

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

E. T. S DE INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA Y MORFOLOGÍA DEL TERRENO



**ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS PLÁSTICOS
CON MINERALIZADORES EN AMBIENTES SULFATADOS O
YESÍFEROS.**

PROYECTO FIN DE MÁSTER

WILFREDO ALFONSO VALLE AREAS

Ingeniero Civil

DIRECTOR DE PROYECTO FIN DE MÁSTER:

CLAUDIO OLALLA MARAÑÓN

Dr. Ing. De Caminos, Canales y Puertos

MADRID, SEPTIEMBRE DE 2010

DEDICATORIA

A mi esposa Ana Argentina Espinoza Montenegro, mi amiga y compañera, por ser el soporte de mis principales decisiones y apoyarme en todos mis proyectos.

A mi madre y padre, por el amor y apoyo incondicional que me han brindado, por haber formado de mí, un hombre de bien para la sociedad. A mis hermanos, por estar siempre conmigo.

AGRADECIMIENTOS

Sírvase estas primeras líneas para agradecer muy especialmente a mi tutor Claudio Olalla, por haberme orientado en la selección de mi proyecto fin de máster, y por su valiosa ayuda en el desarrollo del mismo, que como tutor supo indicarme el camino para su buena finalización. También le deseo agradecer por estar siempre disponible, así como proporcionarme sus proyectos de investigación y amplia información bibliográfica que me han servido de base y guía en este proyecto.

Me es muy grato agradecer a todos y cada uno de mis profesores, de la escuela de ingenieros de caminos, canales y puertos, de la universidad politécnica de Madrid, por sus enseñanzas y experiencias transmitidas.

Deseo agradecer a la escuela de ingenieros de caminos, canales y puertos por los medios puestos a disposición del alumno, que sin duda alguna me ahorró muchos inconvenientes.

GLOSARIO.

- California Bearing Ratio. (CBR): Se utiliza para evaluar la capacidad portante de los suelos.
- Floculación: Se da por la sustitución iónica, que se produce al mezclar la cal con el suelo arcilloso, la doble capa difusa disminuye fuertemente su espesor. Ello permite una mayor aproximación de las partículas de la arcilla, facilitando la floculación o aglomeración. Este proceso se ve favorecido por la alta concentración electrolítica que existe y el alto pH producido por la adición de cal.
- Lixiviación: Es un proceso por el cual se extrae uno o varios solutos de un sólido, mediante la utilización de un disolvente líquido. Ambas fases entran en contacto íntimo y el soluto o los solutos pueden difundirse desde el sólido a la fase líquida, lo que produce una separación de los componentes originales del sólido.

Proceso de empobrecimiento que sufre el suelo por efecto de la excesiva infiltración y percolación de las aguas de lluvias, de riego o variaciones constantes de humedad perdiendo con esto parte de sus nutrientes.

- Fibras fibrilada de polipropileno: Las fibras Baxi-Fiber P200 están constituidas por polipropileno virgen fibrilado, puro al 100%, concebidas y fabricadas de acuerdo a las especificaciones de la norma ASTM C-1116 para ser utilizadas como refuerzo en hormigones, morteros y hormigón proyectado. Las fibras Baxi-Fiber P200 también cumplen con el criterio ICBO-ES AC32 que mide el desempeño de las fibras sintéticas en el hormigón.
- ASTM: American society for testing and materials.
- OMC: Optimun moisture content.

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo socio-económico de las grandes ciudades demanda nuevas vías de comunicación terrestre y ampliación de las existentes, que faciliten sus intercambios comerciales, mejoren su competitividad y promuevan el turismo, entre otros. Estas obras de ingeniería civil son promovidas por los gobiernos locales y centrales y, representan grandes movimientos de tierras si el terreno existente no asegura la estabilidad y durabilidad que garantice geotécnicamente el comportamiento de la explanada.

La creciente importancia medioambiental por minimizar la creación de nuevos préstamos y vertederos, es una meta a lograr por la comunidad de expertos geotécnicos. Un volumen importante de materiales clasificados como tolerables, marginales, e inadecuados podrían ser reutilizados con un procedimiento adecuado de estabilización, con su beneficio económico y medioambiental asociado. Un ejemplo, son los suelos arcillosos plásticos ricos en sulfatos. La alta presencia de sulfatos en el suelo, dificulta reutilizarlos en la construcción o ampliación de las vías, por la formación etringita - taumasita y su perjudicada efecto hinchamiento sobre la calzada.

La clasificación del suelo, en los tres grupos mencionados con anterioridad, puede ser debida al contenido de materia orgánica, tamaño máximo, granulometría, límite líquido, índice de plasticidad, asentamientos, hinchamiento libre, y por último y objeto de este estudio, el contenido de sulfatos solubles y yeso en el suelo.

La patología por etringita es estudiada por primera vez, por el profesor de ingeniería civil, Jim Mitchell de la universidad de California, en Berkeley, que describió el grave deterioro que en 1975 se produjo en la calzada de la avenida Stewart, en las Vegas Nevadas. Se produjeron hinchamientos en el pavimento, en bordillos y en cunetas, en algunos puntos el hinchamiento fue del 100%, las zonas más perjudicadas fueron aquellas donde pudo llegar el agua a la sub-base tratada.

Hoy en día, los sistemas de localización de sulfatos solubles en el suelo han mejorado sustancialmente, sin embargo los técnicos no han podido comprobar métodos de estabilización del suelo que aseguren la estabilidad del terreno y, eliminación o reducción a niveles tolerables sus patologías por altos contenido de sulfatos solubles incluido el yeso; mismo motivo, que las normativas más importantes se han visto obligadas a limitar su empleo a contenidos de sulfatos solubles menores del 1%, en lo general.

2. ALCANCE Y OBJETO DEL PROYECTO.

El proyecto busca el máximo aprovechamiento del terreno en presencia de sulfatos solubles y yesos, en la construcción de terraplenes y fondos de desmontes, con métodos de estabilizaciones adecuados.

Se analizarán cuatro métodos experimentales desarrollados por los investigadores de la universidad de Arlington, Texas, estabilización con cenizas volantes bajas en calcio, clase F; estabilización con cemento sulfato resistente, tipo V; estabilización con escorias granuladas de alto horno; estabilización con cal mezclada con fibras fibriladas de polipropileno.

Se analiza además un producto comercial, actualmente no comercializado en España, RBI-81, con características mineralizadoras.

Por último se recopilarán algunas técnicas y recomendaciones que se han desarrollado en España, respecto a la estabilización de suelos ricos en sulfatos.

3. EXPLANACIONES.

3.1. EXCAVACIONES.

Consiste en el conjunto de operaciones para excavar y nivelar las zonas donde ha de asentarse la carretera, incluyendo la plataforma, taludes y cunetas, así como las zonas de préstamos, previstos o autorizados, y el consiguiente transporte de los productos removidos al depósito o lugar de empleo.

3.1.1. Clasificación de las excavaciones.

3.1.1.1. Excavación en rocas.

Comprende todas las masas de roca, depósitos estratificados y aquellos materiales que presenten características de roca masiva o que se encuentren cementados tan sólidamente que hayan de ser excavados utilizando explosivos.

3.1.1.2. Excavación en terreno de tránsito.

Son los materiales formados por rocas descompuestas, tierras muy compactas, y todos aquellos en que no siendo necesario, para su excavación, el empleo de explosivos sea precisa la utilización de escarificadores profundos y pesados.

3.1.1.3. Excavación en tierra.

Son todos los materiales no incluidos en los apartados anteriores.

3.2. RELLENOS.

3.2.1. Clasificación de los materiales.

A como hemos mencionados con anterioridad, este proyecto pretende el máximo empleo del terreno, aun siendo clasificado como tolerable, marginal o inadecuado. Se ve imperiosamente necesario definir la clasificación de los materiales, en base al pliego de prescripciones técnicas para obras de carreteras y puentes.

3.2.1.1. Suelo seleccionado.

Son aquellos que cumplen las siguientes las siguientes condiciones:

- Materia orgánica < 0,2%, según UNE 103204.
- Sales solubles en agua, incluido el yeso, < 0,2%, según NLT 114.
- Tamaño máximo $D_{\text{máx}} \leq 100$ mm

- Cernido por el tamiz 0,40 $\leq 15\%$ o que en caso contrario cumpla todas y cada una de las condiciones siguientes:
 - ✓ Cernido por el tamiz 2 UNE, ($\# 2 < 80\%$).
 - ✓ Cernido por el tamiz 0,40 UNE, ($\# 0,40 < 75\%$).
 - ✓ Cernido por el tamiz 0,080 UNE ($\# 0,080 < 25\%$).
 - ✓ Límite líquido menor de treinta ($LL < 30$), según UNE 103103.
 - ✓ Índice de plasticidad menor de diez ($IP < 10$), según UNE 103103 y UNE 103104.

3.2.1.2. Suelos adecuados.

Se considerarán como tales los que no pudiendo ser clasificados como suelos seleccionados cumplan las condiciones siguientes:

- Materia orgánica $< 1\%$, según UNE 103 204.
- Sales solubles, incluido el yeso, $< 0,2\%$, según NTL 114.
- Tamaño máximo $D_{\text{máx}} \leq 100$ mm
- Cernido por el tamiz 2 UNE, ($\# 2 < 80\%$).
- Cernido por el tamiz 0,080 UNE ($\# 0,080 < 35\%$).
- Límite líquido inferior a cuarenta ($LL < 40$), según UNE 103103.
- Si el límite líquido es superior a treinta ($LL > 30$) el índice de plasticidad será superior a cuatro ($IP > 4$), según UNE 103103 y UNE 103104.

3.2.1.3. Suelos tolerables.

Se considerarán como tales los que no pudiendo ser clasificados como suelos seleccionados ni adecuados, cumplen las condiciones siguientes:

- Materia orgánica $< 2\%$, según UNE 103 204.
- Contenido en yeso $< 5\%$, según NLT 115.
- Otras sales solubles distintas del yeso $< 1\%$, según NLT 114.
- Límite líquido inferior a sesenta y cinco ($LL < 65$), según UNE 103103.

- Si el límite líquido es superior a cuarenta ($LL > 40$) el índice de plasticidad será mayor del setenta y tres por ciento del valor que resulta de restar veinte al límite líquido [$IP > 0,73 (LL - 20)$].
- Asiento en ensayo de colapso inferior al uno por ciento (1%), según NLT 254, para muestra remoldeada según el ensayo próctor normal UNE 103500, y presión de ensayo de dos décimas de megapascal (0,2 MPa).
- Hinchamiento libre según UNE 103601 inferior al tres por ciento (3%), para muestra remoldeada según el ensayo próctor normal UNE 103500.

3.2.1.4. Suelos marginales.

Se considerarán como tales los que no pudiendo ser clasificados como suelos seleccionados, ni adecuados, ni tampoco como suelos tolerables, por el incumplimiento de alguna de las condiciones indicadas para éstos, cumplan las siguientes condiciones:

- Materia orgánica $< 5 \%$, según UNE 103204.
- Hinchamiento libre según UNE 103601 inferior al cinco por ciento (5%), para muestra remoldeada según el ensayo próctor normal UNE 103500.
- Si el límite líquido es superior a noventa ($LL > 90$) el índice de plasticidad será inferior al setenta y tres por ciento del valor que resulta de restar veinte al límite líquido [$IP < 0,73 (LL - 20)$].

3.2.1.5. Suelos inadecuados.

Se considerarán suelos inadecuados:

- Los que no se puedan incluir en las categorías anteriores.
- Las turbas y otros suelos que contengan materiales perecederos u orgánicos tales como tocones, ramas, etc.
- Los que puedan resultar insalubre para las actividades que sobre los mismos se desarrollen.

3.2.1.6. Resumen, clasificación de los materiales, en base al PG-3.

		Seleccionado	Adecuados	Tolerables	Marginales	Inadecuados	Normativa
			Los que no puedan incluirse en suelos seleccionados y cumplan:	Los que no puedan incluirse en suelos seleccionados, adecuados y cumplan:	Los que no puedan incluirse en suelos seleccionados, adecuados, tolerables y cumplan:	Los que no puedan incluirse en suelos seleccionados, adecuados, tolerables, marginales y cumplan:	
1	Materia Orgánica	< 0,2 %	< 1 %	< 2 %	< 5 %	Las turbas y otros suelos que contengan materiales perecederos u orgánicos tales como tocones, ramas etc. los que puedan resultar insalubre para las actividades que sobre los mismos desarrollen.	UNE-103 204
2	Sales solubles en agua, incluido el yeso	< 0,2 %	< 0,2 %				NLT-114
3	Contenido de yesos	-	-	< 5 %			NLT-115
4	Otras sales solubles		-	< 1 %			NLT-114
5	Tamaño máximo	D<= 100 mm	D<= 100 mm				
6	Cernido tamiz # 0,40 UNE	<= 15% ó cumplir todas ellas 7,8,9,10 y 11	-				
7	Cernido tamiz # 2 UNE	< 80%	< 80%				
8	Cernido tamiz # 0,40 UNE	< 75%	-				
9	Cernido tamiz # 0,080 UNE	< 25%	< 35%				
10	Límite líquido	< 30	< 40	< 65			UNE-103103
11	Índice de plasticidad	< 10	-				UNE-103103 UNE-103104
12	Límite líquido - Índice de plasticidad	-	Si LL>30, IP > 4	Si LL>40, IP > 0,73 (LL-20)	Si LL> 90, IP > 0,73 (LL-20)		UNE-103103 UNE-103104
13	Asiento en ensayo de colapso			< 1 %			NLT 254 - P.N. UNE 103500 Pr. ensayo 0,2 Mpa
14	Hinchamiento libre			< 3 %	< 5 %		UNE 103601 próctor normal UNE 103500

Tabla. 1 Fuente: pg-3 y elaboración propia.

3.2.2. Empleo de los materiales en rellenos tipo terraplén.

Teniendo en cuenta las condiciones básicas indicadas, en el pg-3 artículo 330.3 así como las exigidas en las prescripciones particulares de cada proyecto, se podrá utilizar, en las diferentes zonas del relleno tipo terraplén, los suelos indicados en los siguientes apartados.

3.2.2.1. Coronación.

Se utilizara suelos adecuados o seleccionados, con CBR ≥ 5 según UNE 103502. Se podrán utilizar otros materiales en forma natural o previo tratamiento, siempre que cumplan las condiciones de capacidad de soporte exigidas, y previo estudio justificativo aprobado por el director de las obras. No se utilizaran suelos expansivos o colapsables.

Cuando bajo la coronación exista material expansivo o colapsable o con contenido de sulfatos solubles mayor del dos por ciento (2 %), la coronación habrá de evitar la infiltración de agua hacia el resto

3.2.2.2. Cimientos.

Se utilizarán suelos tolerables, adecuados ó seleccionados siempre que las condiciones de drenaje o estanqueidad lo permitan, que las características del terreno de apoyo sean adecuadas para su puesta en obra y siempre que el índice CBR ≥ 3 según UNE 103502.

3.2.2.3. Núcleo.

Se utilizarán suelos tolerables, adecuados ó seleccionados, siempre que su índice CBR ≥ 3 , según UNE 103502. La utilización de suelos marginales o de suelos con índice CBR menor de tres (CBR < 3) puede venir condicionada por problemas de resistencia, deformabilidad y puesta en obra, por lo que su empleo queda desaconsejado y en todo caso habrá de justificarse mediante un estudio especial, aprobado por el director de las obras, conforme a lo indicado en el apartado 330.4.4 del pg-3.

Asimismo la posible utilización de suelos colapsables, expansivos, con yesos, con otras sales solubles, con materia orgánica o de cualquier otro tipo de material marginal (según la clasificación del apartado 330.3.3 del pg-3), se regirá por lo indicado en el apartado 330.4.4 del pg-3.

3.2.2.4. Espaldones.

Se utilizarán materiales que satisfagan las condiciones que defina el proyecto en cuanto a impermeabilidad, resistencia, peso estabilizador y protección frente a la erosión. No se usarán en estas zonas suelos expansivos o colapsables, según lo definido en el apartado 330.4.4 del

pg-3. Cuando en el núcleo exista material expansivo o colapsable o con contenido en sulfatos solubles según UNE 103201 mayor del dos por ciento (2 %), los espaldones evitarán la infiltración de agua hacia el mismo, bien por el propio tipo de material, bien mediante la adopción de medidas complementarias.

3.2.2.5. Resumen, uso de los materiales, en base al PG-3.

	Seleccionado	Adecuados	Tolerables	Marginales	Inadecuados
Coronación	Sí.	Sí.			
	CBR \geq 5 UNE 103502.	CBR \geq 5 UNE 103502.			
	Excepción	Otro material, en forma natural o previo tratamiento siempre que cumplan la capacidad de soporte exigida y previo estudio aprobado por director de las obras.			
	Limitación	Suelos expansivos o colapsables. Art. 330.4.4 pg-3			
	Precaución.	Si bajo la coronación hay material expansivo o colapsables o con contenidos de sulfatos solubles según UNE 103201 \geq 2 %. Evitar infiltración			
Cimiento	Sí.	Sí.	Sí.		
	CBR \geq 3 UNE 103502.	CBR \geq 3 UNE 103502.	CBR \geq 3 UNE 103502.		
Núcleo	Sí.	Sí.	Sí.		
	CBR \geq 3 UNE 103502.	CBR \geq 3 UNE 103502.	CBR \geq 3 UNE 103502.	ó CBR < 3. Desaconsejado.	
	Excepción	Marginales ó CBR < 3. Desaconsejado. Ó estudio justificativo aprobado por director de las obras en base 330.4.4 del pg-3.			
	Precaución.	Colapsables, expansivos, con yesos, con sales solubles, materia orgánica, o cualquier otro material marginal, se registrá 330.4.4 del pg-3			
Espaldones	Materiales que satisfagan las condiciones del proyecto. Impermeabilidad, resistencia, peso estabilizador, protección frente a la erosión.				
	Precaución.	Si en el núcleo hay material expansivo o colapsables o con contenidos de sulfatos solubles según UNE 103201 \geq 2 %. Evitar infiltración			

Tabla. 2 Fuente: pg-3 y elaboración propia.

3.2.3. Precauciones especiales con distintos tipos de suelos.

Los suelos marginales, podrán utilizarse en algunas zonas de la obra siempre que su uso se justifique mediante estudio especial, aprobado por el director de las obras.

Este "Estudio de usos de materiales marginales" deberá contemplar explícitamente y con detalle al menos los siguientes aspectos.

- Determinación y valoración de las propiedades que confieren al suelo su carácter de marginal.
- Influencia de dichas características en los diferentes usos del suelo dentro de la obra.
- Posible influencia en el comportamiento o evolución de otras zonas u elementos de la obra.
- Estudio pormenorizado en donde se indique las características resistentes del material y los asientos totales y diferenciales esperados, así como la evolución futura de estas características.
- Conclusión justificada de los posibles usos del material en estudio.
- Cuidados, disposiciones constructivas y prescripciones técnicas a adoptar para los diferentes usos del suelo dentro de la obra.

A continuación se expresan algunas consideraciones sobre el uso de distintos tipos de suelos.

3.2.3.1. Suelos colapsables.

Son aquellos en los que una muestra remoldeada y compactada con la densidad y humedad remoldeada del ensayo próctor normal según UNE 103500, sufra un asiento superior al uno por ciento (1 %) de la altura inicial de la muestra, cuando se ensaye según NLT 254 y presión de ensayo de dos décimas de megapascal (0,2 MPa).

Los suelos colapsables no se usarán en coronación ni espaldones. Su uso en núcleo y en cimiento estará sujeto a un estudio especial que teniendo en cuenta la funcionalidad del terraplén, el grado de colapsabilidad del suelo, las condiciones climáticas y de niveles freáticos, defina las disposiciones y cuidados a adoptar para su uso. Estos suelos deberán compactarse del lado húmedo, con relación a la humedad óptima del ensayo próctor de referencia.

3.2.3.2. Suelos expansivos.

Se consideran suelos expansivos aquellos en los que en una muestra remoldeada y compactada con la densidad y humedad óptimas del ensayo próctor normal según UNE 103500, supere un hinchamiento libre del tres por ciento (3%), cuando se ensaye según UNE 103601.

Los suelos expansivos así definidos, no se utilizarán en coronación ni en los espaldones ya que en estas zonas se acusan especialmente las variaciones estacionales de humedad. Si resultara inevitable su empleo en el núcleo se realizará un estudio especial, que teniendo en cuenta la funcionalidad del relleno tipo terraplén, las características de permeabilidad de la coronación y espaldones, el hinchamiento libre y las condiciones climáticas, defina las disposiciones y cuidados a adoptar durante la construcción. Sin embargo no podrán usarse en ningún caso aquellos suelos cuyo hinchamiento libre, según UNE 103601 sea superior al cinco por ciento (5%).

Estos suelos deben compactarse ligeramente del lado húmedo, con relación a la humedad óptima del ensayo próctor de referencia.

3.2.3.3. Suelos con yesos.

La utilización, siempre justificada y autorizada por el director de las obras, será en función del contenido de yesos determinado según NLT 115, tal como se indica a continuación:

- Menor del cero con dos por ciento (0,2%): Utilización en cualquier zona del terraplén.
- Entre el cero con dos y el dos por ciento (0,2 y 2%): Utilización en el núcleo del terraplén. No se necesitará tomar ninguna precaución especial en la ejecución de la coronación y los espaldones.
- Entre el dos y el cinco por ciento (2 y 5%): Utilización en el núcleo del terraplén con adopción de cuidados y materiales de características especiales en coronación y en los espaldones, que vendrán explícitamente indicados en el proyecto.
- Entre el cinco y el veinte por ciento (5 y 20%): Utilización limitada al núcleo del terraplén y siempre que se tomen, entre otras, las siguientes medidas para evitar la disolución con posible producción de asientos o pérdida de resistencia:
 - ✓ El núcleo deberá constituir una masa compacta e impermeable.

- ✓ Disponer medidas de drenaje e impermeabilizaciones para impedir el acceso al relleno de las aguas tanto superficiales como profundas.
- Mayor del veinte por ciento (20%): Este tipo de suelos no debe utilizarse en ninguna zona del relleno. Su uso se limitará a aquellos casos en que no existan otros suelos disponibles y siempre que el mismo venga contemplado y convenientemente justificado en el proyecto.

3.2.3.4. Suelos con otras sales solubles.

La utilización de materiales con sales solubles en agua distintas del yeso, según sea su contenido, será la siguiente:

- Menor del cero con dos por ciento (0,2%): Utilización en cualquier zona del terraplén.
- Entre el cero con dos y el uno por ciento (0,2 y 1%): Utilización en el núcleo del terraplén, sin necesidad de tomar precauciones especiales en coronación y espaldones.
- Mayor del uno por ciento (1%): Se requiere un estudio especial, aprobado expresamente por el director de las Obras.

3.2.3.5. Suelos con materia orgánica.

Cuando se sospeche que un suelo pueda contener materia orgánica, ésta se determinará según UNE 103204. Esta norma incluye como materia orgánica todas las sustancias oxidables existentes en la muestra ensayada, por tanto, cuando las sustancias oxidables no orgánicas puedan influir de forma importante sobre los resultados obtenidos, el director de las obras podrá autorizar que el contenido de materia orgánica se obtenga descontando los materiales oxidables no orgánicos, determinados según método explícitamente aprobado por él.

En rellenos tipo terraplén de hasta cinco metros (5 m) de altura, se podrán admitir en el núcleo materiales con hasta un cinco por ciento (5%) de materia orgánica, siempre que las deformaciones previsibles se hayan tenido en cuenta en el proyecto.

Para terraplenes de más de cinco metros (5 m) de altura el uso de suelos con porcentaje de materia orgánica superior al dos por ciento ($MO > 2\%$) habrá de justificarse con un estudio especial, aprobado por el director de las obras.

En coronación el contenido de materia orgánica será inferior al uno por ciento (1%).

3.3. NORMAS Y ENSAYOS DE REFERENCIA

UNE 103101 Análisis granulométrico de suelos por tamizado.

UNE 103103 Determinación del límite líquido de un suelo por el método del aparato de Casagrande.

UNE 103104 Determinación del límite plástico de un suelo.

UNE 103201 Determinación cuantitativa del contenido en sulfatos solubles de un suelo.

UNE 103204 Determinación del contenido de materia orgánica oxidable de un suelo por el método del permanganato potásico.

UNE 103300 Determinación de la humedad de un suelo mediante secado en estufa.

UNE 103302 Determinación de la densidad relativa de las partículas de un suelo.

UNE 103500 Geotecnia. Ensayo de compactación próctor normal.

UNE 103501 Geotecnia. Ensayo de compactación próctor modificado.

UNE 103502 Método de ensayo para determinar en laboratorio el índice CBR. de un suelo.

UNE 103503 Determinación “in situ” de la densidad de un suelo por el método de la arena.

UNE 103601 Ensayo del hinchamiento libre de un suelo en edómetro.

NLT 114 Determinación del contenido de sales solubles de los suelos.

NLT 115 Contenido de yeso en suelos.

NLT 254 Ensayo de colapso en suelos.

NLT 256 Ensayo de huella en terrenos.

NLT 357 Ensayo de carga con placa.

4. ESTABILIZACIÓN DEL SUELO.

La estabilización de un suelo es el proceso mediante el cual, se someten los suelos naturales a cierta manipulación o tratamiento de modo que podamos aprovechar sus mejores cualidades, obteniéndose una capa de asiento del firme estable y durable, capaz de soportar los efectos del tránsito y las condiciones de clima más severas y por ende asegure geotécnicamente el comportamiento de la explanada.

La estabilización del suelo también es la corrección de una deficiencia para darle una mayor resistencia al terreno o bien, disminuir su índice de plasticidad. Las tres formas de lograrlo son: estabilización física, estabilización química y estabilización mecánica.

Para el proceso de estabilización del suelo existente dos opciones de ejecución, mezcla en central o planta móviles y mezcla in situ.

Según el artículo 512 (pg-3), se define un suelo estabilizado “*in situ*” a la mezcla homogénea y uniforme de un suelo con cal o con cemento, y eventualmente agua, en la propia traza de la carretera, la cual convenientemente compactada, tiene por objeto disminuir la susceptibilidad al agua del suelo o aumentar su resistencia, para su uso en la formación de explanadas.



Fig. 1 Estabilización en planta.



Fig. 2 Estabilización in situ, con cemento.

Las propiedades más importantes que se deben mejorar con la estabilización son: (Sherwood, 1992):

- Resistencia. El incremento de resistencia aumenta la estabilidad y la capacidad de carga.
- Estabilidad del volumen. Proporciona el control de los procesos de hinchamiento-colapso causados por los cambios de humedad.
- Durabilidad. Una mayor durabilidad aumenta la resistencia a la erosión, responde de manera más eficaz a los cambios climáticos y al uso del tráfico.
- Permeabilidad. La reducción de la permeabilidad y por lo tanto de la circulación de agua, mejora la estabilidad.

La ejecución de un suelo estabilizado in situ incluye las siguientes operaciones:

- Estudio de la mezcla y obtención de la fórmula de trabajo.
- Preparación de la superficie existente.
- Disgregación del suelo.
- Humectación o desecación del suelo.
- Distribución de la cal o del cemento.
- Ejecución de la mezcla.
- Compactación.
- Terminación de la superficie.

- Curado y protección superficial.

4.1. TIPOS DE ESTABILIZACIÓN.

4.1.1. Estabilización física.

Se utiliza para mejorar el suelo produciendo cambios físicos en el mismo. Hay varios métodos como lo son:

- Mezclas de Suelos: este tipo de estabilización es de amplio uso pero por si sola no logra producir los efectos deseados, necesiándose siempre de por lo menos la compactación como complemento.

Por ejemplo, los suelos de grano grueso como las grava-arenas tienen una alta fricción interna lo que le permiten soportar grandes esfuerzos, pero esta cualidad no hace que sea estable como capa de asiento del firme de una carretera ya que, al no tener cohesión sus partículas se mueven libremente y con el paso de los vehículos se pueden separar e incluso salirse del camino.

Las arcillas, por lo contrario, tienen una gran cohesión y muy poca fricción lo que provoca que pierdan estabilidad cuando hay mucha humedad. La mezcla adecuada de estos dos tipos de suelo puede dar como resultado un material estable en el que se puede aprovechar la gran fricción interna de uno y la cohesión del otro para que las partículas se mantengan unidas.

- Geotextiles
- Vibroflotación (Mecánica de Suelos)
- Consolidación Previa

4.1.2. Estabilización química.

Se refiere principalmente a la utilización de ciertas sustancias químicas patentizadas y cuyo uso involucra la sustitución de iones metálicos y cambios en la constitución de los suelos involucrados en el proceso.

Dentro de este grupo de estabilización, las sustancias químicas más comunes son: cal y cemento.

Cal: disminuye la plasticidad de los suelos arcillosos y es muy económica.

Cemento portland: aumenta la resistencia de los suelos y se usa principalmente para arenas o gravas finas.

Otros productos también utilizados son:

Productos Asfálticos: es una emulsión muy usada para material triturado sin cohesión.

Cloruro de sodio: impermeabilizan y disminuyen los polvos en el suelo, principalmente para arcillas y limos.

Cloruro de calcio: impermeabilizan y disminuyen los polvos en el suelo, principalmente para arcillas y limos.

Escorias de fundición: se utiliza comúnmente en carpetas asfálticas para darle mayor resistencia, impermeabilizarla y prolongar su vida útil.

Polímeros: este se utiliza comúnmente en carpetas asfálticas para darle mayor resistencia, impermeabilizarla y prolongar su vida útil.

Caucho de Neumáticos: este se utiliza comúnmente en carpetas asfálticas para darle mayor resistencia, impermeabilizarla y prolongar su vida útil.

4.1.3. Estabilización mecánica.

Es aquella con la que se logra mejorar considerablemente un suelo sin que se produzcan reacciones químicas de importancia.

Compactación: esta mejora generalmente se hace en la sub-base, base y en las carpetas asfálticas.

5. EL ATAQUE POR LOS SULFATOS A LAS ESTABILIZACIONES CON CAL.

Debido a los graves daños que la presencia de sulfatos puede provocar en las obras de estabilización, en especial las de cal, se ha considerado de especial interés este tema.

5.1. LA SERIE ETRINGITA - TAUMASITA.

Los denominados minerales del grupo de la etringita-taumasita son sulfatos de calcio hidratados con una estructura perteneciente al sistema trigonal. Tienen la siguiente fórmula estructural genérica:



Donde X puede ser: Al, Cr, Fe, Mn, Si.

Se localizan en zonas de alteración hidrotermal, o zonas de metamorfismo térmico de baja temperatura. Suelen aparecer asociados a minerales como las zeolitas, la calcita, el yeso y la pilipsita (Hurlbut and Baum, 1960; Kollmann y Strubel, 1981).

La etringita y la taumasita son los responsables de la expansividad y en otros son, aparentemente, el motivo de un aumento de la resistencia. Este comportamiento tan distinto depende del tamaño y de la morfología de los cristales, aspecto que, a su vez, es función de la estructura cristalina del mineral (Mehta, 1983).

Los minerales de la solución sólida que forman la etringita y la taumasita, incluyendo otras posibles composiciones intermedias de la serie, poseen un gran potencial de expansión volumétrica, en algunos casos de más del 250%. Durante la formación de la etringita se pueden desarrollar, a su vez, altas presiones de hinchamiento, de aproximadamente 241 MPa, provocando grandes incrementos de volumen, con los efectos nocivos que ello conlleva (Little, 1995).

5.1.1. La etringita

Puede aparecer en la naturaleza como precipitado a partir de soluciones hidrotermales. En tales casos, da lugar a cristales con forma de prisma hexagonal con puntas piramidales hexagonales



Fig. 3 Monocristal de etringita Fuente: Santiago Buey, C. Estudio a escala microscópica de los fenómenos de interacción suelo-cal, 2000.

Los prismas hexagonales, generalmente, son muy alargados; pueden tener diferentes formas: aguja, listón o varilla. Estos cristales fibrosos suelen estar agrupados formando agregados radiales, tal como se puede apreciar en las figuras.

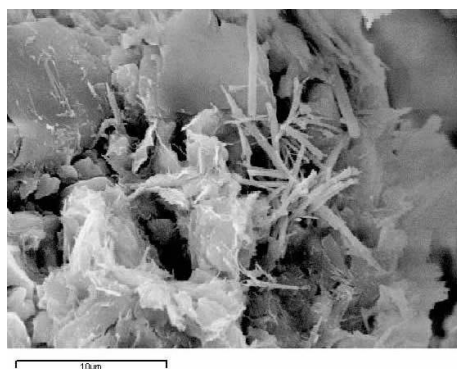


Fig. 4 Núcleos de formación de etringita en el sistema suelo-cal (fotografía de microscopía electrónica de barrido). Fuente: Santiago Buey, C. Estudio a escala microscópica de los fenómenos de interacción suelo-cal, 2000.

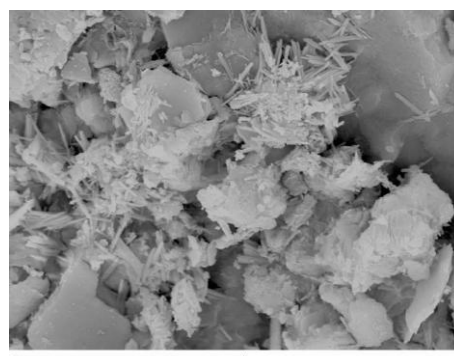


Fig. 5 Núcleos de formación de etringita en el sistema suelo-cal (fotografía de microscopía electrónica de barrido). Fuente: Santiago Buey, C. Estudio a escala microscópica de los fenómenos de interacción suelo-cal, 2000.

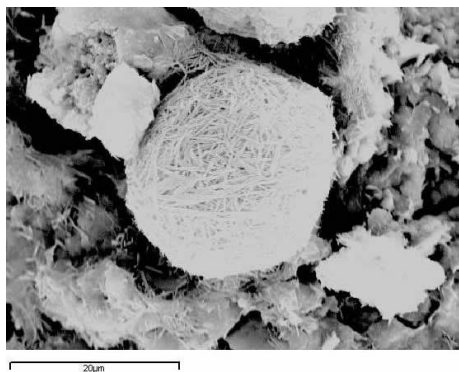


Fig. 6 Cristales en forma de “nido” (fotografía de microscopía electrónica de barrido). Fuente: Santiago Buey, C. Estudio a escala microscópica de los fenómenos de interacción suelo-cal, 2000.

5.1.2. La taumasita.

Es isoestructural a la etringita, es decir de igual forma que la etringita; cuatro de cada cinco átomos que definen la estructura de este mineral forman parte de una molécula de agua o de un grupo hidroxilo (OH). Por ello su peso específico es también relativamente bajo (1.9) aunque más alto que en el caso de la etringita.

La forma del cristal y morfología de la taumasita es muy similar a la de la etringita. Los cristales de taumasita suelen presentar morfologías prismáticas-aciculares o formas masivas



Fig. 7 Monocristal de taumasita. Fuente: Santiago Buey, C. Estudio a escala microscópica de los fenómenos de interacción suelo-cal, 2000.

5.2. FACTORES QUE CONDICIONAN EL HINCHAMIENTO DEBIDO A LOS SULFATOS SOLUBLES.

Los factores más importantes que determinan la formación de la etringita-taumasita y en consecuencia el hinchamiento potencial en los suelos estabilizados con cal, son el contenido y tipo de arcilla, el área superficial, la cantidad de alúmina presente, el tipo y porcentaje de cal, la cantidad y clase de sulfatos solubles, el tamaño y morfología de los cristales de sulfatos solubles y la presencia de agua.

Según los resultados experimentales obtenidos en distintas investigaciones, la etringita se forma cuando los sulfatos y la alúmina están presentes en un suelo tratado con cal, y su creación no depende de la forma en la que los sulfatos aparecen.

Los principales factores que influyen en la formación de la serie etringita-taumasita se describen a continuación.

5.2.1. Presencia de arcillas

Ciertas experiencias demuestran que se necesita un mínimo de un 10% de partículas arcillosas (tamaños inferiores a $5\ \mu$) para que se pueda desarrollar el hinchamiento.

5.2.2. Presencia de minerales arcillosos ricos en alúmina.

Conceptualmente, los minerales de la arcilla ricos en alúmina tales como la caolinita, son potencialmente más susceptibles al ataque de los sulfatos que minerales como la montmorillonita con un menor contenido en alúmina.

5.2.3. Presencia de sulfatos.

Como ya se ha comentado anteriormente, si un suelo arcilloso presenta sulfatos en su composición la disolución de éstos liberará el SO_3 suficiente para reaccionar con la alúmina y la sílice (de los cementos carbonáticos) y formar sulfatos de calcio hidratados (minerales del grupo de la etringita y la taumasita).

5.2.4. Presencia de agua.

Tanto la etringita como la taumasita son minerales hidratados. Sin la presencia de agua, no pueden cristalizarse ni expandirse. La magnitud del hinchamiento producido es proporcional al agua accesible.

La experiencia obtenida del fracaso de la Avenida Stewart, muestra que es necesario el acceso de sulfatos, a través de la percolación del agua, para que se produzca el hinchamiento (Hunter, 1988).

5.2.5. Tamaño y morfología de los cristales de sulfatos solubles.

Cuanto menor es el tamaño de los cristales y mayor es la superficie específica, mayor será el hinchamiento producido.

5.2.6. Presencia de cementos carbonáticos.

Frecuentemente la etringita nuclea y crece en zonas de cementos carbonáticos. Esto significa que en presencia de sulfatos y cementos carbonáticos (silicatos y aluminatos de calcio hidratados) la etringita se puede desarrollar aprovechando la composición química de estas fases ricas en silicio, aluminio y calcio.

5.2.7. pH del suelo.

El incremento del pH, consecuencia de la adición de cal, favorece la disolución de la arcilla. En este proceso se libera sílice y alúmina que al reaccionar con el azufre de los sulfatos, forman los cristales de etringita.

5.2.8. Tiempo de curado.

Es necesario tomar las precauciones oportunas, extremando y cuidando las condiciones de curado, ya que de esta manera se minimiza la creación de los minerales expansivos. Se recomienda un periodo de curado de al menos 28 días con anterioridad a que el material se haya saturado de agua, con el fin de que cualquier reacción potencialmente dañina que se vaya a desarrollar, quede limitada por la propia calidad del producto estabilizado (Wild et al. 1999).

5.2.9. Densidad seca.

A menor densidad mayores posibilidades de que la etringita se desarrolle.

5.2.10. Temperatura de humectación y humedad relativa.

El desarrollo del hinchamiento es función también de las condiciones de temperatura y humedad relativa mantenidas durante la humectación. Los ciclos de humectación (humedad-secado) conducen a un incremento de la masa de la etringita, que es atribuida a la adsorción del agua.

5.2.11. Resistencia.

De la misma manera, cuanto mayor es la resistencia de suelo-cal menores son las posibilidades de que se desarrolle el proceso. La propia “tenacidad” (resistencia a la tracción) de la mezcla, contribuye a disminuir la expansividad del producto. La magnitud de la presión de hinchamiento, que es proporcional al alcance de la formación de la etringita, tiene que ser más grande que la debido al confinamiento o la componente cohesiva de la resistencia, para que el hinchamiento pueda ocurrir (Dermatas, 1995).

5.3. MECANISMOS DE HINCHAMIENTO.

Se considera que hay dos mecanismos diferentes que son responsables del hinchamiento de gran alcance. Estos son: (1) el crecimiento del cristal y (2) la hidratación, que significa que las moléculas de agua adicionales son adsorbidas por la estructura del cristal (Dermatas, 1995).

5.4. DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO EN SULFATOS.

La determinación cuantitativa precisa de la presencia de sulfatos solubles no está garantizada. No existe una normativa homogénea entre España (Europa) y los Estados Unidos de América. Esta es una realidad conocida y así lo han puesto de manifiesto algunos autores (Petry, 1994). En el Estado de Texas se utilizan las normas TEX-619 y TEX 620J, ambas de gran importancia práctica por ser, las universidades de ese estado, grandes centros de investigación en este campo del conocimiento.

En España, se utiliza la NLT-120/99, que a los efectos prácticos es idéntica a la norma UNE 103201 (1996). El laboratorio de geotecnia (CEDEX) ha realizado un estudio, sobre la validez de la norma UNE; las normas de TEXAS (EE.UU.); y su contraste con el procedimiento más riguroso y fiable posible: la cromatografía iónica, (Hervás y Rodríguez, 2002).

Para muestras con valores por encima del 5% de sulfatos es preferible utilizar la norma UNE. La normativa de Texas no es válida para porcentajes importantes de sulfatos solubles; por ejemplo por encima del 2-3 %. Esto es debido a que la cantidad de disolvente que se utiliza en la norma TEXAS es escasa, mientras que la cantidad que se utiliza en la Norma UNE es suficiente.

Sin embargo, para muestras con menor contenido en sulfatos, (inferior al 5% y en particular inferior al 1%), es preferible utilizar la norma empleada en EE.UU. dado que se ajusta más al valor real deducible del cromatógrafo iónico. A su vez, la normativa americana utiliza mayor cantidad de muestra por lo que su representatividad puede ser aún mayor: la norma TEXAS, una vez tamizada la muestra, utiliza 30 gr. de ésta, mientras que la norma UNE tan sólo 10 gr.

5.5. POSIBILIDADES DE ACTUACIÓN FRENTE AL FENÓMENO.

Algunos de esos intentos han sido eficaces. Otros, aun siendo efectivos, son económicamente inviables (Fernández, 2003).

5.5.1. Formación de minerales nocivos antes del proceso de compactación.

Si se forman durante el periodo de mezclado, antes de la colocación y compactación definitiva, no es de esperar que se produzcan daños posteriormente. Afortunadamente, los minerales expansivos se crean relativamente deprisa, tan pronto como los sulfatos se disuelven, el aluminio es liberado de la arcilla y está disponible la suficiente cantidad de agua para su formación.

El tiempo entre la aplicación del estabilizador y la compactación del suelo no debe ser menor a 24 horas ni mayor de 7 días. Además, se le debe suministrar una cantidad de agua que esté por encima del porcentaje óptimo necesario.

5.5.2. Doble aplicación de cal.

La cal se mezcla con la arcilla en una primera fase, posteriormente se almacena y se mantiene húmeda durante aproximadamente un mes, para permitir la formación de la etringita y para que se agoten la alúmina y los sulfatos disponibles. Una segunda aplicación de cal consigue la estabilización real, definitiva, para que la mezcla arcilla-cal sea colocada, compactada y curada. Es el procedimiento llevado a cabo en las obras de infraestructura del Aeropuerto de Denver (Colorado), para la ejecución de las capas de firme.

5.5.3. Cantidad y tipo de cal utilizada.

Se deben mantener los niveles de adición de cal lo más bajos posibles. A su vez es más recomendable usar la lechada de cal. Durante el periodo de mezclado e inicio del curado se debe mantener el suelo a una humedad por encima de la óptima, para disolver los sulfatos solubles disponibles.

5.5.4. Incorporación de procedimientos constructivos especiales.

La incorporación de procedimientos constructivos especiales pueden, bajo ciertas circunstancias, mitigar o prevenir las reacciones dañinas del hinchamiento inducido por los sulfatos. Deben estar basados en:

- Conseguir una buena compactación del terreno tratado, reduciendo así la permeabilidad y aumentando la resistencia de la mezcla.
- Diseño del pavimento de forma que proporcione el drenaje adecuado, e impide la posibilidad de que se desencadene el proceso.

5.5.5. Adición de cenizas volantes bajas en calcio.

Adición de cenizas volantes bajas en calcio como agente complementario estabilizador. Para suelos que posean una alta concentración de sulfatos, las cenizas volantes bajas en calcio reducen considerablemente la expansión. Se sugiere, por tanto, utilizar las cenizas volantes bajas en calcio con suelos que tienen una alta concentración de sulfatos, mientras que para aquellos suelos con una pequeña cantidad se podría usar la cal hidratada (HBR, 1994, 1995 y 2000).

5.5.6. Adición de hidróxido de bario, o de sales de litio.

La adición de hidróxido de bario, o de sales de litio, como tratamiento previo para conseguir una mayor resistencia de la mezcla.

5.6. RESUMEN DE LOS ESTUDIOS SOBRE EL ATAQUE DE LOS SULFATOS.

Existen múltiples limitaciones respecto a la presencia máxima tolerable de sulfatos solubles (Fernández, 2003). Si bien la terminología utilizada no siempre es coherente entre los distintos trabajos, una síntesis de los mismos es:

- Hunter (1988) identifica riesgos moderados o severos, con porcentajes del 1% al 2%.
- Perrin (1992) detectó riesgos severos con 0,2 - 0,9%; en otros casos con 1,4 - 2,5%.
- Mitchell y Dermatas (1992); identifican etringita con presencia del 0,3%.
- Sherwood (1992) demostró que hay pérdida de resistencia con tan solo un 0,25%.
- McCallister y Tidwell (1997) propusieron los siguientes límites; con 0,01-0,5% el riesgo es de bajo a moderado; con 0,5-1,20% el riesgo es de moderado a serio; y con más de un 1,20% el riesgo es muy serio.
- El Manual Francés de uso de cal, (LCPC, 2000), no recomienda estabilizar con cal si la presencia de sulfatos es superior al 1%.
- La Asociación de Fabricantes de Cal de los Estados Unidos (N.L.A. 2000) identifica:
 - ✓ Por debajo del 0,3% en peso de suelo, es difícil que se produzcan daños.

- ✓ Moderadamente arriesgado; 0,3% y 0,5%.
- ✓ De moderado a alto riesgo; entre 0,5% y 0,8%.
- ✓ Entre el 0,8% y el 1%, el riesgo es alto.
- ✓ Con más de un 1%, el riesgo de que se produzcan daños es muy alto.

6. EVALUACIONES EXPERIMENTALES DE ESTABILIZACIÓN DE SUELOS EXPANSIVOS RICOS EN SULFATOS.

Esta evaluación experimental, es desarrollada por los investigadores de la universidad de Arlington, en Texas. El interés de su investigación nace por el suelo del sur y oeste de Estados Unidos que presentan alta plasticidad, baja resistencia y alto grado de hinchamiento y contracción. Adicionalmente estos suelos contienen cantidades significativas de sulfatos, lo que implica sean susceptibles al ataque por sulfatos, cuando son tratados con estabilizadores a base de calcio. Esta mala calidad del terreno resultan a menudo en grietas de hinchamiento-contracción; problemas de levantamientos, dejando puntos bajos donde se acumula el agua, (charcos) que degrada la integridad del pavimento.

Hasta la fecha son muchos los intentos de estabilizar los suelos blandos, expansivos y ricos en sulfatos, pero a menudo considerados inadecuados por su incapacidad para proporcionar soluciones durables y rentables.

Los estabilizadores químicos, generalmente reaccionan con los minerales del terreno, para formar varios compuestos químicos que mejoran las propiedades del suelo. Cemento y cal son los productos químicos más utilizados para mejorar la resistencia y plasticidad. Sin embargo estos métodos tienen algunas limitaciones, por ejemplo, la estabilización con cemento es susceptible a las grietas por altas temperaturas y la estabilización con cal proporciona incrementos de resistencia moderados. Adicionalmente ambos métodos son susceptible a la lixiviación por cambios constantes en la humedad lo que limita la vida útil del estabilizado.

Otro problema de especial atención en la estabilización con cal o cemento en suelos ricos en sulfatos, es la generación etringita provocando levantamientos y ondulaciones en la superficie (Mitchell, 1986). El componente, calcio de estos estabilizadores reacciona con la alúmina libre de la arcilla y sulfatos del terreno, formando un mineral cristalino, etringita. La etringita puede expandir considerablemente cuando está sujeta a hidratación. Tal expansión puede inducir levantamiento de la bases de asientos del pavimento; se hay llegado a registrar hasta 45 cm, dañando el pavimento estructural (Mitchell, 1992, Hunter 1988). Por lo tanto los estabilizadores a base de calcio no son adecuados para suelos con sulfatos.

Los suelos localizados en el norte Texas, Estados Unidos, tienen una alta cantidad de yesos, adicionalmente son blandos y de comportamiento expansivo, sufriendo levantamientos, motivados en parte por la estabilización a base de cal o cemento (Puppala, 2001; Kota 1996). Es

por lo tanto necesario acceder a nuevos métodos o modificación de los actuales para resolver el problema de los sulfatos. El proyecto de investigación por la universidad de Arlington, Texas, evaluó cuatro nuevos procedimientos experimentales de estabilización de suelos ricos en sulfatos.

- Estabilización con cenizas volantes bajas en calcio. (clase F)
- Estabilización con cementos sulfato resistente. (tipo V)
- Estabilización con escorias de alto horno. (GGBFS)
- Estabilización con cal mezclada con fibras fibriladas de polipropileno.

Los métodos seleccionados tienen poca cantidad de calcio, eliminando o reduciendo la formación de etringita, que disminuyen a su vez la patología asociada. Sin embargo la información acerca la efectividad de estos estabilizadores es limitada. Las conclusiones de estos estudios deben verificarse en suelos naturales en presencia de sulfatos, y en condiciones in situ.

6.1. EXPLICACIÓN DEL PROGRAMA EXPERIMENTAL DE LA UNIVERSIDAD DE ARLINGTON TEXAS.

El programa experimental consistió en ensayar cuatro tipos de suelos representativos de Arlington, Texas. Walnut Creek, (Arroyo nuez); Quail Creek, (Arroyo codorniz); South Cooper Estate East (Tonelero sur, al este del estado); y South Cooper Estate west (Tonelero sur, al oeste del estado), todos ellos poseen una alto índice de plasticidad, poca resistencia y, alta cantidad de sulfatos. Los ensayos determinaron cantidad de sulfatos solubles superiores a 4000 ppm para las cuatro muestras.

Tabla 3. Características de las cuatro muestras de suelos.

	Walnut creek <i>Arroyo de la Nuez</i>	Quail creek <i>Arroyo de Codorniz</i>	South cooper estate east <i>Tonelero Sureste</i>	South cooper estate west <i>Tonelero suroeste.</i>
% Pasa # 200	90,00	93,00	89,00	91,00
Gravedad específica	2,87	2,80	2,76	2,85
Límite líquido	69,40	69,00	70,60	73,96
Índice de plasticidad	42,70	41,10	42,20	45,04
Contenido de humedad	6,00	5,70	7,20	6,60
pH	7,96	8,20	8,13	8,08
Contenido de sulfato soluble: ppm	32.122,00	5.688,00	4.737,00	33.048,00

Clasificación AASHTO	A-7-6	A-7-6	A-7-6	A-7-6
Clasificación USCS	CH	CH	CH	CH

Cada una de las muestras fue tratada con los cuatros métodos propuestos y dos dosificación diferentes, con un periodo de curado, de tres, siete, y catorce días. Las dosificaciones respecto al peso seco del suelo son:

- Estabilización con cenizas volantes bajas en calcio. (clase F) al 5 % y 10 %.
- Estabilización con cementos sulfato resistente. (tipo V) al 10 % y 20%.
- Estabilización con escorias de alto horno. (GGBFS) al 10 % y 20 %.
- Estabilización con cal mezclada con fibras fibriladas de polipropileno. 8 % de cal + 0,15 % fibras y 8 % de cal + 0,30 % fibras.

Previo al tratamiento se hicieron ensayos de control, es decir la muestra de suelo sin tratar, homogenizando también sus días de curado. Para el fácil manejo de las combinaciones muestra de suelo-tratamiento-días de curado-dosificación se dispuso una nomenclatura de cuatro partes. La primera indica la muestra de suelo utilizada, la segunda el tipo de tratamiento, la tercera los días de curado y por último la dosificación variable del método.

Tabla 4. Nomenclatura empleada.

W	Walnut creek soil <i>Arroyo de la Nuez</i>
Q	Quail creek soil <i>Arroyo de Codorniz</i>
SE	South cooper estate east soil <i>Tonelero sureste</i>
SW	South cooper estate west soil <i>Tonelero suroeste</i>
F	Class F fly ash <i>Ceniza volante. Clase F</i>
C	Sulphate resistant cement type V <i>Cemento sulfato resistente tipo V</i>
G	Ground granulated blast furnance slag <i>Escoria de alto horno</i>
LF	Lime mixed with fibres <i>Cal mezclado con fibras</i>

6.2. ENSAYOS REALIZADOS.

Los ensayos de laboratorios medirán los cambios físicos, químicos y las variaciones de las propiedades mecánicas del suelo, debido al método de estabilización química seleccionado. Los ensayos físicos como los límites de Atterberg, y ensayos de compactación próctor, miden el índice de plasticidad y las características de comprensibilidad del terreno.

Los resultados de la tabla 5 y 6 nos indican que la estabilización con cal incrementa el contenido de humedad óptima del suelo, mientras que los otros tres métodos, la disminuyen o la mantienen igual. Respecto a la estabilización con cenizas volantes se aprecia que adicional de disminuir el contenido de humedad óptima del terreno, esta disminución es mayor, con la dosificación más alta, todo lo contrario con las escorias granuladas de alto horno, donde la disminución mayor se da con la dosificación más baja. La estabilización con cemento sulfato resistente tipo V, en líneas generales disminuye el contenido de humedad óptima del terreno, sin embargo su comportamiento no es uniforme, es decir la variación en las muestras de Walnut creek y Quai creek, disminuye más el contenido de humedad con la dosificación más baja, y para las otras dos muestras, disminuye más con la dosificación más alta.

Las muestras de suelo fueron preparadas con el contenido de humedad óptima y para peso seco, usando la compactación por impacto, posteriormente son curadas en un cuarto especial que mantiene la humedad al 100%. Los ensayos realizados son: unconfined compressive strength (UCS) según los dispuesto en ASTM D-2166 o ensayo de compresión no confinada de suelos cohesivos y ensayos relacionados a la medición de cambio de volumen, basado en ASTM D-4546.

Tabla 5. Contenido de humedad óptima y peso unitario seco.

	Dry unit weight KN/m ³ <i>Peso seco KN/m³</i>	Moisture content. % <i>Contenido de humedad.</i> %
W	15,0	25,3
Q	14,4	27,0
SE	14,8	27,5
SW	15,5	25,0
W-F-10%	14,7	24,7
W-F-20%	14,5	23,0
Q-F-10%	14,7	28,0
Q-F-20%	14,4	25,6
SE-F-10%	14,5	24,5
SE-F-20%	14,7	23,0
SW-F-10%	15,5	22,3
SW-F-20%	14,8	22,7
W-C-5%	14,6	20,5
W-C-10%	15,2	23,0
Q-C-5%	14,4	22,5
Q-C-10%	14,4	26,4
SE-C-5%	14,8	25,4
SE-C-10%	15	23,0
SW-C-5%	14,3	25,5
SW-C-10%	14,4	23,0
W-G-10%	14,9	22,0
W-G-20%	15,6	22,5
Q-G-10%	14,6	23,2
Q-G-20%	14,9	23,5
SE-G-10%	15,3	20,8
SE-G-20%	15,3	23,5
SW-G-10%	16,8	18,6
SW-G-20%	16,2	19,8
W-LF-8%	13,9	29,0
Q-LF-8%	13,4	29,0
SE-LF-8%	13,6	28,0
SW-LF-8%	14,7	27,5

Tabla 6. Contenido de humedad óptima y peso unitario seco.

	Control	W-F-10%	W-F-20%	W-C-5%	W-C-10%	W-G-10%	W-G-20%	W-LF-8%
W	25,3	24,7	23	20,5	23	22	22,5	29
	15	14,7	14,5	14,6	15,2	14,9	15,6	13,9

	Control	Q-F-10%	Q-F-20%	Q-C-5%	Q-C-10%	Q-G-10%	Q-G-20%	Q-LF-8%
Q	27	28	25,6	22,5	26,4	23,2	23,5	29
	14,4	14,7	14,4	14,4	14,4	14,6	14,9	13,4

	Control	SE-F-10%	SE-F-20%	SE-C-5%	SE-C-10%	SE-G-10%	SE-G-20%	SE-LF-8%
SE	27,5	24,5	23	25,4	23	20,8	23,5	28
	14,8	14,5	14,7	14,8	15	15,3	15,3	13,6

	Control	SW-F-10%	SW-F-20%	SW-C-5%	SW-C-10%	SW-G-10%	SW-G-20%	SW-LF-8%
SW	25	22,3	22,7	25,5	23	18,6	19,8	27,5
	15,5	15,5	14,8	14,3	14,4	16,8	16,2	14,7

6.3. ESTABILIZACIÓN CON CENIZAS VOLANTES BAJAS EN CALCIO. (CLASE F)

La estabilización con cenizas volantes mejora el terreno debido a dos reacciones, una corta y otra larga. (Usmen and Bowders, 1990; Nicholson and Kashyap, 1993). La reacción corta causa la floculación y aglomeración de las partículas de las arcillas debidas al intercambio de iones con las partículas de la superficie del suelo, mejorando la reducción inmediata del hinchamiento, contracción y plasticidad. (Nicholson and Kashyap, 1993). Las reacciones químicas relacionadas con la resistencia generalmente ocurren en un periodo de tiempo (termino largo de la reacción) y depende del índice de averías químicas y reacciones de hidratación de los silicatos y aluminatos.

Usualmente dos tipos de cenizas volantes son utilizadas en la estabilización del terreno. (clase c y clase f) La clase C es más utilizada por que tiene más material cementicio respecto la clase F. La investigación realizada en Arlington, Texas utiliza la clase F, ya que al tener menos porcentaje de calcio libre generará probablemente menos etringita.

6.3.1. Material.



Fig. 8 Cenizas volantes. Clase F

6.3.2. Ensayos de laboratorios ejecutados en la muestra.

- Límites de Atterberg. Índice de plasticidad.
- Unconfined compressive strength. Ensayo de compresión no confinada de suelos cohesivos. (ASTM D-2166)
- Free swell strain. %. Hinchamiento libre vertical. (ASTM D-4546)
- Linear shrinkage strain. % Fuerza retracción lineal. (Tex-107-E)

6.3.3. Resultados.

Revisar apéndices 6.7

Revisar apéndices 6.8

Revisar apéndices 6.9

Revisar apéndices 6.10

6.3.4. Análisis de resultados.

Se puede observar, que el índice de plasticidad disminuye a medida que se aumenta la dosificación y periodo de curado, esta tendencia se mantuvo en las cuatro muestras ensayadas con cenizas volantes, clase F. La disminución del índice de plasticidad se debe a un intercambio de cationes, que disminuye el espesor de la doble capa de agua y, a un incremento de la atracción de las partículas de arcilla. Otra observación de los índices de plasticidad, es que los resultados obtenidos con una dosificación del 10% son muy próximos a los resultados con dosificación del 20%, es decir el tratamiento exhibe una mayor efectividad, con la dosificación más baja.

Analizando los ensayos unconfined compressive strength o ensayo de compresión no confinada de suelos cohesivos, se observa nuevamente que las cuatro muestras ensayadas incrementan su resistencia, en algunos casos aumenta un 58 % y en otros más del 100 %. Nuevamente los resultados obtenidos son muy similares en las dos dosificaciones. El aumento de resistencia está relacionado a la floculación y aglomeración de las partículas del suelo, y las reacciones puzolánicas entre los minerales del terreno y el estabilizador. Los valores más altos en el ensayo de compresión no confinada de suelos cohesivos se obtienen con la mayor dosificación, 20 %, y el mayor periodo de curado. Se puede concluir también que con mayores periodos de curado los hinchamientos y contracción horizontal del terreno disminuyen, sin embargo siguen estando en valores muy elevados de deformación tanto vertical como lineal.

6.4. ESTABILIZACIÓN CON CEMENTO SULFATO RESISTENTE. TIPO V.

La estabilización con cemento consiste en mezclar y tratar el suelo con una cantidad específica de cemento portland ordinario y agua. La mezcla es compactada con la humedad deseada, en condiciones de peso seco y finalmente curada. La estabilización con cemento reduce inmediatamente la plasticidad, que es causada por los iones de calcio sueltos durante las

reacciones iniciales de la hidratación. El mecanismo puede ser un intercambio de cationes en la reacción, o un apiñamiento de cationes adicionales en las partículas de la arcilla o ambos. Ambas reacciones cambia la carga eléctrica alrededor de las partículas de arcilla, y como resultado las partículas de arcilla son atraídas eléctricamente unas a otras, originado la floculación y aglomeración.

Las reacciones de aglomeración en los suelos tratados tienen lugar rápidamente y son causadas por la adición de pequeñas cantidades de cemento. Ambas, tanto la floculación como la aglomeración disminuyen la plasticidad del terreno. Las reacciones de hidratación del cemento portland son reacciones puzolánicas complejas que producen diferentes compuestos y geles, que incrementa la resistencia del suelo. (Nelson and Miller, 1992). También la estabilización con cemento disminuye el cambio de volumen, esto es atribuido a mecanismos similares a aquellos que reducen la plasticidad.

El tratamiento con cemento tiene algunas limitaciones, lixiviación, fallas frágiles o quebradizas, y grietas por bajas temperatura (contracción). El uso de este estabilizador puede provocar un ambiente de suelo corrosivo. En suelos con sulfatos la eficiencia del estabilizado está vinculada por la presencia de sulfatos en el suelo. En proyecto de investigación de la universidad de Arlington, Texas selecciona el cemento sulfato resistente (tipo V), que puede dar resultados similares a los cementos ordinarios, adicionalmente al ser sulfato resistente se espera no genere etringita, por lo tanto tampoco su patología asociada, pero esto debe ser corroborado.

6.4.1. Material.

Cemento tipo V. Resistente a la acción de los sulfatos. Para uso general y además en construcciones donde existe un alto ataque de sulfatos.

6.4.2. Ensayos de laboratorios ejecutados en la muestra.

- Límites de Atterberg. Índice de plasticidad.
- Unconfined compressive strength. Ensayo de compresión no confinada de suelos cohesivos. (ASTM D-2166)
- Free swell strain. %. Hinchamiento libre vertical. (ASTM D-4546)
- Linear shrinkage strain. % Fuerza retracción lineal. (Tex-107-E)

6.4.3. Resultados.

Revisar apéndices 6.7

Revisar apéndices 6.8

Revisar apéndices 6.9

Revisar apéndices 6.10

6.4.1. Análisis de resultados.

Los resultados expuestos en la tabla índice de plasticidad, indican que en todas las muestras de suelos estabilizados con cemento tipo V, el comportamiento es la transformación de un suelo plástico a uno no plástico, al cabo de un periodo de curado de tres días, en adelante y la dosifican más baja empleada. La reducción del índice de plasticidad esta atribuida a la reducción del espesor de la doble capa de agua debido al intercambio de iones.

Los resultados de los ensayos unconfined compressive strength (UCS) o ensayo de compresión no confinada de suelos cohesivos, con cemento tipo v, reflejan un comportamiento excelente, todas muestras ensayas aumentaban sus resistencia a medida que se incrementa la dosificación y periodo de curado. El aumento registrado para dosificación del 5 % fue de un 350 % a los 3 días y 500 % a los 14 días. Con una dosificación del 10 % a los 3 días de curado registro un aumento del 700 % y a los 14 días del 900 %. Los mecánicos que incrementa la resistencia en suelos estabilizados con cemento tipo V, son la floculación, cementación y reacciones puzolánicas. La resistencia al corte es proporcional al incremento de la dosificación, lo que indica que el porcentaje a emplear para estabilizar suelos con cemento, debe ser seleccionada en base a los ensayos de compresión no confinada de suelos cohesivos.

La reducción del hinchamiento libre observado en la tabla de resultados, es muy próximo a cero, para una dosificación del 5 % y 7 días de curado, y para una dosificación del 10 % y 3 días de curado se comporta de forma muy similar que el anterior. Es decir la clasificación de suelo expansivo es eliminada. Esta reducción de hinchamiento libre está relacionada a la disminución del índice de plasticidad. Un ensayo de difracción de rayos x, a los 14 días de curado muestra la baja intensidad de formación de etringita, por lo que sus ataques no sería objeto de preocupación para este método.

La tabla de resultado de retracción lineal del suelo, confirma el excelente comportamiento que tiene la estabilización con cemento tipo V, incluso con porcentajes bajos de dosificación, obteniéndose valores próximos a cero.

Se puede resumir finalmente, que el método de estabilización con cemento tipo v, disminuye la plasticidad, hinchamiento libre y retracción lineal de suelo y al mismo tiempo incrementa la resistencia del terreno.

6.5. ESTABILIZACIÓN CON ESCORIAS GRANULADAS DE ALTO HORNO.

Existen varios tipos de escorias que se producen durante la extracción de metales, el producto adecuado como material cementicio es “ground granulated blast furnace slag”. (GGBFS) o escorias granuladas de alto horno, este es un subproducto de la producción del hierro que se forma por la combinación de componentes silíceos del hierro y el fluido de piedra caliza usada para fundición del hierro. (Sherwood, 1995)

Químicamente la escoria granulada de alto horno tiene una composición similar al cemento portland, y su empleo en la estabilización proporciona un incremento moderado de la resistencia. Ozyildirim en 1990 menciona los factores que influyen en la mejora de la resistencia del suelo, para el estabilizado con escorias del alto horno, como son: composición química, la concentración álcali del sistema reactivo, el contenido de cristal de escoria, la finesa de la escoria y la temperatura durante la primera parte del proceso de hidratación.

La técnica de estabilización con escoria granulada de alto horno reduce la permeabilidad de la muestra, que depende de la cantidad de escoria utilizada que modifica el tamaño de los poros asociado con la producción de silicato de calcio hidratados, formado en el proceso de hidratación. La reducción de la permeabilidad está asociada a la alta resistencia química de los suelos tratados con GGBFS, incluyendo la resistencia a ataques por sulfatos.

El estudio fue llevado a cabo en muestras de caolinita artificial (tipo de suelo) y demuestra un incremento de la resistencia por cortante, reducción del índice de plasticidad, reducción del hinchamiento y contracción del terreno. La efectividad del método GGBFS en suelos naturales con sulfatos necesita ser estudiada y aplicada en suelos naturales, es decir condiciones de puesta en obra.

6.5.1. Material.

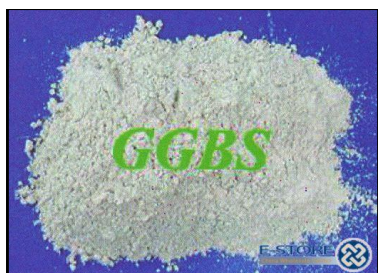


Fig. 9 Escoria granulada de alto horno.

6.5.1. Ensayos de laboratorios ejecutados en la muestra.

- Límites de Atterberg. Índice de plasticidad.
- Unconfined compressive strength. Ensayo de compresión no confinada de suelos cohesivos. (ASTM D-2166)
- Free swell strain. %. Hinchamiento libre vertical. (ASTM D-4546)
- Linear shrinkage strain. % Fuerza retracción lineal. (Tex-107-E)

6.5.2. Resultados.

Revisar apéndices 6.7

Revisar apéndices 6.8

Revisar apéndices 6.9

Revisar apéndices 6.10

6.5.1. Análisis de resultados.

A igual que la estabilización con cemento, la estabilización con escoria de alto horno transforma el terreno de plástico a no plástico. El proceso por el cual se disminuye el índice de plasticidad es similar al ocurrido en el tratamiento con cemento y cenizas volantes, es decir al intercambio de cationes seguido de la floculación. En sí, en lo que plasticidad se refiere las cuatro muestras ensayas tenían un comportamiento no plástico a partir del tercer día de curado.

Aun siendo la escoria de alto horno un producto mineralógicamente parecido al cemento, en los ensayos de compresión no confinada de suelos cohesivos, hinchamiento libre y retracción lineal los resultados obtenidos están muy por debajo en comparación a la estabilización con cemento tipo V y, respecto a la cenizas volantes muy por encima.

En el ensayo unconfined compressive strength ó ensayo de compresión no confinada de suelos cohesivos se observa un incremento de la

resistencia en todas las muestras ensayadas, y para todos los casos a mayor dosificación y periodo de curado, mayor es el aumento de resistencia. Para dosificaciones del 10 %, el aumento observado ronda 200 % y 300 %, en dosificaciones del 20 %, el aumento observado ronda entre 300 % al 500 %.

De los resultados obtenidos en los ensayos de hinchamiento libre, se puede comentar que mejoraban a medida que aumentaba la dosificación y periodo de curado. La condición de suelo expansible que define el pg-3 (hinchamiento > 3 %) se elimina con la menor dosificación ensaya (10 %) y un periodo de curado de siete días. Para una dosificación del 20 %, en el 90 % de los casos al tercer día de curado presentan un hinchamiento menor del 2 % y, a los 14 días menor del 0,7 %.

Respecto al ensayo de retracción lineal, la tendencia se mantiene, los resultados mejoraban a medida que aumentaba la dosificación y periodo de curado. Para una dosificación del 10 % y 7 días de curado la retracción ronda un 2,6 %, a los 14 días y dosificación del 20 % la retracción lineal es menor que el 0,6 %.

6.6. ESTABILIZACIÓN CON CAL MEZCLADO CON FIBRAS FIBRILADAS DE POLIPROPILENO.

La estabilización con cal ha sido usada por muchos años mejorando las propiedades del terreno. (Little, 1987; Sherwood 1995, Schoute, 1999). La adición de cal a la arcilla resulta en una disminución del índice de plasticidad, disminución del hinchamiento libre, disminución en las tensiones de contracción, un incremento de la resistencia por cortante y una disminución de la compresibilidad y permeabilidad. Existen varios procesos asociados al aumento de resistencia por cortante y al cambio de volumen, de los suelos estabilizados con cal, como son: deshidratación, intercambio de cationes, floculación, reacciones puzolánicas y de carbonatación.

Las fibras usualmente se utilizan para mejorar la resistencia del suelo, y reducir la retracción. (Puppala y Musenda, 2000). Se destaca como un método novedoso al mezclar fibras de polipropileno con cal, reduciendo así la cantidad de cal necesaria.

Las razones de esta afirmación son: se sabe que las fibras incrementan la resistencia al corte del terreno natural sin tratamiento previo, por lo que la combinación cal y fibras permitiría la reducción de cal necesaria para estabilizar al terreno, si bien ahora se necesita menos cal, reduciríamos así la formación de etringita. De esta forma se eliminaría o se reduciría a niveles no problemáticos la patología por ataques por sulfatos.

Nuevamente esta hipótesis deberá comprobarse, más allá de un laboratorio.

6.6.1. Material.

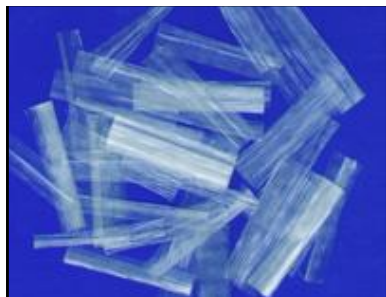


fig. 10 Fibras fibriladas de polipropileno.

6.6.2. Ensayos de laboratorios ejecutados en la muestra.

- Límites de Atterberg. Índice de plasticidad.
- Unconfined compressive strength. Ensayo de compresión no confinada de suelos cohesivos. (ASTM D-2166)
- Free swell strain. %. Hinchamiento libre vertical. (ASTM D-4546)
- Linear shrinkage strain. % Fuerza retracción lineal. (Tex-107-E)

6.6.3. Resultados

Revisar apéndices 6.7

Revisar apéndices 6.8

Revisar apéndices 6.9

Revisar apéndices 6.10

6.6.1. Análisis de resultados.

Los resultados de los ensayos de límites de atterberg nos muestran como el terreno cambia de plástico a no plástico, inclusive los valores obtenidos son próximos a cero, cabe destacar que esta reducción del índice de plasticidad no depende de las fibras, por lo que se recomienda hacer los ensayos de atterberg sin fibras, puesto dificulta su realización.

En líneas generales se puede resumir, que los resultados de los ensayos de compresión no confinada de suelos cohesivos, hinchamiento libre, y retracción lineal, mejora a medida que la parte variable de la dosificación (fibra) y periodo de curado, aumenta. Sin lugar a duda queda demostrado que la fibra mejora el desempeño del tratamiento, ya que al ser el

porcentaje de cal fijo, se aprecia en todos los ensayos y periodos de curados, mejores resultados, que ronda desde el 10 % al 40 % respecto a dosificación 8 % cal + 0,15 % de fibras.

Los resultados indican que el método combinado aumenta los valores de unconfined compressive strength o compresión no confinada de suelos cohesivos, de mala calidad. El aumento de resistencia de este método, se da por el cambio catiónico, floculación y las reacciones puzolánicas. Las fibras, al ser elementos tensores, aumentan resistencia a la tensión y las propiedades de compresión no confinada de suelos cohesivos.

La orientación aleatoria de las fibras y su presencia cerca del plano de corte proveerá una significativa resistencia al corte por cargas axiales. Un incremento al corte mejorará las propiedades de UCS del suelo.

Los resultados del ensayo hinchamiento libre confirma una disminución en los suelos tratados con cal más fibras. Esta disminución es atribuida a una disminución en las características de plasticidad.

Sin embargo Musenda y Puppala en el 2001 advirtieron que las fibras no aumentan ni disminuyen el hinchamiento libre vertical, pero los resultados de estos ensayos reflejan una disminución. Una explicación de estos resultados puede ser: que la presencia de fibras puede haber mejorado la distribución de humedad en los suelos tratados con cal y haber acelerado y mejorado las reacciones químicas entre la cal y suelo, contribuyendo a una disminución adicional en el hinchamiento. Adicionalmente, el aumento en las propiedades de UCS debido al tratamiento puede haber contribuido en cierta cantidad en la disminución del hinchamiento libre.

Estudios mineralógicos en los suelos tratados mostraron niveles bajos de etringita. Esto indica que los levantamientos o patología asociada no sería un problema en estos suelos.

Los niveles de cal pudieran ser además reducidos al 4 %, así limitar la formación de etringita en los suelos con presencia de sulfatos.

En los ensayos de compresión no confinada de suelos cohesivos se refleja un incremento de resistencia, el segundo mejor de los cuatro métodos experimentales propuestos. Para una dosificación 8 % cal + 0,15 % fibras, los incrementos rondan un 400 % y mejora a medida que aumenta el periodo de curado.

Con la dosificación de 8 % + 0,30 % el aumento es cercano al 500 % y aumenta nuevamente a medida que incrementa el periodo de curado. Es obvio analizar que el incremento obtenido con las dosificación de 0,30 % de fibras respecto a la dosificación 0,15% no es muy pronunciado, y eso

que tiene el doble de fibras. Es decir la optimización del método mixto cal más fibras esta con un porcentaje del 0% al 0,15 % de fibras.

Respecto a los ensayos de hinchamiento libre, una vez aplicado el método con ambas dosificaciones y un período de curado de tres días, se observa que en el 96 % de los casos el terreno mostraba un hinchamiento menor del 3 %, y para la dosificación 8 % cal + 0,15 fibras + 14 días de curado y la dosificación 8 % cal + 0,30 fibras + 7 días de curado el hinchamiento libre es menor de 0,80 % y en algunos casos 0,0 %.

El ensayo de retracción lineal muestra también muy buenos resultados del método mixto. A los 3 días de curado y con 0,15 % de fibras, la retracción era menor a 0,5 % y en las sucesivas mediciones casi cero o el cero por ciento.

Las fibras al ser elementos que soportan bien las tensiones, aumentan la resistencia y retracción del suelo. La disposición de las fibras cerca al plano de corte natural del terreno, genera un incremento en la resistencia y retracción lineal de suelo.

6.7. ÍNDICE DE PLASTICIDAD. LÍMITES DE ATTERBERG.

		Walnut creek <i>Arroyo de la Nuez</i>				Quail creek <i>Arroyo de Codorniz</i>				South cooper estate east <i>Tonelero Sureste</i>				South cooper estate west <i>Tonelero suroeste.</i>			
M. de estabilización	Dosificación %	0	3	7	14	0	3	7	14	0	3	7	14	0	3	7	14
Class F fly ash <i>Ceniza volante. Clase F</i>	0	43,00	43,00	43,00	43,00	41,00	41,00	41,00	41,00	42,00	42,00	42,00	42,00	45,00	45,00	45,00	45,00
	10	-	30,00	26,00	26,00	-	21,00	22,00	19,00	-	30,00	24,00	23,00	-	32,00	33,00	32,00
	20	-	24,00	22,00	25,00	-	18,00	21,00	19,00	-	21,00	23,00	21,00	-	29,00	26,00	29,00
Sulphate resistant cement type V <i>Cemento sulfato resistente tipo V</i>	0	43,00	43,00	43,00	43,00	41,00	41,00	41,00	41,00	42,00	42,00	42,00	42,00	45,00	45,00	45,00	45,00
	5	-	NP	NP	NP	-	NP	NP	NP	-	NP	NP	NP	-	NP	NP	NP
	10	-	NP	NP	NP	-	NP	NP	NP	-	NP	NP	NP	-	NP	NP	NP
Ground granulated blast furnace slag <i>Escoria de alto horno</i>	0	43,00	43,00	43,00	43,00	41,00	41,00	41,00	41,00	42,00	42,00	42,00	42,00	45,00	45,00	45,00	45,00
	10	-	NP	NP	NP	-	NP	NP	NP	-	NP	NP	NP	-	NP	NP	NP
	20	-	NP	NP	NP	-	NP	NP	NP	-	NP	NP	NP	-	NP	NP	NP
Lime mixed with fibres <i>Cal mezclado con fibras</i>	0	43,00	43,00	43,00	43,00	41,00	41,00	41,00	41,00	42,00	42,00	42,00	42,00	45,00	45,00	45,00	45,00
	8 + 0,15	-	NP	NP	NP	-	NP	NP	NP	-	NP	NP	NP	-	NP	NP	NP
	8 + 0,30	-	NP	NP	NP	-	NP	NP	NP	-	NP	NP	NP	-	NP	NP	NP

6.8. RESULTADOS DE ENSAYO DE COMPRESIÓN NO CONFINADA DE SUELOS COHESIVOS. (ASTM D-2166).

		Walnut creek <i>Arroyo de la Nuez</i>				Quail creek <i>Arroyo de Codorniz</i>				South cooper estate east <i>Tonelero Sureste</i>				South cooper estate west <i>Tonelero suroeste,</i>			
M. de estabilización	Dosificación %	0	3	7	14	0	3	7	14	0	3	7	14	0	3	7	14
Class F fly ash <i>Ceniza volante. Clase F</i>	0	0,19	0,19	0,19	0,19	0,23	0,23	0,23	0,23	0,14	0,14	0,14	0,14	0,20	0,20	0,20	0,20
	10	-	0,30	0,31	0,31	-	0,29	0,29	0,31	-	0,32	0,31	0,32	-	0,27	0,32	32,00
	20	-	0,24	0,27	0,31	-	0,29	0,35	0,34	-	0,31	0,31	0,30	-	0,35	0,36	29,00
Sulphate resistant cement type V <i>Cemento sulfato resistente tipo V</i>	0	0,19	0,19	0,19	0,19	0,23	0,23	0,23	0,23	0,14	0,14	0,14	0,14	0,20	0,20	0,20	0,20
	5	-	0,65	0,95	0,96	-	0,55	0,68	0,80	-	0,73	0,97	1,11	-	1,01	1,04	1,14
	10	-	1,35	1,59	1,86	-	1,48	2,11	2,30	-	1,06	1,47	1,60	-	1,09	1,37	1,55
Ground granulated blast furnace slag <i>Escoria de alto horno</i>	0	0,19	0,19	0,19	0,19	0,23	0,23	0,23	0,23	0,14	0,14	0,14	0,14	0,20	0,20	0,20	0,20
	10	-	0,45	0,57	0,58	-	0,41	0,58	0,66	-	0,39	0,49	0,55	-	0,45	0,66	0,92
	20	-	0,58	0,72	0,97	-	0,62	0,77	0,83	-	0,51	0,70	0,73	-	0,51	0,72	1,04
Lime mixed with fibres <i>Cal mezclado con fibras</i>	0	0,19	0,19	0,19	0,19	0,23	0,23	0,23	0,23	0,14	0,14	0,14	0,14	0,20	0,20	0,20	0,20
	8 + 0,15	-	0,77	0,89	1,26	-	0,64	0,86	1,07	-	0,73	0,89	1,07	-	0,85	1,00	1,28
	8 + 0,30	-	0,80	0,92	1,30	-	0,87	0,92	1,15	-	0,74	0,98	1,19	-	0,94	NP	1,56

6.9. HINCHAMIENTO LIBRE VERTICAL. (ASTM D-4546)

		Walnut creek <i>Arroyo de la Nuez</i>				Quail creek <i>Arroyo de Codorniz</i>				South cooper estate east <i>Tonelero Sureste</i>				South cooper estate west <i>Tonelero suroeste,</i>			
M. de estabilización	Dosificación %	0	3	7	14	0	3	7	14	0	3	7	14	0	3	7	14
Class F fly ash <i>Ceniza volante. Clase F</i>	0	20,20	20,20	20,20	20,20	12,50	12,50	12,50	12,50	14,70	14,70	14,70	14,70	18,40	18,40	18,40	18,40
	10	-	15,30	8,40	7,30	-	8,90	8,00	7,20	-	11,40	10,60	9,60	-	14,30	13,20	13,30
	20	-	11,30	7,30	6,10	-	7,70	7,50	6,12	-	10,90	10,10	6,80	-	12,30	11,60	9,90
Sulphate resistant cement type V <i>Cemento sulfato resistente tipo V</i>	0	20,20	20,20	20,20	20,20	12,50	12,50	12,50	12,50	14,70	14,70	14,70	14,70	18,40	18,40	18,40	18,40
	5	-	6,80	1,60	1,10	-	1,10	1,10	0,90	-	0,20	0,20	0,10	-	8,60	1,50	1,20
	10	-	0,70	0,30	0,30	-	0,50	0,20	0,10	-	0,20	0,10	0,10	-	0,90	0,70	0,30
Ground granulated blast furnace slag <i>Escoria de alto horno</i>	0	20,20	20,20	20,20	20,20	12,50	12,50	12,50	12,50	14,70	14,70	14,70	14,70	18,40	18,40	18,40	18,40
	10	-	5,50	3,70	1,20	-	4,60	3,10	1,10	-	4,80	3,70	1,10	-	6,80	3,70	1,40
	20	-	3,10	1,10	0,69	-	2,80	0,90	0,40	-	2,20	0,90	0,50	-	2,90	1,50	0,70
Lime mixed with fibres <i>Cal mezclado con fibras</i>	0	20,20	20,20	20,20	20,20	12,50	12,50	12,50	12,50	14,70	14,70	14,70	14,70	18,40	18,40	18,40	18,40
	8 + 0,15	-	3,70	1,20	0,80	-	3,40	1,00	0,60	-	2,50	0,10	0,10	-	2,70	1,40	1,00
	8 + 0,30	-	1,70	0,80	0,40	-	1,30	0,50	0,40	-	0,10	0,00	0,00	-	2,20	0,90	0,50

6.10. FUERZA RETRACCIÓN LINEAL. (TEX-107-E)

		Walnut creek <i>Arroyo de la Nuez</i>				Quail creek <i>Arroyo de Codorniz</i>				South cooper estate east <i>Tonelero Sureste</i>				South cooper estate west <i>Tonelero suroeste,</i>			
M. de estabilización	Dosificación %	0	3	7	14	0	3	7	14	0	3	7	14	0	3	7	14
Class F fly ash <i>Ceniza volante. Clase F</i>	0	17,70	17,70	17,70	17,70	16,80	16,80	16,80	16,80	17,40	17,40	17,40	17,40	17,00	17,00	17,00	17,00
	10	-	17,00	14,30	13,50	-	16,00	14,50	12,00	-	16,90	14,70	14,50	-	16,70	14,00	14,50
	20	-	13,30	11,60	11,20	-	12,20	12,00	10,80	-	11,90	12,50	12,00	-	13,90	12,90	12,20
Sulphate resistant cement type V <i>Cemento sulfato resistente tipo V</i>	0	17,70	17,70	17,70	17,70	16,80	16,80	16,80	16,80	17,40	17,40	17,40	17,40	17,00	17,00	17,00	17,00
	5	-	3,00	3,00	2,90	-	2,30	2,30	1,60	-	1,90	1,60	1,30	-	2,40	1,40	1,20
	10	-	0,90	0,00	0,00	-	0,10	0,00	0,00	-	0,70	0,00	0,00	-	0,80	0,40	0,00
Ground granulated blast furnace slag <i>Escoria de alto horno</i>	0	17,70	17,70	17,70	17,70	16,80	16,80	16,80	16,80	17,40	17,40	17,40	17,40	17,00	17,00	17,00	17,00
	10	-	4,20	3,10	1,20	-	4,20	2,00	0,90	-	4,40	2,50	1,40	-	5,20	3,30	2,00
	20	-	3,80	2,50	0,30	-	2,90	1,90	0,60	-	3,80	1,90	0,60	-	3,60	2,30	0,50
Lime mixed with fibres <i>Cal mezclado con fibras</i>	0	17,70	17,70	17,70	17,70	16,80	16,80	16,80	16,80	17,40	17,40	17,40	17,40	17,00	17,00	17,00	17,00
	8 + 0,15	-	0,40	0,20	0,20	-	0,40	0,20	0,10	-	0,40	0,20	0,10	-	0,50	0,30	0,10
	8 + 0,30	-	0,20	0,10	0,00	-	0,30	0,10	0,00	-	0,30	0,10	0,00	-	0,20	0,10	0,00

6.11. PRINCIPALES CONCLUSIONES.

Todos los métodos analizados de estabilización disminuyen el índice de plasticidad, hinchamiento libre vertical y retracción lineal, adicionalmente todos incrementa la resistencia del suelo.

La estabilización más efectiva es la realizada con cemento tipo v, que incrementa la resistencia al corte, reduce el hinchamiento libre, reduce la retracción lineal, y el índice de plasticidad. Los mecanismo que dan lugar a todas estas mejoras son el intercambio de iones, floculación y las reacciones cementicias y puzolánicas.

El empleo de cemento sulfato resistente tipo V abre un debate, si su uso realmente beneficia a la estabilización de suelos ricos en sulfatos y si ayuda a prevenir la formación de etringita. Se conoce que el cemento tipo V, es manufacturado con muy poco o cero aluminato de calcio (C_3A), lo que elimina una fuente importante de aluminato necesaria para la formación de etringita. Por lo tanto el debate comienza que el aluminato de calcio necesario para la formación de etringita pudiera ser aportada por el suelo, afirmación que aún no está del todo clara, igual que la disolución de alumina en los minerales de arcilla, si depende de la mineralogía de la arcilla, pH y condiciones medio ambientales del suelo. Otras investigaciones realizadas también por la universidad de Arlington, Texas encontraron que las cantidades de alúmina reactiva, o alúmina libre, liberada por la caolinita, illita, montmorillonita, alúmina amorfa y aluminatos silicatos, es diferente. Y estas variaciones influyen drásticamente en la formación de etringita ya sea para positivamente o de forma perjudicial.

La segunda mejor opción, es la estabilización mixta cal más fibras fibriladas de polipropileno, que reduce el índice de plasticidad, aumenta la resistencia, reduce el hinchamiento y retracción lineal del suelo. Los mecanismos que dan lugar a todas estas mejoras son, el intercambio de iones, floculación y las reacciones puzolánicas y una mejora en la cohesión debido a la incorporación de fibras.

La estabilización con escoria granulada de alto horno, a pesar que mejora las propiedades mecánicas del terreno, estos incrementos son menores que los proporcionados con cemento o cal más fibras.

Otros estudios realizados han abierto una discusión si la escoria de alto horno es un producto cementicio por sí solo, o si necesita de un activador como la cal o cemento. Sin embargo la asociación de escoria cementicia, de Estados Unidos, rectifica que por sí sola si es un producto cementicio y que no necesita ningún aditivo o activador. Basado en el alto porcentaje de calcio que contiene las escorias de alto horno, se puede asegurar muy

buenos resultados. Por otro lado si se procede a un tratamiento mixto de escoria de alto horno con cal o cemento, mejorarían los resultados obtenidos, en comparación de un tratamiento solo con las escorias granuladas de alto horno.

Los resultados más bajos son los obtenidos con cenizas volantes clase F, inclusive es incapaz de quitar la categoría de suelo plástico a las muestras ensayadas, los hinchamientos pos tratamiento aún eran excesivos, por encima del 6%.

Se omite una valoración de costos debido a la variación de precio de un país a otro, tanto de materiales, mano de obra, alquiler de equipo, como posibles subvenciones. Sin embargo se puede comentar que a igualdad de condiciones en Estados Unidos, la opción más rentable es la estabilización con cenizas volantes, ya que la materia prima es muy económica, no así en España por ejemplo, que está comprometida con las fábricas de cemento, que la utilizan para elaboración de cementos especiales.

Un estudio más amplio, efectividad - costos, ponen de manifiesto que la opción más interesante, es la estabilización con cemento tipo v, seguido de la estabilización con cal y fibras.

7. ESTABILIZACIÓN CON ADITIVOS DE NATURALEZA MINERALÓGICA.

Este capítulo abordará un producto comercial actualmente no empleado en España, que pudiese englobar una única solución para la estabilización de arcillas, limos y suelos granulares.

El RBI-81 es un estabilizador in situ, que desde sus orígenes fue concebido como un producto para la estabilización de suelos naturales, al contrario que otros productos habitualmente utilizados en procesos de estabilización (cal, cemento, emulsiones asfálticas) que han sido adaptados para dicho uso. Se trata de unos polvos naturales inorgánicos carentes de toxicidad, que aplicados a suelos de diversos tipos tales como arenas, limos y arcilla, es capaz de modificar sus propiedades mecánicas.

		Fine clay	Coarse clay	Fine silt	Coarse silt	Fine sand	Coarse sands	
Particle size (mm)		<.0006	.0006-.002	.002-.01	.01-.06	.06-.4	.4-2.0	
Volume stability		V.poor	Fair	Fair	Good	V.good	V.good	
Type of stabilisation	Bitumen						[Patterned bar]	
	RBI-81	[Hatched bar]						
	Lime	[Dotted bar]						
	Cement						[Cross-hatched bar]	
	Thermal	[Dotted bar]						

fig. 11 Estabilización según material.

7.1. MATERIAL.

7.1.1. Composición - Información sobre ingredientes.

Polvo inorgánico: Ca, (25-25%) Si (5-20%), Mg (0-10%), Fe (0-5%), Cu (0-2%), S (5-15%), K (0-5%), Al (0-5%), Zn (0-2%), Mn (0-2%)

Aspecto: Polvos beige-blanquecinos finos inodoros.

7.1.2. Propiedades físicas y químicas.

- Aspecto: polvo beige blanquecino.
- Olor: inodoro
- pH : 12.5
- Presión de vapor: No medible

- Inflamabilidad: No inflamable
- Gravedad específica: 2.5
- Auto-inflamabilidad: No aplicable
- Propiedades oxidantes: No aplicable
- Solubilidad: en agua 0.2 pts/100 pts.
- Coeficiente de partición: No Aplicable
- Punto de congelación: Ninguno, sólido
- Viscosidad: Ninguna, sólido

7.2. ENSAYOS DE LABORATORIO.

Con el fin de determinar el porcentaje de RBI-81 más apropiado para estabilizar un tipo de suelo, es necesario realizar una serie de pruebas de laboratorio con muestras del suelo natural así como mezclas del mismo con distintos porcentajes del estabilizador. Los resultados obtenidos a partir de estas pruebas son esenciales para definir los parámetros de trabajo óptimos para la realización de los trabajos a gran escala en el camino que se desea estabilizar.

* La realización de los siguientes ensayos requerirá un total de 120-150 Kg. de suelo natural.

7.2.1. Pruebas a realizar en suelo natural sin tratar.

- Granulometría.
- Límites de Atterberg.
- Próctor modificado.
- California bearing ratio.

7.2.2. Pruebas a realizar en muestras de suelo natural con estabilizador.

Las muestras de suelo natural se mezclarán en el laboratorio con 3 porcentajes distintos de RBI-81. 2%, 4% y 6%.

- Próctor modificado.
- California bearing ratio.

- Compresión simple (UCS) o tracción indirecta (ITS o método brasileño).

7.2.3. Cálculos necesarios para saber la cantidad de RBI-81 que es necesario mezclar con el suelo natural.

Para establecer el porcentaje de RBI-81 necesario para estabilizar un suelo determinado, se deberán obtener los valores de CBR y habrá que hacer una gráfica de las resistencias obtenidas según las distintas concentraciones de RBI-81 ensayadas.

Tras evaluar estas gráficas se seleccionará el % de RBI-81 que ofrece la mayor resistencia, al mismo tiempo que resulte económico y satisfaga las especificaciones requeridas para el tipo de uso que va a tener el camino en cuestión.

Por lo general, cuanto más activa sea la fracción arcillosa y cuanto más finas sean las partículas del suelo, es decir, cuanto mayor sean las fuerzas asociadas con la superficie de las partículas a estabilizar, mayor será el porcentaje del estabilizador químico RBI-81 que será necesario usar.

El ratio RBI-81: suelo natural es particularmente importante en suelos cuyo índice de plasticidad (IP) es mayor de 10.

Típicamente, el porcentaje de RBI-81 que suele ser necesario para estabilizar un suelo, suele estar en el rango del 2-6%.

7.3. ATAQUE POR SULFATOS.

Según la normativa vigente en España (pg-3), el contenido en sulfatos solubles de un suelo no debe superar el 1 % ya que si eso ocurre, existe un riesgo elevado que el proceso de estabilización con cal o cemento resulte en la formación de unos cristales de un producto llamado etringita, que deteriora el suelo estabilizado por efecto de hinchamiento. Esta situación suele darse en determinados suelos de naturaleza arcillosa donde la adición de un estabilizador de naturaleza básica ($\text{pH} > 7$) resulta en la liberación de cationes de calcio (Ca^{++}) e hidroxilo (OH^-). El aumento en el pH del suelo desestructura las arcillas, las cuales liberan metales como el aluminio y el silíceo.

Estos forman hidroxilos que al reaccionar con los sulfatos del suelo producen etringita. En estos casos el *RBI-81* es una opción interesante ya que por su composición y modo de acción no forma etringita. Asimismo, este sistema es capaz de estabilizar *suelos difíciles* (ej. arcillas expansivas) con resultados muy satisfactorios.

7.4. RESULTADOS.

Tabla 1. Resultados de Granulometría, IP y CBR en muestras de 6 suelos naturales distintos.

Tipos de suelos naturales ensayados	Muestra nº	IP	Granulometría	CBR 95%
Arenas blancas no plásticas	10872/1	NP	100 Ar	7
Limos amarillos arcilloso-arenosos	10872/2	13	2%G+34%A+45%L+19%Ar	2
Arcilla roja marronácea limo-arenosa	10872/3	13	3%G+30%A+29%L+38%Ar	3
Arena marrón oscura arcillosa	10872/4	7	15%G+63%A+11%L+11%Ar	27
Limo amarillo arcilloso	11016/1	20	3%G+24%A+47%L+26%Ar	2
Arena gruesa naranja amarillenta arcillosa	11016/2	7	20%G+362%A+10%L+8%Ar	67

IP = Índice de Plasticidad; G = gravas, A = arcillas, L = limos, Ar = arenas.

Tabla 2. Cambios de CBR observados en muestras de 6 suelos naturales tratados con RBI-81.

Tipos de suelos naturales ensayados	Muestra nº	Resultados
Arenas blancas no plásticas	10872/1	Aumento de CBR en un factor de 3,6. El CBR de este tipo de suelo no aumentaría con la adición de cal.
Limos amarillos arcilloso-arenosos	10872/2	Aumento de CBR en un factor de 42
Arcilla roja marronácea limo-arenosa	10872/3	Aumento de CBR en un factor de 11
Arena marrón oscura arcillosa	10872/4	Aumento de CBR en un factor de 7,6
Limo amarillo arcilloso	11016/1	Aumento de CBR en un factor de 38
Arena gruesa naranja amarillenta arcillosa	11016/2	Aumento de CBR en un factor de 2,7

Tabla 3. Valores de CBR antes y después de la adición de Cal y RBI-81.

Tipos de suelos naturales ensayados	Muestra nº	CBR	CBR 95%	CBR 95%
		Suelo Natural	4% Cal	4% RBI-81
Arenas blancas no plásticas	10872/1	17	25	62
Limos amarillos arcilloso-arenosos	10872/2	2	71	84
Arcilla roja marronácea limo-arenosa	10872/3	5	44	55
Arena marrón oscura arcillosa	10872/4	37	138	280
Limo amarillo arcilloso	11016/1	2	68	76
Arena gruesa naranja amarillenta arcillosa	11016/2	110	124	300

Tabla 4. Valores de las resistencias (UCS) antes y después de la adición de Cal y RBI-81.

Tipos de suelos naturales ensayados	Muestra nº	UCS kPa	UCS kPa	UCS kPa	UCS kPa
		2% Cal	2% RBI-81	4% Cal	4% RBI-81
Arenas blancas no plásticas	10872/1	-	40	50	128
Limos amarillos arcilloso-arenosos	10872/2	582	676	838	1318
Arcilla roja marronácea limo-arenosa	10872/3	626	1146	1383	1757
Arena marrón oscura arcillosa	10872/4	733	1050	1040	2130
Limo amarillo arcilloso	11016/1	--	--	--	--
Arena gruesa naranja amarillenta arcillosa	11016/2	--	--	--	--

7.5. PUESTA EN OBRA.

- I. Acondicionamiento inicial: si existiera una capa superficial de bitumen habrá que destruirla y retirarla con el fin de exponer el suelo ‘in-situ’ de lo contrario, se preparará la superficie existente (barrido para eliminar materiales perjudiciales como trozos de arcilla o materia orgánica). Asimismo, se inspeccionará la pista adecuadamente en busca de defectos, puntos húmedos etc., los cuales deberán corregirse antes de iniciar el proceso de estabilización.
- II. Preparación del suelo ‘in situ’: la capa de suelo in-situ es escarificada hasta la profundidad de trabajo seleccionada (7.5 cm - 15 cm). Se realizará una corrección granulométrica si fuera necesaria con aporte de nuevos materiales, machaqueo (con una machacadora in situ o equipos agrícolas) o cribado.
- III. Homogenización del suelo ‘in situ’: el suelo natural se mezclará completamente por medio de equipo mezclador hasta que se consiga una mezcla homogénea en todo el espesor de la capa a tratar. Nota: en el caso de querer tratar espesores de pistas de tierra superiores a 15 cm-20 cm, es recomendable realizar el proceso de estabilización en dos capas separadas a fin de asegurar la compactación mínima requerida. (según calidad de material subyacente a la capa a tratar)
- IV. Extensión del estabilizador:
 - a. Extensión manual: este tipo de distribución sólo es válida para obras de pequeña envergadura. Para ello las bolsas de 20 Kg de RBI-81 son colocadas a lo largo de la longitud de la pista a modo de cuadrículas, según un espaciamiento previamente calculado. A continuación son abiertas y su contenido esparcido en todo lo ancho y largo de la cuadrícula con ayuda de rastrillos.
 - b. Extensión mecánica: para obras de mayor envergadura se recurrirá a maquinaria especializada.

En ambos casos el estabilizador deberá extenderse lo más homogéneamente posible.

- V. Mezclado del suelo natural con el estabilizador: inmediatamente después de haber aplicado el estabilizador se deberá proceder a su mezclado con el suelo natural hasta la profundidad total de la capa a tratar. Para ello se puede utilizar un rotavator o un equipo

de mezcla, realizándose tantas pasadas como se consideren necesarias hasta alcanzar una mezcla homogénea en todo el espesor a tratar. Durante esta operación habrá que tener cuidado de no alterar la capa compactada subyacente.

VI. Riego con agua: inmediatamente después de haber mezclado adecuadamente RBI-81 con el suelo, el contenido de humedad óptimo pre-determinado (OMC) deberá ser administrado (nota: la mezcla suelo + estabilizador deberá tener un color uniforme antes de añadir el contenido óptimo de agua). Se realizará un mezclado de forma continua con el equipo de mezcla hasta que la humedad esté homogéneamente distribuida por todo el material a tratar (longitud, ancho y espesor), evitando la formación de bolsas de agua o de concentraciones de agua cerca de la superficie. Hay que asegurarse de que el contenido óptimo en humedad no esté por debajo del valor pre-determinado o no supere más de un 2% de dicho valor.

- a. La mezcla del estabilizador con el suelo se hará según especificaciones similares a las utilizadas en la estabilización con cemento, con la salvedad de que en el caso del RBI-81 el proceso de compactación deberá hacerse de manera inmediata.
- b. Si algún tramo de la pista a tratar se humedece demasiado (ej. por un chaparrón) una vez que el agente estabilizador ha sido añadido y antes de haber compactado la mezcla, dicha sección no será válida. Habrá que dejar que se seque de nuevo hasta alcanzar el OMC adecuado, luego ser escarificada, volver a estabilizarla, compactarla y acabarla.

VII. Compactación: la compactación deberá hacerse en un plazo máximo de 4 horas. El tipo de equipos de compactación a utilizar y el número de pasadas a realizar deberá ser tal que asegure que las densidades especificadas son alcanzadas sin dañar las capas inferiores de material. El contratista será quien seleccionará el tipo de maquinaria a utilizar. (ej. rodillos metálicos vibratorios y/o compactadores de neumáticos). Las pequeñas pérdidas de humedad resultantes del proceso de compactación deberán ser corregidas con un fino riego de agua sobre la superficie. Deberán tomarse medidas de la densidad de los suelos tratados en un plazo máximo de 24 horas desde la terminación del proceso de compactación.

Es muy importante que el número de pasadas y la velocidad de trabajo sean las adecuadas así como la vibración y la presión de inflado de las compactadoras. Estos parámetros vendrán definidos por el director de obra o por los resultados obtenidos en un tramo de prueba en caso de haber sido realizado uno con anterioridad.

Nota: en el caso de climas fríos, la temperatura baja del suelo puede reducir la estabilización del RBI – 81 y por tanto es algo que deberá tenerse en cuenta en la fase de diseño.

- VIII. Curado: una vez que el suelo ha sido estabilizado habrá que procurar que en los siguientes 3 días a la compactación el secado no sea demasiado rápido con el fin de que el proceso de curado sea adecuado. Para ello es recomendable humedecer la superficie a intervalos regulares. Si hubiera pronóstico de fuertes lluvias o inundaciones habrá que proteger la superficie los primeros días para permitir un curado adecuado.
- IX. El tráfico rodado podrá circular siempre y cuando haya una señalización vial adecuada y que no haya previsión de lluvias.
- X. Una vez que se han completado los trabajos, habrá que controlar la densidad de la capa tratada con un medidor nuclear de densidad o aparato similar operado por personal cualificado. El aparato deberá estar debidamente calibrado.

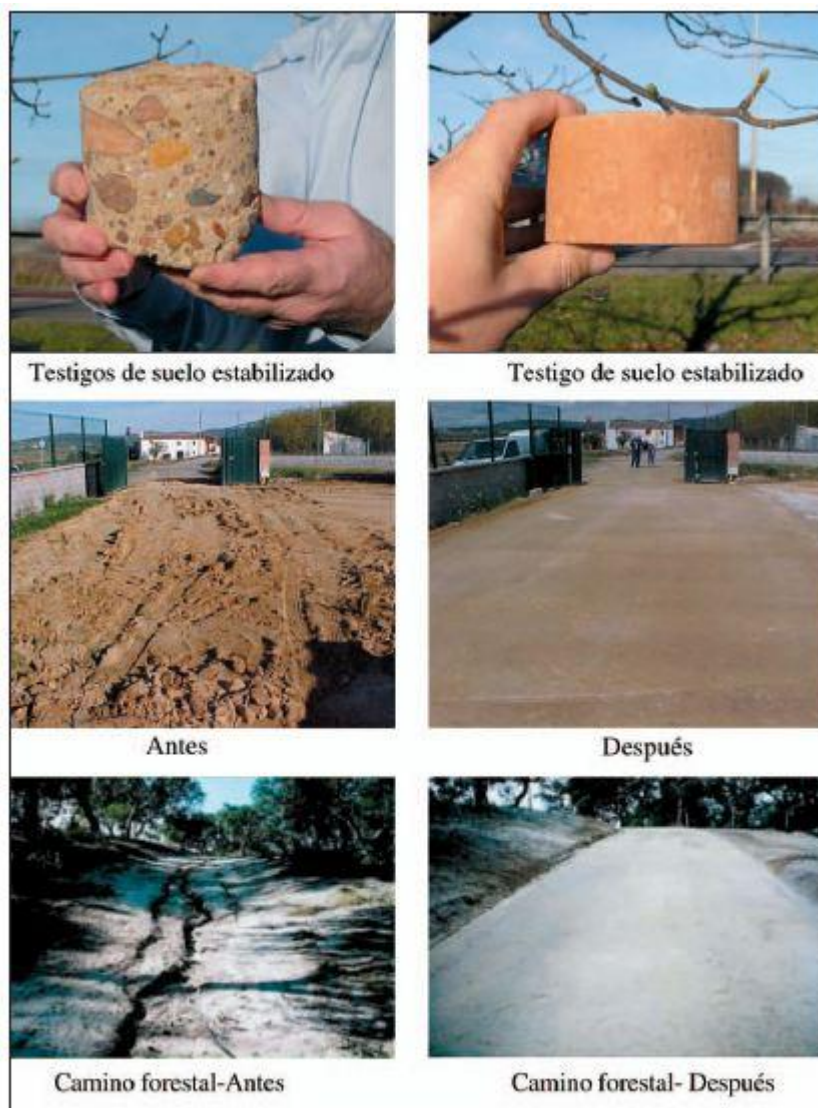
7.6. EQUIPOS NECESARIOS.

- I. Pala con ripper o machacadora para disgregar elementos gruesos.
- II. Equipos de mezcla para mezclar el suelo escarificado en una capa homogénea así como para mezclar el estabilizador con el suelo ‘in situ’. Asimismo, se utilizará posteriormente para mezclar homogéneamente la mezcla del suelo y estabilizador con el agua.
- III. Distribuidor/Extendedora de mezcla en caso de necesitar corregir la granulometría con aporte de áridos.
- IV. Máquina dosificadora de estabilizador.
- V. Camión cisterna o cisterna acoplada a tractor con boquillas de riego para humedecer el material y activar el estabilizador así como para obtener una compactación adecuada.
- VI. Equipo de compactación tales como rodillos vibratorios o rodillos neumáticos.

7.7. DIFERENTES FASES DE APLICACIÓN DEL RBI – 81.



7.8.EJEMPLOS TESTIGOS TOMADOS Y DE TRABAJO REALIZADOS CON RBI-81.



7.9. CONCLUSIONES.

La estabilización con RBI-81 posibilita dejar expuesta la capa estabilizada, sin necesidad de cubrirla con una capa de zahorra o asfalto, permitiendo un ahorro de costos; además es una opción viable de cara a la mejora de sendas o caminos de tierra en medios rurales o en lugares donde el aspecto paisajístico es una variable importante.

El RBI-81 proporciona un aumento significativo de la resistencia (CBR) y reducción significativa de la plasticidad (Límites Atterberg) e hinchamiento de las capas estabilizadas.

Los suelos estabilizados con RBI-81 pueden servir como superficie de rodadura directa.

Según la información proporcionada por el proveedor del RBI-81 asegura, que la estabilización de suelos ricos en sulfatos, con RBI - 81, no forma etringita. Esta información deberá ampliarse y ensayarse.

8. PUESTA EN OBRA DE TRATAMIENTO ESTABILIZADOR CON CAL.



1.Preparación del suelo:
Escarificar para favorecer la mezcla suelo-cal. No siempre es necesaria.



2.Extendido de la cal:
La distribución se realiza mediante un dosificador volumétrico que se controla por la velocidad de avance de la unidad de extendido.



3.Apagado de la cal:
En el caso de utilizar cal viva será necesario apagar la cal in situ mediante un riego de la cal extendida.



4.Mezclado:
Esta operación debe conseguir una mezcla íntima entre el suelo y la cal. Es recomendable el uso de pulverizadores de alta energía mecánica de mezcla.



5.Compactación:
La mezcla se compacta por medio de compactadoras neumáticas en tongadas sucesivas. Se necesita un control riguroso de la humedad óptima de compactación de la capa de suelo-cal.



6.Refino:
Finalmente se pueden refinar las capas superiores. Esta operación se flexibiliza con el uso de la cal, pudiéndose realizar hasta das después de la mezcla y compactación.

9. CONCLUSIONES.

La problemática de suelos ricos en sulfatos y suelos expansivos o con altos valores de hinchamiento libre vertical, dispone de un amplio abanico de soluciones, en las que se debe priorizar la solución que menos deteriore el medioambiente. En ocasiones esta selección no será la más económica de construir, para un efectivo análisis, se debe estudiar entre otros, los costos de mantenimiento y costos de restauración del medioambiente de futuras obras.

Un patrón de todos los métodos explicados en este proyecto, es la mejora en las propiedades mecánicas que permite reducir sustancialmente los aportes externos de material o de la eliminación de estos vía vertedero.

Los métodos experimentales, al ser solo ensayados en condiciones controladas, debe ser comprobados en condiciones reales, es decir puesta en obra, para verificar su efectividad real en el campo.

Respecto al mejor método ensayo por la universidad de Arlington, Texas; estabilización con cemento sulfato resistente tipo v, y la variedad de opiniones y líneas de investigación abiertas, en la cantidad de alúmina libre que puede proporcionar los diferentes tipos arcillas, se deberá seguir ensayo y experimentando, hasta tener datos concluyentes y fiables.

La escases de información de productos mineralógicos, en parte al ser productos patentados limito explicar de forma más técnica el porqué, estos, aseguran que impiden la formación de etringita en suelos ricos en sulfatos. La información proporcionada por el producto comercial, RBI-81 comercializado por Olenpro S.L., tabula unos resultados excelentes en todos los tipos de suelos empleados. El producto según ficha técnica y ensayos proporcionados por el distribuidor se puede emplear en cualquier tipo de suelo, como arcillas, limos y arenas. Los ensayos CBR, en comparación al estabilizador comúnmente utilizado triplica los valores. Otra ventaja de gran importancia es que no se necesita medios auxiliares especiales para su puesta en obra.

10. BIBLIOGRAFÍA.

- IV simposio nacional de geotecnia vial. Claudio Olalla, laboratorio de geotecnia del CEDEX; T. Fernández, técnicas territoriales y urbanas; M.J. Fraile, técnicas territoriales y urbanas.
- Jornada técnica SEMSIG-AETESS. Técnicas de mejora del terreno. RBI-81: un nuevo estabilizador natural de suelos in situ. por Mercedes Aguirre Lipperheide. Dra. en biología.
- Discussion. Experimental evaluations of stabilisation methods for sulphate-rich expansive soils. A.J Puppala, E Wattanasanticharoen and K. punthutaecha. Department of civil and environment engineering, The University of Texas at Arlington, Arlington, USA
- Experimental evaluations of stabilisation methods for sulphate-rich expansive soils. A.J Puppala, E Wattanasanticharoen and K. punthutaecha. Department of civil and environment engineering, The University of Texas at Arlington, Arlington, USA
- Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes. Art. 330.
- Tratamientos de suelos marginales o inadecuados con aditivos cementantes para terraplenes varios. Tesis doctoral, autor: Rafael Pérez Arenas. Universidad politécnica de Madrid.
- Influencia de los terrenos en la urbanización de nuevos sectores urbanos. La estabilización de arcillas margosas con cal. Tesis doctoral, autor: Tomás Fernández Jiménez. Universidad politécnica de Madrid.
- Recomendaciones para la redacción de pliegos de especificaciones técnicas generales para el tratamiento de Los suelos con cal. Gestión de infraestructuras de Andalucía, S.A.
- SANTIAGO, C. (2000). “Estudio a escala de microscopio de los fenómenos de interacción suelo-cal”. Manuscrito personal. Inédito. Madrid.
- Normas atinentes a categoría estructural de laboratorios de suelos. Facultad de ciencias físicas y matemáticas. Universidad de Chile.
- Evaluation of additives used in treatment in expansive clays. Universidad Nueva de Granada, Bogotá-Colombia.

- ASTM D4318-05 standard test method for liquid limit, plastic limit and plasticity index of soils.

Contenido

GLOSARIO.....	1
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. ALCANCE Y OBJETO DEL PROYECTO.....	2
3. EXPLANACIONES.....	3
3.1. EXCAVACIONES.....	3
3.1.1. Clasificación de las excavaciones.....	3
3.1.1.1. Excavación en rocas.....	3
3.1.1.2. Excavación en terreno de tránsito.....	3
3.1.1.3. Excavación en tierra.....	3
3.2. RELLENOS.....	3
3.2.1. Clasificación de los materiales.....	3
3.2.1.1. Suelo seleccionado.....	3
3.2.1.2. Suelos adecuados.....	4
3.2.1.3. Suelos tolerables.....	4
3.2.1.4. Suelos marginales.....	5
3.2.1.5. Suelos inadecuados.....	5
3.2.1.6. Resumen, clasificación de los materiales, en base al PG-3.....	6
3.2.2. Empleo de los materiales en rellenos tipo terraplén.....	7
3.2.2.1. Coronación.....	7
3.2.2.2. Cimientos.....	7
3.2.2.3. Núcleo.....	7
3.2.2.4. Espaldones.....	7
3.2.2.5. Resumen, uso de los materiales, en base al PG-3.....	8
3.2.3. Precauciones especiales con distintos tipos de suelos.....	9
3.2.3.1. Suelos colapsables.....	9
3.2.3.2. Suelos expansivos.....	10
3.2.3.3. Suelos con yesos.....	10
3.2.3.4. Suelos con otras sales solubles.....	11
3.2.3.5. Suelos con materia orgánica.....	11
3.3. NORMAS Y ENSAYOS DE REFERENCIA.....	12
4. ESTABILIZACIÓN DEL SUELO.....	13
4.1. TIPOS DE ESTABILIZACIÓN.....	15
4.1.1. Estabilización física.....	15
4.1.2. Estabilización química.....	15
4.1.3. Estabilización mecánica.....	16
5. EL ATAQUE POR LOS SULFATOS A LAS ESTABILIZACIONES CON CAL..	17
5.1. LA SERIE ETRINGITA - TAUMASITA.....	17
5.1.1. La etringita.....	17
5.1.2. La taumasita.....	19
5.2. FACTORES QUE CONDICIONAN EL HINCHAMIENTO DEBIDO A LOS	
SULFATOS SOLUBLES.....	19
5.2.1. Presencia de arcillas.....	20
5.2.2. Presencia de minerales arcillosos ricos en alúmina.....	20
5.2.3. Presencia de sulfatos.....	20
5.2.4. Presencia de agua.....	20

5.2.5.	Tamaño y morfología de los cristales de sulfatos solubles.....	20
5.2.6.	Presencia de cementos carbonáticos.....	20
5.2.7.	pH del suelo.	21
5.2.8.	Tiempo de curado.	21
5.2.9.	Densidad seca.....	21
5.2.10.	Temperatura de humectación y humedad relativa.....	21
5.2.11.	Resistencia.	21
5.3.	MECANISMOS DE HINCHAMIENTO.	21
5.4.	DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO EN SULFATOS.	22
5.5.	POSIBILIDADES DE ACTUACIÓN FRENTE AL FENÓMENO.....	22
5.5.1.	Formación de minerales nocivos antes del proceso de compactación.	22
5.5.2.	Doble aplicación de cal.....	23
5.5.3.	Cantidad y tipo de cal utilizada.....	23
5.5.4.	Incorporación de procedimientos constructivos especiales.	23
5.5.5.	Adición de cenizas volantes bajas en calcio.	23
5.5.6.	Adición de hidróxido de bario, o de sales de litio.....	24
5.6.	RESUMEN DE LOS ESTUDIOS SOBRE EL ATAQUE DE LOS SULFATOS.	24
6.	EVALUACIONES EXPERIMENTALES DE ESTABILIZACIÓN DE SUELOS EXPANSIVOS RICOS EN SULFATOS.....	26
6.1.	EXPLICACIÓN DEL PROGRAMA EXPERIMENTAL DE LA UNIVERSIDAD DE ARLINGTON TEXAS.....	27
6.2.	ENSAYOS REALIZADOS.	29
6.3.	ESTABILIZACIÓN CON CENIZAS VOLANTES BAJAS EN CALCIO. (CLASE F) ..	32
6.3.1.	Material.	32
6.3.2.	Ensayos de laboratorios ejecutados en la muestra.	32
6.3.3.	Resultados.....	33
6.3.4.	Análisis de resultados.....	33
6.4.	ESTABILIZACIÓN CON CEMENTO SULFATO RESISTENTE. TIPO V.....	33
6.4.1.	Material.	34
6.4.2.	Ensayos de laboratorios ejecutados en la muestra.	34
6.4.3.	Resultados.....	34
6.4.1.	Análisis de resultados.....	35
6.5.	ESTABILIZACIÓN CON ESCORIAS GRANULADAS DE ALTO HORNO.....	36
6.5.1.	Material.	36
6.5.1.	Ensayos de laboratorios ejecutados en la muestra.	37
6.5.2.	Resultados.....	37
6.5.1.	Análisis de resultados.....	37
6.6.	ESTABILIZACIÓN CON CAL MEZCLADO CON FIBRAS FIBRILADAS DE POLIPROPILENO.	38
6.6.1.	Material.	39
6.6.2.	Ensayos de laboratorios ejecutados en la muestra.	39
6.6.3.	Resultados.....	39
6.6.1.	Análisis de resultados.....	39
6.7.	ÍNDICE DE PLASTICIDAD. LÍMITES DE ATTERBERG.	42
6.8.	RESULTADOS DE ENSAYO DE COMPRESIÓN NO CONFINADA DE SUELOS COHESIVOS. (ASTM D-2166).....	43
6.9.	HINCHAMIENTO LIBRE VERTICAL. (ASTM D-4546)	44
6.10.	FUERZA RETRACCIÓN LINEAL. (TEX-107-E)	45
6.11.	PRINCIPALES CONCLUSIONES.....	46

7. ESTABILIZACIÓN CON ADITIVOS DE NATURALEZA MINERALÓGICA...	48
7.1. MATERIAL.....	48
7.1.1. Composición - Información sobre ingredientes.....	48
7.1.2. Propiedades físicas y químicas.....	48
7.2. ENSAYOS DE LABORATORIO.....	49
7.2.1. Pruebas a realizar en suelo natural sin tratar.	49
7.2.2. Pruebas a realizar en muestras de suelo natural con estabilizador.	49
7.2.3. Cálculos necesarios para saber la cantidad de RBI-81 que es necesario mezclar con el suelo natural.	50
7.3. ATAQUE POR SULFATOS.....	50
7.4. RESULTADOS.....	51
7.5. PUESTA EN OBRA.	52
7.6. EQUIPOS NECESARIOS.....	54
7.7. DIFERENTES FASES DE APLICACIÓN DEL RBI – 81.....	55
7.8. EJEMPLOS TESTIGOS TOMADOS Y DE TRABAJO REALIZADOS CON RBI-81.	56
7.9. CONCLUSIONES.....	57
8. PUESTA EN OBRA DE TRATAMIENTO ESTABILIZADOR CON CAL.	58
9. CONCLUSIONES.....	59
10. BIBLIOGRAFÍA.	60