (figura 27). Este sistema no logró el desalojo del gas y el propietario seguía sin poder rentar su edificio.

Se tomó la decisión de emplear la inyección de cal con ceniza para netralizar y sellar el gas metano. Además, la loseta del firme había sufrido un asentamiento de aproximadamente 6 cms., en algunos lugares y para nivelarla se usó lechada de cal con ceniza volátil más densa.

El trabajo se llevó a cabo en algo así como 3,000 m²., del edificio, como sigue :

- 1.- Se perforaron agujeros en el firme a 3 mts., de distancia entre centros.
- 2.- Se inyectó a presión en el subsuelo y a una profundidad promedio de 3 mts., una lechada de cal con ceniza volátil en proporción de 0.25 Kg., de ceniza por cada litro de agua. El proceso de inyección de la lechada se comenzó en las paredes exteriores para formar una cortina que contuviera las sucesivas inyecciones de lechada ya dentro del perímetro del edificio. Se insertaron tubos para la inyección de la lechada en cada uno de los agujeros, forzándoseles hasta el fondo del relleno de basura o bien hasta topar con material impenetrable. La lechada de cal con ceniza se bombeaba hasta el punto de rechazo, a una presión de 7 Kg./cm². Los tubos se iban levantando gradualmente a niveles intermedios y se repetía la operación.

- 3.- Siguió después el trabajo de nivelado y el de sellado.

Se inyectó bajo la loseta del firme una lechada elaborada con .25 Kg., de cal y 1.5 Kg., de ceniza por cada litro de agua para renivelar la loseta afectada y finalmente para llenar posibles subsistencia oquedades bajo la total área del suelo.

El Jefe del Departamento de Bomberos hizo revisiones periódicas para detectar gas metano a medida que avanzaba el trabajo hasta que no pudieron encontrarse trazas del gas. El edificio se rentó a un nuevo inquilino y fue ocupado en 1983.

En estos trea años no ha vuelto a detectarse ningún rastro de metano.

REFUERZO DEL SUBSUELO - PARQUE INDUSTRIAL EN OHIO

Los constructores de un edificio industrial de considerables puntos de observación antes de la inyección para detectar posibles movimientos de superficie debido a la inyección a presión. En algunas zonas de la superficie se alzó hasta 15 cms., indicando fractura hidráulica del suelo a baja profundidad. Fluía agua libre por grietas y fisuras, desplazada por la lechada de cal.

En tres años no han habido asentamientos o estos han sido escasos. De pruebas Standard realizadas en el penetrómetro sobre una escala N de valores cubrió una gama de entre 10 a 16 golpes por pie contra 5 a 11 antes de la inyección.

ESTABILIZACION DE UN RELLENO SANITARIO PARA CONSTRUCCION DE UN ESTACIONAMIENTO

Hace poco la ciudad de Dallas terminó un relleno sanitario y como este se encontraba en una zona adecuada fue comprado para fraccionamiento industrial. El fraccionador excavó el material de desecho que se encontraba bajo las calles y lo reemplazó con material arcilloso. Después a medida que los edificios se van construyendo, el procedimiento ha sido el de excavar el relleno (de aproximadamente 3 mts., de profundidad), y rellenarlo con otro material. Como este procedimiento es muy costoso, el dueño del proyecto decidió investigar otras opciones para reducir el costo de la explanada de estacionamiento que cubre una superficie de 2250 mts².

El Ingeniero consultor en geotécnica contratado por el dueño, escogió la inyección de cal y ceniza. Las inyecciones se llevaron a cabo en dos etapas, usando una unidad de inyección montada en tractor. Las primeras inyecciones se efectuaron en perforaciones separadas 1.5 mts., de centro en centro, a una profundidad de 3 mts. La segunda serie de inyecciones se efectuó posteriormente en diagonal respecto a la primeras. La lechada se mezcló en razón de 0.12 Kgs., de cal y 0.36 Kgs., de ceniza por litro de agua; todas las inyecciones efectuadas hasta el punto de rechazo.

Al comenzar el proyecto se cavó una zanja para permitir inspeccionar visualmente el flujo de la lechada en el relleno. El experimento confirmó que la lechada podía fluir con facilidad en los intersticios del material de relleno (figura 28).

Otras investigaciones de campo consistieron en perforar tres agujeros de precolación antes de la inyección y otros tres agujeros después de la inyección

para poder evaluar la penetración de la lechada en el material de relleno. -
Los resultados de las pruebas indicaron una disminución a razón de 20 a 30 -
veces después de terminada la inyección.

La explanada de estacionamiento se pavimentó con una loseta de 10 cms., de -
concreto armado y la inspección visual, a tres años de comenzado su servicio,
no da muestras de deterioro alguno en la estructura. (figura 29).

ESTABILIZACION DE EXPLANADA DE ESTACIONAMIENTO

DALLAS FORTH WORTH

Muchas zonas en todo el territorio de los Estados Unidos y en la zona conurbada Worth, se ven afectadas por fallas en las superficies pavimentadas. Tanto en explanadas para estacionamiento (figura 30), como en calles muy transitadas y en carreteras. La mayoría de estas fallas son el resultado de expansiones destructivas provenientes de los estratos de arcilla expansiva. Algunas de las características de las fallas en el pavimento debidas a arcillas expansivas son los baches, las cuarteaduras "de piel de cocodrilo" (figura-31), y la más característica de todas que es una falla parecida a una ola, en que el pavimento se convierte en una serie redondeada de cúspides y hondonadas.

Una vez que se declara la primera falla y que hay agrietamiento superficial-- es muy común que la primera falla siga como consecuencia inmediata un mayor-- deterioro debido a que el agua alimenta directamente los estratos arcillosos. Desde hace muchos años el procedimiento para tratar las zonas que van a ser - pavimentadas, ha sido el uso convencional de la cal para crear una capa estabilizada en la superficie (ordinariamente de entre 15 y 20 cms., de espesor) y pavimentar directamente sobre la capa estabilizada. Como esta capa estabilizada puede no ser adecuada para controlar los estratos arcillosos profundos de ciertas regiones. El empleo de la inyección a presión ha aumentado considerablemente en los últimos años.

Normalmente las inyecciones se hacen en profundidades de 1.0 a 1.5 mts., siendo 1.2 mts., lo más común. Para sitios con arcillas altamente activas o en los cuales se prevén los rodamientos de cargas pesadas, se recomienda una segunda inyección. Una vez terminada la inyección, se mezcla la cal de la superficie a los 15 cms., superiores para que el resultado final sea una combinación de los beneficios de la estabilización profunda sumada al tratamiento de superficie. En muchos casos, la estabilización por inyección a 1.2 mts., de profundidad puede hacerse con un costo inferior que la estabilización convencional a 15 a 20 cms., y si bien una inyección doble a 1.2 mts., de profundidad puede tener un costo mayor inicial, el ahorro a lo largo del plazo en mantenimiento y reparación podría ser considerable y los beneficios resultan evidentes.

DESARROLLO DE LOS USOS DE LA INYECCION A PRESION

Partiendo de los casos anteriores, que representan solamente una fracción del total de la experiencia habida en el uso de la Inyección a Presión, resulta evidentemente que la inyección a presión de cal y de cal con ceniza se está convirtiendo en una solución a la cual se recurre con reciente frecuencia para la estabilización de suelos, sea esta como medida preventiva o como restauración posterior. La diversidad de sus usos hasta la fecha incluyen cimentaciones de edificios, basamentos ferroviarios, carreteras, pendientes, levantamientos, pistas aéreas, explanadas de estacionamiento, diques, tanques de depósito, así como relleno, proyectos de desagüe y de neutralización de ácidos. La inyección a presión puede ser usada para reducir el cambio potencial de volumen en los suelos, aumentar la resistencia y capacidad de soporte (Capacidad de aguante), estabilizar el contenido de humedad, expeler el exceso de humedad libre en el suelo, impedir la transmisión y el flujo de agua o lixiviación, detener la producción de gas metano en sitios de relleno sanitario, y también densificación y consolidación.

Con la experiencia obtenida hasta la fecha, es de suponer que la Inyección a presión tiene mucho potencial como un método económico de tratamiento para rellenos activos o abandonados.

Hoy en día es ya grande la concientización y por ende la preocupación ante los efectos tóxicos de las transminaciones de desechos industriales cercanos a depósitos acuíferos o a las aguas de superficie en general y tal parece que la Inyección a Presión podría ser un arma poderosa para la protección del agua de superficie, la neutralización de fugas ácidas en relleno sanitario y para colocar paredes en cortina para prevenir fugas migratorias, filtraciones a terrenos adyacentes.

Las zonas de reciente excavación destinadas a rellenos pueden ser estabilizadas con cal o con cal y ceniza inyectadas a presión como un recurso de construcción con miras a impedir el trasminado (filtración), de compuestos tóxicos al agua del subsuelo.

Otro campo prometedor en el uso de la inyección a presión es en el tratamiento de desperdicios tóxicos. Se sabe bien que la cal tiene la propiedad de "fijar" metales pesados; el ambiente altamente alcalino que hace posible el inyectado de la lechada de cal puede inhibir el movimiento de metales pesados y otros contaminantes. Una reciente evaluación de varios métodos de acción restauradora en las colas de molienda de uranio llegó a la conclusión que la inyección de cal y ceniza podría ofrecer una solución viable (39). La estabilización por inyección a presión en carreteras ya existentes es un área en que la experiencia adquirida en estabilizar basamentos ferrocarrileros, puede ser correlacionada directamente a la red de carreteras. En lugares donde las condiciones de inestabilidad profunda del suelo causan condiciones indeseables de distorsión en la superficie, alterando las características del manejo de vehículos en ellas, la estabilización por inyección a presión puede ser oportuna antes de la colocación de la capa superior. Las inyecciones pueden hacerse a través de agujeros perforados en el pavimento o a la orilla de la acotación para formar un muro en cortina que impida la fluctuación de humedad por debajo de la carpeta asfáltica.

Además, la Inyección a Presión ofrece un método económicamente viable para estabilizar deslizamientos de superficie y fallas en las pendientes, que desde hace largo tiempo le han creado dificultades a las comisiones constructoras de carreteras. Dos proyectos de demostración en el verano de 1983 en Arkansas (1) y en Alabama (7) (figura 33), y una en Missouri en 1984.

También se llevó a cabo un proyecto de demostración en la primavera de 1984 por el Departamento de Carreteras de Texas, cerca de Greenville Texas, donde se inyectaron secciones para crear una cortina en forma de pared inyectada para prolongar la vida útil del pavimento. Otros proyectos se encuentran actualmente en distintas etapas de planeación en los departamentos de carreteras y tal parece que la inyección a presión jugará un papel verdaderamente vital en la rehabilitación del sistema de carreteras.

MEDIDAS DE SEGURIDAD

La cal hidratada (Hidróxido de calcio), como la mayoría de los materiales y de los productos químicos de uso corriente, no es peligrosa si se toman las debidas precauciones.

Aunque es remota la probabilidad de quemaduras graves ocasionadas por la cal, en general es preferible impedir que la cal hidratada entre en contacto con la piel de los obreros.

El contacto prolongado de la cal hidratada con la piel húmeda por el sudor y rozada por ropa apretada puede producir quemaduras.

Así pues, deben tomarse precauciones para evitar la presencia de la lechada de cal en las botas o zapatos. El clima caliente y húmedo tiende a aumentar el efecto caústico de la cal en la piel del obrero. Las personas con piel más sensitiva de lo común también han manifestado irritación de la piel con el contacto prolongado. No hay urgencia en quitar el polvo de la cal hidratada de regiones de piel al descubierto, pero si es conveniente enjuagar ese polvo en cuanto sea posible.

Si se siguen las recomendaciones que a continuación se numeran, hay poca probabilidad que los trabajadores sufran quemaduras de la piel o irritación. En un sistema cerrado de mezcla, los peligros del polvo de cal se evitan y no se requieren las precauciones relacionadas con el polvo de cal excepto en la operación de traslado, en la que los obreros deberán con todo cuidado protegerse los ojos.

PROTECCION DE LOS OJOS

Aunque se recomiendan anteojos de seguridad con protectores laterales -- cuando se trabaja con cal, los trabajadores de inyección rara vez la usan. Así pues, es importante que el contratista tenga botiquines para el lavado de ojos disponibles para el caso de una rotura de manguera u otro incidente que pueda ocasionar el acceso de lechada de cal a los ojos del obrero. Esta es la causa más común de daños en este tipo de trabajo y el daño a los ojos puede ser grave si el trabajador se talla o si no se lava de inmediato.

PROTECCION DE LA PIEL

Al final de la jornada de trabajo los obreros deberían lavarse o bañarse enteramente para limpiar bien todo el cuerpo de todos los residuos de cal. Cuando sea necesario, un poco de solución de vinagre administrada a las manos, a los pies o a otras partes del cuerpo no sensibles neutralizará cualquier sedimento que haya podido quedar de cal sobre el cuerpo después de lavado.

PRIMEROS AUXILIOS

QUEMADURAS DE LA PIEL

Lavar concienzudamente con jabón y agua tibia y vinagre para--remover toda traza de cal. Aplicar unguento ordinario para quemaduras por calor o cáusticas sobre el lugar afectado y cubrir con vendaje estéril.

Mantengase vendado mientras cicatriza para evitar infección.

CAL EN LOS OJOS - ¡ NO TALLAR LOS OJOS POR NINGUN MOTIVO !

Mantener el ojo abierto al obrero y enjuagar abundantemente con agua limpia inmediatamente. En cada vehículo inyector de cal, como medida preventiva, debería haber siempre botiquines lava-ojos, para emergencias. Reporten se todas las quemaduras serias debidas a la cal o los casos de cal en los ojos de inmediato para que se pueda proveer con atención médica en caso de necesidad.

PRECAUCIONES GENERALES

En general, los obreros más expuestos a quemadura por polvo de cal son los que manejan la cal encostalada y los que se ocupan de trasladar los sacos (costales) de cal y son ellos los que deberán observar más rigurosamente las precauciones arriba mencionadas. Se puede decir que en general requiere de mayor precaución el manejo de la cal encostalada que de la cal a granel. Como el peligro mayor son los ojos, todos los obreros encargados del vaciado de sacos de cal deberán usar lentes bien apretados.

Si a un trabajador agachado se le cae un paquete o una bolsa abierta, se puede originar una densa nube de polvo de cal que llegará directamente a la cara del obrero. Si no tiene los ojos protegidos con lentes, puede sobrevenir pérdida de la vista por la quemadura de cal. Los trabajadores que desempeñan en las proximidades del traslado de la cal y de proceso de mezclado deberán usar lentes para prevenir que una ráfaga de polvo de cal les llegue a los ojos.

El peligro menor ante las quemaduras de cal se encuentra en el manejo de la lechada de cal. Unicamente los obreros con piel extraordinariamente sensible se ven adversamente afectados si algo de la lechada viene a rociarles la piel. Pero debería ejercerse el mismo riguroso cuidado para prevenir que la lechada de cal les llegue a los ojos, a los zapatos o a la ropa y se empape con ella.

Las precauciones arriba indicadas se entienden en general para contratistas - que usan la cal por primera vez. Los contratistas que estan ya familiariza - dos con la cal han aprendido su debido uso y siguen las anteriores reglas - - de seguridad. Aun así, es importante siempre disponer de instructivos - - - ("Hombre precavido vale por dos"), de manera que todos los contratistas de - berían explicar concienzudamente a todos y cada uno de sus obreros, inspecto - res y otros trabajadores presentes en la obra acerca de las precauciones re - queridas para el trabajo con cal y más importante aún, supervisar que el tra - bajador acate estas pocas y sencillas medidas. En términos prácticos, la cal hidratada o la lechada de cal no son más peligrosas para la piel que el ce - mento portland; sólo que la cal es más liviana y más fina que el cemento y - por eso más propensa a propagarse en el aire. Como la lechada está bajo con - siderable presión, un punto adicional de peligro son las posibles roturas en - las mangueras.

C O N C L U S I O N E S

Es importante, para entender y tener éxito con cualquier trabajo de inyec - ción a presión, determinar la presencia de fisuras adecuadas, aberturas y - anomalías del suelo que permitan la penetración de la lechada a través de la masa, muchos ingenieros, con poca experiencia en el uso de la Inyección a - Presión, dudan a veces que la lechada pueda penetrar arcillas altamente - - plásticas e "infranqueables".

Esto se basa generalmente en las extremadamente pequeñas dimensiones de las - partículas de arcilla y en el hecho de que las lechadas de cal y de cal con - ceniza son soluciones perfectamente integradas.

La experiencia ha demostrado no obstante, que casi todas las arcillas expan - sivas pueden ser inyectadas, ya que siempre hay grietas de desecación y fi - suras y se trata de arcillas más cerradas y plásticas, será necesario hacer - más de una inyección y a más cortos intervalos.

Cuando se comenzó a usar la inyección a presión se pensaba que con una sola - inyección en centro espaciados a 1.5 mts., uno del otro e inyectando hasta - el punto de rechazo era suficiente y se llevaban a cabo de esta manera como - rutina en todos los suelos problema.

Ahora en cambio, es común valerse de múltiples inyecciones, menos espaciadas una de otras y usando una combinación de materiales idóneos para las necesidades específicas de un sitio determinado. La figura 34 muestra diferentes planos de inyección comúnmente usados para arcillas expansivas.

Durante los últimos veinte años la inyección a presión ha crecido y se ha desarrollado, de ser un sistema en desarrollo casi manual, a su estado actual como industria bien establecida y aceptada, con equipo automatizado capaz de inyectar a profundidades de 12 mts., y con multitud de aplicaciones y usos. (figura 35).

A través de los años se han incrementado considerablemente los conocimientos sobre inyección a presión gracias a la constante investigación. Y con el continuado trabajo y con métodos de prueba más confiables se entrevé la promesa de nuevos descubrimientos técnicos. El uso siempre creciente de aditivos de bajo costo como la ceniza seguramente continuará.

Casi sin excepción, el uso de la inyección a presión de lechada de cal dará resultado en considerables ahorros en el costo, asegurando un continuado futuro para esta técnica de estabilización.

- 8.- Blacklock, James R., Wright, Paul J., "Estabilización de Sumideros, - Basamentos de Ferrocarril y Terraplanados de Tierra mediante Inyección a Presión de Lechada de Cal con Ceniza Volátil", Minutos de Conferencia - Tec. de la Ceniza '84, Segunda Conferencia Internacional sobre - Tecnología de la Ceniza y Mercadeo, Londres, Septiembre 1984.
- 9.- Blenden, Robert E. "Estudio sobre los Efectos de Solución Saturada de Lechada de Cal en la Resistencia de una Arcilla de Dakota del Sur", - Tesis de Maestría, Universidad de Arkansas, Instituto de Entrenamiento para Graduados en Tecnología, Litte Rock, Arkansas, 1977.
- 10.- Mesa de Asesores de Investigación de la Construcción, "Estabilización Química de los Suelos", Academia Nacional de Ciencias, Washington D.C. 1969.
- 11.- Chang, David Ta-teh, "Cambio de Propiedades a Corto Plazo de un Suelo Arcilloso Activo, ocasionado por Inyección de Cal y Ceniza Volátil", - Tesis de Maestría, Universidad de Texas en Arlington, Arlington, Tex., 1981.
- 12.- Cothren S.M., "Estabilización de basamento de Carretera mediante Pro - ceso de Inyección de Lechada de Cal", Quinta Conferencia Internacional sobre Suelos Expansivos. Adelaide, Australia del Sur, Mayo, 1984.
- 13.- Eades, J.L., Grim, R.E., "Una Prueba Rápida para determinar los requi - sitos de Cal para Estabilización del Suelo", Archivo de Investigación - de Carreteras No. 139 págs. 61-72, 1966.
- 14.- Eades, J.L., Grim, R.E., "Reacciones de la Cal Hidratada con Minera - les de Arcilla Pura en La Estabilización de los Suelos", Boletín de - la Mesa de Investigación de Carreteras 262, 1960.
- 15.- Eades, J.L., Nichols, F.P., y Grim. R.E. "Formación de Nuevos Minera - les con Estabilización de Cal según pruebas de Experimentos de Campo - en Virginia", Boletín de la Mesa de Investigación de Carreteras, 335,- págs. 31-39, 1962.

- 16.- Farris, J.B. "Experiencias en Proyectos de Estabilización por Cal Inyectada en Basamentos de Caminos", Minutas de la Conferencia de Estabilización de Basamentos Camioneros por Inyección de Cal, Agosto 1975, FRA-OR&D-76-137, Noviembre, 1975.
- 17.- Fohs, D.G., y Kinter, E.B., "Migración de la Cal en Suelo Compactado", Caminos Públicos, 37, No. 1, Junio, 1972.
- 18.- Greeson, William C., "Pruebas de Laboratorio de Suelos Inyectados a Presión con Lechada de Cal", Tesis Magisterial, Universidad de - Arkansas, Fayetteville, Arkansas, 1975.
- 19.- Higgs, C.M., "Inyección de Cal a Alta Presión", Reporte de Investigación No. 17, Reporte Interim No. 2, Proyecto de Investigación - No. 63-75, Departamento de Caminos de Luisiana, Agosto, 1965.
- 20.- Higgins, C.M., "Tratamiento de Cal en Profundidad", Reporte de - Investigación No. 41, Reporte Final, Proyecto de Investigación - - No. 63-75, Departamento de Caminos de Luisiana, Junio 1969.
- 21.- Holtz, W.G., "Cambio de Volumen en Suelos Expansivos y Control por Medio de Tratamiento con Cal", Minutas, Segunda Conferencia Internacional de Investigación e Ingeniería sobre Suelos Expansivos de - Arcilla, Universidad de Texas A&M, College Station, Texas, 1969.
- 22.- Ingles, O.G., & Neil, R. C., "Penetración de la Cal en la Argamasa y Movimientos Asociados de la Humedad en el Suelo", Monografía de - Investigación No. 138, División de Geo-Mecánica Aplicada C.S.I.R.O., Australia, 1970.
- 23.- Ingles, O.G., "Estabilización de Suelos." Los Próximos Cien Años, - Simposio sobre Reforzamiento de Suelos y Técnicas Estabilizadoras, - Sydney, Australia, 1978.

- 24.- Jones, D. Earl, "Suelos Expansivos y Fraccionamientos Habitacionales", Presentado al Taller sobre Arcillas Expansivas y Pizarras en Diseño de Carreteras, Denver, Colorado Diciembre 1972.
- 25.- Joshi, R.C., y White, P.J., "Mejoría In-Situ de Suelos mediante el Proceso de Inyección de Cal y Cal con Ceniza Volátil en Lechada", Simposio sobre Refuerzo de Suelos y Técnicas Estabilizadoras en la Práctica de la Ingeniería, Sydney, Australia, 1978.
- 26.- Lai, T.M., y Mortland, M.M., "Autodifusión de Cationes Intercambiables en la Bentonita", Minutas de la Novena Conferencia Nacional sobre Arcilla y Minerales Arcillosos, Vol. 9, págs., 229-247, 1960.
- 27.- Lawson, Chris H., "Estudio sobre el efecto de una Junta de Cal en Compresión No contenida las características de una Arcilla de Dakota del Sur", Tesis de Maestría de posgrado en Tecnología de la Universidad de Arkansas, Litte Rock, Arkansas, 1977.
- 28.- Lundy, H.L. Jr., y Greenfield, B.J. "Evaluación de Estabilización Profunda In-Situ Mediante Inyección de Lechada de Cal a Ata Presión", Archivo de investigación de Caminos No. 235, Mesa de Investigación de Caminos, 1968.
- 29.- Mckeen, R. Gordon, "Diseño de Pavimentos para Aeropuertos en Suelos Expansivos", Administración Federal de Aviación, Reporte No. FAA - ARD - 83, Enero, 1981.
- 30.- Asociación Nacional de la Cal, "Manual de Estabilización con cal para la Construcción", Boletín No. 326, Arlington, Va., 1982.
- 31.- Petry, Thomas M., y otros, "Cambios a Corto Plazo en Suelos Activos causados por Inyección de Cal y de Ceniza Volátil", Minutas de la Mesa de Investigación para el transporte. Washington, D.C. 1982.

- 32.- Petry, T.M., y Armstrong, J.C., "Relaciones y Variaciones de las propiedades de la Arcilla", Minutas de la cuarta Conferencia Internacional sobre Suelos Expansivos, Volumen 1, Patrocinado por ASCE - Denver, Colorado, Junio, 1980.
- 33.- Progreso Ferroviario, "C&NW Entra en Profundidad con la Cal" Octubre, 1976.
- 34.- Progreso Ferroviario, "La Cal Trabaja para MoPac", Spt. 1978.
- 35.- Progreso Ferroviario, "Arcilla Tipo Yazoo en Basamento Estable", - Abril, 1978.
- 36.- Rieles Ferroviarios y Estructuras, "Estabilización de Basamente mediante Inyección de Lechada de Cal, Junio, 1975.
- 37.- Robnett, Quentin L., "Alteración de Propiedades del Suelo según se efectuaron por varios tratamientos con cal", minutas de la Conferencia sobre Estabilización de Basamentos por inyección de Cal, Agosto-1975, FRA-OR&D-76-137, Noviembre, 1975.
- 38.- Stocker, P.T., "Difusión y Cementación Difusa en Suelos Arcillosos-Estabilizados con Cal, y con Cemento", Reporte Especial No. 8 Mesa Australiana de Investigación Para Caminos, 1972.
- 39.- Tamura, T., y Boegly, W.J., Jr. "Argamasado In Situ de Pilas Atómicas: Un Avalúo, Laboratorio Nacional de Oak Ridge, ORNL/TM-8539 - Mayo, 1983.
- 40.- Townsend, Frank C., y Donaghe, Robert T., "Investigación de Curado-Acelerado de Suelos con Mezclas Agregadas de Tierra con Cal con Ceniza Volátil", Reporte Técnico S-76-9, Laboratorio de Suelos y Pavimentos, Estación de Experimentación de Ingeniería de Vías Acuaticas del Ejército de los E.U.A., Vicksburg, Mississippi, Agosto 1976.

- 41.- Thompson, Marshall R., "Evaluación de Campo del Tratamiento de Inyección a Presión para Reforzar Subsuelos", Minutas de la Conferencia sobre Estabilización de Basamentos de Carreteras por Inyección de cal. Agosto 1975, FRA-OR&D-76-137, Noviembre 1975.
- 42.- Thompson, M.R., y Robnett, Q.L., "Tratamiento por Inyección de cal a Presión de Suelos Expansivos". presentado en la Mesa de la Investigación para la transportación, 54 ava. Junta Anual, Washington - D.C., Enero 1975.
- 43.- Comité de la Mesa de Investigación para el Transporte sobre Estabilización con Cal y con Cal y Ceniza Volátil, "Condiciones Actuales: Estabilización con Cal", Circular No. 180 de la Investigación para el Transporte, Septiembre 1976.
- 44.- Mesa de la Investigación para el Transporte, "Bases y Sub-Bases Estabilizadas con Cal y Ceniza Volátil", NCHRP Síntesis de Práctica de Caminos No. 37, 1976.
- 45.- Vickers, Albert F., "Consideraciones Ambientales", Minutas de Estabilización de Basamentos, Conferencias de Inyección de Cal, Agosto, 1975, FRA-OR&D-76-137, Noviembre, 1975.
- 46.- Corporación Woodbine, "Estabilización de Dique de Cuenca de Ecuilibración", Historia del Caso Particular D76-24, Fort Worth, Texas - Diciembre 1976.
- 47.- Wright, Paul J., "La Inyección de Lechada de Cal controla Arcillas Expansivas", Ingeniería Civil - ASCE, 43, Octubre, 1973.
- 48.- Wright, Paul J., "Equipo de Producción y Técnicas para la Inyección de Cal", Minutas de la Conferencia sobre Estabilización de Basamentos de Carreteras por Inyección de Cal, Agosto 1975, FRA-OR&D 76 - 137, Noviembre 1975.

- 49.- Wright, Paul J., "Usos de la Inyección de la Cal con Ceniza Volátil", presentado en el Quinto Simposio Internacional sobre utilización de la Ceniza, sostenido en Atlanta, Georgia del 25 al 27 de Febrero de 1979.
- 50.- Wright, Paul J., "Estabilización por Inyección de Cal con Ceniza Volátil", presentado en la Conferencia sobre Tecnología y Mercado de la Ceniza sostenida en Londres, Inglaterra, en Octubre 22 al 27 de 1978.
- 51.- Caminos y Calles, "La Inyección Profunda Estabiliza el Emplazamiento de Centro Peatonal", Agosto, 1975.