

TEXTO COMPLEMENTAR

ESTABILIZAÇÃO COM ADITIVOS

Quando não é possível a dosagem de frações nas proporções requeridas pelas curvas de Talbot – pela falta, na região, de um dos agregados – recorre-se, para estabilizar os solos, à adição de um ingrediente estranho que lhe confira resistência permanente. Entre tais ingredientes encontram-se: asfaltos e betumes, o cimento Portland, a cal e uma série de produtos químicos e industrializados. Em geral eles podem conferir resistência ao solo, ou por meio de cimentação dos grãos entre si, ou por meio de aumento ou preservações das forças coloidais que unem os grãos entre si.

Convém deixar claro que um aditivo estabilizador só poderá ganhar utilidade prática se ele for suficientemente barato. Entretanto, o conceito de barato é relativo. É possível que, nos pavimentos rodoviários só seja economicamente possível o emprego de aditivos que sejam produzidos industrialmente em larga escala – como, por exemplo, o cimento Portland – ou subprodutos industriais de preço baixo. Porém, se a estabilização está ligada à solução de um problema proveniente e localizado é evidente que convém, mesmo economicamente, a utilização de produtos complexos e caros.

I. ESTABILIZAÇÃO COM CAL

Na estabilização de solos deve-se utilizar, preferencialmente, a cal cálcica com teor de Ca(OH)_2 solúvel maior do que 65%, embora as especificações aceitem um teor mínimo de 50%. Desta forma, devem-se ensaiar as cales antes que cheguem à obra. Os ensaios devem ser realizados por um laboratorista químico experimentado, determinando o teor, em termos de Ca(OH)_2 solúvel em sacarose (NBR 6473), o grau de carbonatação (efervescência com HCl) e resíduo insolúvel (ataque pelo HCl).

Tanto a cal virgem com a cal hidratada, podem ser utilizadas na estabilização de solos. Prefere-se a cal extinta por ser menos insalubre à saúde dos operários que a manuseiam.

Uma das maneiras de se avaliar se o solo se presta, ou não, à estabilização com cal, é através de ensaios rodoviários convencionais (principalmente ISC), os quais demonstrarão se há melhoria que justifique o emprego da cal.

Normalmente, os solos argilosos apresentam melhores resultados com a cal do que outros solos, embora os siltosos, alguns arenosos, argilo-arenosos ou pedregulhos-plásticos de saibreiras, tenham sua resistência razoavelmente aumentada com a adição de cal.

De outra forma, a utilização de pedregulhos ou cascalhos, contendo finos plásticos em quantidade adequada para reagir com a cal, em grande número de casos, apresenta resistência maior do que as misturas argila-cal.

• REAÇÕES

Diversos tipos de reações químicas surgem quando a cal é misturada com o solo úmido. A seguir enumeramos algumas, fruto da compilação e comentários de vários autores:

a) AGLOMERAÇÃO

Quando a cal e um solo coesivo úmido são misturados intimamente e deixados curar ao ar livre por um período de tempo, o produto torna-se mais trabalhável e com menor plasticidade, devido às trocas iônicas que se processam.

Normalmente, os solos com limite de liquidez maior do que 30% e índice de plasticidade maior do que 12% opõem grande resistência à pulverização para mistura com outros materiais. Porém, se a cal for adicionada, antes, a esses solos plásticos, a pulverização será mais eficiente, devido à redução de plasticidade que ocorrerá na mistura.

b) AÇÃO CIMENTANTE POZOLÂNICA

Trata-se de uma reação pouco compreendida no âmbito rodoviário. O composto de cálcio reage com alguns minerais do solo para formar novas estruturas. Esta reação tende a transformar as partículas finas minerais do solo, originando compostos ligantes semelhantes àqueles produzidos pela ação do cimento Portland.

Para que ocorram reações importantes, os solos devem apresentar certa capacidade “pozolânica” que, em geral, é função da natureza da fração argilosa (mineralogia, grau de cristalinidade dos minerais e produtos amorfos presentes).

c) CARBONATAÇÃO

A terceira reação importante da cal refere-se à absorção de dióxido de carbono (CO_2), do ar. Trata-se de uma reação inversa à da produção da cal, pois se produz carbonato de cálcio, prejudicial à melhoria pretendida quando da adição de cal ao solo. A carbonatação é prejudicial por diminuir o composto que realmente reage com o solo.

• PROPRIEDADES

A reação química entre o solo e a cal afeta certas propriedades físicas dos solos e, embora haja carência de dados nesse sentido, concorda-se, de um modo geral, com o seguinte:

a) AGLOMERAÇÃO DOS GRÃOS FINOS

A primeira mudança física que se dá nos solos coesivos é a aglomeração ou floculação das partículas de argila, produzindo um solo mais “granular”. As argilas, finas, tendem a reagir mais intensamente com a cal do que as partículas individuais maiores, de material semelhante à areia. Daí que os solos argilosos tendem a se aglomerar mais do que os siltosos ou arenosos.

b) PLASTICIDADE DO SOLO

O gradiente de redução do IP de um solo, após a adição de cal, depende principalmente da plasticidade do mesmo. A tendência geral é que, quanto mais plástico o material, maior será a redução proporcional do IP e, quanto menos plástico, menor será a redução proporcional do mesmo.

Além do tipo de solo e do teor utilizado na mistura, influi também na variação do IP o tempo de cura e o tipo da cal. Até os 2 primeiros dias de cura se processa sua redução mais significativa, sendo que, após esse prazo, muito pouco se notará nessa redução.

c) MUDANÇA DE VOLUME

A cal possui a capacidade de reduzir a variação volumétrica que ocorre nos solos, face à variação de umidade. Essa influência é tanto maior, quanto mais sensível à água for o solo.

d) COMPACTAÇÃO E TEOR ÓTIMO DE UMIDADE

No ensaio de compactação, misturas do solo-cal, normalmente, apresentam uma densidade menor do que a do solo original sem cal. Com o aumento do teor de cal, a densidade tende a decrescer mais ainda. Em contrapartida, o teor ótimo de umidade tende a aumentar. Este fenômeno, entretanto, não implica em que a resistência das misturas solo-cal diminua.

e) RESISTÊNCIA

Existe um teor de cal, que pode ser chamado de “ótimo”, que fornece a resistência desejada pelo projetista, face às exigências previstas. Alguns fatores influenciam sobremaneira a resistência das misturas de solo-cal: teor de cal, tipo de cal, tipo de solo, densidade obtida na mistura, tempo e tipo de cura. Desta forma, há necessidade de se proceder a uma adequada bateria de ensaios.

II. ESTABILIZAÇÃO COM CIMENTO

A incorporação do cimento tem por objetivo, no caso, a melhoria do solo, modificando os seus limites de consistência, a sua sensibilidade à água e a sua resistência ao cisalhamento.

Na seqüência, descrevem-se as exigências tradicionais em uma dosagem de solo melhorado com cimento:

Como sub-base, o material a ser modificado pelo cimento, deverá apresentar:

- porcentagem passando na peneira nº 200, máxima..... 50%.
- limite de liquidez, máximo 40%.
- índice de plasticidade, máximo 18%.

A mistura pós-compactada deverá possuir:

- índice de suporte Califórnia, na energia intermediária, mínimo..... 30%.
- expansão volumétrica, máxima 1%.

Como camada de base, exige-se que a mistura compactada apresente não menos do que 80% para ISC e não mais do que 0,5% para expansão volumétrica. Fixa-se ainda em 25% e 6% os valores máximos para, respectivamente, o LL e o IP da mistura.

A lembrança desses dados e exigências tradicionais devem, em conjunto com a análise de RCS, definir o melhor teor a ser misturado, desde que promovendo uma resistência à compressão simples mínima de 1,2 MPa, para sub-base, e 1,5 MPa, para base.

• ETAPAS DA ESTABILIZAÇÃO COM CIMENTO

As etapas de dosagem de solo-cimento a seguir apresentadas aplicam-se a solos que se enquadrem nas classificações A1, A2, A3 e A4, que apresentem:

- 100% de material passando na peneira de abertura de 76 mm;
- no máximo 45% de material retido na peneira de abertura de 4,8mm.

a) ENSAIOS PRELIMINARES NO SOLO

Preliminarmente, procede-se à determinação de algumas características dos materiais, realizando-se os seguintes ensaios:

- Granulometria
- Limite de liquidez
- Limite de plasticidade
- Compactação
- ISC
- Expansão

b) SELEÇÃO DO TEOR DE CIMENTO

A tabela a seguir sugere os teores de cimento, em massa, para o ensaio de compactação do solo-cimento, conforme a classificação:

CLASSIFICAÇÃO HRB	TEOR DE CIMENTO SUGERIDO EM MASSA (%)
A1 – a	5
A1 –b	6
A2	7
A3	9
A4	10

(1) É a relação percentual entre a massa do cimento Portland e a massa do solo seco

c) ENSAIO DE COMPACTAÇÃO

A seguir executa-se o ensaio de compactação, usando o teor de cimento indicado, e anotam-se os valores da umidade ótima (h_o) e da massa específica aparente seca máxima ($\gamma_{smáx}$). O ensaio é executado de acordo com a MB-3359 – Solo-Cimento: Ensaio de Compactação

Com o emprego da figura 1, para materiais com 100% passando na peneira nº 4 ou da figura 2, para materiais que apresentam fração retida na retida na peneira nº 4, estimar o teor de cimento provável para o solo em questão. Para o ensaio à compressão simples, serão definidos 7 (sete) teores de cimento, variando entre si de 0,5%, sendo 3 (três) deles abaixo do teor provável, 3 (três) acima deste teor e o próprio teor provável.

d) MOLDAGEM E CURA DOS CORPOS DE PROVA

Para cada teor selecionado, moldar a umidade ótima pré-definida e deixar curar por 7 dias, no mínimo três corpos de prova cilíndricos, de acordo com o método de ensaio MB-3360 – Solo-cimento: Moldagem e Cura de Corpos de Prova Cilíndricos.

A cura será em câmara úmida, à temperatura de $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa do ar não inferior a 95%.

e) ENSAIO DE COMPRESSÃO

Decorrido o período de cura, os corpos de prova deverão ser imersos por 4 horas em água, à temperatura ambiente, e, depois de secos superficialmente, submetidos ao ensaio de compressão, de acordo com o método de ensaio MB-3361 – Solo-cimento: Ensaio de Compressão Simples de Corpo de Prova Cilíndricos.

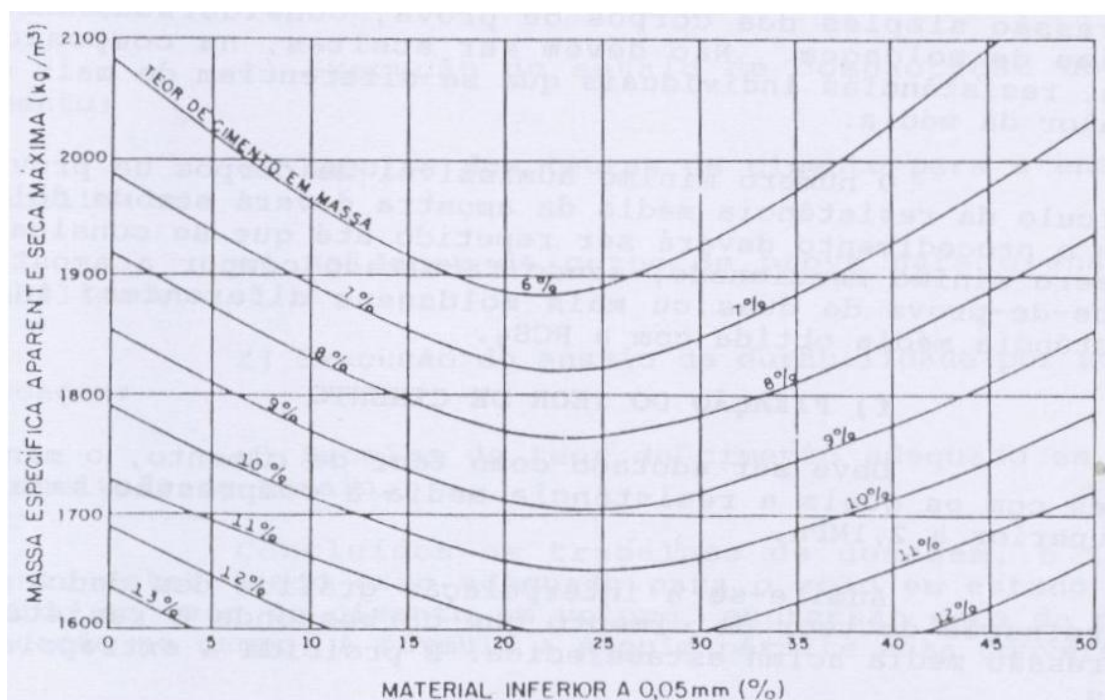


Figura 1 – Teor de cimento para o ensaio à compressão simples (100% PASS. N°4)

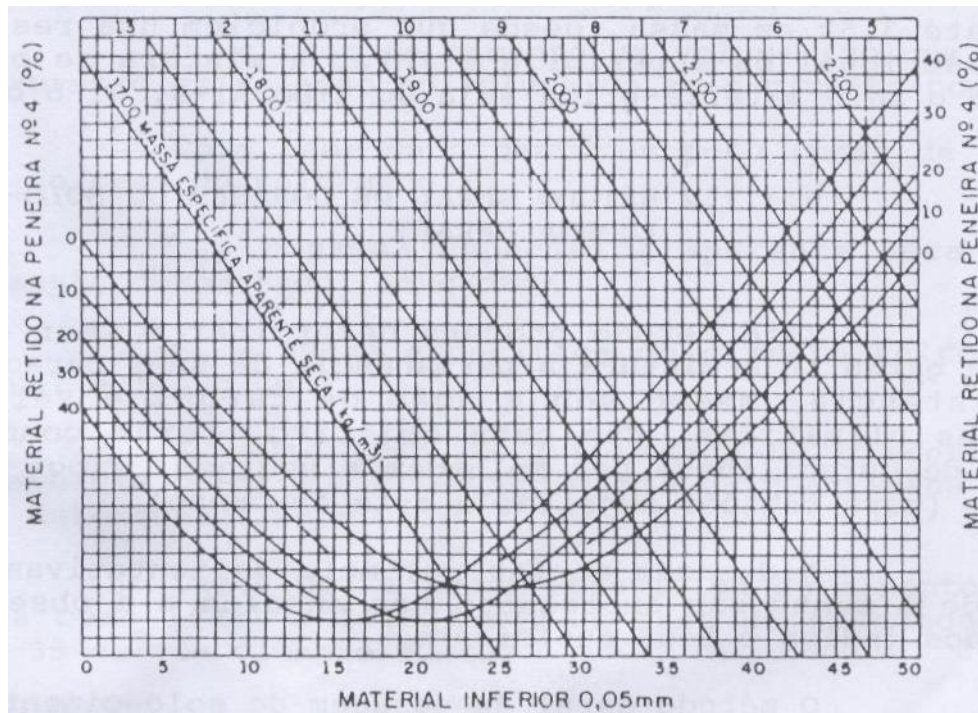


Figura 2 – Teor de cimento para o ensaio à compressão simples (com material retido Nº 4)

O número mínimo admissível de corpos de prova para o cálculo da resistência média da amostra deverá ser de dois, sem o que o procedimento deverá ser repetido até que se consiga obter o número mínimo mencionado, sendo facultado compor a amostra com corpos-de-prova de duas ou mais moldagens diferentes; anotar a resistência média obtida com a RCS_7 .

f) FIXAÇÃO DO TEOR DE CIMENTO

Deve ser adotado como teor de cimento, o menor dos teores com os quais a resistência média à compressão seja igual ou superior a 2,1 MPa.

Admite-se a interpolação gráfica dos dados para a determinação do teor de cimento que corresponda à resistência à compressão média acima estabelecida. É proibida a extrapolação de dados.

O teor mínimo de cimento em massa recomendado é de 5%.

Excepcionalmente, poderão ser empregados teores de até 3,5% em massa, desde que propiciem uma resistência à compressão igual ou superior a 2,1 MPa, a mistura se processe em usina, e o solo matéria-prima seja do tipo A1-a, A1-b, ou A-2-4.

g) CONVERSÃO DE TEOR DE CIMENTO EM PESO PARA VOLUME

Concluídos os trabalhos de dosagem, o teor de cimento determinado como adequado para o solo em estudo é convertido em teor de cimento em volume, expressão esta de prática aplicação no campo. A fórmula a seguir permite esta conversão:

$$C_v = \frac{100C_p}{100 + C_p} \times \frac{\gamma_{sc}}{\gamma_c}$$

Sendo:

C_v = teor de cimento em volume (volume de cimento solto expresso em relação ao volume do solo-cimento compactado);

C_p = teor de cimento em peso (peso de cimento em relação ao peso do solo seco);

γ_{sc} = massa específica aparente seca máxima do solo-cimento compactado, em g/dm³

γ_c = massa específica do cimento solto, admitida como igual a 1430 g/dm³

A designação da quantidade de cimento pelo seu teor em volume permite a obtenção direta da quantidade necessária para um determinado serviço.

Desde que a massa específica de cimento solto foi admitida como igual a 1430 g/dm³, um saco de 50 Kg possui praticamente 35 dm³ de cimento solto.

• EXEMPLO

Base de solo-cimento com 7% de cimento em peso.

O teor de cimento apresentado é em peso, devendo-se adequá-lo para o teor em volume, através da expressão abaixo, já definida anteriormente:

$$C_v = \frac{100C_p}{100 + C_p} \times \frac{\gamma_{sc}}{\gamma_c}$$

Supondo: $\gamma_{sc} = 1900$ g/dm³ e $\gamma_c = 1430$ g/dm³, tem-se:

$$C_v = \frac{100 \times 7}{100 + 7} \times \frac{1900}{1430} = 8,70\% , \text{ em volume}$$

III. ESTABILIZAÇÃO COM MISTURA DE CAL E CINZAS VOLANTES (FLY ASH)

Consiste numa mistura íntima de solo, cal e cinzas volantes (*fly ash*) e água e pode ser utilizada para construção de camadas estabilizantes de reforço, sub-bases e base e melhoria dos subleitos. Os processos construtivos são os mesmos descritos para o caso do solo-cal, intervindo apenas um terceiro material, o *fly ash*. Aplica-se o *fly ash* quando o solo não tem a pozolana necessária para evitar as reações que se processam quando se mistura a cal a um solo.

IV. ESTABILIZAÇÃO COM CLORETO DE CÁLCIO

O cloreto cálcio, cuja fórmula química é CaCl₂, apresenta um peso específico a 25°C de 2,152 Kg/dm³, é higroscópico e deliçescente, apresenta-se para uso na estabilização em palhetas de cor branca, condicionadas em sacos de 50 Kg ou tambores de 300 Kg, ambos hermeticamente fechados. Quando condicionado em sacos deve-se ter cuidados especiais para

conservá-lo, armazenado em estrado de madeira em lugar seco. Empregado na estrada, age como um redutor de pó e como consolidante.

No primeiro caso, quando distribuído na superfície da estrada, tem a propriedade de atrair avidamente a umidade atmosférica, dissolvendo-se na água absorvida e transformando-se numa solução salina concentrada; a tensão do vapor desta solução é sempre inferior à tensão máxima do vapor d'água e penetra no revestimento da rodovia. A absorção da umidade prossegue até que a tensão do vapor da solução e a tensão do vapor d'água permaneçam em equilíbrio. Isto se dá nos períodos de seca, quando baixa o teor de umidade do ar, havendo então evaporação parcial da solução do CaCl_2 , cessando o processo de troca, pois haverá o equilíbrio referido.

No segundo caso, como consolidante, o CaCl_2 aumenta a tensão superficial das películas de água que envolvem os grãos do revestimento e pela ação dos rolos compressores (de preferência de pneu), ou pelo próprio tráfego uma compactação, com aumento da densidade, que será maior que a do solo sem tratamento, conseguindo-se assim um solo mais estável e sem poeira. Não haverá lama por ocasião das chuvas, nem poeira no tempo seco.

V. ESTABILIZAÇÃO COM SULFONATO DE LIGNINA

O sulfonato de lignina é um subproduto químico resultante do despolpamento da madeira.

Quando se aplica a lignina de maneira apropriada nas estradas encascalhadas e poeirentas, os finos do solo são aglutinados de tal modo que formam uma argamassa e mantêm a superfície da estrada sem desagregação, eliminando a poeira. Experiências levadas a efeito durante vários anos em diversos Estados da América do Norte, como no Estado de Wisconsin, mostraram que se obtêm bons resultados quando se mistura a lignina com estradas de terra contendo pedregulhos, areias e argila.

VI. ESTABILIZAÇÃO COM AÇÃO IMPERMEABILIZANTE

Consiste na mistura de solos pulverizados (argila, silte e areia) de jazidas próximas do local de trabalho, com água e com material betuminoso, com a finalidade de alterar ou melhorar as propriedades dos solos de modo que apresentem características para funcionarem com material estabilizado para base ou sub-base, impermeabilizando o solo e aumentando o seu valor de suporte.

Os produtos betuminosos mais usados são:

- 1) Emulsões asfálticas de ruptura lenta;
- 2) *Cut-Backs*: cura rápida e média
- 3) Asfalto Líquido
- 4) Alcatrões

Quando se emprega o alcatrão, maiores cuidados devem ser tomados.

Não é muito conveniente o emprego deste tipo de estabilização em climas frios ou úmidos, devido ao fato de que o teor de água dos solos coesivos é muito alto durante uma grande parte do ano, maior do que o teor ótimo, resultando que a adição de mais um fluido (betume) diminuirá a resistência do solo. O mesmo não acontece em climas quentes onde o teor de água do solo é, em geral, baixo.

O material betuminoso, misturado com o solo, tem uma ação ligante, ou uma ação de impermeabilizante, ou as duas ao mesmo tempo.

Os solos empregados para este gênero de estabilização devem ter a seguinte granulometria:

Peneiras	% que passam
Nº 4	50
Nº 40	35 - 100
Nº 200	10 - 50

O diâmetro máximo das partículas do solo não deve ser maior que 1/3 da espessura da base compactada.

O material que passa na peneira 40 deverá ter um limite de liquidez < 40 e um índice de plasticidade < 18.

A água, que será usada, deve ser limpa, clara e livre de impurezas, sais, óleos, ácidos, matéria vegetal, etc.

A quantidade de betume necessária varia em torno de 4% a 6% em peso do solo seco, sendo função da quantidade de argila, silte, areia, vazios e densidade do solo. Quanto mais fino o solo (argiloso) maior será a quantidade de betume usado, porém um excesso de betume, isto é, além do necessário para encher os vazios do solo compactado na densidade máxima obtida em laboratório, causará uma diminuição na estabilidade, pois o betume passará a agir como lubrificante.