

Conceitos de estabilização de solos para obras viárias

Estabilizar um solo significa conferir-lhe a capacidade de resistir e suportar as cargas e os esforços induzidos pelo tráfego normalmente aplicados sobre o pavimento e também às ações erosivas de agentes naturais sob as condições mais adversas de sollicitação consideradas no projeto.

Objetivo

Compreende todos os processos naturais e artificiais aplicados aos solos, objetivando melhorar suas características de resistência mecânica, bem como garantir a constância destas melhorias no tempo de vida útil das obras de engenharia.

Importância

O domínio das técnicas de estabilização de solos pode conduzir a sensíveis reduções nos tempos de execução das obras, viabilizando a industrialização do processo construtivo, propiciando uma economia substancial para o empreendimento.

Estudos e Análises

Essencialmente, a estabilização de um solo consiste de um estudo da resistência do solo e da suplementação necessária desta resistência. Baseado neste estudo é escolhido um método qualquer para a suplementação da resistência, e isto é feito segundo análises econômicas e técnicas do problema em questão.

Métodos de Estabilização

Entre os métodos conhecidos, segundo Winterkorn e Vogt J.C., a classificação dos procedimentos de estabilização de solos são as seguintes:

- Estabilização Mecânica;
- Estabilização Granulométrica;
- Estabilização Físicoquímica
- Estabilização Química;
- Estabilização Térmica e Elétrica;
- Estabilização Eletroquímica.

A **estabilização mecânica** compreende os movimentos dos solos e sua compactação com o conteúdo ótimo de umidade para alcançar a máxima densidade possível. Estes procedimentos mecânicos participam, obrigatoriamente, de todos os outros tipos de estabilização.

A **estabilização granulométrica** implica na mistura de solos para produzir um novo solo, adequando-o numa granulometria que garanta determinadas propriedades. Assim, por exemplo, se temos um solo muito coesivo, misturamos com um solo inerte (areia) ou com um coesivo (argila) se o solo for inerte. A fração grossa caracteriza-se por definir a granulometria e possuir uma estrutura que lhe dê coesão.

As misturas com alta proporção de agregados graúdos são de difícil trabalhabilidade e produzem superfícies muito rugosas e segregáveis. Ao contrário, misturas com grandes quantidades de finos e com características plásticas não são aptas para obter um sistema resistente, pois formam superfícies demasiadamente lisas, barrentas quando estão úmidas e pulverulentas quando estão secas.

A **estabilização físicoquímica** consiste em modificar as propriedades de um solo coesivo ou granular mediante a incorporação de aditivos orgânicos ou inorgânicos ou por materiais impermeabilizantes.

Estes aditivos interatuam com os constituintes do solo desenvolvendo reações físicas e químicas, tais como correção da granulometria, diminuição da permeabilidade, melhoria na lubrificação das partículas na etapa da compactação e desenvolvimento completo das propriedades físicoquímicas.

Entre os aditivos inorgânicos, os mais utilizados são cimento e a cal, com os quais se obtém as misturas denominadas solo-cimento e solo-cal.

Como aditivos orgânicos se utilizam também os betumes, em especial os asfaltos de petróleo, cujo caso se denomina por estabilização betuminosa.

A **estabilização química** de solos se obtém mediante a incorporação de agentes estabilizantes específicos. Estes podem ser de natureza inorgânica, como o ácido fosfórico e fosfatos, ácido sulfônico, hidróxido de cálcio, cloreto de cálcio, sulfato de cálcio, sais de alumínio, etc ou de origem orgânica, como as resinas naturais, polímeros, anilina, furfural, etc.

Sem entrarmos em detalhes de como atua cada estabilizante inorgânico em particular, podemos dizer, que em termos gerais e na sua maioria, reagem quimicamente com os componentes do solo, especialmente com os argilo-minerais, produzindo compostos cimentantes, modificando assim as propriedades dos mesmos. Outros atuam atacando os colóides, exercendo uma ação floculante que favorece a compactação.

Quanto aos estabilizantes orgânicos, podemos sintetizar, como um complexo resinoso que pode atuar como agentes cimentantes, repelentes a água e melhoradores de aderência em solos hidrofílicos.

O comportamento de cada produto depende, fundamentalmente, do tipo, características e natureza do solo a estabilizar, podendo produzir efeitos variáveis como a facilidade de compactação, aumento da impermeabilidade, redução das propriedades expansivas, melhoramento do comportamento dos solos ante o congelamento, etc.

A **estabilização térmica** é o processo bem conhecido de fabricação de tijolos e cerâmicas para ser utilizado como material de construção. Se obtém submetendo os solos argilosos a ação do calor a uma temperatura entre 600° e 800° C, aproximadamente. Neste estado, o solo modifica substancialmente suas propriedades e características ganhando uma pronunciada resistência, que não a perde nem por imersão na água.

A estabilização térmica de solos, nas obras rodoviárias, em geral, aplica o mesmo princípio, porém com muito menos temperatura. Assim, por exemplo, entre 200° a 400° C, elimina a água combinada quimicamente e sofre um princípio da dissociação das argilas em silicato e alumina, de modo a assegurar a desidratação da argila, provocando outras transformações não reversíveis.

Com este procedimento se obtém a redução da plasticidade, impedimento da reidratação dos argilo-minerais, ganha um grande benefício no efeito resistente e reduz as propriedades expansivas do solo.

Quanto à **estabilização elétrica**, esta se baseia na aplicação de um procedimento denominado "eletrosiose". Também se utilizam para o mesmo fim, as estacas eletrometálicas. Dos métodos de estabilização de solos estes dois últimos são considerados como os mais complicados, muito onerosos e de pouca aplicação prática nas construções rodoviárias.

ESTABILIZAÇÃO ELETROQUIMICA DO BS-PLUS

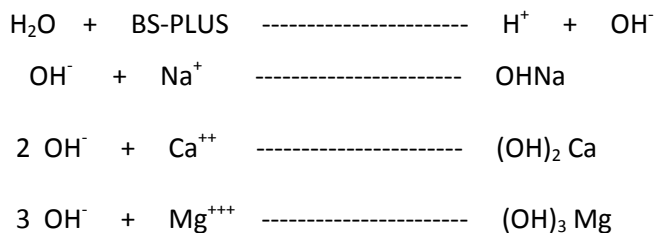
O estabilizante líquido em contato com os reagentes e o solo, forma um composto metalo-orgânico insolúvel e permanente, cuja ação se exerce por uma coesão estável entre as partículas do solo.

As partículas finas das argilas, devido a sua composição mineralógica, têm em sua superfície excesso de íons negativos (ânions), pelos quais são atraídos os íons positivos (cátions) da água, aderindo-os fortemente, formando a água adsorvida. Quanto mais espessa a camada mais se distanciam as superfícies das partículas, diminuindo assim, a intensidade do campo elétrico e a energia térmica das moléculas de água faz com que essas partículas, que tem forma lamelar, se movimentem e provoquem um desequilíbrio entre elas, promovendo uma expansão do solo e por consequência, diminuindo sua resistência.

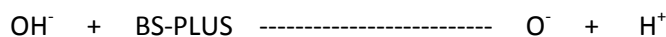
Portanto, a maneira de estabilizarmos um solo, será conseguir reduzir ou eliminar a adsorção.

O Estabilizante de Solos líquido, por sua composição química, tem um enorme potencial de troca iônica. Quando se introduz pequenas quantidades do produto em água ativam os íons H^+ e $(OH)^-$ da água que provoca um intercâmbio de suas cargas elétricas com as partículas do solo, provocando na água adsorvida um rompimento do enlace eletroquímico, despredendo-as e convertendo-as em água livre, a qual drena por gravidade, evaporação e compactação. Esta reação eletroquímica, de troca iônica, provoca a aproximação das partículas dos solos, tornando-o estável e permanente.

A troca catiônica é uma reação estequiométrica, isto é: o aumento na concentração de um determinado cátion, no caso o H, faz com que ele substitua os demais.



Por outro lado, o oxidrilo na presença do estabilizante de solos, poderá se decompor em O e H promovendo assim, a reação de oxidação da matéria orgânica.



Outras reações poderão ocorrer, como por exemplo, a formação do gás H e posterior formação de novas moléculas de água.



Assim sendo, através dessa troca catiônica, conseguimos:

- Redução da espessura da camada de água adsorvida;
- Aglutinação das partículas finas dos solos;
- Pela combinação dos dois efeitos citados, ocorre uma redução na superfície específica do solo, conseqüentemente, menos água poderá ser absorvida, diminuindo a expansão e a contração do solo, aumentando sua impermeabilidade (O produto atua conferindo propriedades hidrófobas, cobrindo as partículas da argila com uma fina película, fortemente aderida e bloqueando ou tamponando os condutos capilares a fim de impedir o acesso das águas), resistência ao cisalhamento (consequência das condições anteriormente descritas), compressão e penetração.

OBS: Por uma série de fatores, consequências e materiais envolvidos, este processo de estabilização de solos, também pode ser qualificado ou classificado como uma Estabilização Físicoquímica.

Os trabalhos de investigações realizados, as experiências de laboratório e as obras executadas desde 1.973, confirmam estas breves considerações teóricas.

A qualidade e o comportamento prático dos solos assim estabilizados dependem, fundamentalmente, de:

Uma adequada técnica de dosagem para determinar as quantidades ótimas de produtos envolvidos para se empregar;

Obter uma boa e uniforme mistura entre os solos e os estabilizantes químicos envolvidos;

Promover compactação especificada, adotada na umidade ótima que assegure obter adequada densificação e estabilidade;

Promover processo de cura, por secagem do corpo de prova compactado até alcançar o menor grau de umidade possível antes do período de imersão de 96 horas.

Os estudos de laboratório e as obras construídas com esta tecnologia ao longo de mais de 30 anos têm demonstrado através de seu comportamento em obras viárias, permitem afirmar que os solos estabilizados quimicamente com BS-PLUS, devidamente dosado e construídos, apresentam, entre outras qualidades, uma adequada resistência estrutural por efeito placa e controle sobre ação das águas.

Estas propriedades progridem com o transcorrer do tempo e alcançam seus valores definitivos quando a mistura completa seu processo de cura, quer dizer, quando foi perdida a totalidade da água de preparação (água de umectação mais a água introduzida com os produtos).

6.1- ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA DE SOLOS

A estabilização química de solos com aditivos líquidos + reagentes (sulfato de alumínio ou cal hidratada ou cimento) é obtida da mistura íntima de solo, aditivo líquido, reagente e água em proporções definidas de acordo com a dosagem escolhida. A mistura é compactada de maneira a atingir a massa específica pré-fixada.

A estabilização química de solos em estradas pode ter vários objetivos, tais como: modificar o solo pelos aditivos químicos, com vistas a acelerar o processo construtivo; melhoria do subleito, sub-bases e bases; melhoria da resistência e durabilidade, para aplicação em camadas de pavimentos viários.

No emprego dessas misturas considera-se, os solos de modo geral, onde os aditivos possam ser utilizados como um agente estabilizador e impermeabilizador. A ação nestes solos está ligada a fenômenos de trocas catiônicas, responsáveis por efeitos de floculação e das reações coesivas (com sulfato de alumínio) e/ou pozolânicas (com a cal hidratada), responsáveis pelos efeitos de cimentação. É de consenso comum entre os pesquisadores que a troca catiônica provoca, em geral, mudanças na plasticidade do solo, enquanto que as reações coesivas ou pozolânicas, quando ocorrem resultam em consideráveis ganhos de resistência mecânica.

As alterações hídricas e mecânicas promovidas pelos aditivos nos solos resultam dos seguintes tipos de reação em ocasiões distintas: troca catiônica, ação pozolânica e carbonatação.

A *Troca Iônica* reflete uma ação imediata, que promove após alguns instantes de contato dos aditivos com o solo, mudanças nas propriedades físicas da mistura. A literatura e a observação, geralmente, considera que são alterados:

- a granulometria, pela floculação das partículas originais. Isto se traduz por deslocamento da curva para o lado grosseiro;

- os limites de Atterberg, cuja alteração mais notável se relaciona ao limite de plasticidade, que normalmente aumenta;
- na compactação, quando se considera uma mesma energia, ocorre diminuição do valor da densidade máxima seca e aumento do valor da umidade ótima;
- a expansão e contração, que sofrem uma redução de valores, ou seja, uma menor variação volumétrica;
- acréscimo na capacidade de suporte.

Estudos e pesquisas mostram que a floculação de um solo por adição desses aditivos depende de sua composição química, sendo as propriedades e comportamento do solo estabilizado por ela afetados. O fenômeno das trocas das bases ocorre com os argilominerais. Essa reação leva à floculação das partículas argilosas, causando o aumento no ângulo de atrito da massa de solo.

São consideradas como origem do fenômeno de capacidade de troca catiônica, a ruptura das ligações iônicas nas arestas das unidades estruturais sílica-alumina, liberando cargas não compensadas; a substituição no interior da estrutura molecular do cátion alumínio (trivalente) dos tetraedros por silício (tetraivalente) ou do alumínio (trivalente) dos octaedros por íons de valência menor, particularmente o magnésio; a substituição do hidrogênio das hidroxilas externas por cátion permutável.

Na caulinita os cátions trocáveis são geralmente resultantes da quebra das unidades estruturais, o que rompe o equilíbrio original. Na montmorilonita e na vermiculita os cátions trocáveis, na maioria das vezes situam-se nas superfícies basais, ocorrendo à substituição dos íons alumínio ou silício do interior das estruturas.

É importante ressaltar ainda que, a quantidade de cátions trocáveis varia com o tipo de mineral argiloso, com a granulometria, com as concentrações, com a posição estrutural e natureza dos cátions, com a espécie de ânion ao qual se acham ligados os cátions nas soluções percolantes e com a temperatura.

A ação ***Coesiva*** ocorre em curto prazo e está fundamentada no caráter da imediata reação química imediata de floculação dos materiais envolvidos na mistura, impermeabilizando-os e produzindo compostos estáveis e permanentes.

A ação ***Pozolânica*** ocorre em longo prazo, está fundamentada no caráter pozolânico dos materiais estabilizados. Um material com características pozolônicas é aquele que em combinação com os aditivos e em presença da água, sob condições de temperatura ambiente, produz compostos estáveis com propriedades ligantes.

A reação pozolânica é lenta e só se completa alguns anos depois, requer temperatura acima de 21°C e o mínimo de algumas semanas para sua ocorrência. Em temperaturas maiores, a reação pode ser acelerada, ocasionando um possível ataque da sílica (quartzo) granular presente no solo. Além da temperatura, do grau de cristalinidade dos minerais e do teor de água existente no sistema, o tipo de argila, as condições climáticas e a compactação imediata aparecem como fatores que influenciam na mistura química do solo+aditivos.

A ***Carbonatação*** de origem diferente das anteriores, também é de ação imediata. É a combinação do aditivo líquido com o óxido ou hidróxido de cálcio ou de magnésio com o anidrido carbônico presente nas minúsculas bolhas de ar absorvidas e retiradas por ocasião da realização da mistura ou pela penetração do ar nos poros após a execução do solo estabilizado quimicamente.

A reação tende a refazer o carbonato original, visto que a decomposição pelo calor é uma reação reversível. Tem-se então:



Desse fato resulta a ação cimentante da cal, pois ela faz aparecer um novo corpo sólido que se entrelaça com os demais do solo e compacta o sistema. Com o aparecimento do carbonato, que é um cimento fraco surgem grãos de dimensões bem maiores, em face da diferença das estruturas cristalinas unitárias entre a do carbonato e a do primitivo hidróxido de cálcio. Esta reação complementa as ações da troca iônica e da ação pozolânica.

A estabilização com esses aditivos tem um caráter químico, por isso o conhecimento da natureza da *fração argila* passa a ter uma grande importância. Esses constituintes são responsáveis por vários aspectos do comportamento hídrico-mecânico do solo (plasticidade, expansão, contração, impermeabilidade, etc) e pela reatividade com os aditivos estabilizantes. Faltam estudos e pesquisas específicas de petrografia, de análise térmica diferencial, de microscopia eletrônica de varredura, de difratometria de raios-X e análises químicas e físicas, do solo natural e tratado quimicamente.

É importante se destacar que há um consenso entre os pesquisadores ao afirmarem que, de um modo geral, esses aditivos afetam favoravelmente certas propriedades dos solos com presença de argilas, o que se reflete em variações de certas características físicas. São elas:

a) Granulometria: a principal consequência da adição desses aditivos ao solo de natureza físico-química é a aglutinação e floculação por troca iônica, processada nas finíssimas partículas de argilas reativas, produzindo um solo mais grosseiro, mais impermeável e mais friável. Em geral, a influência dos aditivos na granulometria é tanto maior quanto mais fino e argiloso é o solo inicialmente, pois mais destacada é a alteração da textura com a agregação e floculação das partículas.

b) Alteração nos Limites de Atterberg: os aditivos quando misturados ao solo modifica o seu estado de plasticidade, variando o limite de plasticidade para alguns minerais argilosos (caso das montmorilonitas), devido à composição do cátion trocável, a presença de outros minerais não argilosos, às variações relativas à estrutura e à composição no interior das estruturas argilosas. Portanto, as montmorilonitas contendo sódio e cálcio, mostram índices conforme a abundância desses íons.

Nos minerais compostos de argilas, (excluindo-se a montmorilonita), outros fatores, tais como a presença de minerais não argilosos, ocasionam maiores variações nos limites de plasticidade do que a composição dos cátions trocáveis. Cita-se por exemplo que, a adição de sulfato de alumínio, em solos areno-argilosos com ou sem cátions trocáveis, pode aumentar o índice de plasticidade, tornando o solo portador de minerais sujeitos às variações do limite de plasticidade.

Quanto ao limite de liquidez dos solos de mesma fração argilosa pode este variar entre largos limites. Em escala decrescente de LL, alinha os minerais argilosos na seguinte ordem: montmorilonita (sódica ou lítica), montmorilonita (cálcica ou potássica), illita, caulinita (com cristalização incipiente ou fraca) e caulinita bem cristalizada. Tal como o limite de plasticidade, a adição dos aditivos ao solo eleva o limite de liquidez.

O índice de plasticidade é decorrente das mudanças anteriormente citadas. A adição dos aditivos aos solos argilosos faz decrescer o grau de plasticidade do solo, reduzindo, portanto, os defeitos para construção que os solos argilosos apresentam.

c) Alterações nas mudanças de volume, isto é, uma significativa consequência da adição da cal aos solos siltosos ou muito argilosos é a redução brusca das suas propriedades de expansão. As argilas transmitem ao volume dos solos uma importante instabilidade nos ciclos climáticos, das chuvas e das secas, o que atinge toda a espessura de suas camadas, devido a facilidade com que a água se movimenta nos poros do solo, pela força da gravidade e da capilaridade. Muitos especialistas comentam que a expansão é determinada por vários fatores, dos quais se destacam a percentagem de argila

presente, seus íons trocáveis, teor de eletrólito da fase líquida, a dispersão granulométrica dos grãos do solo, a distribuição e tamanho dos poros, a estrutura interna do solo, a quantidade de água circulante e a carga estática ou variável existente sobre o solo.

No sistema da estabilização química, por via líquida, a contração com a secagem (cura) do solo pode reduzir de modo significativo os vazios do solo, diminuindo a percolação da água livre. Nos solos tropicais intemperizados, tanto a escassez de argilosminerais expansivos como a estrutura cimentada por óxidos ou hidróxidos de ferro e alumínio limitam o fenômeno de expansão e retração.

Os aditivos tendem, pela floculação das partículas, a reduzir as mudanças de volume apresentadas pelos solos. De outro lado, quando utilizamos a cal tem maior influência nos solos que apresentam mudanças rápidas de volume de água. Destaca-se ainda que, a cal sozinha pode atuar desagregando alguns solos tropicais, principalmente os predominantemente arenosos.

d) Alteração na Acidez do Solo: quando a água circula pelos espaços intersuperficiais das partículas das misturas de solo estabilizado quimicamente, esta se enriquece gradualmente dos íons aí presentes, redistribuindo-os e, devido à adsorção, permanece retida, envolvendo as partículas minerais.

No complexo água-colóide-mineral do solo podem existir adsorvidos diferentes quantidades de cátions, isto é, H^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , entre outros. A soma total desses cátions adsorvidos pode atingir o máximo permitido pela capacidade de troca de cátions.

Quanto maior a quantidade de bases presentes, menor é a quantidade de hidrogênio adsorvido pelos colóides dos solos. Qualquer que seja a reação inicial do solo, processando-se a circulação de água, há a uma tendência natural a acidificações, visto que as bases, geralmente mais solúveis, são removidas e o hidrogênio toma seus lugares nas estruturas cristalinas ou nas micelas de natureza coloidal. Quanto mais úmido e quente o clima, mais rápido é o processo de acidificação natural do solo. O cátion Ca^{2+} ou Mg^{2+} , que se encontram normalmente nos solos, nesse tipo de clima tende a ser substituído rapidamente pelo íon H^+ proveniente do ácido carbônico que é extremamente ativo e resultante da dissolução do CO_2 atmosférico pelas águas de chuvas e pelas que circulam na superfície, encaminhadas ao solo por infiltração.

Inversamente, quando se incorpora os aditivos ao solo é permitida a substituição do H^+ pelos cátions Ca^{2+} ou Mg^{2+} , modificando-se gradativamente o pH de ácido para alcalino e, portanto, seus comportamentos físicos, físico-químicos e químicos. Nos solos tropicais ocorre ainda, a substituição do cátion Al^{3+} .

e) Alteração na Resistência: Os principais fatores que afetam a resistência da mistura de solo estabilizado quimicamente: as dosagens dos aditivos, o tipo de solo, a densidade, o tempo de cura e a qualidade dos materiais estabilizantes. Os ensaios e a prática mostram a melhoria das resistências dos solos com as adições dos aditivos qualquer que seja o método utilizado para as avaliações. Podemos afirmar que a resistência, de maneira geral, cresce com a percentagem dos reagentes (cal ou cimento), havendo uma tendência deste ser pequeno após certo teor do aditivo, entretanto tal fato depende do tempo de cura.

f) Densidade e Umidade Ótima: a compactação da mistura solo estabilizado quimicamente produz em geral, devido a atuação dos produtos na textura do solo, uma resultante de peso específico aparente diferente do correspondente ao solo natural. Os produtos tendem a afofar o solo, e por isso, reduzir a densidade a seco e o teor ótimo de umidade, resultando para condições idênticas de compactação essa diminuição alcançar valores de até 5%. Ensaios laboratoriais mostram, no entanto, que tal redução nem sempre ocorre.

Experimentos realizados em diversas universidades americanas demonstraram que a resistência aumenta à medida que a densidade diminui na mistura solo estabilizado porque há formação de novos compostos que tem propriedades físicas e químicas inteiramente diferentes das originais, proporcionando maior resistência que o solo não tratado, ainda que este se encontre mais densificado.

g) Tempo de Cura, Umidade e Coesão: diversos autores afirmam que a resistência da mistura solo estabilizado aumenta com o tempo, por forças das reações químicas e físico-químicas. Em geral, a resistência do solo estabilizado aumenta rapidamente no período inicial, no entanto, à medida que a cura progride, a velocidade de aumento torna-se cada vez menor. Este acréscimo lento é resultante das reações coesivas ou pozolánicas, que fazem com que, a resistência aumente, mesmo após alguns anos de idade. Vale ressaltar que, no campo e no laboratório, a resistência alcançada é, também, função das condições de umidade e de temperatura.

Em relação à durabilidade da mistura solo estabilizado quimicamente, comumente esta é função da duração do tempo de cura, ou seja, a durabilidade cresce com o tempo de cura.

h) Retenção de Água: Alguns especialistas estudaram o efeito dos aditivos nas propriedades de retenção de água nos solos, a partir da análise das curvas de sucção e observaram que a variação da capacidade de retenção de água devido à adição dos aditivos, aparentemente encontrava-se relacionado à natureza da fração argilosa. Ainda verificaram que as amostras com alta percentagem de caulinita mostraram apreciável aumento da capacidade de retenção de água, enquanto que amostras com predominância de illita apresentaram diminuição nesta capacidade.

Em relação a solos com predominância de argila montmorilonita, o reagente cal de origem cálcica fez diminuir a capacidade de retenção de água, enquanto que com o uso da cal dolomítica não se observou nenhuma influência em termos de capacidade de retenção de água. Também, em amostras com a presença de mais de um tipo de argilomineral, possivelmente devido ao equilíbrio de tendências contrárias, não ocorreu efeito significativo devido à adição do reagente cal ao solo.

As camadas estabilizadas com o aditivo líquido com a cal ou sulfato de alumínio formam barreira resistente à água, uma vez que impedem a penetração da água, quer por gravidade (de cima para baixo) quer por capilaridade (de baixo para cima). Sendo assim, após o endurecimento da camada tratada com esses aditivos, não ocorre perda de integridade ou amolecimento.

i) Compactação: Muitos pesquisadores observaram que igual compactação imediatamente e 24 horas após a mistura ocorreu diminuição da densidade e da resistência.

No entanto, não há consenso entre os pesquisadores, quanto à cura e compactação, principalmente em relação à ordem de realização destas. Alguns acham que deveria ocorrer um período de cura antes da compactação, recomendando ou não uma pré-compactação leve durante esse tempo. Todavia, seus idealizadores fazem restrições a essa prática, indicando que a cura deveria se processar no material já compactado, a não ser nos solos muito argilosos (terra roxa). A partir de estudos das características da compactação solo aditivado e da influência dos fatores que interferem na mesma (o teor de umidade, a temperatura, a energia de compactação, o efeito do tempo de espera entre a mistura e a compactação), concluíram que a compactação deve ser feita logo após a mistura para que não ocorra perda nos valores de resistência, devido à carbonatação.

Acrescentamos que a eficiência do aditivo líquido e dos reagentes como estabilizadores de solo depende da intensidade das reações relacionadas com a mineralogia do solo, do método de construção e da qualidade dos produtos utilizados.

ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS

Os solos argilosos são considerados na Engenharia Rodoviária como materiais problemáticos, tanto no que concerne a trabalhabilidade quanto ao seu comportamento.

Isto ocorre devido as suas características de expansão, contração e plasticidade, que se apresentam frequentemente elevadas, além de sua grande sensibilidade às variações de umidade.

A estabilização destes materiais possibilita utilizar solos locais, dispensando assim, os custos provenientes de distâncias de transporte elevadas.

Podemos dizer que a estabilização de um solo para serviços de pavimentação como uma modificação de suas propriedades geotécnicas por adição de outro material, seja ele composto por um ligante ou fração granulométrica que deverá ser intimamente incorporado ao solo, e uma subsequente compactação da mistura. Tal definição é bastante apropriada na medida em que se consideram dois aspectos: a presença de um ligante (aditivo líquido) ou correção granulométrica (reagentes cal ou cimento) e a necessidade de uma compactação adequada da mistura.

Esta consideração enfoca apenas a estabilização química do solo para os serviços de pavimentação.

O domínio das técnicas de estabilização pode conduzir a sensíveis reduções nos tempos de execução de obras, viabilizando a industrialização do processo construtivo, e conseqüentemente, propiciando uma economia substancial para o empreendimento.

As soluções para a estabilização química de solos para fins rodoviários foram bastante discutidas no meio rodoviário. Inicialmente foram estabelecidos princípios teóricos que procuravam explicar os respectivos mecanismos de atuação dos aditivos estabilizantes, mas muitos profissionais não entendiam seus princípios.

Inicialmente passa-se pelo processo de identificação das características dos solos, de forma a se considerar a adequabilidade e eficiência de cada proposta de estabilização, conjuntamente com a questão econômica. A análise do comportamento dos solos estabilizados requer, no entanto de uma análise detalhada no que se refere aos ensaios laboratoriais, do efeito da floculação, da ascensão capilar e da sucção no comportamento da mistura. É necessário compreender os mecanismos de reação nos solos para que se entenda o seu comportamento.

Descrição dos solos

A terminologia de Solos e Rochas, de acordo com as entidades normativas, estabelece que os solos sejam identificados por sua textura (composição granulométrica), plasticidade, consistência ou compacidade, citando-se outras propriedades que auxiliam sua identificação, como: estrutura, forma dos grãos, cor, cheiro, friabilidade, presença de outros materiais (conchas, materiais vegetais, micas, etc.).

Sob o ponto de vista de IDENTIFICAÇÃO, a textura, é uma das mais importantes propriedades dos solos, mesmo que não seja suficiente para definir e caracterizar o comportamento geral desses materiais.

Para fins de terminologia é, ainda, uma tradição a DIVISÃO DOS SOLOS, sob o ponto de vista exclusivamente textural, e frações diversas, cujos limites convencionais superiores e inferiores normativas, onde adotam a seguinte escala granulométrica, considerando as seguintes frações de solo:

Pedregulho: é a fração do solo que passa na peneira de (3") e é retida na peneira de 2,00mm (nº10);

Areia: é fração do solo que passa na peneira de 2,00mm (nº10) e é retida na peneira de 0,075mm (nº200);

Areia grossa: é a fração compreendida entre as peneiras de 2,0mm (nº10) e 0,42mm (nº40);

Areia fina: é a fração compreendida entre as peneiras de 0,42mm (nº40) e 0,075mm (nº200);

Silte: é a fração com tamanho de grãos entre a peneira de 0,075mm (nº200) e 0,005mm;

Argila: é a fração com tamanho de grãos abaixo de 0,005mm (argila coloidal é a fração com tamanho de grãos abaixo de 0,001mm).

Turfa: solo sem plasticidade, com grande percentagem de partículas fibrosas de material ao lado de matéria orgânica coloidal, marrom-escuro a preto, muito compressível e combustível quando seco;

Cascalho: solo com grande percentagem de pedregulho, podendo ter diferentes origens – fluvial, glacial e residual; o cascalho de origem fluvial é chamado comumente de seixo rolado;

Solo laterítico: é um solo que ocorre comumente sob a forma de crostas contínuas na forma de textura fina, mas pouco ou nada ativos. Suas cores variam do amarelo ao vermelho mais ou menos escuro e mesmo negro. Designações locais: piçarra, recife, tapiocanga e mocoioró;

Saibro: solo residual areno-argiloso, podendo conter pedregulhos, proveniente de alteração de rochas graníticas ou gnáissicas;

Topsoil: solo areno-siltoso, com pouca ou nenhuma argila, encontrado nas camadas superficiais de terrenos de pequena declividade, ou nas partes baixas de bacias hidrográficas;

Massapê: solos argilosos, de plasticidade, expansibilidade e contratibilidade elevadas, encontrado, principalmente, na bacia do Recôncavo Baiano. Suas características decorrem da presença da montmorilonita. No Paraná, materiais semelhantes são designados sabão-de-caboclo.

Classificação dos Solos

O solo, sendo material que ocorre na natureza nas mais diferentes formas, para ser utilizado como material de construção necessita ser classificado de modo que se possam formular métodos de projetos baseados em algumas propriedades de cada grupo.

A maneira mais simples de classificar um solo, objetivando sua aplicação em trabalhos de construção, é levar em conta a granulometria desse solo. Esse parâmetro, porém, não atende às finalidades decorrentes do uso do solo para pavimentação, pois não leva em conta, por exemplo, a plasticidade, fator de importância fundamental no estudo dos solos, quer como material de construção quer como material a compor as camadas do pavimento.

Deste modo foram desenvolvidos vários sistemas de classificação, cada adequado a uma utilização dos solos ou a métodos de projeto.

- Classificações Triangulares

Baseadas na granulometria do material de solo e apresentadas em forma de triângulos, nos quais são localizadas zonas identificadas com os diversos tipos.

- Classificação Unificada – USC

Idealizado pelo Prof. Artur Casagrande é uma classificação de solos em que se procura auxiliar a identificação de solos plásticos. Consiste em um diagrama cartesiano com limite de liquidez (LL) em abscissa e o índice de plasticidade (IP) em ordenadas.

- Classificação TRB- Transportation Research Board (antigo HRB)- Mais Usual

Os solos são reunidos em grupos e subgrupos, em função de sua granulometria, limites de consistência e do índice de grupo. Determina-se o grupo do solo, por processo de eliminação da esquerda para a direita, no quadro de classificação. O primeiro grupo a partir da esquerda, com o qual os valores do solo ensaiado coincidir, será a classificação correta.

Referente à granulometria, nos interessa a porcentagem que passa nas peneiras nº.10, 40 e 200.

Pela HRB, os solos são classificados em sete grupos: A-1; A-2; A-3; A-4; A-5; A-6 e A-7, sendo que o A-1; A-2 e o A-7 são subdivididos.

Os limites de separação entre os diversos fatores da classificação são os seguintes:

p = porcentagem que passa na peneira nº.200

$p \leq 35\%$ são solos A-1, A-2 e A-3;

$p \geq 36\%$ são solos A-4, A-5, A-6 e A-7.

LL = limite de liquidez em %

$LL \leq 40\%$ são os solos A-1, A-2-4, A-2-6, A-3, A-4 e A-6;

$LL \geq 41\%$ são solos A-2-5, A-2-7, A-5 e A-7.

IP = índice de plasticidade (IP = LL – LP)

$IP \leq 6$ são solos A-1

$IP \leq 10$ são solos A-2-4, A-2-5, A-3, A-4 e A-5;

$IP \geq 11$ são os solos A-2-6, A-2-7, A-6 e A-7.

$LL - 30 > IP$ solo A-7-5

$LL - 30 < IP$ solo A-7-6

Os solos A-1-a, A-1-b e A-3 tem a classificação sempre subordinada aos resultados do ensaio de granulometria, levando-se em conta as porcentagens que passam nas peneiras nº. 10, 40 e 200.

Solos granulares ou de granulação grossa são os que contêm 35% ou menos de material passando na peneira nº. 200.

A seguir, são listadas as características dos solos de cada um dos grupos e subgrupos deste sistema de classificação, relacionadas à sua utilização em pavimentação.

Grupo A-1: O material típico deste grupo é constituído de mistura bem graduada de fragmentos de pedra ou pedregulhos, areia grossa, areia fina e um aglutinante de solo não plástico ou fracamente plástico. No entanto, este grupo inclui também fragmentos de pedra, pedregulho, areia grossa, cinzas vulcânicas, etc., que não contêm aglutinantes de solo.

- **Subgrupo A-1-a:** inclui os materiais contendo, principalmente, fragmentos de pedra ou pedregulho, com ou sem material fino bem graduado, funcionando como aglutinante.
- **Subgrupo A-1-b:** inclui os materiais constituídos, principalmente, de areia grossa, com ou sem aglutinante de solo bem graduado.

Grupo A-2: Este grupo inclui grande variedade de materiais que se situam entre os grupos A-1 e A-3 e também entre os materiais constituídos de mistura silte-argila dos grupos A-4, A-5, A-6 e A-7. Inclui todos os solos com 35% ou menos passando na peneira nº. 200, mas que não podem ser classificados como A-1 ou A-3, devido ao teor de finos que contêm, ou a plasticidade, ou ambos excedendo os limites estabelecidos para os citados grupos.

- **Subgrupos A-2-4 e A-2-5:** Incluem solo contendo 35% ou menos, passando na peneira nº.200, com uma porção menor retida na peneira nº.40, possuindo as características dos grupos A-4 ou A-5. Estes grupos abrangem os materiais tais como pedregulho e areia grossa, em que o teor de silte e o índice de plasticidade ultrapassam os limites estabelecidos para o Grupo A-1, e ainda areia fina com silte não plástico excedendo os limites do Grupo A-3.
- **Subgrupos A-2-6 e A-2-7:** Incluem solos semelhantes aos descritos nos subgrupos A-2-4 e A-2-5, exceção feita da porção de finos que contem argila plástica com características dos grupos A-6 ou A-7. Os efeitos combinados dos índices de plasticidade maiores que 10 e percentagem passando na peneira nº.200, maiores que 15, estão refletidos nos valores dos índices do grupo de 0 a 4.

Grupo A-3: O material típico deste grupo é areia de praia ou de deserto, sem silte ou argila, ou possuindo pequena quantidade de silte não plástico. O grupo inclui também misturas de areia fina mal graduada e quantidades limitadas de areia grossa e pedregulho depositado pelas correntes.

Grupo A-4: O solo típico deste grupo é siltoso não plástico, ou moderadamente plástico, possuindo, geralmente, 5% ou mais passando na peneira nº. 200. Inclui também misturas de solo fino siltoso com até 64% de areia e pedregulho retidos na peneira nº.200. Os valores dos índices do grupo vão de 1 a 8, as percentagens crescentes de material grosso, dando origem a valores decrescentes para os índices de grupo.

Grupo A-5: O solo típico deste grupo é semelhante ao que foi descrito no A-4, exceto que ele é, geralmente, de caráter diatomáceo ou micáceo, altamente elástico, conforme indica seu elevado limite

de liquidez. Os valores dos índices do grupo vão de 1 a 12; esses valores crescentes revelam o efeito combinado do aumento dos limites de liquidez e das percentagens decrescentes de material grosso.

Grupo A-6: O solo deste grupo é argiloso, plástico, tendo, geralmente 75% ou mais de material passando na peneira nº.200. O grupo inclui também misturas de solos finos argilosos, podendo conter até 64% de areia e pedregulho retidos na peneira nº.200. Os solos deste grupo comumente sofrem elevada mudança de volume entre os estados seco e úmido. Os valores dos índices do grupo vão de 1 a 16, esses valores crescentes mostram o efeito combinado do aumento dos índices de plasticidade e diminuição dos materiais grossos.

Grupo A-7: O solo típico deste grupo é semelhante ao descrito no grupo A-6, com a diferença que possui as características de alto limite de liquidez do grupo A-5, podendo ainda ser elástico e estar sujeito a elevada mudança de volume, principalmente se houver presença do argilo-mineral mica. Os valores dos índices do grupo vão de 1 a 20; este aumento indica o efeito combinado de crescimento dos limites de liquidez e dos índices de plasticidade, bem como a diminuição dos materiais grossos.

- **Subgrupo A-7-5:** Encerra materiais com índice de plasticidade moderado em relação ao limite de liquidez, podendo ser altamente elástico e sujeito a elevadas mudanças de volume. Tem moderado índice de plasticidade.
- **Subgrupo A-7-6:** Inclui materiais com elevados índices de plasticidade em relação aos limites de liquidez, estando sujeitos a elevadas mudanças de volume.

Engº Helio Rubens Vieira Bussamra