

Estabilización de suelos



Alfonso **Montejo** Fonseca
Alejandro **Montejo** Piratova
Alberto **Montejo** Piratova

Estabilización de suelos



Alfonso **Montejo** Fonseca
Alejandro **Montejo** Piratova
Alberto **Montejo** Piratova

Montejo Fonseca, Alfonso, *et al*

Estabilización de suelos -- Alfonso Montejo Fonseca, Alejandro Montejo Piratova, Alberto Montejo Piratova / 1a. edición, Bogotá: Ediciones de la U, 2018. 350 p. ; 24 cm.

ISBN 978-958-762-878-4 - e-ISBN 978-958-762-879-1

1. Ingeniería civil 2. Suelos 3. Materiales 4. Estabilización de suelos I. Tít. 620 cd 24 ed.

Área: Ingeniería civil

Primera edición: Bogotá, Colombia, agosto de 2018

ISBN. 978-958-762-878-4

- © Alfonso Montejo Fonseca, Alejandro Montejo Piratova
Alberto Montejo Piratova
(Foros de discusión, blog del libro y materiales complementarios del autor en www.edicionesdelau.com)
- © Ediciones de la U - Carrera 27 # 27-43 - Tel. (+57-1) 3203510
www.edicionesdelau.com - E-mail: editor@edicionesdelau.com
Bogotá, Colombia

Ediciones de la U es una empresa editorial que, con una visión moderna y estratégica de las tecnologías, desarrolla, promueve, distribuye y comercializa contenidos, herramientas de formación, libros técnicos y profesionales, e-books, e-learning o aprendizaje en línea, realizados por autores con amplia experiencia en las diferentes áreas profesionales e investigativas, para brindar a nuestros usuarios soluciones útiles y prácticas que contribuyan al dominio de sus campos de trabajo y a su mejor desempeño en un mundo global, cambiante y cada vez más competitivo.

Coordinación editorial: Adriana Gutiérrez M.

Carátula: Ediciones de la U

Impresión: DGP Editores SAS.

Calle 63 #70D-34, Pbx. (57+1) 7217756

Impreso y hecho en Colombia

Printed and made in Colombia

No está permitida la reproducción total o parcial de este libro, ni su tratamiento informático, ni la transmisión de ninguna forma o por cualquier medio, ya sea electrónico, mecánico, por fotocopia, por registro y otros medios, sin el permiso previo y por escrito de los titulares del Copyright.

Contenido

Presentación	11
Capítulo 1. Estabilización de suelos.....	13
1.1. Generalidades.....	13
1.2. Métodos.....	15
1.3. Propiedades de los suelos a estabilizar	16
1.3.1. Estabilidad volumétrica	17
1.3.2. Resistencia	17
1.3.3. Permeabilidad	18
1.3.4. Compresibilidad	18
1.3.5. Durabilidad	18
Capítulo 2. Estabilización de suelos mediante su mezclado con otros suelos	31
2.1. Introducción.....	31
2.2. Dosificación de mezclas de agregados	35
2.2.1. Dosificación de los agregados “por peso”	35
2.2.2. Ajuste de la gradación por desechos.....	41
2.2.3. Gradación y mezcla de los agregados por volumen	48
2.2.4. Cálculo del peso de la mezcla en el laboratorio	53
2.3. Plasticidad resultante en la mezcla de varios materiales.....	55
2.4. Procedimiento de construcción.....	57
Capítulo 3. Estabilización de suelos con cemento	59
3.1. Suelo-cemento.....	59
3.1.1. Tipos de mezclas de suelo tratadas con cemento.....	60

3.1.2. Suelo cemento propiamente dicho	61
3.1.3. Suelos granulares modificados con cemento	62
3.1.4. Mezclas de suelos finogranulares modificados con cemento.....	62
3.1.5. Suelo-cemento plástico.....	63
3.1.6. Lodos y materiales para inyección tratados con cemento	63
3.2. Propiedades de las mezclas de suelos tratados con cemento.....	63
3.2.1. Resistencia a la compresión	64
3.2.2. Resistencia a la flexión	65
3.2.3. Módulo de elasticidad.....	65
3.2.4. Índice de plasticidad.....	65
3.2.5. Cambio de volumen	66
3.2.6. Absorción capilar y permeabilidad	67
3.2.7. Durabilidad	68
3.2.8. Humedad óptima y densidad máxima de suelos tratados con cemento	68
3.3. Factores que influyen en las propiedades de las mezclas de suelo-cemento.....	69
3.3.1. El suelo.....	69
3.4. Diseño de pavimentos de suelo-cemento.....	78
3.4.1. Método de la Portland Cement Association (PCA)	78
3.5. Procedimiento de diseño	82
3.5.1. Resistencia del suelo.....	83
3.5.2. Período de diseño.....	83
3.5.3. Tráfico	84
3.5.4. TPD y porcentaje de camiones.....	85
3.5.5. Proyección del tráfico.....	85
3.5.6. Distribución de cargas por eje	87
3.5.7. Datos de encuestas de cargas disponibles (caminos rurales y calles urbanas)	87
3.5.8. Datos de encuestas de cargas no disponibles (calles residenciales y caminos secundarios)	87
3.5.9. Distribución por carril	88
3.5.10. Factor de fatiga	89
3.5.11. Espesor de suelo-cemento.....	89
3.5.12. Espesor de la capa de superficie bituminosa.....	89
3.6. Ejemplo de diseño	94
3.6.1. Ejemplo 1	94
3.6.2. Ejemplo 2	95

3.7. Ejemplo de aplicación	98
3.8. Proceso constructivo.....	102
3.8.1. Pistas de prueba.....	102
3.8.2. Diseño en la pista de prueba	102
3.8.3. Recopilación de información de las pistas de prueba.....	103
3.8.4. Pasos a seguir en el proceso constructivo	105
3.8.5. Suelo-cemento mezclado <i>in situ</i>	105
3.8.6. Suelo-cemento mezclado en planta.....	114
3.8.7. Manejo de juntas	118
Capítulo 4. Estabilización de suelos con cal	121
4.1. Naturaleza de los materiales aptos para la estabilización	123
4.2. Tipos de cal utilizadas	126
4.2.1. Cal viva.....	127
4.2.2. Cal grasa	127
4.2.3. Cal magra.....	128
4.2.4. Cal hidráulica	128
4.3. Requisitos técnicos de los materiales para la estabilización y mejoramiento de suelos.....	129
4.4. Efecto puzolánico	132
4.5. Control de calidad de la cal.....	133
4.6. Influencia del tipo y calidad de la cal utilizada	134
4.7. Requisitos de los suelos de subrasante para su estabilización con cal	136
4.8. Requisitos que debe cumplir el agua	136
4.9. Efectos de la cal en las características de los suelos	137
4.10. Influencia de la cal sobre las constantes físicas del suelo	138
4.11. Efecto de la cal sobre el hinchamiento volumétrico de los suelos	142
4.12. Efecto de la cal sobre el peso de la unidad de volumen (densidad) de los suelos	143
4.13. Efecto de la cal en la resistencia de las mezclas.....	144
4.14. Efecto de algunos aditivos en las mezclas de suelo-cal.....	145
4.15. Efecto en la acidez del suelo.....	146
4.16. Normas de ensayo de materiales aplicables en la estabilización de suelos con cal	148
4.17. Concepto de cal útil vial	148

4.18. Diseño de mezclas suelo-cal.....	149
4.19. Pasos constructivos para la estabilización de subrasantes.....	154

Capítulo 5 . Estabilización de suelos con materiales bituminosos..... 155

5.1. Generalidades.....	155
5.2. Tipo de estabilizaciones bituminosas	156
5.3. Estabilizaciones con emulsión asfáltica	157
5.3.1. Conceptos generales.....	157
5.3.2. Materiales	160
5.4. Diseño y construcción	164
5.4.1. Fórmula de trabajo.....	164
5.5. Composición y dosificación de la mezcla.....	171
5.6. Preparación de la superficie	172
5.7. Fabricación	172
5.7.1. Mezcla en vía (fabricación y extensión).....	173
5.7.2. Mezcla en planta fija	177
5.7.3. Plantas camineras (fabricación y extensión).....	178
5.7.4. Puesta a punto de la fabricación.....	179
5.7.5. Extensión y compactación	180
5.7.6. Sección de ensayo o tramo de prueba.....	181
5.7.7. Reciclado.....	182
5.8. Control de obra	183
5.8.1. Almacenamiento y acopios.....	183
5.8.2. Control de materiales	184
5.8.3. Fórmula de trabajo.....	186
5.8.4. Control de fabricación y puesta en obra	186
5.8.5. Tolerancias	186
5.8.6. Limitaciones.....	187

Capítulo 6 . Otros tipos de estabilización de suelos 189

6.1. Estabilizantes físicos.....	189
6.1.1. Estabilización térmica por calentamiento	189
6.1.2. Estabilización térmica por enfriamiento	194
6.2. Estabilizantes químicos.....	194
6.2.1. Ácido fosfórico y fosfatos.....	194
6.2.2. Estabilización de suelos con cloruro de calcio	195
6.2.3. Sulfato de calcio (yeso) y cloruro de calcio (CaCl ₂).....	196

6.2.4. Estabilización de suelos con silicato de sodio (Na_2SiO_3)	197
6.2.5. Hidróxido de sodio (sosa cáustica)	198
6.2.6. Estabilización con cloruro de sodio (NaCl)	199
6.2.7. Sales de aluminio	204
6.2.8. Resinas y polímeros.....	204
6.3. Estabilización por electro-ósmosis	205
6.3.1. Determinación de los parámetros	208
6.3.2. Funcionamiento del sistema eléctrico en aplicaciones de campo	208
Bibliografía	211
Glosario	215
Anexos	231
Anexo 1. Normas de ensayo de materiales de estabilización de suelos con cemento.....	231
Anexo 2. Normas de ensayo de materiales de estabilización de suelos con cal	275
Anexo 3. Normas de ensayo de materiales de estabilización de suelos con emulsiones asfálticas	331

Presentación

En la ingeniería vial es reconocida la variabilidad de los suelos. Es frecuente entonces, que el ingeniero encuentre no adecuados en algún sentido los suelos que ha de utilizar para un determinado fin en un lugar específico. Este hecho abre la posibilidad más razonable, que es la de modificar las propiedades del material existente para hacerlo capaz de cumplir mejores requerimientos. Esta alternativa da lugar a las técnicas de estabilización de suelos.

Las propiedades de un suelo se pueden alterar de muchas formas, como puede ser: por medios mecánicos, drenaje, medios eléctricos, cambios de temperatura o adición de agentes estabilizantes.

Debe tenerse siempre muy presente que, debido a la gran variabilidad de suelos, cada método resulta aplicable solamente a un número limitado de ellos. Por desfortuna, en unos cuantos metros podemos tener variabilidad en los suelos, de tal manera que, aplicando un cierto sistema de estabilización, este no puede ser efectivo para todos los suelos encontrados y la elección de la clase de estabilización estará gobernada por el número y tipo, así como la extensión, de los que el tipo de estabilización sea efectivo. Igualmente, es indispensable reconocer que la estabilización no es una herramienta que nos permita mejorar todas las propiedades de un suelo. Por esta razón, se debe tener una clara definición de las propiedades que se desean mejorar, por cuanto este requisito específico es un elemento importante para tomar la decisión correcta acerca de la conveniencia de la estabilización.

Hoy en día, puede afirmarse que la estabilización de los suelos ha evolucionado, desde ser un arte puramente experimental hacia una ciencia. En este sentido, el ingeniero no debe olvidar que buena parte del conocimiento necesario es facilitado por otras ciencias: Física, Química, Fisicoquímica, Mineralogía, Geología, etc. Cada una de ellas debe considerarse como una abstracción impuesta por razones metodológicas y de alcance humano, pero en realidad todas están unidas entre sí. No debe caerse nunca en el error de usar exclusivamente la

metodología de su propia especialidad o permitir que otro especialista influya sobre él en el mismo sentido, buscando soluciones en el campo restringido de la elasticidad, resistencia de materiales o bien de la Física o de la Química, es decir, imponiendo al problema sus propias limitaciones a través de exageradas simplificaciones. Lo anterior sugiere el trabajo en equipo, compensando con ello las propias limitaciones con la colaboración de otros especialistas.

La diversidad de agentes estabilizantes propuestos en este texto, su distinta y compleja forma de actuar, que conduce a materiales de propiedades geológicas diferentes, la influencia de la técnica constructiva y de la variabilidad de los suelos, así como los criterios distintos que han guiado a la experimentación que aporta el material básico para el conocimiento del tema, hacen muy difícil en la actualidad sentar los principios básicos fundamentales de la estabilización de los suelos. Pese a ello, en este texto se pretende sistematizar y sintetizar, en la forma más simple posible, algunos de los puntos fundamentales que plantean los problemas prácticos de la estabilización de los suelos.

*Alfonso Montejó Fonseca,
Alejandro Montejó Piratova,
Alberto Montejó Piratova.*

Capítulo 1

Estabilización de suelos

1.1. Generalidades

En la construcción de una obra de ingeniería es natural que se prefiera utilizar materiales de óptima calidad. Sin embargo, en muchos casos prácticos, no es posible alcanzar este ideal a costos razonables comparados con la utilidad de la obra y en un lapso de construcción compatible con los programas establecidos previamente. Lo anterior es especialmente cierto en la construcción de pavimentos para carreteras y para calles en ciudades, casos en los cuales puede ocurrir que dichos materiales sean difíciles de conseguir en la zona del proyecto y que el costo de la extracción y transporte de los materiales que cumplan con los requisitos de calidad deseados sean tales que resulte muy costosa y onerosa la construcción de un proyecto vial. En estas condiciones, es entonces obligatorio o deseable emplear materiales de características inferiores a las ideales pero mejorándolos mediante determinados procesos que, a la postre, den como resultado un material adecuado para los fines que se persiguen, a un costo relativamente bajo comparado con el costo de un material ideal. De estas consideraciones, nació la necesidad de estabilizar o mejorar los suelos para la construcción de pavimentos y otras obras de ingeniería, tales como terraplenes, protección de las caras de las presas, revestimientos de canales, etc. [2]

Los procesos que conducen a la sustitución de materiales de acuerdo con las consideraciones expresadas anteriormente se pueden reducir, en general, a dos, denominados: “estabilización” y “mejoramiento” de suelos.

En los párrafos que siguen, se harán algunas consideraciones sobre estos dos fenómenos y su aplicación a obras de ingeniería, especialmente en pavimentos.

En sentido general, **estabilizar** un suelo significa mejorar sus propiedades (tales como resistencia, durabilidad, plasticidad, permeabilidad, densidad, etc.)

por medio de cualquier sistema, que generalmente consiste en uno de los siguientes:

- a. Mezclas de agregados (estabilización mecánica).
- b. Mezclas de aditivos (cemento, cal viva o apagada, asfalto, cloruro de calcio o de sodio, cenizas del alto horno, anilina furfural, acrilato de calcio, lignino de cromo, etc.).
- c. Compactación apropiada (la cual se puede emplear sola o en combinación obligada con cualquiera de los otros procedimientos mencionados anteriormente).

Es necesario, además, que el suelo mejorado conserve permanentemente sus nuevas propiedades.

De acuerdo con lo dicho antes, normalmente no se consideran como estabilizaciones las bases construidas con materiales que son naturalmente estables, tales como piedra triturada, concreto, etc., pero sí todos aquellos tratamientos que permitan mejorar la resistencia de un suelo mediante la reducción de su susceptibilidad a la acción del agua y de las cargas de tránsito.

Por otra parte, al tratar suelos arcillosos es necesario distinguir los términos "modificación" y "estabilización", especialmente cuando se trata de aditivos como la cal.

a. Modificación

La modificación es un tratamiento que se le da a la arcilla mezclándole porcentajes relativamente pequeños de un aditivo para producir, por lo menos, los siguientes efectos benéficos:

1. Reducir la plasticidad.
2. Reducir los cambios potenciales de volumen.
3. Mejorar sustancialmente la trabajabilidad.

b. Estabilización

La estabilización consiste en mezclar al suelo cohesivo una cantidad suficiente de aditivo para producir reacciones químicas que cementan las partículas de suelo, de tal manera que la resistencia del suelo aumenta de forma significativa. Normalmente, la estabilización requiere mayor porcentaje de aditivo que la modificación.

En resumen, se dice que un suelo es estable cuando muestra en estado seco o húmedo una resistencia marcada y sostenida a la deformación bajo la aplicación de cargas repetidas o continuas.

En un principio, el término estabilización significaba incremento en un sentido cualitativo únicamente. Recientemente, la estabilización se ha asociado con los valores cuantitativos de resistencia y durabilidad, los cuales están relacionados con su funcionamiento. Estos valores cuantitativos se expresan en función de la resistencia a la compresión o al esfuerzo cortante o de algunas medidas de capacidad de soporte o de flexión bajo carga (para indicar la capacidad de soporte) y en función de la absorción, ablandamiento y reducción de resistencia directa al hielo y deshielo, humedecimiento y secado, para indicar la durabilidad de una construcción estabilizada.

1.2. Métodos

Los suelos pueden ser mejorados por medios mecánicos, químicos, eléctricos y térmicos. El grado de estabilización obtenido puede mostrar diferencias dentro de un método dado y también entre los diferentes métodos. Ya que existen tipos distintos de suelos que difieren de forma marcada en cuanto a sus propiedades y puesto que suelos diferentes reaccionan de manera distinta a los diversos métodos, es evidente que no se tengan solo muchas formas de estabilización, sino también amplias variaciones en los grados de estabilidad alcanzados. La siguiente es una lista de los diferentes tipos de estabilización que se han utilizado o que pueden utilizarse en la construcción de carreteras; sobre algunos de ellos, ya mencionados antes, se tratará más adelante:

- a. Mecánicos (bases granulares estabilizadas por mezclas de varios materiales naturales).
- b. Químicos (cemento, cal viva, apagada o puzolánica, cloruro de calcio, cloruro de sodio, anilina furfural, acrilato de calcio, lignino de cromo, etc.).
- c. Eléctricos (electro-ósmosis para estabilización temporal).
- d. Térmicos.

Con el objeto de que el diseñador tenga una guía en la definición del tipo de estabilizador por utilizar de acuerdo al tipo de suelo que disponga en el terreno, a continuación se presenta la figura 1.1.

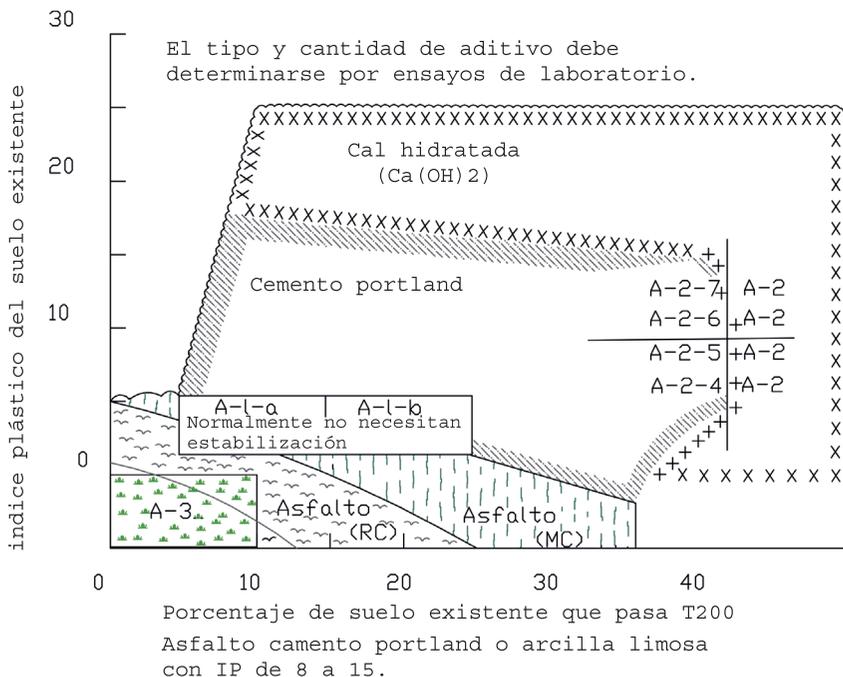


Figura 1.1. Agente estabilizador sugerido.
 Fuente: Bureau of Public Roads de los Estados Unidos.

1.3. Propiedades de los suelos a estabilizar

Las propiedades de los suelos que más frecuentemente se estudian en problemas de estabilización son:

- Estabilidad volumétrica
- Resistencia
- Permeabilidad
- Compresibilidad
- Durabilidad

Frecuentemente, es posible utilizar tratamientos que mejoren simultáneamente varias de esas propiedades, pero también se debe estar preparado para encontrar evoluciones contradictorias en la lista, de manera que el mejoramiento de una propiedad signifique el deterioro de otra u otras. No debe verse a la estabilización solo como una medida correctiva; algunos de los mejores usos de estas técnicas presentan, más bien, medidas preventivas contra condiciones

adversas susceptibles de un ulterior desarrollo. A continuación, se insiste un poco sobre las propiedades de los suelos más susceptibles de ser mejoradas por estabilización. [2]

1.3.1. Estabilidad volumétrica

La expresión se refiere, por lo general, a los problemas relacionados con los suelos expansivos por cambio de humedad, relacionado con variaciones estacionales o con la actividad del ingeniero. La estabilización suele ofrecer una alternativa de tratamiento para estos suelos, diferente del uso de cargas, capas permeables, introducción de agua, etc., que forman la gama de líneas de acción más usual. Se trata de transformar la masa de arcilla expansiva bien sea en una masa rígida o en una granulada, con sus partículas unidas por lazos suficientemente fuertes como para resistir las presiones internas de expansión. Esto se logra por tratamientos químicos o térmicos. La experiencia, muy orientada por factores económicos, ha demostrado que los tratamientos químicos son útiles sobre todo para arcillas ubicadas cerca de la superficie del terreno, en tanto que los tratamientos térmicos se han aplicado más bien a arcillas más profundas. [2]

En muchos de los casos de tratamientos de capas superficiales de arcilla expansiva, la economía impone estabilizar solamente la parte superior del manto, en un cierto espesor, y ello será suficiente siempre que se balancee correctamente la presión de expansión que producirá el espesor no tratado.

1.3.2. Resistencia

Existen varios métodos de estabilización que se han revelado útiles para mejorar la resistencia de muchos suelos. Sin embargo, antes de profundizar más en este aspecto, será preciso decir que todos ellos parecen perder mucho de su poder en el momento en que se tienen importantes contenidos de materia orgánica, circunstancia desafortunada, dado que, como es bien sabido, muchos de los más graves problemas de falta de resistencia ocurren precisamente en suelos orgánicos. [2]

La compactación es de hecho una forma de estabilización mecánica a la que se recurre para incrementar la resistencia de los suelos como uno de sus objetivos más comunes. El empleo de mayores intensidades de compactación no siempre conduce a valores más altos de la resistencia, muy especialmente si se considera la necesidad de mantener dicho parámetro en valores razonables durante tiempos largos. Algunas de las formas de estabilización más usadas para elevar la resistencia son las siguientes:

- Compactación
- Vibroflotación
- Precarga
- Drenaje
- Estabilización mecánica con mezclas de otros suelos
- Estabilización química con cemento, cal o aditivos líquidos

La estabilización con empleo de calor se ha utilizado también, aunque mucho más raramente.

1.3.3. Permeabilidad

No suele ser muy difícil modificar sustancialmente la permeabilidad de formaciones de suelo por métodos tales como la compactación, la inyección, etc. En materiales arcillosos, el uso de floculantes (por ejemplo, polifosfatos) puede reducir la permeabilidad también significativamente; el uso de floculantes (muchas veces hidróxido de cal o yeso) aumenta correspondientemente el valor de la permeabilidad. En la actualidad, se va disponiendo de algunas sustancias que introducidas en el suelo en forma de emulsión pueden reducir mucho su permeabilidad, si bien el uso de estas sustancias ha de ser cuidadosamente analizado, ya que no es raro que ejerzan efectos desfavorables en la resistencia del efecto cortante de los suelos. [2]

En términos generales, y eliminando la estabilización mecánica, los métodos de estabilización para influir en la permeabilidad de los suelos suelen estar bastante desligados de los métodos con los que se busca variar la estabilidad volumétrica o la resistencia.

1.3.4. Compresibilidad

La compactación es una forma rutinaria de estabilización que modifica fuertemente la compresibilidad de los suelos. Sin embargo, la compactación no es la única forma de estabilización que influye en la compresibilidad y, de hecho, puede decirse que todos los métodos de estabilización mencionados anteriormente tienen influencia en dicho concepto.

1.3.5. Durabilidad

Suelen involucrarse en este concepto aquellos factores que se refieren a la resistencia al intemperismo, a la erosión o a la abrasión del tráfico. De esta

manera, los problemas de durabilidad en las vías terrestres suelen estar muy asociados a suelos situados relativamente cerca de la superficie de rodamiento. En rigor, estos problemas pueden afectar tanto a los suelos naturales como a los estabilizados, si bien es en estos últimos donde se producen los peores comportamientos, que suelen ser consecuencia de diseños inadecuados, tales como una mala elección del agente estabilizador o un serio error en su uso, tal como podría ser el caso cuando se ignora la bien conocida susceptibilidad de los suelos arcillosos estabilizadas con cemento a la presencia con sulfatos. [2]

En la práctica actual, se echan de menos criterios de campo o de laboratorio que permitan establecer con seguridad cuál va a ser la durabilidad de un suelo estabilizado y este es un motivo que contribuye poderosamente a que el concepto de durabilidad sea hoy de los más difíciles de analizar, por lo menos cuantitativamente.

Con la somera información dada hasta el momento, se destaca la multiplicidad y objetivos que puede tener la estabilización del suelo; ha de insistirse en que, con cierta frecuencia, esos objetivos podrán ser contradictorios, en el sentido de que la técnica de estabilización que mejora uno podría perjudicar a otro. También se destaca el elevado número de métodos de estabilización que la actual tecnología ha ido desarrollando. Si a este panorama se unen la escasez de investigación que se deja sentir en este campo y las muchas incertidumbres que se plantean en él, en cuanto al comportamiento a corto y, sobre todo, a largo plazo en los materiales estabilizados, no será difícil comprender que existan muchas dudas en torno a esos tópicos. Esto se traduce en preferencias por uno u otro método no siempre bien fundadas; no es difícil ver que en la técnica de un país algunos métodos han llegado a ser rutina de construcción, en tanto que otros no se usan nunca, mientras que en otro país, quizá igualmente tecnificado, se confía mucho en algunos de estos últimos métodos y se rechaza alguno de los primeros. [2]

Con el objeto de comprender mejor la respuesta de los suelos finos a la estabilización, es conveniente proporcionar una introducción a sus aspectos físico-químicos.

Se considera, en general, que las partículas arcillosas tienen un tamaño del orden de 2 micras o menores y que presentan una gran actividad eléctrica. A continuación, se presenta una breve descripción de algunas hipótesis respecto al origen de las fuerzas actuantes en las partículas arcillosas.

La fuerza de unión entre átomos para formar moléculas se conoce como la fuerza de valencia primaria. Estas uniones se deben a que los átomos comparten o intercambian los electrones de sus órbitas exteriores y son lo suficientemente

fuertes como para no romperlas con la aplicación de los esfuerzos usuales en Ingeniería (se conoce como valencia a la capacidad de combinación de un elemento en un compuesto). Cuando se unen los átomos de una molécula a los átomos de otra molécula, se tiene lo que se conoce como uniones de valencia secundaria. A estas fuerzas se les conoce también como fuerzas de Van Der Waals y actúan con una intensidad de 1/100 de la correspondiente a las fuerzas de valencia primaria y se deben a la interacción entre moléculas dipolares y otros dipolos o campos eléctricos (un dipolo es una partícula cargada en la cual los centros de acción de las cargas positivas y negativas no coinciden), como se ilustra en la figura 1.2.

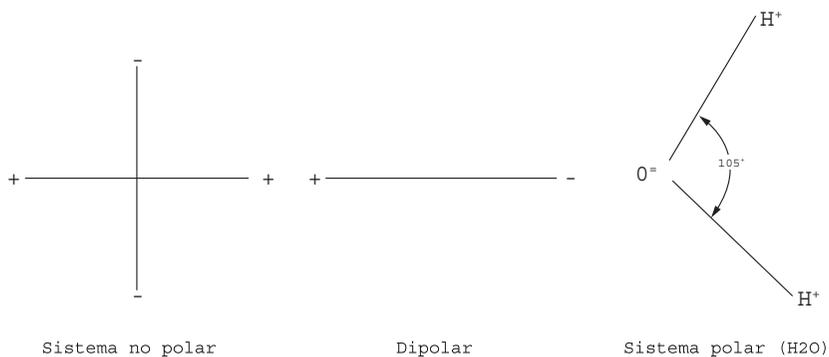


Figura 1.2. Polaridad en las partículas o moléculas.

Fuente: A. Rico & H. Del Castillo, *La ingeniería de suelos en las vías terrestres para carreteras, ferrocarriles y aeropistas*. Vol. 2. México: Limusa. 1978.

Las fuerzas de Van Der Waals actúan en distancias mayores de 5 angströms (1 angström = Å = 1×10^{-4} micras), mientras que las de valencia primaria lo hacen en distancias de 1 a 2 Å, debido a lo cual las uniones de este tipo son tan fuertes.

La unión hidrógeno se tienen cuando un átomo (H⁺) es igualmente atraído a otros dos átomos formando un puente entre ellos, como se ilustra en la figura 1.3. La unión hidrógeno actúa en distancias del orden de 2 a 3 Å y es aproximadamente 10 veces más fuerte que la unión de valencia secundaria o de Van Der Waals.

La unión catiónica se presenta cuando un catión (Na⁺, Ca⁺⁺, K⁺, etc.) es igualmente atraído a dos moléculas cargadas negativamente. Esta unión es similar a la unión hidrógeno, excepto que es mucho más débil e inestable.

La unión coulombica (electrostática) ocurre entre todas las partículas cargadas eléctricamente. La estructura de las moléculas pueden ser polares y, por consiguiente, se desarrollan fuerzas de Van Der Waals dependiendo de la orientación de las partículas. Ahora bien, el espaciamiento entre las partículas es uno

de los factores críticos que afectan al comportamiento ingenieril de los suelos y más aún cuando entre las partículas predominan fuerzas eléctricas, las cuales también dependen de la naturaleza del medio que separa a las partículas, al que se toma en cuenta mediante la constante dieléctrica, que es la relación de la fuerza de atracción en el vacío con respecto a la fuerza de atracción a través del medio particular en consideración.

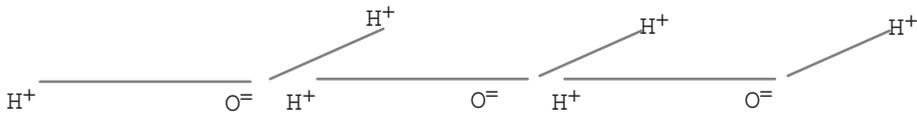


Figura 1.3. Unión hidrógeno.

Fuente: A. Rico & H. Del Castillo, *La ingeniería de suelos en las vías terrestres para carreteras, ferrocarriles y aeropistas*. Vol. 2. México: Limusa. 1978.

Es obvio que la constante dieléctrica en el agua dependerá de las concentraciones iónicas que en ellas existan.

En los suelos finos predominan las fuerzas eléctricas y están compuestos predominantemente por minerales cristalinos, algunos de los cuales, aunque pequeños en tamaño, tienen actividades superficiales muy bajas, por lo que no contribuyen a esos efectos conocidos como plasticidad y cohesión. A estos minerales se les podría referir como no arcillosos, tal es el caso del cuarzo y la calcita, por ejemplo. Estos minerales no arcillosos rara vez se presentan en tamaños menores de 2 micras.

Los minerales cristalinos cuya actividad superficial es tal que se presenta cohesión y plasticidad podemos definirlos como arcillosos. Se conocen, aproximadamente, 15 minerales principales de este tipo, pero podría decirse que, en general, se tienen tres grupos dominantes, a saber: caolinita, montmorilonita e illita.

Existen dos bloques fundamentales en las estructuras de los minerales arcillosos: uno de ellos constituye a la llamada unidad tetraédrica y el otro a la unidad octaédrica. La unidad tetraédrica se muestra en la figura 1.4 y está constituida por cuatro átomos de oxígeno, equidistantes de un átomo de silicio. Las unidades tetraédricas se pueden combinar según se indica en la figura para integrar la lámina conocida como sílica. A esta lámina se le suele representar como un trapecio. La unidad octaédrica está constituida por seis hidróxilos rodeando a un átomo que puede ser aluminio o magnesio, como se muestra en la figura 1.5.

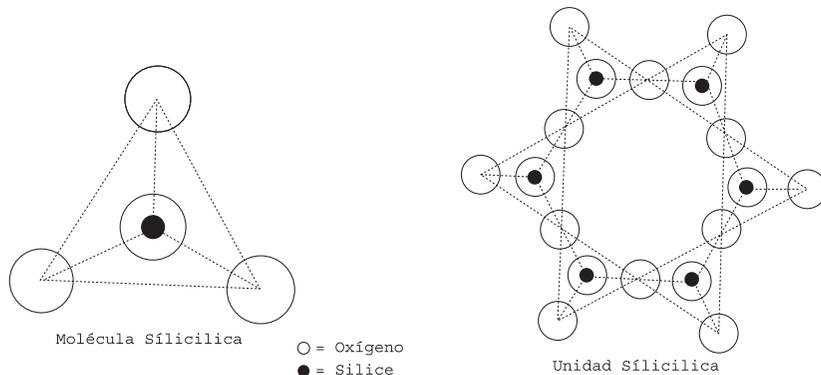


Figura 1.4. Unidad tetraédrica y lámina sílica.

Fuente: A. Rico & H. Del Castillo, *La ingeniería de suelos en las vías terrestres para carreteras, ferrocarriles y aeropistas. Vol. 2. México: Limusa. 1978.*

Las láminas octaédricas también se pueden combinar para formar diferentes tipos de láminas, como se muestra en la figura 1.5, y se les representa como rectángulos.

En la figura 1.6 se muestra, en forma esquemática, a las unidades tetraédricas (a y b), la unidad octaédrica aluminica (c), la unidad octaédrica de magnesio (d), la lámina conocida como sílica (e), las láminas conocidas como gibsita, en las que los átomos anteriores son átomos de aluminio, (f) y la brucita, en la que los átomos interiores son átomos de magnesio (g). Como se puede notar, a la derecha de los correspondientes esquemas se han indicado las correspondientes valencias.

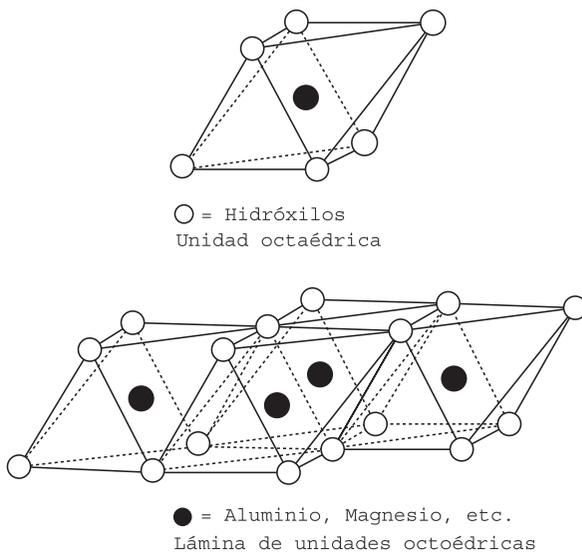


Figura 1.5. Unidad octaédrica y lámina octaédrica.

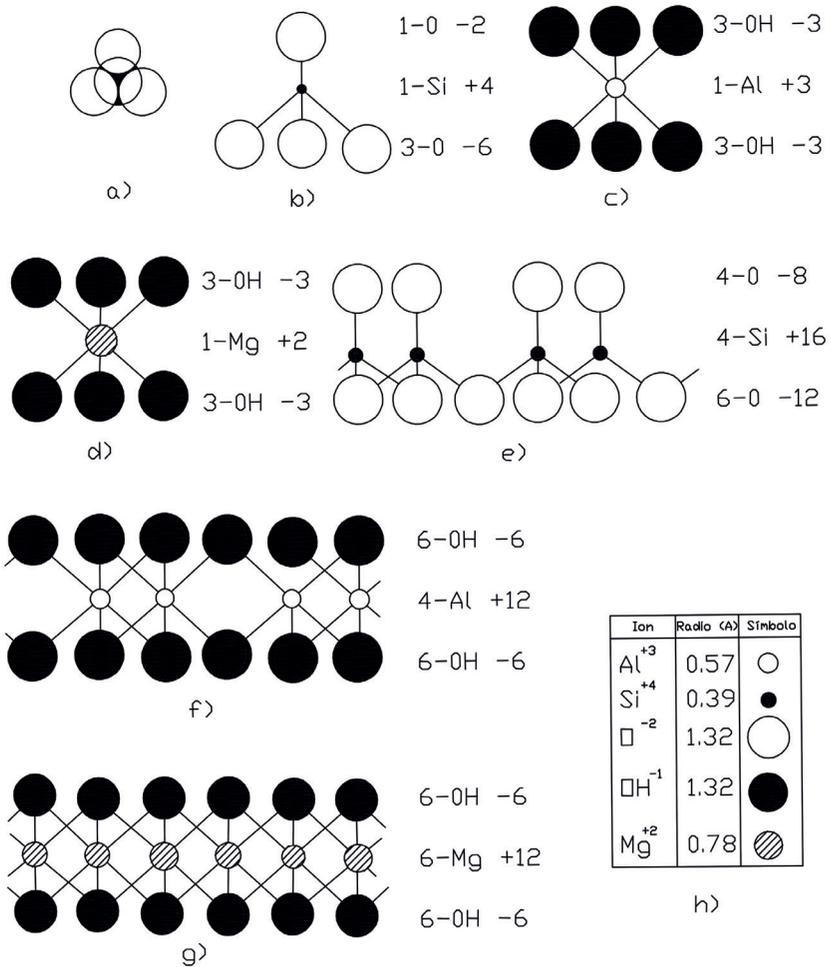
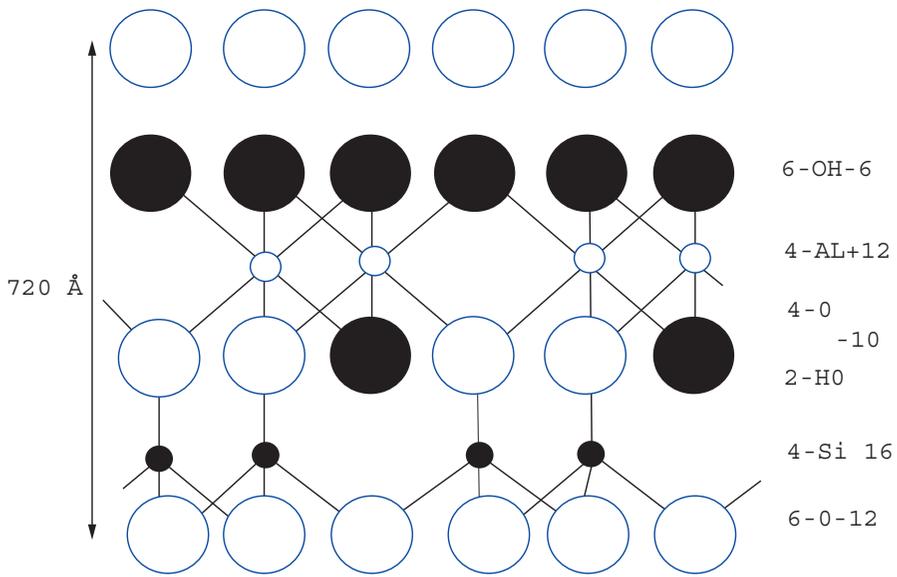


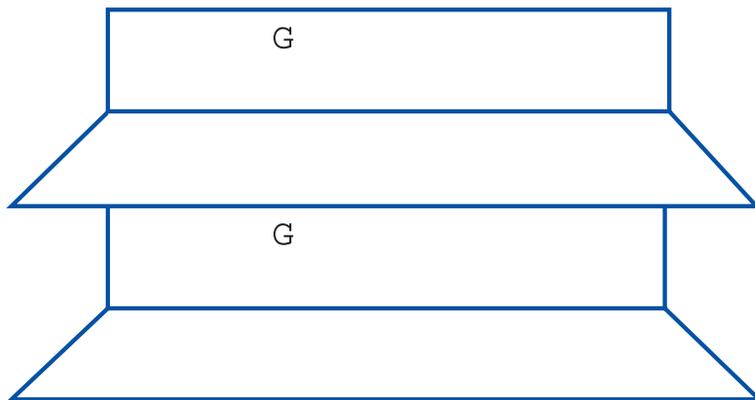
Figura 1.6. Unidades arcillosas básicas, a) y b) unidad tetraédrica, c) y d) unidades octaédricas, e) lámina silícica, f) gibsita, g) brucita.

Fuente: C. Fernández Loaiza, *Estabilización de suelos*, México, 1982.

Caolinitas. Debido a que las fuerzas de valencia en los átomos de oxígeno superiores, en la lámina de sílica, se encuentran insatisfechas, así como los espaciamientos que guardan entre sí dichos oxígenos, resulta posible que la mencionada lámina se una a la de gibsita como se muestra en la figura 1.7, en forma esquemática, y en la figura 1.8, en perspectiva. En dichas figuras se puede apreciar la sustitución de dos de los oxígenos de la lámina sílica por dos de los hidróxilos de cada unidad tetraédrica de la gibsita, estableciéndose con ellos una liga, tanto del tipo iónico como de valencia, la cual es demasiado fuerte; en la representación esquemática, se puede apreciar que la lámina es eléctricamente neutra, obteniendo el mineral conocido como caolín.



a)



b)

- a) Representación esquemática
b) Representación simbólica

Figura 1.7, Caolinita.

Fuente: C. Fernández Loaiza, *Estabilización de suelos*, México, 1982.

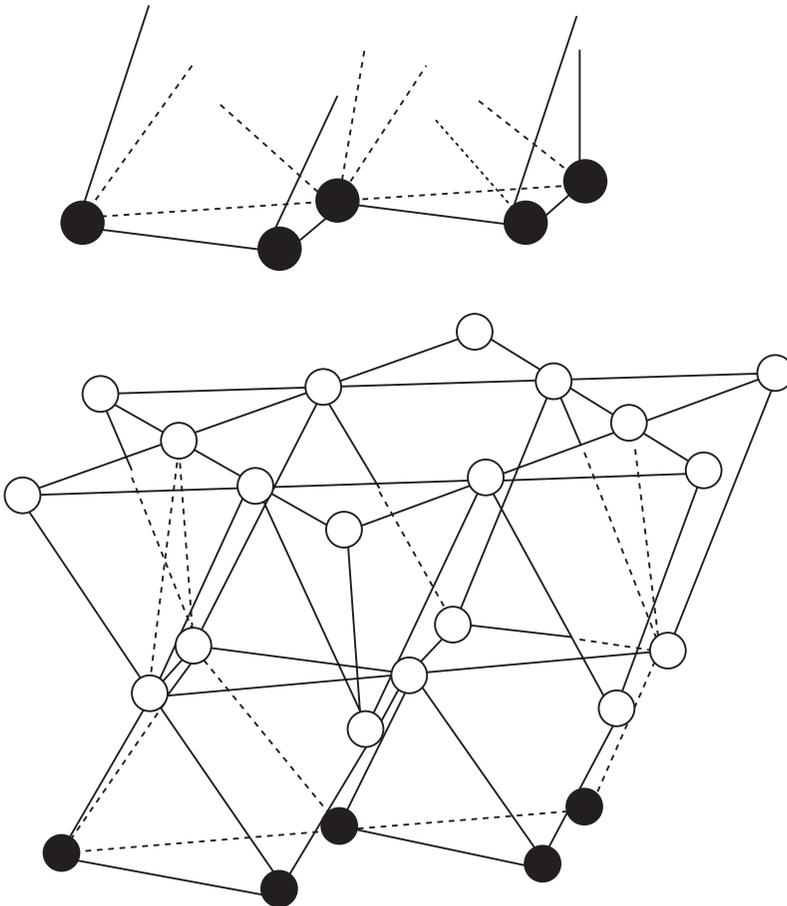
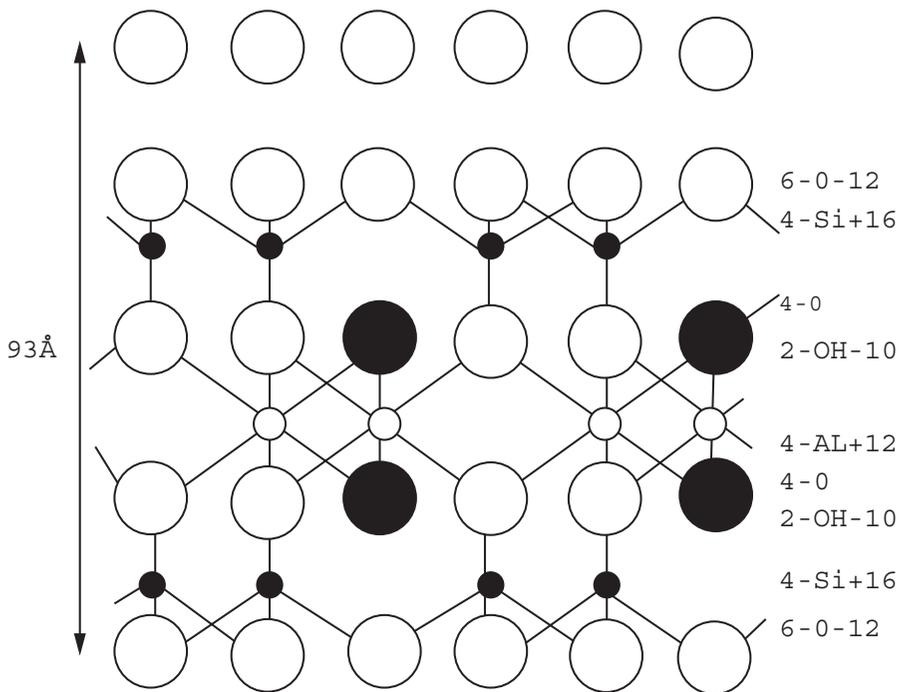


Figura 1.8. Representación en 3 dimensiones de la caolinita.

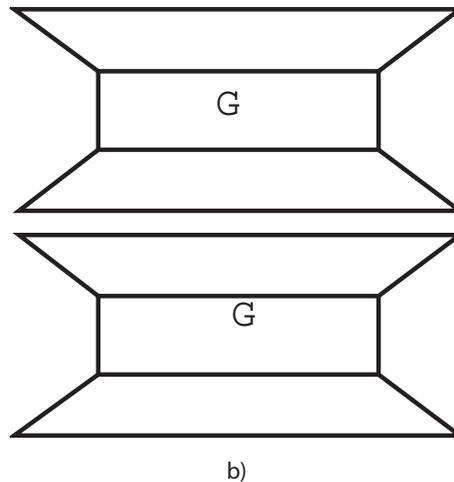
Fuente: C. Fernández Loiza, *Estabilización de suelos, México, 1982.*

Se pueden unir láminas de este tipo unas sobre otras para formar cristales de caolín conocidos como caolinita, siendo las fuerzas que las unen del tipo hidrógeno y desarrolladas entre los iones oxígeno (O^{2-}) y los iones hidróxilo $(OH)^{-1}$. Esta unión es también relativamente fuerte. Si se tienen diferentes estructuras de las láminas, se obtienen distintos minerales arcillosos con la misma composición del caolín. Aunque las láminas de sílica y gibsita son capaces de extenderse en forma indefinida en la dirección horizontal (de los planos), se ha encontrado que las partículas de caolín, que generalmente son de forma hexagonal, se presentan como partículas planas cuyos radios varían de 0.5 a 1.0 micras. Debido a que las partículas quedan interrumpidas en sus bordes, se sigue que mientras las cargas eléctricas para una lámina elemental de caolinita

son neutras, en los bordes se habrán roto iones, por lo cual se podrán tener bordes eléctricamente positivos o negativos, pudiendo así adsorber iones extraños, de encontrarse estos disponibles. El rompimiento puede dar origen a partículas que no son eléctricamente neutras. Como ya se mencionó, las fuerzas que, en forma preponderante, unen a las láminas de gibsita o sílica son del tipo de valencia, las cuales son del orden de 10 veces mayores que las fuerzas de tipo hidrógeno que unen a las láminas de caolín para formar la caolinita. No obstante, en la caolinita, este último tipo de fuerzas son lo suficientemente fuertes, al grado que los cristales de caolinita (formados a veces con más de 100 láminas de caolín) son bastante estables y el agua no puede penetrar entre las láminas individuales de caolín para separarlas. Se mencionó también que la caolinita es un mineral eléctricamente neutro, pero bajo la presencia de agua se disocian algunos de los hidróxilos (OH)⁻¹ y pierden los iones hidrógeno (H⁺), dejando en consecuencia al cristal con una carga residual negativa que se equilibra con la atracción de algunos cationes intercambiables presentes en el agua, por ejemplo sodio (Na⁺) o calcio (Ca⁺²).



a)



- a) Representación esquemática
b) Representación simbólica

Figura 1.9. Pirofilita.

Fuente: C. Fernández Loaiza, *Estabilización de suelos, México, 1982.*

Montmorilonitas. En las láminas formadas por unidades tetraédricas u octaédricas frecuentemente ocurre lo que se conoce como sustitución isomorfa, que consiste en la sustitución de un átomo por otro. En la figura 1.8, se muestra esquemática la unión de una lámina octaédrica alumínica (bigrita) en medio de dos de sílica; estas uniones son semejantes a la unión en el caolín, según se ilustra en la figura 1.10, y al mineral obtenido se le conoce como pirofilita. En la figura 1.8, se puede denotar que existe equilibrio eléctrico en esta estructura, pero si se presenta una sustitución isomorfa, en la lámina subsita, de unión de aluminio (Al^{+3}) por un ión de hierro (Fe^{+2}) o magnesio (Mg^{+2}) se tendrá una carga residual negativa. Si el agua contiene cationes tales como sodio (Na^{+1}), calcio (Ca^{+2}), potasio (K^{+1}) o similares, estos son atraídos a las unidades, de tal manera que satisfacen casi totalmente a la carga negativa resultante de la sustitución isomorfa. El problema es que estos cationes no se quedan fijos en las láminas, sino que se pueden intercambiar fácilmente. El espesor de las láminas de montmorilonita es del orden de 10 Angstroms y se colocan una sobre otra como las hojas de un libro, teniéndose como liga entre las unidades a las atracciones mutuas de dos láminas hacia los cationes intercambiables anteriormente retenidos. La unión catiónica en la montmorilonita depende del tipo de catión que se tenga presente, pero en general es débil, por lo que el agua puede entrar fácilmente entre las láminas de montmorilonita, ocasionando que se separen, no siendo difícil desasociar a las unidades estructurales de montmorilonita. Como resultado de lo anterior, los suelos que contengan cantidades considerables de montmorilonita presentan características muy importantes de expansión.

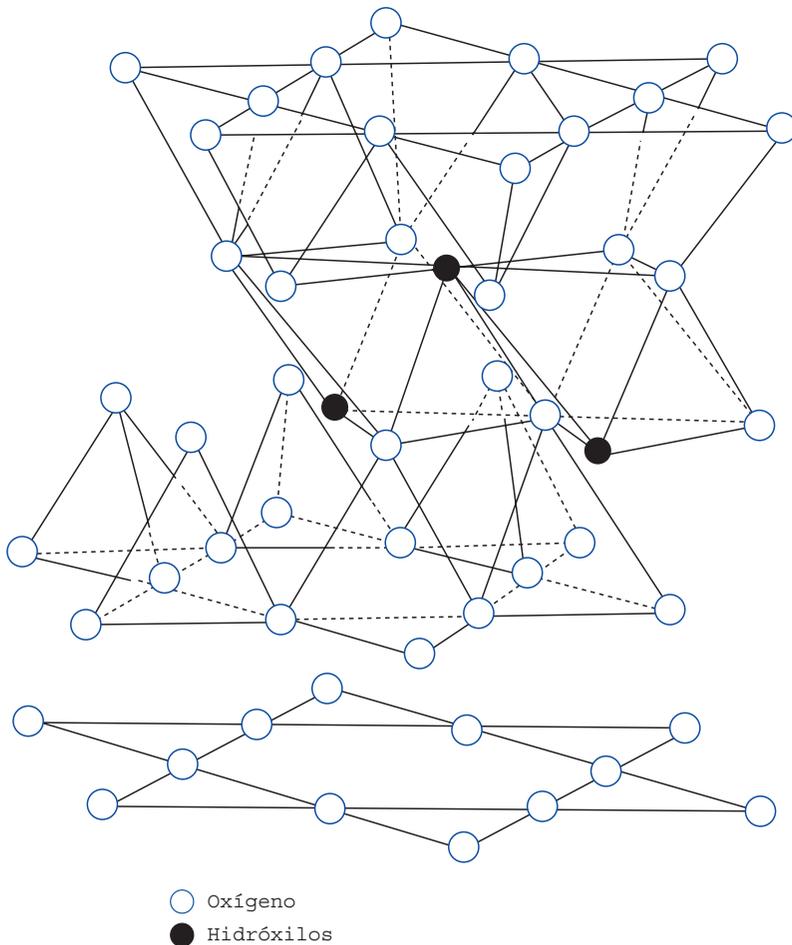


Figura 1.10. Representación en 3 dimensiones de la pirofilita.

Fuente: C. Fernández Loaiza, *Estabilización de suelos*, México, 1982.

Illita. La unidad estructural de la illita es muy semejante a la montmorilonita, según se muestra en la figura 1.11, con la excepción de que siempre se presenta una sustitución isoforma adicional de átomos de sílice (Si^{+4}) por átomos de aluminio (Al^{+3}) en la lámina de sílica, resultando con ello una carga residual negativa más alta que la correspondiente a la de la lámina de montmorilonita. Sin embargo, una parte sustancial de esta carga residual negativa se equilibra con cationes de potasio (K^{+1}) no intercambiables, lo que provee una liga fuerte entre las láminas de illita para constituir las partículas. Las ligas mediante los cationes no intercambiables (K^{+1}) son más débiles que las ligas hidrógeno que unen a las unidades estructurales de la caolinita, pero son mucho más fuertes que las ligas de los cationes intercambiables que forman los cristales

de la montmorilonita. Esto se debe, en parte, al hecho de que los cationes (K^{+1}) se fijan entre las superficies de las láminas de sílica y, en consecuencia, se encuentran mucho más cerca del catión intercambiado que en el caso de la montmorilonita, en donde el catión intercambiado queda en la lámina central. Debido a esto, la estructura de la illita no se expande por el paso del agua a través de sus láminas como sucede en la montmorilonita.

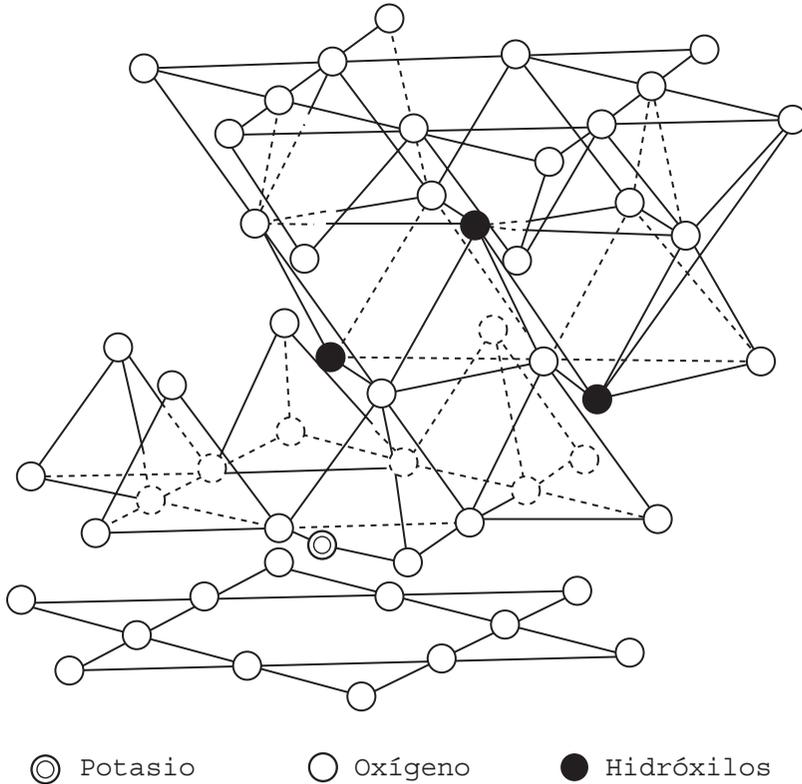


Figura 1.11. Representación en 3 dimensiones de la illita.

Fuente: C. Fernández Loaiza, *Estabilización de suelos*, México, 1982.

Resulta evidente que las ligas entre las partículas de suelo compuestas de minerales arcillosos dependerán en gran parte de la magnitud de la carga residual negativa, debido a la sustitución isomorfa, y del tipo, concentración y distribución de los cationes disponibles para equilibrar a dicha carga. Se ha encontrado (Schofield y Samson, 1954 y Olphen, 1951), trabajando con cao-linitas y montmorilonitas, que la cantidad y distribución de la carga residual neta que puede ser satisfecha por cationes intercambiables (conocido esto como "capacidad de intercambio catiónico" o "capacidad de intercambio de base") depende de la acidez relativa del pH del agua contenida en el suelo. Si se tiene un pH de 7 (solución neutra), la capacidad relativa de intercambio es:

GRUPO	CAPACIDAD DE INTERCAMBIO Meq por 100 g (*)
Caolín	3 a 8
Illitas	40
Montmorilonitas	80

*Algunos autores reportan valores ligeramente diferentes; meq significa miliequivalencia = 10^{-3} equivalentes. Un equivalente es el número de cargas electrónicas en una mole de solución y es igual a 6×10^{23} (Número de Avogadro, que es el número verdadero de átomos o moléculas que constituyen una mole, siendo la mole el número de átomos o moléculas contenidos, los primeros en el peso atómico relativo o en el peso molecular relativo y los segundos, cuando los pesos se toman en gramos). Una capacidad de intercambio de 10 meq por 100 g significa que cada 100 g de sólidos del suelo pueden intercambiar $10 \times 10^{-3} \times 6 \times 10^{23} = 6 \times 10^{21}$ cargas electrónicas. Si el ion intercambiable es univalente (tal como el sodio Na^+), podrán ser reemplazados 6×10^{21} iones de sodio; si los iones intercambiables son divalentes (tales como el calcio, Ca^{++}), se pueden reemplazar 3×10^{21} iones de calcio y así sucesivamente.

Si se tienen valores de pH menores de 7 (solución ácida), se forman zonas cargadas positivamente debido a la adsorción de iones hidrógeno en los bordes expuestos de las láminas octaédricas. Esto resulta no solamente en una reducción de la capacidad de intercambio catiónico, sino que también transforma al mineral en dipolar, es decir, las caras de las láminas quedan con su carga neta residual negativa debido a sustituciones isomórficas en el conjunto de láminas, mientras que los bordes quedan positivamente cargados debido a la mencionada adsorción de iones hidrógeno.

El efecto bipolar tiene relativamente mayor importancia en el caso de la caolinita debido a que las densidades de carga en las caras y en los bordes son del mismo orden de magnitud, mientras que en la montmorilonita, la carga en los bordes es menor del 5%, aproximadamente, que la carga en las caras. Independientemente de la naturaleza de los minerales arcillosos, el efecto bipolar tiene una influencia importante sobre la orientación de las partículas y sobre las fuerzas de atracción entre ellas.

Por otro lado, si se tienen valores de pH superiores a 7 (solución alcalina), los iones hidrógeno (H^+) se disociarán de los oxhidrilos en las láminas octaédricas, resultando con una carga neta negativa en los bordes, la capacidad de intercambio catiónico se verá incrementada y los bordes se repelerán con las caras resultando en orientaciones y ligas entre las partículas completamente aleatorias.

Estabilización de suelos mediante su mezclado con otros suelos

2.1. Introducción

La estabilidad de un suelo que contenga material fino y grueso depende de la distribución de los diferentes tamaños de sus partículas, de la forma de las partículas, su peso volumétrico, su fricción interna y su cohesión. Los materiales que se emplean en carreteras pueden ser:

- **Suelos procedentes de bancos naturales.** Como los depósitos de río, que generalmente contienen grava, arena, arcilla y limos, o los depósitos de arena de playa constituidos generalmente por arenas uniformes.
- **Suelos procesados.** Muchas veces los suelos naturales tal y como vienen del banco no son adecuados para su uso y, por consiguiente, se hace necesario procesarlos para cambiar su tamaño, forma o textura mediante trituración o modificación de su granulometría mediante lavado o su separación en los diferentes tamaños y posterior redosificación.
- **Suelos procedentes de bancos de préstamo.** Cuando los materiales por los que atraviesa el camino son adecuados para su construcción, se les emplea extrayéndolos de excavaciones cercanas.
- **Suelos de tipo especial.** Como los que resultan de la modificación, en sus características físicas o químicas, de algunos materiales durante algún proceso, como lo es el caso de las escorias de altos hornos. Este material flota durante la fundición del hierro, se separa de este y se reduce al tamaño deseado para su utilización.