

## 2.1 INTRODUÇÃO

O solo natural constitui simultaneamente um material complexo e variável de acordo com a sua localização. Contudo, devido à sua universalidade e baixo custo, apresenta normalmente uma grande utilidade enquanto material de engenharia. Não é porém anormal que o solo de um determinado local não cumpra, total ou parcialmente, os requisitos necessários. Terá então de ser tomada uma decisão relativa à solução mais indicada para cada caso, e que irá geralmente contemplar uma das seguintes hipóteses:

1. Aceitar o material original e ajustar o projecto às restrições por ele impostas;
2. Remover o material do seu local original e substituí-lo por material de qualidade superior;
3. Alterar as propriedades do solo existente de forma a criar um material capaz de responder às necessidades da tarefa prevista.

Esta última possibilidade, a alteração das propriedades do solo para possibilitar a sua utilização como material de engenharia, é normalmente designada por ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS.

As alterações às propriedades de um solo podem ser de ordem química, física e biológica. Contudo, devido à grande variabilidade dos solos nenhum método será bem sucedido em mais do que alguns tipos de solos. De facto, visto que as características de um solo se alteram em intervalos de alguns metros, a escolha de um método de estabilização é normalmente condicionada pelo número e tipo de solos sobre os quais este provou ter uma acção efectiva. Deve também ser notado que a estabilização não é necessariamente um processo infalível através do qual toda e qualquer propriedade do solo é alterada para melhor. Uma aplicação correcta de qualquer método exige assim a identificação clara de quais as propriedades do solo que se pretendem melhorar.

A resistência dos solos a uma determinada solicitação, além de variar com as características intrínsecas desses solos, varia também com o estado de tensão instalado antes da solicitação e com o teor em água. Sendo assim, torna-se claro que estabilizar um solo em que o estado de tensão é constante e a variação de humidade é reduzida, como por exemplo no interior duma barragem de terra ou sob uma fundação profunda, é bem diferente de estabilizar os terrenos superficiais duma encosta onde a amplitude de variação da

humidade é considerável, ou ainda de estabilizar os solos dum pavimento rodoviário onde quer o estado de tensão quer a humidade apresentam significativas variações. Segundo Nascimento (1970), é precisamente na pavimentação de estradas e aeródromos que a estabilidade de um solo é mais solicitada, visto que a tensão transmitida pode ir desde valores próximos de zero até dezenas de kPa, enquanto o grau de saturação pode variar entre 0 e 100%. Outro factor importante é a variação do estado de tensão devido às variações de humidade, que em solos como os das superfícies das encostas, em que as tensões permanentes devidas ao peso próprio são muito pequenas, pode tornar instável toda uma faixa de solo, originando os conhecidos fenómenos de fluimento sazonal (Nascimento, 1970).

Fundações superficiais de pequenas estruturas também podem ser afectadas por estas variações de humidade no solo, mas é contudo em pavimentos rodoviários que a estabilização dos solos requer maiores cuidados. Para o projectista de vias de comunicação rodoviárias a resistência do solo não é condição suficiente para garantir uma boa estabilização, visto que por exemplo ao compactar um solo expansivo aumenta-se a sua resistência mas em contacto com a água este poderá absorvê-la e expandir, diminuindo novamente a resistência.

Contudo, existem autores que consideram determinados tratamentos como métodos de estabilização, apesar de estes não promoverem a diminuição da susceptibilidade dos solos às variações de humidade, tendo efeito apenas no aumento da resistência. Por exemplo Lamb (1960, in Nascimento, 1970) considera que os seguintes tratamentos são estabilizantes: compactação, consolidação por sobrecargas, aceleração da consolidação por drenagem vertical, congelação, electro-osmose, etc. Ora, nenhum destes processos seria considerado como estabilizante na execução de um pavimento rodoviário. Isto porque a estabilização de solos na construção de estradas e aeródromos visa tornar o solo intrinsecamente estável, independentemente do estado de tensão a que está submetido, sendo portanto necessário modificar as suas características naturais. Nascimento (1970) considera assim que o referido termo faria mais sentido quando utilizado para classificar a estabilização geral da obra em que o solo está integrado, como no caso dum talude, dum túnel, dum fundação, etc.

## **2.2 ALTERAÇÃO DAS PROPRIEDADES DOS SOLOS ATRAVÉS DA ESTABILIZAÇÃO**

As propriedades principais de um solo com que o engenheiro rodoviário se preocupa são, segundo Ingles e Metcalf (1972), a manutenção do volume ou controle da expansibilidade, a resistência, a durabilidade dessa resistência e a permeabilidade. A estabilização deve ainda ser pensada não apenas em termos de correção às propriedades naturais mas também em termos de medidas preventivas contra condições adversas desenvolvidas quer durante a construção quer durante a vida útil da obra.

### **2.2.1 CONTROLE DA EXPANSIBILIDADE**

Muitos solos argilosos aumentam e diminuem de volume com as variações sazonais do seu teor de humidade. Estas variações de volume podem contudo não coincidir com as alturas de máxima precipitação ou insolação, uma vez que em solos de baixa permeabilidade a velocidade de percolação da água pode ser substancialmente reduzida. Notar que as variações de volume referidas devem-se apenas à alteração do teor de humidade, e só mantendo constante a quantidade de água presente no solo é que é possível evitar alterações ao seu volume inicial.

A magnitude dos movimentos da água só deve ser medida no terreno (Ingles e Metcalf, 1972), porque as condições de permeabilidade duma amostra laboratorial dificilmente serão semelhantes às do solo *in situ*.

As soluções tradicionais para controlar a variação de volume dum solo consistem no rebaixamento do nível freático; na colocação de sobrecargas temporárias para acelerar a consolidação; na utilização de geomembranas; e no posicionamento das fundações sobre estratos com reduzidas variações do teor em água. Os métodos alternativos consistem na transformação do solo inicial num solo tipicamente granular ou no retardar do avanço da água dentro do solo.

Quando apenas a superfície do solo é estabilizada (15 a 30 cm) é natural que variações de volume possam ocorrer abaixo desse estrato. Contudo, tais movimentos poderão ser tolerados desde que a camada estabilizada os acompanhe de forma uniforme, evitando assim os assentamentos diferenciais que normalmente caracterizam a superfície do solo (Ingles e Metcalf, 1972).

Não é possível transformar um estrato profundo de argila numa massa rígida através de jet-grouting devido ao baixo valor da permeabilidade que provavelmente se verifica a tais profundidades. Sendo assim, o único meio de estabilizar solos argilosos profundos será através de métodos químicos ou térmicos.

Embora a diminuição do avanço da água no solo possa ser obtida de várias formas, não deve ser esquecido o facto de que, exceptuando o recurso a geomembranas, não é possível impedir completamente a circulação de água. Isto verifica-se mesmo quando se procede a fortes compactações, que constitui o mais divulgado método para retardar a percolação da água. A compactação diminui de facto a permeabilidade de um solo, podendo constituir uma alternativa pragmática ao uso de geomembranas não só porque se trata de um método de fácil aplicação como também porque a geomembrana tem de isolar completamente toda a área, sob pena de o efeito produzido não ser mais do que um simples aumento do percurso a efectuar pela água. Além disso, a resistência de materiais detríticos, como os solos, é directamente proporcional à sua compactidade, a não ser que o aumento dessa compactidade dê origem a excessos de pressão neutra.

O ensaio edométrico demonstra bem esta correlação entre resistência e índice de vazios ( $e$ ), e uma vez que este índice depende da tensão de consolidação ( $\sigma$ ), este ensaio demonstra também a correlação existente entre esta tensão e a resistência. Para tensões superiores à tensão de pré-consolidação ( $\sigma_p$ ) o índice de vazios decresce linearmente com o logaritmo da tensão de consolidação. Esse decréscimo é indicado pelo índice de compressibilidade ( $C_c$ ):

$$C_c = (-\Delta e) / (\log \sigma - \log \sigma_o)$$

Nas areias este índice é muito baixo, o que significa que é reduzido o efeito de diminuição da compressibilidade com o aumento da tensão de consolidação. Já nas argilas tende a assumir um valor elevado, traduzindo assim uma maior influencia na redução da compressibilidade deste tipo de solo. O efeito contrário ao da diminuição da compressibilidade com o aumento da carga é definido no ramo de descarga do ensaio edométrico e designa-se por índice de expansibilidade ( $C_e$ ). Quanto maior for este índice, maior será a expansão do solo devido à descompressão. Mais uma vez se verifica que enquanto nas areias o efeito da expansibilidade é normalmente desprezável, nas argilas obriga muitas vezes a cuidados especiais.

Embora seja possível atingir a completa restrição à variação de volume de um solo argiloso, tal é em muitos casos desnecessário, desde que a estabilização seja utilizada para controlar parte das variações sazonais de humidade no solo. Para além da aplicação de cargas de modo a restringir a expansão não há grandes alternativas à estabilização como forma de evitar os efeitos nefastos da variação da quantidade de água num solo expansivo.

A problemática da expansibilidade assume especial importância em obras rodoviárias, porque certas zonas do pavimento estão quase completamente descomprimidas nos períodos que decorrem entre a passagem dos veículos. Esses períodos serão muito curtos durante as horas de maior tráfego mas podem ser bastante longos, sobretudo em estradas de menor circulação ou em zonas do pavimento menos utilizadas. Sendo assim, estão criadas as condições ideais para a expansão do solo por efeito da respectiva sobrecompactação, especialmente durante períodos de maior precipitação, em que existirá mais água sobre a plataforma em condições de poder ser absorvida pelo terreno (Nascimento, 1970).

A grandeza da pressão de expansão do solo saturado depende dum conjunto de características físico-químicas como sejam a natureza mineralógica da argila, a sua granulometria, a natureza e nível de concentração dos iões existentes na água do solo, etc. Contudo, é difícil correlacionar todos estes parâmetros com a pressão de expansão, de modo a utiliza-los para calcular o seu valor. Assim, são normalmente utilizados os limites de Atterberg como critério de aceitação ou rejeição de um determinado material a utilizar num pavimento rodoviário (Nascimento, 1970).

Segundo Nascimento (1970), existe uma correlação entre as condições a que o solo é submetido nos ensaios para determinação dos limites de liquidez e de plasticidade e a expansão que presumivelmente experimentaria se, em contacto com a água e por si próprio, passasse do estado correspondente ao limite de plasticidade para o estado correspondente ao limite de liquidez. O resultado prático desta regra semi-empírica é a possibilidade de controlar a expansão do solo, quando este é colocado em condições de descompressão e de poder absorver água, através do índice de plasticidade ( $I_p$ ). Outra forma de limitar a expansão dum solo será limitar o valor máximo do limite de liquidez. Esta medida será até indispensável,

porque um reduzido valor do índice de plasticidade não significa que o limite de liquidez não seja elevado, o que significa que as variações volumétricas a partir da secura total podem ser excessivas.

### 2.2.2 AUMENTO DA RESISTÊNCIA

É conhecido o efeito que o excesso de humidade num solo provoca na sua resistência ou capacidade de carga. De facto, altos teores em água reduzem consideravelmente a resistência, e se além disso o solo contiver elevados teores em matéria orgânica, a sua resistência pode mesmo atingir valores muito pequenos. Por seu turno, a secagem de um solo muito argiloso num ambiente pouco húmido conduz à transformação deste num solo muito duro, sendo que na situação limite essa argila seria transformada em tijolo. Contudo na prática a dureza de um solo é menos importante do que a sua resistência às deformações quando solicitado (Ingles e Metcalf, 1972).

As deformações devidas à variação no carregamento são em muitos aspectos semelhantes às variações de volume provocadas pelas forças internas, que por sua vez são causadas pelas alterações do teor em humidade. Esta relação é tanto mais evidente quanto se reconhece que os estabilizantes utilizados para melhorar a resistência de um solo acabam também por diminuir a sua susceptibilidade à água, e vice-versa.

Uma resistência insuficiente constitui muitas vezes o principal problema com os solos a utilizar em obra. Uma das causas mais comuns deste tipo de problema é a reduzida eficiência do sistema de drenagem. A fraca graduação de alguns solos arenosos transportados pode também conduzir a valores reduzidos da capacidade de carga. Contudo, nem todas as causas de uma fraca resistência estarão relacionadas com o aumento da humidade; em condições de tráfego um solo excessivamente seco tornar-se-á pulverulento, sem coesão, perdendo assim resistência.

Assim, a medida da adequabilidade da resistência do solo terá de ser escolhida em função da utilização em vista. Normalmente a resistência ao corte constitui um critério aceitável para solos cuja rigidez é também função da quantidade de água presente. Em solos menos susceptíveis à água serão desejáveis ensaios de carga-descarga. Em solos mal graduados aceita-se um ensaio de capacidade de carga. Estes ensaios

podem ser efectuados em laboratório ou in situ, mas a imperiosa necessidade de ensaiar amostras indeformadas e a reconhecida dificuldade em obtê-las leva a que os ensaios de campo sejam utilizados sempre que possível (Ingles e Metcalf, 1972).

Assim como para o caso da manutenção do volume, a expulsão da água do solo pode servir para manter a sua resistência. Uma drenagem eficiente constitui pois um factor importante. Em áreas de tráfego, que normalmente sofrem problemas como a gradual pulverização mesmo que bem compactadas, a única solução viável é a estabilização mecânica ou betuminosa. A traficabilidade em solos moles pode também ser melhorada espalhando materiais de melhor qualidade à superfície, mas este método não pode ser considerado como estabilizante.

Em resumo, as propriedades mecânicas podem ser optimizadas ou mantidas a um determinado nível através da estabilização. Os métodos utilizados para melhorar a estabilidade de volume são também eficazes na manutenção ou melhoramento das propriedades mecânicas, visto que a questão da água no solo é também neste caso identificada como a principal fonte de problemas.

### **2.2.3 PERMEABILIDADE**

A importância do movimento da água no solo foi já aqui destacada. A permeabilidade constitui a medida deste movimento. As argilas possuem um complexo sistema de microporos, pelo que a condensação e a humidade ambiente desempenham um papel importante na sua permeabilidade. A gama de permeabilidades existentes nos solos naturais e em obras de terra é bastante extensa. Enquanto alguns solos possuem texturas "abertas", sendo portanto bastante permeáveis; outros, particularmente as argilas "gordas", podem ter permeabilidades abaixo dos  $10^{-12}$  cm/seg. Contudo, factores como a estratificação, as discontinuidades e as fissuras originam permeabilidade muito mais elevadas neste tipo de argilas (Ingles e Metcalf, 1972).

A permeabilidade conduz a alguns problemas para as aplicações em engenharia, sobretudo os que dizem respeito à dissipação de pressões neutras e à percolação da água no solo. Inadequada dissipação de pressões neutras pode conduzir a deslizamentos em obras de terra enquanto elevados fluxos de água podem

provocar fenómenos como o “piping” ou o “levantamento hidráulico”. Além disso, em regiões com precipitação intermitente, a permeabilidade do solo constitui um problema durante a construção, visto que nas áreas onde houver estratos impermeáveis de argila podem surgir complicações com a drenagem e com a capacidade de carga. Em contra-partida, solos granulares ou argilas próximas do limite de retracção podem causar fugas a partir de estruturas de retenção de água ou movimentos diferenciais à superfície relacionados com a expansibilidade do solo (Ingles e Metcalf, 1972).

A compactação de solos secos conduz a elevados valores da permeabilidade, uma vez que a reduzida quantidade de água não permite o deslizamento relativo das partículas do solo, necessário para se atingirem melhores arranjos e conseqüentemente menores vazios. Alguns vazios resultam também da decomposição natural dos solos e de processos de aglutinação das partículas, incluindo a própria estabilização. Baixas permeabilidades estão normalmente associadas a solos com elevada fracção argilosa. A secagem de uma argila conduz porém a um significativo aumento da permeabilidade. Embora a determinação da permeabilidade de um solo possa ser feita quer no campo quer em laboratório, esta última será menos indicada, visto que qualquer perturbação na amostra implica adulterações no resultado final obtido. Normalmente, a permeabilidade constitui uma característica altamente anisotrópica (Ingles e Metcalf, 1972).

Segundo Ingles e Metcalf (1972), na maioria dos casos a permeabilidade de um solo pode ser bastante alterada. Valores elevados da permeabilidade podem ser reduzidos através da compactação ou da injeção de caldas ou, em solos argilosos, através da adição de desfloculantes. Enquanto que as caldas não preenchem os vazios menores mas apenas reduzem o fluxo de água, os desfloculantes podem impermeabilizar completamente o solo. Pelo contrário, aumentos da permeabilidade podem apenas ser conseguidos através de flocculantes, dos quais a cal é o mais indicado. Isto porque estas baixas permeabilidades se devem à presença das partículas mais reduzidas.

O movimento da água num solo apresenta um interessante paradoxo: em algumas circunstâncias, uma zona de areia altamente permeável pode funcionar como uma barreira impermeável associada a uma zona de argila. Este fenómeno acontece devido à incapacidade da água, retida por capilaridade no estrato de argila, atravessar uma zona em que o sistema da água é descontínuo, como é o caso de uma areia não saturada.



Os métodos de estabilização utilizados para reduzir a permeabilidade de um solo não conduzem necessariamente a melhoramentos na manutenção do volume ou da resistência mecânica, podendo inclusive reduzir estes parâmetros. Sendo assim, e segundo (Ingles e Metcalf, 1972), é fundamental em qualquer projecto de engenharia considerar cuidadosamente a relativa importância de todas estas características na obra final, antes de ser tomada uma decisão relativamente ao método de estabilização a adoptar.

#### **2.2.4 DURABILIDADE**

Em comum com todos os outros materiais utilizados na construção, a resistência do solo aos processos de erosão e desgaste é altamente desejável. Para que um solo seja estável é necessário que as próprias partículas que o constituem sejam elas próprias estáveis, ou seja, que não percam resistência nem sofram variações de volume.

Em solos naturais podem ser encontrados diferentes valores para a durabilidade, sendo quase sempre necessário melhorar aqueles que se apresentam muito reduzidos. Uma elevada erosão interna num solo natural ou numa obra de terra é normalmente resultado não só de uma reduzida durabilidade mas também de uma excessiva permeabilidade. Reduzidos valores da durabilidade traduzem-se normalmente em elevados custos de manutenção e não em roturas estruturais relevantes, embora tal tenha já ocorrido em casos especiais (Ingles e Metcalf, 1972).

Em solos aluvionares, em que as respectivas partículas se encontram já nos últimos estágios do respectivo processo de alteração, ou então possuem uma resistência que foi capaz de suportar um longo processo de abrasão, os fenómenos de alteração terão pouca importância. Mas em solos residuais ou coluvionares em que não esteja concluído o processo de alteração e portanto praticamente sem contacto com qualquer tipo de abrasão, tais fenómenos podem ter importância.

As condições e os mecanismos porque se processa a alteração são a dissolução, a erosão interna, a fissuração e a perda de ligações pétreas, o que conduz à perda de material e à desagregação. Como a alterabilidade é a taxa de evolução no tempo da alteração de um material, esta pode ser avaliada pela perda de peso ou pela variação de absorção ou expansão experimentada ao fim dum certo tempo ou dum determinado número de ciclos de uma acção periódica, como a secagem e molhagem (Ingles e Metcalf, 1972).

Em solos naturais a fraca durabilidade, associada à circulação rodoviária, está normalmente relacionada com um insuficiente teor em argila. Em solos estabilizados a fraca durabilidade poderá ser resultante de vários aspectos, como a escolha inadequada do estabilizante, à sua reduzida quantidade, etc.

Uma das deficiências da actual estabilização de solos é a falta de testes que permitam aferir da real durabilidade do solo estabilizado, o que faz com que a durabilidade constitua uma das características mais difíceis de avaliar nos solos. Uma reacção típica a esta dificuldade é o recurso ao sobre-dimensionamento, o que para além de não ser económico pode também não ser a melhor opção do ponto de vista técnico.

Resumindo, exceptuando alguns casos especiais, a durabilidade de um solo estabilizado excede a do solo natural. O reconhecimento da fraca durabilidade de um solo é possível, mas apenas em termos qualitativos, sendo necessário aplicar métodos de ensaio muito específicos (Nascimento, 1970).

### **2.3 APLICAÇÕES DA ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS**

As principais justificações para o recurso à estabilização de um solo são, segundo Winterkorn (1975):

- A necessidade de elevar um país ou região de terrenos lodosos ou arenosos de modo a permitir maiores possibilidades de desenvolvimento económico;
- Permitir a utilização de estradas secundárias e rurais em boas condições;
- Fornecer bases para pavimentos de qualidade em situações em que o recurso a materiais como rocha, gravilha ou outros normalmente utilizados nestas situações não é economicamente viável;

- Actuar como fonte de absorção de ruído, particularmente em zonas urbanas, em que adequados sistemas de solo estabilizado possuem vantagens consideráveis sobre outros materiais de construção;
- Propiciar a circulação de tráfego em determinadas áreas e em curtos intervalos de tempo em caso de emergências militares ou outras.

Porém, a principal aplicação da estabilização de solos sempre foi na execução de pavimentos, nomeadamente das bases, sub-bases e camadas de desgaste de estradas e aeródromos. À medida que os padrões de qualidade na construção são alargados, é cada vez maior a exigência por pavimentos com qualidade e de longa duração. Ora, como em alguns casos os materiais naturais que cumprem estes requisitos respeitantes à qualidade apenas podem ser encontrados em locais a partir dos quais o seu transporte não é economicamente viável, surge a hipótese de utilizar os materiais que se encontram no local da obra, o que implica o melhoramento das suas capacidades mecânicas.

Nascimento (1964) refere que o custo total da construção duma estrada pode considerar-se dividido nas seguintes parcelas: terraplenagens e obras de arte, pavimento e obras acessórias; sendo que o custo do pavimento atinge normalmente 25 a 50% do custo total da obra, dependendo do perfil da estrada. Outro factor a ter em conta será o custo da conservação, de mais difícil avaliação, e que normalmente é tanto maior quanto mais barato o pavimento. Existe assim uma clara vantagem, quer em termos económicos quer em termos de qualidade da obra a médio/longo prazo, em transformar o solo de fundação do pavimento num material capaz de responder, ao longo de toda a vida útil da obra, às solicitações impostas.

A grande experiência acumulada na estabilização de solos para pavimentação de estradas pode ser muito útil para outro tipo de obras, como as pequenas barragens de terra. Com efeito, enquanto numa grande barragem de terra as solicitações termo-higroscópicas afectam apenas uma zona superficial da obra, com pequenas repercussões no seu desempenho, já em barragens mais pequenas estas solicitações podem ter efeitos significativos.

## **2.4 MÉTODOS CONVENCIONAIS DE ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS**

Os métodos de estabilização de solos são frequentemente classificados em três grupos:

- métodos de **estabilização mecânica**, nos quais se procura melhorar as características do solo através duma melhor "arrumação" das suas partículas constituintes e/ou recorrendo a correcções da sua composição granulométrica;
- métodos de **estabilização física**, nos quais se alteram as propriedades do solo através da acção do calor, da electricidade, etc;
- métodos de **estabilização química**, que modificam permanentemente as propriedades do solo através de aditivos.

Neste capítulo é feita uma descrição dos principais métodos englobados em cada um destes grupos.

### 2.4.1 ESTABILIZAÇÃO MECÂNICA

A necessidade de trabalhar com solos correctamente estabilizados verifica-se com maior frequência em obras de pavimentação rodoviária. Assim, e no que respeita ao projecto rodoviário, a estabilização mecânica de um solo consiste num conjunto de operações "mecânicas" que lhe conferem estabilidade, quando solicitado em pavimentos de estradas. São consideradas como operações mecânicas aquelas que apenas modificam o arranjo das partículas do solo, ou a sua granulometria, por meio da subtracção ou adição de algumas fracções. O tratamento com aditivos como o cimento, a cal, o betume, etc, que não são inertes como os solos e os agregados, já não constitui uma estabilização mecânica (Nascimento, 1970).

Em muitos casos, especialmente durante a construção de uma estrada, encontram-se várias formações de solos que podem ser utilizadas como zonas de empréstimo, bastando então escolher aqueles que satisfaçam, sem qualquer correcção, as especificações requeridas. Neste caso não se pode, em rigor, falar em estabilização mecânica mas apenas numa selecção de solos.

#### 2.4.1.1 COMPACTAÇÃO

Designa-se por compactação dum solo a acção mecânica susceptível de provocar nesse solo uma diminuição do seu índice de vazios, conseguida fundamentalmente à custa da redução do volume da sua fase gasosa. Pode então deduzir-se que o teor em água do solo se mantém praticamente constante durante a compactação, o que constitui a principal diferença entre a compactação e a consolidação. Isto porque embora o principal objectivo da consolidação também seja a redução do volume de vazios, tal é conseguida através não só da redução do volume de ar mas sobretudo também através da redução do volume de água (Melo, 1985). Pode mesmo dizer-se que na prática, quando se pretende reduzir o índice de vazios dum solo através de qualquer processo mecânico, os dois fenómenos ocorrem simultaneamente.

O comportamento de um solo está geralmente dependente do seu índice de vazios, nomeadamente no que diz respeito às características de resistência ao corte, deformabilidade e permeabilidade. Assim, quanto menor o índice de vazios, maior a resistência e menor a deformabilidade e permeabilidade. Mas existem outras razões para que se procure sempre atingir o menor índice de vazios possível:

- A adição de água a solos granulares soltos pode levar a fenómenos de liquefacção;
- Alguns solos, com uma estrutura tipo colmeia com um grande volume de vazios, apresentam comportamento colapsível. A introdução de água numa estrutura deste tipo diminui as forças entre partículas e funciona como um lubrificante que permite que estas partículas deslizem umas em relação às outras, ocupando os espaços antes vazios. Uma compactação adequada reduz o risco de colapso.

Está normalmente associado à consolidação a ideia de um processo relativamente lento, provocado por uma solicitação estática que origina a aproximação progressiva das partículas sólidas à medida que a água se escoia. Já a compactação é associada a um processo rápido e brusco que procura alterar a estrutura das partículas de um solo. Contudo alguns métodos, como o da vibroflutuação, provocam a redução do índice de vazios à custa da expulsão da água, o que os coloca no domínio da consolidação, não deixando porém de ter características típicas do que foi já definido como compactação.

A compactação constitui uma forma de forçar o aumento da compacidade dum solo, e embora não apresente uma relação tão óbvia como a que existe entre tensão de consolidação / compacidade do solo, existe alguma relação causa-efeito entre as características dum equipamento de compactação e a compacidade que esse equipamento confere ao solo. De facto, quando se aplica um certo número de passagens de um equipamento de compactação a um solo, obtém-se um claro aumento da compacidade numa fase inicial, verificando-se contudo uma redução desse aumento ao fim de algumas passagens. Ou seja, assim como num processo de consolidação existe uma correspondência entre a compacidade máxima e a tensão de consolidação utilizada, compacidade essa que só poderá ser aumentada com o aumento da referida tensão de consolidação, também no processo de compactação se verifica uma relação entre a energia de compactação e a compacidade obtida.

Este conjunto de semelhanças entre consolidação e compactação evidencia alguns princípios a considerar na estabilização de solos (Nascimento, 1970):

1. O solo é tanto mais resistente quanto mais compacto estiver, podendo a compactação constituir um método para estabilizar um solo;
2. Um solo expansivo só conserva uma determinada compacidade, obtida por consolidação ou compactação, se for mantida uma pressão igual ou superior à sua pressão de expansão. Com efeito, se a pressão que actua no solo for inferior à sua pressão de expansão, ele expande até que a pressão de reacção iguale a sua pressão de expansão, que entretanto se foi reduzindo.

Em solos pouco expansivos, com reduzido índice de expansibilidade ( $C_e$ ), a perda de resistência que advém da expansão não tem significado. Contudo, em solos com elevado potencial de expansão, a diminuição da resistência pode ser bastante prejudicial. Um solo compactado cujo valor da compacidade actual foi atingido após sofrer uma expansão diz-se sobrecompactado. Em consequência duma escavação pode ocorrer um fenómeno semelhante, com a expansão a ser motivada pela descompressão a que o solo é sujeito após a escavação (Nascimento, 1970). Do que foi dito pode concluir-se que num terreno argiloso expansivo a excessiva compacidade pode levar a fenómenos de sobreconsolidação, com todos os inconvenientes que normalmente lhes estão associados. Em terrenos não expansivos este problema já não se coloca.

Foi já dito que a compacidade de um solo é função da sua tensão de consolidação, no caso deste estar intacto, ou da potência do equipamento de compactação, se o solo for remexido. Em solos remexidos só será possível aumentar o seu nível de compacidade aumentando a energia de compactação. Mas este aumento de energia pode ser limitado pela resistência ao esmagamento das partículas, que constitui um outro princípio orientador da estabilização do referido solo (Nascimento, 1970). Essa resistência ao esmagamento das partículas será tanto maior quanto mais grosseira e mal graduada for a sua granulometria. Isto porque, se for esse o caso, haverá menos pontos de contacto entre as partículas, o que conseqüentemente implica uma maior tensão nessas áreas.

#### **2.4.1.1.1 COMPACTAÇÃO DE SOLOS COESIVOS**

Num dado volume de solo existem partículas com vários graus de ligação entre si e nas mais variadas orientações, o que faz com que essas partículas sejam afectadas de forma diferente pela compactação. O efeito global obtido com a compactação consiste no somatório dos resultados atingidos ao nível de cada partícula (Melo, 1985). Contudo, ao procurar aumentar o efeito da compactação à custa de sucessivas transmissões dum dado tipo e nível de energia é possível originar modificações importantes na orientação das partículas em vez de progredir no sentido de incrementar as ligações entre as partículas orientadas. Ou seja, as sucessivas tentativas de compactação podem ter um efeito bem mais importante na modificação da orientação das partículas do que na fomentação das ligações entre estas. Isto deve-se ao facto do nível de energia envolvido não ser susceptível de fazer aumentar o número de partículas que consegue quebrar as ligações com as respectivas partículas envolventes.

O resultado desta situação é o aparecimento de partículas monotonamente orientadas em camadas e com forças de ligação relativamente pequenas, formando estratos dentro do solo com reduzida resistência ao corte. Por exemplo, quando o número de passagens do cilindro de compactação é demasiado elevado observa-se uma separação do terreno em estratos ou "escamas", sem praticamente qualquer ligação com a camada subjacente. Verifica-se assim que os efeitos obtidos com a compactação dependem da energia transmitida ao solo durante o processo.

Em relação aos resultados obtidos quando se compacta um solo com diferentes níveis de energia, verifica-se que os pesos específicos secos após compactação aumentam com o aumento da referida energia. Isto

acontece com qualquer valor do teor em água, o que conseqüentemente origina um aumento nos pesos específicos secos máximos e uma diminuição nos teores óptimos de humidade.

Por outro lado, a quantidade de água envolvida tem grande influência na forma como se desenvolvem os fenómenos eléctricos associados às partículas mais finas e, conseqüentemente, nos efeitos alcançados pela compactação. A representação gráfica da função que relaciona, para um dado valor da energia de compactação e para o método adoptado, a baridade seca do solo e o teor em água existente aquando da compactação é normalmente designada por curva de compactação.

Uma análise pormenorizada de todos os factores envolvidos no fenómeno da compactação com o objectivo de explicar a forma da curva de compactação constitui uma tarefa praticamente impossível de realizar. Isto porque uma explicação detalhada tem forçosamente de contemplar os aspectos resultantes da actuação da energia de compactação sobre um sistema complexo constituído pelas três fases do solo. Este facto levou a que as várias explicações apresentadas pelos especialistas tivessem sempre um carácter predominantemente qualitativo, com a indicação dos diversos tipos de fenómenos envolvidos e o valor relativo dos efeitos correspondentes a cada um desses fenómenos (Melo, 1985).

Segundo Proctor (1933, in Melo, 1985) existem dois fenómenos de efeitos contraditórios na evolução do peso específico seco do material compactado. O sentido dessa evolução depende do valor relativo desses efeitos. Para valores do teor em água muito baixos o solo possui um grande volume de ar, o que permite que pequenos acréscimos de água, ao facilitarem a constituição de novas arrumações, levem à expulsão de grandes quantidades desse ar. O efeito preponderante será nesta fase o que tende a aumentar a baridade seca. À medida que sobe o teor em água diminui o volume de ar. Este efeito vai perdendo importância até se atingir um ponto em que o processo de compactação utilizado já não é capaz de expulsar mais ar, não sendo possível obter novos incrementos do peso específico seco por esse mecanismo. Entretanto, o processo de afastamento de partículas originado pela diminuição das forças de capilaridade, que por sua vez se deve ao incremento da quantidade de água, vai ganhando preponderância com o atenuar das carências de água no solo, em especial quando passa a haver água em estado livre nos vazios. À transição entre as duas situações descritas corresponde um máximo na curva de compactação que não é mais do que o já referido teor em água óptimo.



De uma forma simplificada, e tendo em conta as dificuldades já mencionadas em explicar o comportamento da curva de compactação, pode dizer-se que o efeito da água no processo de compactação é o de lubrificar as partículas permitindo o seu deslizamento relativo, tornando assim o solo mais trabalhável e conseqüentemente mais compactável. Contudo, a partir de certa altura o aumento da quantidade de água impede a fuga do ar dos vazios do solo, inviabilizando a continuação do aumento da compactidade do solo. Existe assim um valor óptimo para o teor em água, ao qual corresponde o valor máximo da baridade seca após compactação.

Segundo a curva de compactação, um mesmo valor da baridade seca pode ser atingido com duas quantidades diferentes de humidade e com o mesmo nível de energia. Quando a compactação é feita com um teor em água inferior ao óptimo é habitual dizer-se que se trata de compactação no "ramo seco" (Melo, 1985). Se, pelo contrário, o teor em água durante a compactação é superior ao óptimo diz-se que a compactação foi efectuada no "ramo húmido".

Poderia pensar-se que as características de um solo compactado dependeriam apenas da baridade seca atingida, o que tornaria irrelevante o nível do teor em água com que a compactação foi executada. Mas a experiência mostra que, para um mesmo valor do peso específico seco dum solo compactado, as características de resistência ao corte, deformabilidade e permeabilidade podem ser substancialmente diferentes em função do ramo em que foi efectuada essa compactação.

Em relação à resistência ao corte verifica-se que, se a compactação é feita no ramo seco, uma grande percentagem dos vazios permanece preenchida por ar, existindo apenas pequenas quantidades de água junto às partículas. Este facto origina fenómenos de capilaridade na interface ar-água aos quais estão associadas forças de sucção que tendem a aproximar as partículas sólidas. Aumenta-se desta forma a tensão efectiva entre as partículas e conseqüentemente a resistência ao corte.

Se a compactação é feita no ramo húmido as forças devidas aos fenómenos de capilaridade passam a ser pouco influentes, podendo mesmo anular-se para graus de saturação elevados (Melo, 1985). Está desde logo diminuída a resistência ao corte em relação a uma compactação no lado seco. Mas esta resistência é ainda

diminuída visto que a deformabilidade de um maciço aumenta com o teor em água, o que permite que mesmo solicitações não muito elevadas possam provocar deformações capazes não só de anular eventuais pequenas tensões de origem capilar como também originar tensões neutras positivas que reduzem as tensões efectivas instaladas.

Assim, verifica-se de uma forma geral que os solos compactados em ramo seco exibem maior resistência ao corte do que aqueles compactados em ramo húmido. Convém porém ter em atenção o facto de esta superioridade poder ser seriamente reduzida ou mesmo invertida caso o solo seja posteriormente colocado em contacto com a água.

Os solos compactados no ramo seco são, em regra, menos deformáveis do que aqueles compactados no ramo húmido. Isto porque as tensões neutras negativas, que tendem a aproximar as partículas, originam estruturas menos deformáveis (Melo, 1985). Mas, quando postos em contacto com a água, os solos apresentam diferentes tipos de comportamento. Assim, por exemplo os solos coesivos mais activos aumentam de volume com a água, enquanto solos com minerais argilosos menos sensíveis já apresentam aumentos de volume pouco significativos. Em relação à deformabilidade de solos compactados no ramo seco há ainda a destacar o facto de, quanto maior o afastamento entre o teor em água e o seu valor óptimo, maior o volume de vazios preenchido com ar. Numa estrutura deste tipo, a redução das forças efectivas provocada pela molhagem após compactação pode levar a um colapso estrutural, com bruscas e elevadas reduções volumétricas.

A deformabilidade de um solo compactado no ramo húmido é, em princípio, superior à que se verifica para o mesmo solo compactado no ramo seco, e tanto maior quanto maior o teor em água. De facto, com o aumento do teor em água o solo vai-se tornando cada vez mais plástico, o que lhe permite deformar-se sem rotura. Este comportamento contrasta com o do ramo seco, em que o solo apresenta características de material frágil, com roturas consideráveis para pequenas deformações. Contudo, quando colocados em contacto com a água os solos compactados no ramo húmido são menos sensíveis podendo inclusive exibir menores deformabilidades do que os solos compactados no ramo seco.

Em relação à permeabilidade, compreende-se que os solos compactados no ramo seco, devido à elevada

percentagem de vazios ocupada por ar, sejam muito mais permeáveis do que aqueles compactados no ramo húmido. Contudo, os canais de comunicação entre esses vazios tendem a fechar-se à medida que o teor em água se aproxima do óptimo. Já no ramo húmido, e uma vez que a distância média entre as partículas aumenta com o teor em água, seria de esperar que a permeabilidade continuasse a aumentar. Mas tal não se verifica na prática uma vez que a permeabilidade continua a diminuir, o que só encontra explicação na natureza dos arranjos estruturais que ocorrem nessa zona da curva de compactação (Melo, 1985).

#### **2.4.1.1.2 COMPACTAÇÃO DE SOLOS INCOERENTES**

Ao contrário do que acontece com os solos argilosos, os solos não coesivos não são muito afectados pela humidade intrínseca na altura da compactação. Assim, para uma dada energia de compactação, a curva de compactação obtida é em geral muito abatida e é muito menor a gama de variação das baridades secas. A forma da curva baridade seca/teor em água implica que as maiores densidades são obtidas para um determinado método de compactação, a utilizar consoante o solo está muito seco ou próximo da saturação. À medida que o solo é compactado a água retira-se para os reduzidos espaços junto aos pontos de contacto das partículas, colocando assim a interface ar-água destes espaços capilares sob tensão. Desta forma a tensão efectiva aumenta, o que provoca uma aparente coesão e consequentemente um aumento da resistência à compactação (Hamzah, 1983).

A existência duma zona intermédia na curva de compactação de um solo não coesivo (Figura 2.1), na qual se verifica uma diminuição dos valores da baridade seca para valores do teor em água relativamente baixos, é devida às pequenas forças de natureza capilar desenvolvidas quando se verificam baixos níveis do teor em água, anulando-se quando este é nulo ou muito elevado.

Tendo em conta a forma da curva de compactação dum material incoerente, os conceitos de “teor em água óptimo” e “baridade seca máxima” perdem o significado que possuíam no caso dos solos coesivos, sobretudo porque a relação entre as partículas não argilosas destes materiais e a água é completamente diferente da que então se verificava. Recorre-se assim a outro parâmetro, designado por densidade relativa e definido pela expressão:

$$D_r = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}}$$

em que:

$D_r$  = densidade relativa expressa em percentagem

$e_{max}$  = índice de vazios do solo quando este se encontra no estado mais solto possível

$e_{min}$  = índice de vazios do solo quando este se encontra no estado mais denso possível

$e$  = índice de vazios do solo no estado actual

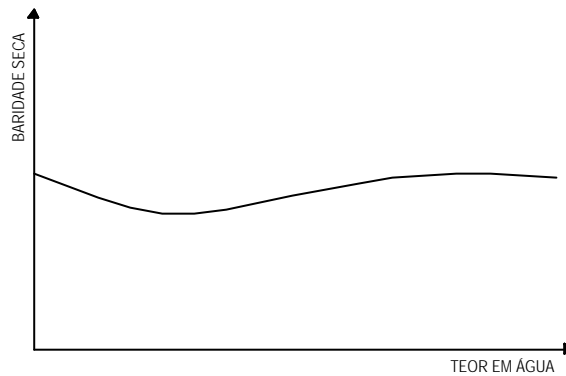


Figura 2.1: Relação entre a baridade seca e o teor em água em areias  
(adaptado de Schroeder, 1980, in Hamzah, 1983)

Uma importante característica deste parâmetro consiste no facto de não haver praticamente qualquer relação com o estado de tensão a que se encontra submetido o solo, sendo contudo difícil determinar os valores dos vários índices de vazios envolvidos. Essas dificuldades começam logo na determinação do índice de vazios natural: no caso de um solo muito pouco coerente, a simples obtenção de uma amostra pode alterar significativamente o nível de compactação. Mas a obtenção dos índices de vazios máximo e mínimo levanta também alguns problemas, dada a enorme influência que o método adoptado pode ter sobre os resultados obtidos. Esta questão é em parte ultrapassada através da utilização sistemática de técnicas de ensaio

perfeitamente normalizadas, que embora conduzam a valores que podem ser superiores ou inferiores a outros determinados por outras vias, não deixam contudo de se revelarem vantajosas no que diz respeito à relatividade entre os próprios valores.

O valor da densidade relativa varia entre zero, para materiais o mais soltos possível, e um, caso a compactidade natural do material iguale a compactidade máxima. É frequente designar por compactos os solos com  $D_r > 0.70$  e por soltos aqueles em que  $D_r < 0.30$ . Materiais com compactidade compreendida entre estes dois valores designam-se por medianamente compactos.

As características de deformabilidade e resistência ao corte são, tal como nos solos coesivos, dependentes do valor da compactidade, medida neste caso pela densidade relativa.

A compressibilidade é tanto mais reduzida quanto mais elevada for a densidade relativa, e depende muito não só do índice de vazios inicial e da pressão considerada como também da constituição mineralógica e geometria dos grãos (Melo, 1985). De facto, parte das deformações devem-se ao esmagamento das zonas mais solicitadas das partículas, que são as zonas angulosas em que a concentração de tensões é mais elevada. Estes fenómenos de esmagamento implicam a sucessiva transferência das tensões, à medida que os contactos inter-partículas vão cedendo. Mesmo as zonas de contacto capazes de suportar as tensões a que estão sujeitas acabam mais tarde por perder capacidade resistente e ceder. Verifica-se assim que os materiais granulares, quando submetidos a tensões elevadas exibem normalmente deformações ao longo de períodos de tempo bastante dilatados. Para valores elevados da densidade relativa, que implicam forçosamente um baixo volume de vazios, a área de contacto entre partículas é maior e consequentemente são menores as tensões distribuídas nessas áreas. A deformabilidade será pois menor com o aumento da graduação do material (Melo, 1985).

Quanto à resistência ao corte, verifica-se que o ângulo de atrito dos materiais granulares aumenta com a densidade relativa. O comportamento de um material incoerente e em estado de elevada compactidade é, para baixas pressões de confinamento, caracterizado pelo aparecimento de um valor de pico para valores de extensão muito baixos. O material apresenta assim um comportamento frágil e tende a aumentar de volume durante o processo de corte. Com o aumento da tensão de confinamento o comportamento do material vai

sendo cada vez mais dúctil, o que é visível pelo amortecimento dos picos de resistência e pelo aumento dos valores da extensão de rotura, ao mesmo tempo que se verifica uma tendência para a diminuição de volume.

No caso dos materiais incoerentes soltos, as curvas tensão-extensão são, independentemente das pressões de confinamento utilizadas, semelhantes à dos materiais dúcteis. As variações volumétricas são normalmente no sentido da diminuição de volume, à excepção dos casos em que são aplicadas tensões de confinamento muito baixas.

No caso de um solo coesivo, à medida que aumenta a energia de compactação, a curva de compactação desloca-se na direcção do canto superior esquerdo do gráfico, o que significa que com o aumento da energia de compactação aumenta a baridade seca e diminui o teor em água. Nos solos granulares também se verifica esta relação, mas com o crescimento da energia de compactação é cada vez mais difícil aumentar a compacidade. A relação energia/compacidade não é linear.

#### **2.4.1.2 CORRECÇÃO GRANULOMÉTRICA**

Foi já referido o facto de que o aumento da potência do equipamento de compactação, na tentativa de melhorar a compacidade dum solo, encontra um limite na sobrecompactação (solos finos) e no esmagamento das partículas (solos grosseiros). Além disso, a remoção do ar existente em solos mal graduados através da compactação é muito reduzida. Estas limitações podem ser ultrapassadas recorrendo à correcção da granulometria do solo. Assim, a estabilidade de solos coesivos de baixa resistência pode ser melhorada através da adição de material granular, enquanto que solos arenosos, instáveis devido à falta de ligações entre as partículas, podem também ser melhorados recorrendo à mistura com finos.

Foi também já dito que o aumento da compacidade reduz a tensão de contacto entre as partículas e portanto o perigo de esmagamento. Um dos princípios orientadores do método da correcção granulométrica é pois o do aumento da compacidade (Nascimento, 1970). Esse aumento pode ser conseguido através da correcção granulométrica que resulta do esmagamento das partículas do material. Tratando-se de materiais brandos (alguns calcários, grés, rochas alteradas, etc), existem no mercado equipamentos que possibilitam a

modificação da sua granulometria por esmagamento. Porém, no caso de materiais mais duros não é possível utilizar esta metodologia.

Outro processo, mais utilizado, de corrigir a granulometria do material é adicionar-lhe ou retirar-lhe fracções antes de se proceder à sua compactação (Nascimento, 1970). Assim, no que respeita a agregados e solos granulares, a tecnologia desenvolvida para a preparação de betões apurou determinadas curvas granulométricas, como as de Fuller, que conduzem à máxima compactidade. A curva de Fuller tem a seguinte expressão:

$$P_i = 100 (d_i - d_{100})^b$$

em que :

$P_i$  = percentagem de material que passa num determinado peneiro

$d_i$  = abertura do referido peneiro (mm)

$d_{100}$  = máxima dimensão das partículas (mm)

$b$  = valor dependente da graduação do material

Uma equação semelhante é utilizada pelas autoridades rodoviárias australianas:

$$P_i = M \frac{d_i^n}{D^n}$$

em que :

$P_i$  = percentagem de material que passa no peneiro de malha  $d_i$

$M$  = percentagem de material que passa no peneiro de malha  $D$

$n$  = constante (0.35 a 0.50)

De acordo com este critério, a um material com a máxima dimensão de 50.8mm (2") deveriam ser adicionados 3.9% de finos passando no peneiro de 0.074mm (nº 200). Deve contudo haver o cuidado de não aumentar a plasticidade a ponto de se verificar uma diminuição na estabilidade. Ingles e Metcalf (1972) sugerem um índice de plasticidade máximo de 8, podendo subir até 15 em regiões áridas.

A experiência acumulada em obras rodoviárias mostrou porém que, para obter a necessária coesão, é conveniente aumentar a quantidade de finos fornecida pela expressão de Fuller, em alguns casos até aos 15%, não esquecendo contudo que essa quantidade não deve exceder os dois terços da fracção que passa no peneiro de 0.420mm (nº 40) e impondo limites à sua plasticidade.

Quanto à correcção granulométrica de solos argilosos através de material granular, este terá de ser adicionado em quantidade suficiente para garantir que as partículas fiquem em contacto. A granulometria da fracção fina sofre ainda importantes modificações na estabilização com cal ou cimento, não só devido ao efeito da adição da fracção granulométrica de pó de cal ou cimento mas também devido à acção química desses materiais.

A correcção granulométrica dum solo, especialmente da fracção silto-argilosa, é uma das formas de redução do índice de plasticidade e do limite de liquidez. Esta correcção é geralmente conseguida misturando um solo pouco plástico ao solo original de elevado potencial plástico. A dosagem dos solos na mistura pode ser obtida pela determinação experimental do índice de plasticidade e do limite de liquidez das próprias misturas (Nascimento, 1970). Poderá também fazer-se uma previsão do valor aproximado destes parâmetros, através da sua média ponderada nos solos a misturar, sendo que os pesos da referida média serão as quantidades de finos com que cada um dos solos contribui para a mistura.

#### **2.4.2 ESTABILIZAÇÃO FÍSICA**

Se um aterro for construído sobre um estrato mole altamente compressível, a sua consolidação irá sempre afectar as camadas subjacentes. A taxa de consolidação, particularmente lenta em solos de reduzida



permeabilidade, pode ser acelerada através de várias técnicas, tais como o recurso a drenos verticais, a sobrecargas temporárias, à electro-osmose, etc.

Quando as características de estabilidade resultantes duma aceleração da consolidação não podem ser obtidas mecanicamente, ou quando se tornam necessários elevados valores da resistência e rigidez de um solo, será então altura de considerar métodos alternativos de estabilização. Neste caso recorre-se normalmente a aditivos como o cimento ou a cal, ou a tratamentos especiais que envolvam reacções físicas capazes de modificar as propriedades do solo.

Estes tratamentos são a estabilização térmica e a estabilização por electro-osmose, que têm sido alvo de vários testes ao longo dos últimos anos, com resultados variáveis. Duma forma geral têm-se revelado pouco viáveis economicamente, sendo normalmente utilizados apenas quando algum tipo de dificuldade impede o recurso a métodos menos dispendiosos. Contudo, continuam a ser estudados e desenvolvidos, tendo a sua eficácia sido melhorada ao longo das últimas décadas, à medida que vão sendo cada vez mais conhecidos.

#### 2.4.2.1 ELECTRO-OSMOSE

Este processo consiste em colocar dois eléctrodos numa massa de solo e fazer passar uma corrente eléctrica entre eles (Figura 2.2). Observa-se então a migração da água presente no solo do eléctrodo positivo para o negativo, de onde é feita a remoção da água. Diminui-se assim a quantidade de água no solo, o que permite a sua consolidação.

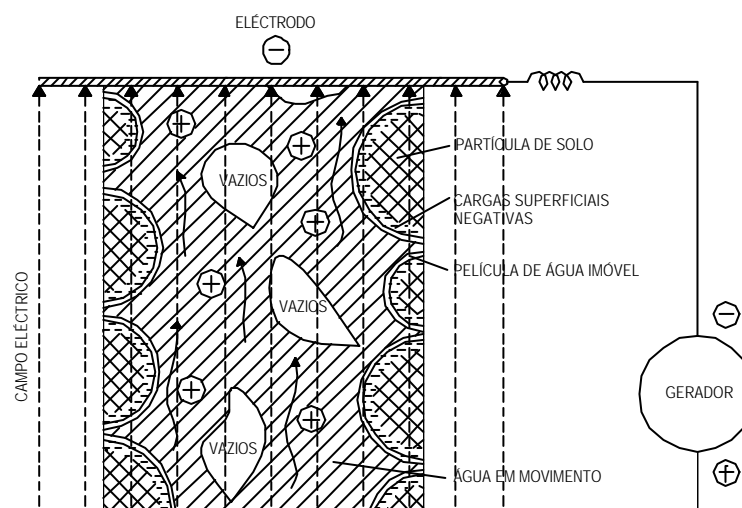


Figura 2.2: Deslocação de iões e da película de água devido à criação de um potencial eléctrico  
(adaptado de Jumikis, 1962, in Hamzah, 1983)

Na maioria dos solos coesivos, a presença de água adsorvida e com dipolos orientados, em contacto com leves partículas cujas superfícies estão carregadas negativamente, por um lado; e de água livre entre os vazios do esqueleto sólido, por outro, permite um melhor entendimento do mecanismo da electro-osmose. Este mecanismo baseia-se nos seguintes pressupostos:

- a) A estrutura do solo é uniforme.
- b) O coeficiente de permeabilidade electro-osmótico do solo é constante.
- c) A velocidade electro-osmótica da água do solo é proporcional ao gradiente de voltagem efectivo.
- d) Embora possam haver voltagens efectivas e não efectivas na electro-osmose, todas as voltagens aplicadas serão consideradas como efectivas.

Através da aplicação de um potencial eléctrico externo, as moléculas polarizadas de água adsorvida são deslocadas da região onde se instalam ânodos para aquela onde se instalam cátodos. A água "livre" segue este movimento.

O primeiro efeito importante da corrente eléctrica no solo é a imposição de uma direcção ao movimento da água. Uma segunda consequência favorável é o facto da corrente eléctrica permitir a extracção da água do solo. Basta para tal utilizar o eléctrodo negativo como um poço filtrante. Isto porque graças à sua corrente eléctrica, este poço será alimentado pela água presente no solo envolvente, sendo que o solo saturado

situado na vizinhança do eléctrodo positivo tornar-se-á cada vez mais seco à medida que a água é expelida para o eléctrodo negativo (Van Impe, 1989). Um típico sistema electro-osmótico simplificado está representado na figura 2.3. Basicamente, trata-se de um sistema de poços colocados segundo uma grelha em que os gradientes que causam o fluxo de água são alimentados por corrente directa. Os eléctrodos são inseridos a meia distância entre poços adjacentes.

A posição dos ânodos e cátodos deve ser tal que o movimento electro-osmótico da água se oponha ao gradiente hidráulico natural. Por exemplo, o ânodo deve ser colocado abaixo do cátodo como forma de precaução contra uma eventual instabilidade durante a aplicação. Segundo Ingles e Metcalf (1972) o espaçamento dos poços de eléctrodos pode ser calculado da mesma forma que o dos poços de drenagem.

A quantidade de água que viaja entre os dois eléctrodos é proporcional à intensidade da corrente que atravessa o solo. Este movimento verifica-se enquanto o solo junto ao ânodo não secar, altura em que a velocidade de extracção de água tende rapidamente para zero. A secagem do solo devida à electro-osmose acontece sobretudo junto ao ânodo, enquanto que junto ao cátodo o teor em água aumenta, pelo menos enquanto for possível acumular mais água.

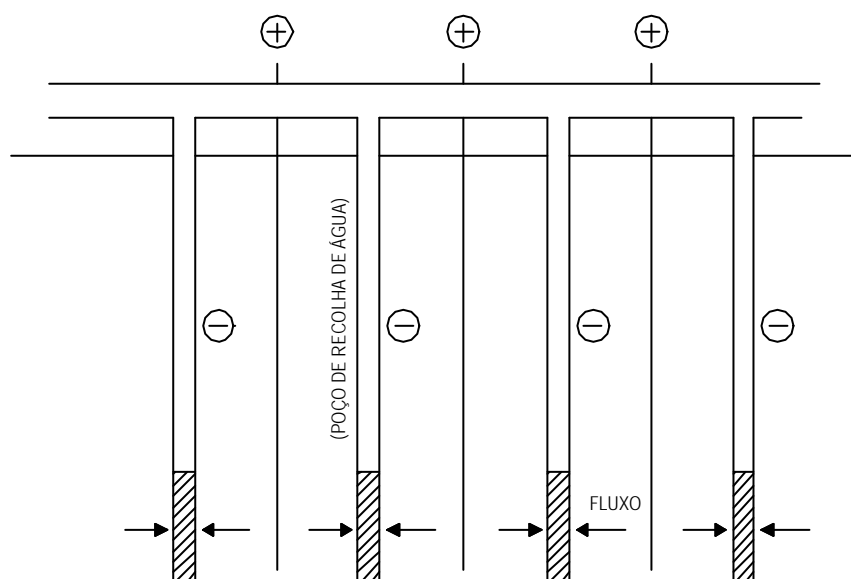


Figura 2.3: Esquema de um sistema electro-osmótico de bombagem de água

(adaptado de Schroeder, 1980, in Hamzah, 1983)

Para uma determinada intensidade de corrente, a quantidade de água expulsa será maior num extracto de areia do que num estrato de argila denso. Existe uma relação linear entre a intensidade da corrente necessária para expulsar 1 grama de água e o teor em água do solo. Para valores da densidade relativa superiores a 85% a massa de água expulsa, por Coulomb, é independente da densidade do solo. Para valores da densidade relativa inferiores a 85% a quantidade de água expulsa, por Coulomb, decresce com a densidade. O caudal percolado num meio unidimensional pode ser obtido através de uma das seguintes expressões:

$$q_h = k_e i_e S \text{ (m}^3\text{/s)}$$

$$q_h = k_j I \text{ (m}^3\text{/s)}$$

em que:

$k_e$  = coeficiente de permeabilidade electro-osmótica (definido de forma análoga ao coeficiente de permeabilidade hidráulica); não é sensível à dimensão das partículas do solo; varia entre  $10^{-9}$  e  $7 \times 10^{-9}$  m/s por V/m

$i_e$  = gradiente do potencial aplicado (V/m)

$S$  = secção ( $\text{m}^2$ )

$k_j$  = fluxo na unidade de tempo, por ampère ( $\text{m}^3\text{/s/A}$ )

$I$  = intensidade da corrente (A)

Na prática, a electro-osmose não visa a secagem do solo, mas sim direccionar a percolação da água de forma a provocar um efeito de estabilização. Van Impe (1989) descreve uma das aplicações iniciais deste método em Antuérpia, na escavação da "Grote Geul", em que as forças de percolação foram favoravelmente influenciadas pela electro-osmose num estrato de lama muito mole com 7 metros de espessura. Após o tratamento foi possível executar uma trincheira de fundação. Neste caso bem sucedido foram utilizadas 3 filas

de eléctrodos separadas de 5 m, com 3 m entre cada eléctrodo. Os 88 cátodos utilizaram, durante 27 dias, um total de 60000 kWh a partir de fontes de corrente directa.

As profundidades máximas do estrato de solo que podem ser tratadas com recurso a este método são da ordem dos 10 a 20m (Hamzah, 1983), e maior eficácia pode ser esperada se estiverem reunidas as seguintes condições:

- o solo a tratar é siltoso ou argilo-siltoso;
- o estrato encontra-se normalmente consolidado;
- a água dos vazios possui um fraca concentração de electrólito;
- o gradiente do potencial eléctrico tem a mesma direcção do gradiente hidráulico.

#### **2.4.2.2 TRATAMENTO POR AQUECIMENTO**

Este método baseia-se no conhecimento de que um elevado aquecimento converte qualquer argila em tijolo. A partir de determinada temperatura, o processo de endurecimento é irreversível, e mesmo a total submersão é incapaz de destruir a coesão do material. Apenas em casos muito específicos, como por exemplo quando existe uma elevada percentagem (>30%) de gesso no solo, é que este tipo de tratamento se justifica (Van Impe, 1989). Além de que, devido ao elevado consumo de combustível, a aplicação desta técnica especial de melhoramento de solos permanece difícil de justificar. Existem várias aplicações para o tratamento térmico: estabilização de taludes, reforço de fundações de edifícios, estacas formadas por material vitrificado in situ.

O método consiste em introduzir no solo, através dum tubo perfurado, uma mistura comprimida de ar muito quente e combustíveis (Figura 2.4). O aquecimento pode ser obtido quer por queima de combustíveis quer por processos eléctricos. Shibakova (1975) e Mitchell e Katti (1981) (in Folque, 1986) relatam casos em que o aquecimento foi obtido por micro-ondas e por raios laser, respectivamente. As pressões de aplicação da mistura são em média 1.5 vezes superiores à pressão atmosférica, e a temperatura pode variar entre 300°C e 1000°C. Em solos saturados a permeabilidade deve ser suficientemente elevada para permitir a evacuação do vapor produzido no processo.

A partir dos 800°C a massa de solo é compactada, quer devido ao aumento das tensões efectivas resultante do aumento da baridade seca (visto que a água é retirada) quer devido ao possível reajustamento favorável das partículas num solo que, estando sob influência do vapor evacuado, se encontra solto e incoerente (Van Impe, 1989).

Quando as argilas são aquecidas a água adsorvida e no estado “solto” evapora. Sendo assim, a repulsão eléctrica entre partículas é reduzida, o que aumenta a resistência do solo. A partir de determinados valores da temperatura (900°C para algumas argilas), a própria estrutura da argila transforma-se numa massa rígida durável que, embora de fraca qualidade, pode ser utilizada na construção, em situações em que materiais com superiores desempenhos não estão disponíveis (Hamzah, 1983). A superfície dos grãos de areia pode derreter a temperaturas superiores a 1000°C, resultando finalmente numa cimentação artificial que provoca um aumento da resistência.

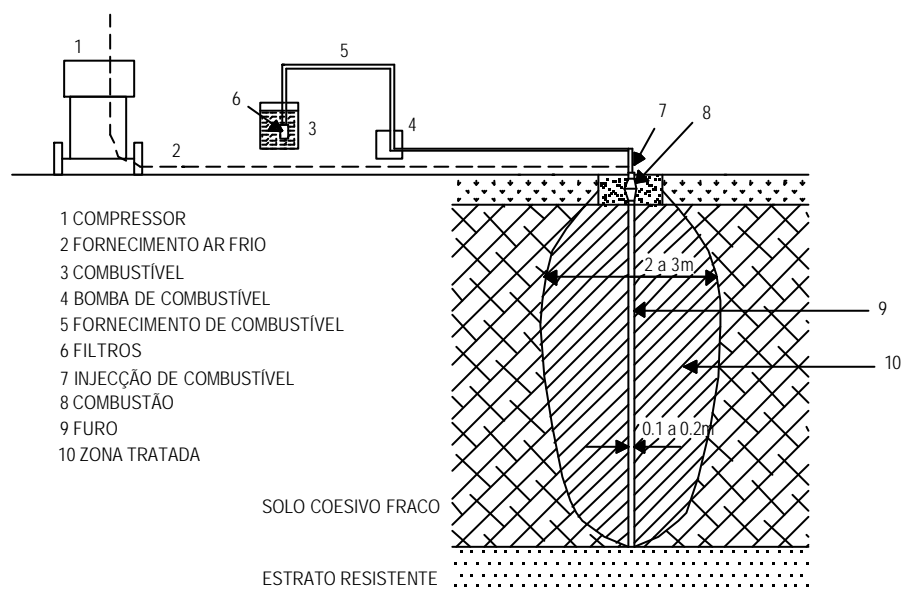


Figura 2.4: Esquema típico de um sistema térmico de tratamento do solo  
 (adaptado de Litvinov, 1960, in Van Impe, 1989)

A plasticidade de solos argilosos é consideravelmente reduzida com o aquecimento. Os limites de liquidez e plasticidade diminuem com o aumento da temperatura, sendo ambos influenciados pela viscosidade da água visto que esta depende da temperatura. É óbvio que o valor do índice de plasticidade aumenta com a diminuição da temperatura, desde que o solo não congele. Se estratos de argila secos são tratados a temperaturas de cerca de 550°C, a capacidade de expansão da argila, quando novamente em contacto com a água, é destruída. Este aspecto pode também ser visto como uma melhoria das características do material.

A forma como é afectada a permeabilidade dum solo com o aquecimento depende da temperatura inicial. Rao e Wadhawan (in Hamzah, 1983) concluíram que a partir de 30 a 60°C a permeabilidade decresce devido à retracção do solo. Entre os 60 e os 650°C a permeabilidade do solo aumenta com a agregação das partículas. A partir de 650°C a permeabilidade diminui novamente devido à fusão das partículas, que reduz a porosidade.

O tratamento térmico afecta também a compressibilidade dos solos argilosos. O'Flaherty (1978, in Hamzah, 1983) concluiu que a compressibilidade diminui com o aumento da temperatura, diminuição essa que, quer em solos saturados quer em solos não saturados, é devida a uma redução da sensibilidade à água que dificulta a sua expulsão dos vazios do solo.

Hamzah (1983) refere estudos efectuados na Índia que mostraram que a resistência aumenta com a temperatura até um certo limite, a partir do qual começa a decrescer. Algumas amostras aquecidas foram posteriormente encharcadas em água e revelaram ligeira redução na resistência. Van Impe (1989) descreve uma técnica mais recente que utiliza tubos aquecidos electricamente que são introduzidos no solo a intervalos reduzidos e que, a temperaturas muito elevadas (1200°C), ligam as partículas criando assim colunas de solo reforçadas. A condutividade térmica e o ponto de fusão do solo desempenham naturalmente um papel importante na previsão de qualquer resultado relacionado com este tipo de aquecimento. É geralmente aceite como regra que uma coluna com 10m de altura e 2m de diâmetro pode ser tratada em 200 a 250 horas.

### 2.4.2.3 TRATAMENTO POR CONGELAÇÃO

Os solos possuem vazios que poderão estar total ou parcialmente ocupados por água. A estabilização por congelação artificial baseia-se no facto de que o congelamento da água intersticial origina um material rígido com elevada resistência. Em solos incoerentes a água congela a temperaturas rondando os 0°C, enquanto que em argilas essa temperatura é inferior aos 0°C (Abouzakhm, 1979, in Hamzah, 1983).

Este método foi utilizado pela primeira vez como forma de melhorar as características dum solo durante a construção do tunel de Brunkeberg em Estocolmo, em 1884. Desde então a lista de aplicações bem sucedidas não parou de aumentar. Consiste na criação de uma barreira à água, suficientemente resistente, em redor da zona a escavar. A gama de aplicações é muito extensa, sobretudo porque a permeabilidade do solo não tem praticamente qualquer influência no processo. Além disso, e pelo menos em extensas áreas do planeta, o solo contém um teor em água suficientemente elevado (>10%).

A resistência ao corte bem como os parâmetros de deformabilidade são consideravelmente melhorados com o tratamento por congelação. Contudo, e mantendo constantes todos as características do solo, verifica-se que a forma de congelação (temperatura final e velocidade de congelação) desempenha um importante papel (Van Impe, 1989). O efeito da congelação na resistência ao corte das areias, siltes e argilas foi estudado por Knutsson em 1981 (in Hamzah, 1983), que concluiu que as amostras congeladas de forma unidimensional (mantendo a base da caixa de corte a uma temperatura constante de -15°C e a temperatura no topo a +0.7°C) possuem uma resistência ao corte inferior à das amostras congeladas isotropicamente. Este efeito pode dever-se à orientação das escamas de gelo formadas durante o processo. Além disso, as areias e siltes saturadas congeladas tendem a apresentar valores de coesão e ângulo de atrito (em termos de tensões totais) semelhantes aos do gelo. Já a argila apresenta valores superiores (Hamzah, 1983).

Conforme representado na Figura 2.5, a resistência à compressão uniaxial aumenta com a temperatura de congelação, até um determinado valor máximo. As três técnicas de congelação utilizadas actualmente são a circulação dupla (em circuito fechado) de CaCl<sub>2</sub> ou de MgCl<sub>2</sub>, a circulação simples de CO<sub>2</sub> e uma terceira técnica que envolve a refrigeração com azoto líquido.



A primeira das técnicas referidas utiliza um condensador para passar consecutivamente ao estado líquido o material utilizado para a refrigeração, que entretanto passou ao estado gasoso. Notar contudo que o cloreto de cálcio ou de magnésio não constituem em si produtos refrigerantes, mas somente produtos que reduzem o ponto de congelação da água (uma solução de  $\text{CaCl}_2$  mantém-se fluida a  $-26^\circ\text{C}$ ). A segunda destas técnicas permite a evaporação do líquido referido, depois deste provocar o arrefecimento do meio envolvente dos reservatórios em que se encontrava comprimido. A terceira técnica deriva do facto da temperatura de congelação ser muito baixa, o que disponibiliza uma maior quantidade de kJ por litro de azoto líquido, garantindo uma velocidade superior de congelação e uma maior resistência média à pressão.

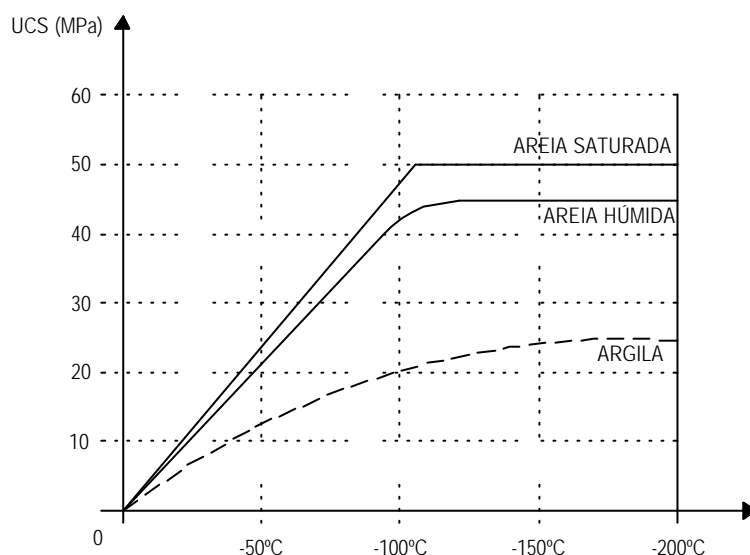


Figura 2.5: Influência do arrefecimento da temperatura na resistência à compressão não confinada do solo  
(adaptado de Van Impe, 1989)

Os solos congelados possuem uma ductilidade muito reduzida, fracturando sob a acção de cargas permanentes. Isto porque todos os melhoramentos conseguidos com a congelação são dependentes do tempo. Além disso, os parâmetros dependem da temperatura, o que significa que quer o tempo quer a temperatura devem ser considerados na avaliação das propriedades mecânicas dos solos congelados.

O cálculo da extensão da área de solo congelada junto ao tubo de congelação pode ser feito tendo em conta as condições de percolação in situ, o tipo de solo, a variação das propriedades térmicas do solo durante a redução da temperatura (condutibilidade e calor específico), a distância entre os tubos de congelação e a variação do nível freático durante o processo (Van Impe, 1989).

Uma elevada velocidade de congelação evita grande parte da expansão do solo que ocorre normalmente quando a água passa do estado líquido para o estado sólido, podendo esta expansão atingir, em alguns casos, os 9% do volume inicial.

A utilização deste método pode ser consideravelmente limitada em estratos com elevados fluxos de percolação, responsáveis pela neutralização do normal processo de congelação. Van Impe (1989) refere que alguns autores, quando utilizaram a dupla circulação, depararam-se com dificuldades a partir de velocidades de percolação superiores a 0.05 m/h. Quando é utilizada a técnica do azoto líquido, o valor da velocidade de percolação a partir da qual se verificam as referidas dificuldades aumenta significativamente.

### **2.4.3 ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA**

Neste tipo de estabilização podem ser utilizados vários tipos de aditivos químicos. As partículas do solo são aglutinadas através de reacções químicas e não físicas. A estabilização química utilizada em obras de pavimentação rodoviária recorre normalmente ao cimento, à cal, aos materiais betuminosos, às resinas e aos carbonatos (Hamzah, 1983). Contudo, será interessante notar que o grupo de estudo da caracterização dos solos de fundação de pavimentos rodoviários, reunido no "Workshop on Improved Pavement Design" realizado em Março de 1996, e que tinha como principal objectivo preparar o Guia 2002 da AASHTO (American Association of State Highway & Transportation Officials), apenas teve em conta a estabilização com cimento, betume, cal e cal/cinzas (Little, 1999).

O tratamento de solos com estes materiais em obras de terraplenagens tem dois objectivos: melhorar os solos muito húmidos, quer se tratem de solos "in situ" quer de solos a serem reutilizados; e realizar camadas de solo

suficientemente rígidas e estáveis às variações hídricas, capazes de permitir o tráfego de obra e suportar a construção das camadas superiores (Correia, 1996). No primeiro caso pretende-se uma rápida alteração no comportamento do solo de modo a possibilitar a circulação de equipamentos de obra e a execução das terraplenagens, não visando contudo uma significativa melhoria das características mecânicas. Esta melhoria constitui sim o segundo objectivo referido, no que pode ser considerado uma transformação do solo original num material nobre através da alteração permanente das suas propriedades.

Cada vez mais utilizado em Portugal, sobretudo em obras rodoviárias, o tratamento de solos com ligantes hidráulicos justifica-se pelas necessidades de carácter económico e também por uma crescente preocupação ecológica. O desenvolvimento desta técnica construtiva está associado ao progresso tecnológico verificado nos últimos anos, permitindo actualmente consideráveis rendimentos e uma boa qualidade de construção (Correia, 1996).

Neste capítulo é feita uma breve descrição dos métodos de estabilização química mais utilizados. Contudo, e visto a cal constituir o estabilizante em destaque nesta dissertação, o seu estudo mais detalhado, onde se inclui uma abordagem à utilização conjunta da cal e de cinzas volantes, será objecto dos capítulos seguintes.

### **2.4.3.1 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS COM CIMENTO**

#### **2.4.3.1.1 INTRODUÇÃO**

Um dos aditivos mais conhecidos e aplicados na estabilização química de um solo é o cimento. Este tratamento pode ser utilizado em certos solos pouco plásticos ou não plásticos, com teores em água suficientemente elevados para impedir a sua adequação aos trabalhos de terraplenagens. Contudo, os principais objectivos da utilização do cimento na estabilização de solos são a melhoria das características mecânicas e uma maior estabilidade relativamente à variação do teor em água.

A estabilização com este material consiste na preparação de uma mistura de solo finamente pulverizado, cimento e água, em proporções previamente determinadas. Normalmente a percentagem de cimento situa-se entre os 5 a 7% nos siltes, 7 a 15% nas areias e é de cerca de 4% no cascalho. A mistura assim obtida é

aplicada e compactada, ficando posteriormente a hidratar (normalmente durante 7 dias) em condições de humidade adequadas, verificando-se o seu progressivo endurecimento.

O cimento tem sido utilizado nos Estados Unidos não só na estabilização de solos mas também no melhoramento de estradas de seixo, no que constitui um caso particular deste aditivo. A mistura solo/cimento constitui o tipo de estabilização mais utilizado, sendo particularmente vantajosa em solos granulares, solos siltosos e argilas pouco plásticas. Não é porém adequada à estabilização de solos com apreciável teor em matéria orgânica.

Em solos pouco plásticos ( $I_p < 10\%$ ) a reduzida fracção argilosa não permite que a cal produza outro efeito senão o abaixamento do teor em água, enquanto o tratamento com cimento permitirá não só uma reutilização dos materiais em aterro, mesmo com um elevado teor em água (visto que o teor óptimo para compactação aumenta); como uma melhoria das características mecânicas, permitindo por exemplo a sua utilização em camadas de leito do pavimento.

Nos solos finos plásticos, as forças de ligação entre as partículas constituintes impedem uma adequada mistura com o cimento. É pois importante quebrar essas ligações transformando o solo em pequenos grânulos, recorrendo ao tratamento com cal. Isto permite que o cimento actue como ligante dessas novas partículas incoerentes, melhorando consideravelmente as propriedades do solo.

Na estabilização química de solos os cimentos do tipo Portland foram sempre os mais utilizados, embora praticamente todos os tipos de cimento possam ser empregues. Contudo, seja qual for o tipo de cimento usado na estabilização dum solo, ele deve estar conforme às especificações que o caracterizam: um cimento de qualidade inferior ou danificado não deve ser utilizado.

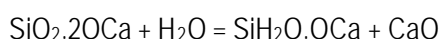
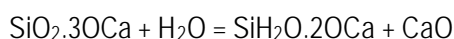
Cimentos de presa rápida podem ser indicados para solos com elevada percentagem de matéria orgânica, visto libertarem quantidades extra de cálcio úteis no combate ao referido material orgânico. Noutras situações pode justificar-se o recurso a um agente retardante, reduzindo assim a perda de resistência que ocorre com os cimentos Portland normais devido a atrasos na preparação e compactação.

Um problema comum a qualquer tipo de estabilização por adição é a mistura do aditivo, particularmente quando um pó seco (cimento ou cal), é adicionado a um solo húmido. Foi então sugerido que um cimento fino “diluído” em material inerte (carbonato de cálcio, por exemplo), poderia ser igualmente eficaz e mais barato do que o cimento comum. Contudo, verifica-se que a distribuição do tamanho das partículas num cimento Portland normal encontra-se normalmente entre 0.5 e 100 micra (com uma média a rondar os 20 micra), e que as partículas maiores não chegam a hidratar completamente. Ora, tendo em conta que uma partícula de 10 microns pode levar três meses a hidratar completamente, seria razoável pensar que um cimento fino é mais vantajoso do que a referida mistura com material inerte de maiores dimensões. Mas é preciso considerar o facto de que as partículas do inerte não consomem água, não impedem ou retardam a sua passagem e originam uma redução da retracção e do calor de hidratação, combinando assim os benefícios dum cimento fino com as propriedades dum cimento normal (Ingles e Metcalf, 1972).

#### 2.4.3.1.2 MECANISMOS DE ESTABILIZAÇÃO DOS SOLOS COM CIMENTO

É normalmente aceite que o cimento ou forma fortes núcleos distribuídos pela massa de solo ou constitui um esqueleto de cimento hidratado, preenchendo os vazios e envolvendo assim as partículas. Herzog (in Ingles e Metcalf, 1972) demonstrou que, numa argila à base de montmorilonite, a evolução da curva tensão-deformação permite, para baixos teores em cimento, sustentar a teoria de que o cimento constitui núcleos independentes espalhados pela massa de solo, enquanto para teores em cimento mais elevados se verifica a progressiva interligação dos referidos núcleos, transformando o cimento num esqueleto das partículas de solo.

Uma vez que o cimento Portland normal é constituído por cerca de 45% de silicato tricálcico ( $\text{SiO}_2 \cdot 3\text{Ca}$ ) e 27% de silicato bicálcico ( $\text{SiO}_2 \cdot 2\text{Ca}$ ), e hidrata com o solo formando um gel de silicato hidratado de bi e monocálcio ( $\text{SiH}_2\text{O} \cdot 2\text{Ca}$  e  $\text{SiH}_2\text{O} \cdot \text{OCa}$ ), a reacção pode ser representada da seguinte forma:



Durante a reacção de hidratação é libertada uma determinada quantidade de cal. O gel de silicato de cálcio insolúvel cristaliza muito lentamente formando uma matriz envolvente.

Contudo, a proporção de partículas argilosas aglutinadas será bastante pequena, sobretudo se comparada com a proporção de partículas granulares que passarão a estar interligadas. Independentemente do tipo de solo, o processo de hidratação do cimento, fundamental para a optimização das características da mistura, é facilitado se esta for compactada no teor de humidade óptimo.

No caso de solos granulares existe alguma semelhança com um típico betão de cimento, embora nas misturas solo/cimento a quantidade de cimento não seja suficiente para preencher a totalidade dos vazios. Neste caso o cimento irá apenas ligar as áreas de contacto das partículas. Como essas áreas dependem da granulometria do solo, quanto melhor for a sua graduação menor a quantidade de cimento necessária para atingir determinada resistência. Sendo assim, em areias de graduação uniforme com áreas de contacto mínimas, é substancialmente maior a necessidade de cimento.

No caso de solos coesivos a semelhança, em termos de comportamento, com uma argamassa ou betão é muito menor. A adição de cimento reduz a plasticidade do solo, o que é atribuído à libertação de iões cálcio durante as reacções de hidratação do cimento. A fixação dos catiões nas partículas de argila altera a distribuição das cargas eléctricas provocando a atracção mútua entre as partículas e a sua consequente floculação. As partículas assim agregadas passam a comportar-se como partículas de maiores dimensões do tipo siltoso ou argilo-siltoso, com inferior plasticidade e coesão.

Em seguida inicia-se a hidratação dos diferentes constituintes do cimento, com os aumentos de resistência provocados pelos recém criados ligantes amorfos e com a consolidação desse endurecimento a longo prazo motivada pelos produtos cristalinos. Por outro lado, a cal libertada pela hidratação do cimento vai provocar o endurecimento dos agregados de partículas de argila.

Dum modo geral, as principais características do método de estabilização de solos com cimento encontram-se indicadas no quadro 2.1.

TIPO DE ACÇÃO DO CIMENTO	EFEITO PRINCIPAL DO CIMENTO	MECANISMO BÁSICO DE ESTABILIZ	APLICAÇÕES MAIS ADEQUADAS	TEOR EM CIMENTO (peso)	AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO CIMENTO	VARIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO SOLO				TÉCNICA CONSTRUTIVA	LIMITAÇÕES
						BARIDADE	LIMITE LIQUIDEZ	LIMITE PLAST	ÍNDICE PLAST		
AGLUTINANTE	AUMENTO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA POR ACÇÃO AGLUTINANTE	HIDRATAÇÃO DO CIMENTO E MODIFICAÇÃO DOS MINERAIS ARGILOSOS	SOLOS ARENOSOS OU POUCO ARGILOSOS	SOLOS A-2 5 a 9% SOLOS A-7 9 a 15%	ENSAIOS DE DURABILIDADE E DE COMPRESSÃO	DIMINUI	LIGEIRA REDUÇÃO	DIMINUI	DIMINUI	PULVERIZAÇÃO, MISTURA, COMPACTAÇÃO E CURA	SOLOS ORGÂNICOS
MODIFICADORA	DIMINUIÇÃO DA PLASTICIDADE ACOMPANHADA OU NÃO DE AUMENTO DA RESISTÊNCIA	MODIFICAÇÃO DA ARGILA E ALTERAÇÃO DA PELÍCULA DE ÁGUA	ARGILAS	0,5 a 4%	LIMITES DE CONSISTÊNCIA E ANÁLISE GRANULOMÉT	.	VARIA	AUMENTA	DIMINUI	PULVERIZAÇÃO, MISTURA E COMPACTAÇÃO	PEQUENO AUMENTO DE RESISTÊNCIA

Quadro 2.1: Principais características da aplicação do cimento na estabilização de solos

### 2.4.3.1.3 CARACTERÍSTICAS DAS MISTURAS SOLO/CIMENTO

Os principais factores que condicionam as propriedades físicas dos solos estabilizados com cimento são, para além do tipo de solo e da quantidade de aditivos, o grau de mistura, o tempo de cura (ou de hidratação) e a baridade seca da mistura compactada.

O cimento exerce a sua acção estabilizante conforme o teor em cimento da mistura. Uma das acções, que consiste no aumento da resistência mecânica devido à acção aglutinante do aditivo (cimentando as partículas do solo), tem efeito preponderante quando os teores em cimento são mais altos. A outra acção, de importância preponderante quando os teores em cimento são mais baixos, consiste fundamentalmente na alteração da fracção argilosa do solo, mais concretamente na diminuição da plasticidade, podendo ou não ser acompanhada de um aumento na resistência mecânica.

Sendo assim, e apesar das misturas de solo e cimento serem genericamente designadas por “solo-cimento”, Pereira (1970) distingue os seguintes três tipos principais de misturas, com diferentes aplicações:

1. Solo-cimento compactado: Mistura de solo e cimento com uma quantidade de cimento suficiente para provocar o seu endurecimento; sendo preparada com a quantidade de água suficiente para uma compactação adequada e para hidratação do cimento.
2. Solo corrigido com cimento: A proporção de cimento é neste caso inferior, destinada apenas a corrigir determinadas propriedades físico-químicas do solo, tais como a expansibilidade, a plasticidade ou a capacidade de carga. O teor em cimento, geralmente superior a 1%, é sensivelmente menor do que o do “solo-cimento”, não chegando assim a endurecer a mistura de forma significativa.
3. Solo-cimento plástico: A quantidade de cimento utilizada neste tipo de misturas é suficiente para permitir o seu endurecimento, sendo adicionada a água necessária para lhe conferir, no momento da aplicação, uma consistência semelhante à das argamassas.

O solo-cimento utiliza-se sobretudo na construção de camadas de base e de sub-base de pavimentos de estradas e de aeródromos, assim como em pavimentos de pistas ou estradas de pequeno tráfego, faixas para aterragens de emergência, núcleos de barragens de terra, etc. No que respeita à utilização em bases de pavimentos rodoviários, verifica-se inicialmente um comportamento do tipo “pavimento rígido”, sendo contudo habitual a fendilhação do pavimento ao fim de algum tempo, passando este a comportar-se como um “pavimento flexível”. Na sua preparação, mistura e compactação é usual utilizar-se equipamento rodoviário apropriado, como “misturadores-pulverizadores”, cilindros, espalhadores, etc.

Os solos corrigidos com cimento utilizam-se normalmente nas camadas que constituem o “leito dos pavimentos”, embora possam ser aplicados em pavimentos de estradas de tráfego muito reduzido.

O solo-cimento plástico é utilizado sobretudo para evitar as dificuldades de colocação em obra ou quando não é conveniente utilizar o equipamento rodoviário de pulverização, mistura e compactação. Utiliza-se pois



no revestimento de valas, canais, taludes, reparações de pavimentos, etc. A preparação da mistura é então realizada através de betoneiras e vibrada com placas, após colocação.

#### **2.4.3.1.4 PROPORÇÃO DOS CONSTITUINTES DA MISTURA, PREPARAÇÃO, COMPACTAÇÃO E CURA**

A determinação do teor em cimento mais adequado à estabilização de um determinado solo apresenta alguma complexidade. Se é verdade que o aumento da quantidade de cimento conduz a resistências mais elevadas (Quadro 2.2), a sua utilização em quantidades superiores às necessárias apresenta alguns inconvenientes, não só do ponto de vista económico como do ponto de vista técnico.

Com efeito o solo-cimento, quando utilizado em pavimentos rodoviários, não se comporta como um material rígido mas sim como um material semi-rígido, em resultado das múltiplas fissuras que o dividem em blocos. Essa rede de fracturas deverá ser suficientemente apertada de modo a garantir um grau de rigidez adequado, o que é normalmente conseguido com a utilização da quantidade de cimento estritamente necessária. Ou seja, mesmo que a resistência mecânica da mistura seja elevada, a sua excessiva retracção devida a um elevado teor em cimento vai originar uma rede de fendas demasiado larga e com blocos de dimensões médias. O material deixa assim de ter um comportamento semi-rígido.

A influência da quantidade de água adicionada à mistura tem sobretudo a ver com a compactação desta, o que faz com que a relação água/cimento seja pouco utilizada na estabilização de solos. Segundo Pereira (1970), o teor em água necessário à hidratação do cimento é inferior ao teor óptimo para compactação. Sendo assim, ao ser adicionada à mistura a quantidade de água necessária à obtenção do teor óptimo de humidade, está automaticamente garantida a hidratação do cimento, desde que não se verifiquem perdas durante o período de cura. Parece contudo verificar-se alguma tendência para o aumento da resistência com o teor em água, em igualdade de peso específico aparente. Por outro lado, em solos argilosos e siltosos, a quantidade de água que conduz à máxima resistência das misturas parece ser igual ou ligeiramente superior ao teor óptimo determinado no ensaio de compactação, enquanto em solos arenosos parece ser mais baixa.

A homogeneidade da mistura tem grande importância para a qualidade do solo-cimento. Assim, as misturas preparadas em laboratório são em geral mais resistentes do que as preparadas no campo, com os mesmos

materiais e proporções, em virtude de em laboratório a se conseguirem misturas mais homogêneas. O grau de homogeneidade das misturas depende do grau de pulverização do solo, do modo como é feita a mistura e da duração desta.

Na prática, não é económico pulverizar muito o solo, admitindo-se geralmente como satisfatório a desagregação da fracção fina até passar no peneiro nº 4. Com efeito, embora a resistência à compressão de certas misturas pareça crescer com o logaritmo do tamanho das partículas, os elementos de maiores dimensões tendem a absorver água e a entumescer durante a cura, provocando a desagregação do material. Por outro lado, a técnica de pulverizar pouco o solo com o objectivo de, com menos cimento, conseguir ligar os grãos maiores do solo natural compactado, não parece adequada visto que o contributo ao aumento da resistência dado pelos aglomerados interiores é normalmente inferior aquele que é dado pelos aglomerados formados com a mistura. Além disso, com pequenos teores em cimento a homogeneidade é mais difícil de conseguir, mesmo quando os finos são obrigados a passar no peneiro nº 4.

SOLO			SOLO-CIMENTO		
TIPO DE SOLO	RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO (kPa)	CAMPO DE APLICAÇÃO	TIPO DE SOLO	RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO (kPa)	CAMPO DE APLICAÇÃO
ARGILA, LODO	< 70	COMO SOLO DE FUNDAÇÃO	ARGILAS, SOLOS ORGÂNICOS	< 350	NÃO DEVE SER UTILIZADO
			SILTES, SILTES ARGILOSOS, AREIAS MAL GRADUADAS, SOLOS POUCO ORGÂNICOS	ENTRE 350 E 1050	SUB-BASE SOBRE FUNDAÇÃO MUITO FRACA
AREIA ARGILOSA POUCO COMPACTADA	ENTRE 70 E 300		SILTES ARGILOSOS, ARGILAS ARENOSAS, AREIAS E SEIXOS MAL GRADUADOS	ENTRE 700 E 1750	SUB-BASE SOBRE FUNDAÇÃO FRACA

			AREIAS SILTOSAS, ARGILAS ARENOSAS, AREIAS E SEIXOS	ENTRE 1750 E 3500	BASE PARA ESTRADAS DE TRÁFEGO REDUZIDO EM CLIMAS TEMPERADOS (COM REVESTIMENTO); SUB- BASE PARA ESTRADAS PRINCIPAIS E PISTAS DE AVIAÇÃO
MISTURAS BEM COMPACTADAS DE SEIXO, AREIA E ARGILA	ENTRE 300 E 700		AREIA ARGILOSA BEM GRADUADA, MISTURAS DE SEIXO, AREIA E ARGILA E AREIAS OU SEIXOS	ENTRE 2800 E 10500, TENDO- SE VERIFICADO VALORES ATÉ 28000	BASE PARA ESTRADAS DE TRÁFEGO REDUZIDO EM CLIMAS MAIS SEVEROS (COM REVESTIMENTO); BASES PARA ESTRADAS DE TRÁFEGO MÉDIO EM CLIMAS TEMPERADOS (COM REVESTIMENTO); SUB- BASE DE ESTRADAS PRINCIPAIS E PISTAS DE AVIAÇÃO

Quadro 2.2: Resistências típicas de solos e de solos estabilizados com 10% de cimento  
(adaptado de Pereira, 1970)

A duração do período de mistura e de espera até à compactação influenciam também a resistência. Com efeito, logo que em obra se adiciona cimento a um solo, e como em princípio este está húmido, a fracção argilosa tende a flocular, o que provoca diminuições na baridade da mistura e consequentemente na resistência. Por outro lado começam também a criar-se algumas ligações que vão dificultar os aumentos de baridade da mistura aquando da compactação. Ora, se por um lado o prolongamento do tempo de preparação da mistura permite melhorias na sua resistência, por outro lado esse prolongamento permite a referida floculação. Sendo assim, verificam-se normalmente diminuições na resistência na ordem dos 10 a 20% ao fim de 2 horas.

O prolongamento do período de espera, que decorre entre a preparação e a compactação da mistura, parece ser mais prejudicial do que o prolongamento do tempo de preparação. Com efeito, as ligações que se vão formando vão dificultar a compactação, diminuindo assim a resistência final obtida. Por outro lado, durante o processo de compactação algumas das ligações são destruídas. Estes factores implicam reduções na resistência, ao fim de duas horas, na ordem dos 20 a 40%. Estas perdas podem contudo ser inferiores (até 50%) se for feito um remeximento imediatamente antes da compactação. Considera-se aceitável um intervalo de até 2 horas (para temperaturas na ordem dos 25°C), entre o início da preparação da mistura e a sua compactação, sendo aconselhável remeximentos intermitentes.

É indispensável que a compactação se realize rapidamente e de forma eficaz. Naturalmente, o aumento da energia de compactação aumenta a baridade e resistência das misturas. Segundo alguns autores, citados

em Pereira (1970), uma diminuição de 5% na compactação relativa provoca reduções da resistência à compressão superiores aos correspondentes a uma diminuição de 10 a 15% na quantidade de cimento. Da mesma forma, a passagem da compactação normal para a pesada origina aumentos na resistência à compressão da ordem dos 50 a 100%.

A resistência à compressão de uma mistura de solo-cimento cresce no tempo, dado o endurecimento progressivo desta. Esse crescimento pode ser afectado pelo tipo de solo e pelo teor em cimento. Os provetes são normalmente ensaiados com tempos de cura iguais ou superiores a 7 dias, visto que o efeito aglutinante do cimento tipo Portland normal é normalmente pouco característico até essa altura, tal como a influência relativa dos diversos teores em cimento utilizados. A preparação destes provetes implica a prévia realização de ensaios de compactação das misturas para determinar os teores em água óptimos.

Tal como com os betões, o solo-cimento necessita de algum tempo de cura antes de entrar em serviço. Esse tempo de cura é normalmente de 7 dias. As condições em que decorre a cura podem afectar a qualidade do produto final. Assim, convém evitar a secagem da superfície sobretudo no período inicial do desenvolvimento da resistência, o que é conseguido cobrindo o material com uma camada pouco espessa de areia ou solo, que se mantém permanentemente húmido, ou regando a superfície com um produto betuminoso que evite as perdas de água da mistura.

A temperatura ambiente também influencia a cura. Se é baixa, atrasa a presa e o endurecimento, e se é alta acelera estes fenómenos. De um modo geral, temperaturas elevadas parecem favorecer a qualidade do solo-cimento.

### **2.4.3.2 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS COM BETUME**

#### **2.4.3.2.1 INTRODUÇÃO**

Segundo o Highway Research Board (HRB, 1946), a estabilização com materiais betuminosos é a designação dada aos métodos de construção em que estes materiais são incorporados numa massa de solo de forma a proporcionar bases e sub-bases para pavimentos rodoviários.

O tratamento superficial de estradas de terra através de materiais betuminosos constituiu uma das suas primeiras aplicações à estabilização de solos. Neste tipo de tratamento, o material é adicionado ao solo sob a forma de óleo ("road oil") ou de betume fluido ("cut back"), por penetração, em regas sucessivas de forma a melhorar a penetração e adesão às partículas. A utilização do betume como material estabilizante não se encontra tão divulgada como a cal ou o cimento visto tratar-se dum material mais caro e mais exigente no que respeita à preparação da mistura.

Com efeito, algumas estradas tornam-se facilmente poeirentas em tempo seco e enlameadas em tempo de chuvas, podendo esses inconvenientes ser bastante atenuados através de regas de materiais betuminosos de viscosidade variável, à razão de 5 litros/m<sup>2</sup> no total das regas. A espessura máxima de solo assim estabilizado não excede porém 1 a 2 cm, espessura esta que é insuficiente quando as solicitações termo-higrométricas se tornam mais severas ou o tráfego mais intenso. Neste casos torna-se necessário tratar camadas mais espessas de solo promovendo a sua mistura com betume. A principal diferença entre as misturas de solo com betume e as misturas de agregados com betume reside no facto das primeiras serem executados com a presença de água e as segundas não (Nascimento, 1970a).

A estabilização com betume é utilizada quer em solos granulares incoerentes, aos quais o betume fornece coesão, quer em solos coerentes, nos quais o betume funciona como impermeabilizante à água, reduzindo a perda de resistência devido ao aumento do teor em água. Ambos os efeitos descritos são motivados não só pela formação duma película em redor das partículas do solo, aglutinando-as e evitando a absorção de água; mas também pelo simples encerramento dos poros da massa terrosa, impedindo a entrada da água.

#### **2.4.3.2.2 MATERIAIS UTILIZADOS NA ESTABILIZAÇÃO DE UM SOLO COM BETUME**

Os materiais betuminosos mais usados na estabilização de solos são os betumes líquidos ("cut-back") e as emulsões betuminosas. Isto porque a sua fluidez os torna adequados à mistura com o solo à temperatura

ambiente. Os alcatrões também são por vezes utilizados, em países onde a sua produção é significativa.

Quando são misturados com o solo, os betumes asfálticos necessitam, tal como o próprio solo, de serem aquecidos de modo a reduzir-lhes a viscosidade, impedindo assim que o betume arrefeça durante a mistura. Podem ser utilizados na estabilização de areias, em instalações análogas às usadas no fabrico de misturas betuminosas, nas quais tanto o agregado como o betume são aquecidos antes da mistura. As “areias-betume” assim obtidas possuem elevada resistência situando-se entre os solos estabilizados com betume, geralmente utilizados como base, e as misturas betuminosas, normalmente utilizadas em camadas de desgaste. O betume asfáltico não pode contudo ser utilizado nos solos-betume porque para isso seria necessário aquecer o solo, o que implicaria a sua secagem e a consequente formação de pequenos torrões onde o betume dificilmente entraria (Nascimento, 1970a).

Os betumes líquidos são geralmente formados por um betume asfáltico fluidificado por um diluente que se evapora algum tempo após a aplicação, tempo esse designado por cura. Os betumes são pois classificados, em função do tempo de cura, em betumes líquidos de cura rápida, de cura média ou de cura lenta. Cada um destes tipos de betume possui uma diferente viscosidade, resultante quer da natureza do betume quer do diluente e sua concentração.

A maioria dos materiais betuminosos utilizados na estabilização encontram-se, a temperaturas normais, num estado semi-sólido, sendo aquecidos aquando da sua aplicação. Esta necessidade de alterar a consistência destes materiais implica que as centrais de fabricação se localizem perto da obra. Quando tal não é viável recorre-se às emulsões. Uma emulsão betuminosa consiste numa dispersão de líquido (betume) relativamente estável num outro líquido com o qual não ocorre solubilidade (água). A estabilidade é conseguida através da adição dum agente emulsionante. Dependendo do tipo de agente adicionado, a solução betuminosa será aniónica ou catiónica. Assim, se o agente emulsionante confere à mistura um excesso de cargas negativas, não compensadas, esta denomina-se emulsão aniónica ou alcalina. Se por outro lado as cargas positivas estão em maioria a emulsão denomina-se catiónica ou ácida. Visto que a superfície das rochas e das partículas de areia estão normalmente carregadas negativamente, a emulsão catiónica será preferível à aniónica.

Uma das principais características das emulsões é a rapidez com que se dá a sua rotura ao serem misturadas com o solo ou agregado, distinguindo-se três tipos de emulsões com base nessa característica: as emulsões de rotura rápida, de rotura média e de rotura lenta. Alguns destes tipos são subdivididos em graduações de acordo com a respectiva viscosidade. Na estabilização de solos são normalmente utilizadas as emulsões lentas, visto haver o risco de que os outros tipos de emulsões rompam prematuramente (Nascimento, 1970a).

#### **2.4.3.2.3 MECANISMO DA ESTABILIZAÇÃO DE UM SOLO COM BETUME**

Segundo Nascimento (1970a), a acção estabilizadora do betume sobre um solo ocorre através de dois processos:

- Aglutinação das partículas, no caso de solos incoerentes;
- Restrição à entrada de água, no caso de solos coerentes, o que favorece a susceptibilidade à água da respectiva coesão.

Os mecanismos referidos dão origem aos dois principais tipos de material estabilizado com substâncias betuminosas: o solo-betume e a areia-betume. Assim, e dependendo da composição granulométrica, das propriedades físicas dos solos a estabilizar e da função do betume incorporado, são normalmente considerados quatro tipos de solo-betume a empregar em engenharia rodoviária (Winterkorn e Fang, 1975):

1. Solo-betume – Trata-se dum solo cuja resistência é sobretudo coesiva e que possivelmente seria suficiente caso o solo se mantivesse seco. Neste caso, a função do betume é apenas a de proteger o solo da água e não aumentar-lhe a resistência. O mecanismo de protecção é normalmente explicado de duas formas, consoante os autores. Alguns consideram que este consiste na formação de uma película de betume sobre a superfície da água existente nos vazios do solo e na resistência que o deslocamento dessa película oferece à entrada no solo de novas quantidades de água. Outros autores consideram porém que essa protecção resulta do revestimento com betume da superfície das partículas do solo e, além disso, do enchimento com betume dos vazios do solo, o que reduz os

canais à disposição da água. Deverá também desempenhar um importante papel neste mecanismo o facto da água ter mais facilidade em molhar a superfície das partículas do que a superfície do betume, o que resulta numa maior dificuldade da água em se infiltrar em vazios onde algumas das paredes são betuminosas do que em vazios sem qualquer revestimento betuminoso. Os melhores resultados foram obtidos para solos com dimensão máxima das partículas igual a aproximadamente um terço da espessura da camada compactada; com 50% de material passado no peneiro nº 4; com 35 a 100% de passados no peneiro nº 40; e com 10 a 50% de passados no peneiro nº 200. A percentagem de betume em relação ao peso seco de solo situa-se normalmente entre 4 a 7%. De realçar ainda o facto de haver alguma necessidade do solo estar húmido de forma a facilitar a difusão do betume no solo e ajudar à desagregação das partículas.

2. Areia-betume – A areia deve estar livre de matéria orgânica e de partículas de argila, podendo necessitar de ser misturada com material mais fino de modo a preencher os requisitos de estabilidade mecânica exigidos. A resistência dum areia limpa antes da estabilização é meramente friccional, não sendo por isso afectada pela água, o que faz com que a acção do betume seja apenas a de conferir coesão ao material original. Conforme foi já referido, na estabilização de solos arenosos a emulsão catiónica é preferível à emulsão aniónica visto as partículas de areia estarem normalmente carregadas negativamente. Ora, quando uma emulsão catiónica é misturada a uma areia seca, as partículas electricamente carregadas atraem as partículas de sinal contrário presentes na areia, o que neutraliza as partículas da emulsão e permite o recobrimento das superfícies dos grãos de areia. Quando, por outro lado, a emulsão é adicionada à areia molhada, estabelece-se uma ligação betume/areia através das moléculas de água. Contudo, visto que a afinidade da emulsão ao agregado é maior do que à água, ao fim de algum tempo a água é expulsa da superfície das partículas de areia, quando se estabelecem ligações electro-químicas entre a emulsão e a areia. A areia natural ou misturada com material mais fino deve conter menos de 12% de material que passa no peneiro nº 200. A quantidade de betume está entre 4 a 10%, devendo o valor óptimo ser determinado através de ensaios de compactação, resistência mecânica e resistência à água. Não deve contudo exceder o volume de vazios do solo compactado.



3. Argila impermeável – Consiste num sistema em que um determinado solo, possuindo uma boa graduação e uma potencialmente elevada densidade, é impermeabilizado através duma distribuição uniforme de pequenas quantidades de betume (1 a 2%).
4. Terra oleada – Trata-se duma superfície de solo, constituída por material silto-argiloso, cuja resistência à água e à abrasão foi melhorada após incorporação duma emulsão betuminosa lenta ou média ou dum “cut-back”, aplicados em duas ou três passagens, totalizando aproximadamente 5 litros por metro quadrado de superfície.

#### **2.4.3.2.4 PROPRIEDADES DAS MISTURAS SOLO/BETUME**

Fazendo ensaios de compactação a uma mistura de solo areno-argiloso com betume líquido, e considerando não apenas o teor em água mas a totalidade do fluido água/betume, obtêm-se curvas de compactação em que a baridade seca máxima corresponde um teor em fluídos ótimo. Com o aumento do teor em betume decresce a baridade seca máxima e cresce o referido teor em fluídos ótimo (Nascimento, 1970a).

Ao ensaiar à compressão simples o solo-betume compactado no teor ótimo de fluídos, verifica-se que existe um teor em betume para o qual é máxima a resistência. Os valores obtidos após a cura de provetes moldados com teores em betume de 3 a 8%, rondaram sempre os 2500 kPa. Submetendo ainda os provetes de solo-betume a um ensaio de absorção capilar verifica-se que a partir de determinado valor do teor em betume a absorção de água é insignificante. Contudo em solos mais finos, como um silte argiloso, o efeito do teor em betume sobre a resistência à compressão é insignificante.

A compactação dum solo é muito influenciada pelo teor em água, que mais não é do que o teor em substâncias voláteis do solo, quando este é aquecido a 100°C. Ao adicionarmos ao solo um betume líquido ou uma emulsão betuminosa, estamos também a adicionar as respectivas substâncias voláteis (hidrocarbonetos no caso dos betumes líquidos e água no caso das emulsões) àquelas que já existiam na humidade inicial e na água eventualmente adicionada para a mistura. Assim, as curvas de compactação obtidas com misturas solo-betume possuem um desenvolvimento semelhante às curvas de compactação de solos simples, com a

diferença de que agora se coloca o teor em voláteis e não o teor em água no eixo das abcissas (Nascimento, 1970a).

A resistência à compressão destas misturas é inversamente proporcional ao teor em voláteis no momento da moldagem dos provetes, mesmo que esse teor seja inferior ao óptimo. Contudo, se após a cura o material for molhado irá apresentar resistência máxima para um teor em voláteis que, no caso dum solo siltoso com 5% de betume, é próximo ou ligeiramente superior ao teor óptimo de compactação.

É muito importante a cura do solo-betume, sendo por um lado maior a perda de voláteis com o tempo de cura e a temperatura a que esta é feita, e por outro maior a resistência quanto menor o teor em voláteis depois de molhada a mistura.

Hamzah (1983) sumariza as propriedades dos solos estabilizados com betume da seguinte forma:

- a) Aumento da resistência à compressão uniaxial até um determinado valor óptimo do teor em betume. Este valor óptimo e a própria resistência serão tanto maiores quanto maior for o tempo de cura.
- b) Aumento da resistência à compressão e do módulo de elasticidade até um determinado valor máximo. Quanto mais elevada for a temperatura de compactação, maiores serão os valores máximos obtidos para os referidos parâmetros. Isto porque quanto mais elevada a temperatura, maior a fluidez do betume e maior a sua capacidade de movimentação. Contudo, temperaturas muito elevadas de compactação reduzem o valor máximo da resistência à compressão, visto que a deformação ocorre inicialmente no betume. Ora, como a película que envolve as partículas do solo é agora menos espessa, devido à maior fluidez proporcionada pela elevada temperatura, verificam-se pequenas deformações localizadas nesses pontos mais frágeis. O teor óptimo em betume, correspondente aos valores máximos da resistência à compressão e do módulo de elasticidade, aumenta com a diminuição das partículas do agregado.
- c) Aumento da resistência ao corte da mistura dependente da temperatura e da velocidade de deformação. O aumento da temperatura de cura otimiza o recobrimento das partículas por parte do

betume, e conseqüentemente aumenta o valor da coesão. Aumentando a temperatura de ensaio, a partir de determinado valor, obtém-se a redução destes parâmetros de resistência. Com o aumento da velocidade de deformação durante o ensaio, verifica-se o aumento da coesão e a diminuição do ângulo de atrito. Num outro estudo, referido por Dunn e Salem (1971, in Hamzah, 1983), verificou-se que para areias estabilizadas com uma emulsão betuminosa catiónica, o valor máximo da coesão é alcançado com um teor em emulsão de 7 a 10%, tendo o ângulo de atrito diminuído proporcionalmente com o aumento deste teor em emulsão.

- d) Redução da densidade máxima com o aumento do teor em betume da mistura.
- e) Redução da susceptibilidade à água com o aumento do teor em betume.

### **2.4.3.3 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS COM OUTROS ADITIVOS**

#### **2.4.3.3.1 INTRODUÇÃO**

Foram já experimentados vários produtos químicos na estabilização de solos para a construção de pavimentos rodoviários. Nem sempre estes produtos foram utilizados com o objectivo de melhorar a resistência, mas também tendo em vista evitar a produção de pó, aumentar ou diminuir a permeabilidade, reduzir a susceptibilidade à água ou ao gelo, etc.

Os aditivos mais utilizados na estabilização de solos normalmente referidos na bibliografia são, para além da cal, do cimento e do betume, os cloretos, as resinas e os impermeabilizantes. Segundo Castro (1970a), é frequente encontrarem-se informações contraditórias relativas aos aditivos mencionados, fruto de diferentes condições de ensaio e tipos de solo. Além disso, o mecanismo de actuação de muitos destes produtos na estabilização não é, em grande parte dos casos, perfeitamente dominado.

#### **2.4.3.3.2 ESTABILIZAÇÃO COM CLORETOS**

Os cloretos foram pela primeira vez usados na estabilização de solos no início do século, sobretudo para evitar a poeira nas estradas de macadame. Basicamente a sua função é a retenção de humidade, impedindo assim a formação de pó até ao seu arrastamento pela chuva, o que acontece por serem solúveis. Os cloretos mais usados em obras rodoviárias são o cloreto de sódio (NaCl) e o cloreto de cálcio (CaCl<sub>2</sub>).

O cloreto de sódio possui um grau de pureza variável e contém associadas pequenas quantidades de cloreto de cálcio e cloreto de magnésio. As especificações ASTM D32-66 e AASHTO M143-54 (in Castro, 1970a) impõem um teor mínimo em NaCl de 95 e 97% respectivamente, e fixam ainda as características a que deve obedecer para ser usado como estabilizante. O cloreto de sódio é normalmente utilizado para remoção do pó em estradas de terra, sendo por vezes usado em conjunto com a cal ou o cimento.

As impurezas encontradas no cloreto de cálcio são o cloreto de sódio e o cloreto de magnésio, cujas quantidades máximas são estabelecidas pelas especificações ASTM D98-68 e AASHTO M144-57 (in Castro, 1970a), que fixam ainda as características a que deve obedecer o cloreto de cálcio de modo a ser utilizado na estabilização de solos. O principal efeito do cloreto de cálcio consiste no aumento da densidade em alguns solos, atingindo por vezes os 11%. Noutros solos, contudo, este efeito é nulo ou contrário.

O efeito cimentante dos cloretos sobre os solos é pequeno, pelo que os materiais a estabilizar deverão possuir suficiente estabilidade mecânica. A acção dos cloretos não é contudo ainda muito bem compreendida. Castro (1970a) resume da seguinte forma os mecanismos desenvolvidos na estabilização com cloretos:

- Lubrificação. As soluções de cloretos têm acção lubrificante sobre as partículas de argila, o que permite uma melhor arrumação e conseqüentemente uma maior compacidade para uma mesma energia de compactação. Este efeito pode conduzir a um aumento de baridade entre 1 a 7%. O cloreto de cálcio é melhor lubrificante do que o cloreto de sódio.
- Retenção de humidade. Constitui uma das maiores vantagens na estabilização com cloretos que, ao absorverem a humidade do ar, conservam o solo húmido e impedem a formação de poeiras. A absorção da humidade da atmosfera por parte destes aditivos é explicada pelo facto de possuírem

uma pressão de vapor tal que os coloca em equilíbrio com uma atmosfera cuja humidade relativa é geralmente baixa. Então, desde que a humidade relativa seja superior ao valor de equilíbrio, o que constitui a situação típica, a solução saturada de cloreto de sódio ou cálcio absorverá água até se diluir de tal modo que a sua pressão de vapor iguale a do ambiente. O cloreto de cálcio é mais activo do que o cloreto de sódio, o que está relacionado com a menor pressão de vapor deste último. Tal implica que o valor de equilíbrio mencionado, a partir do qual a solução começa a absorver água, seja neste caso muito mais elevado.

- Floculação das argilas. Um excesso de iões cálcio provoca a floculação das partículas de argila através dum processo de permuta catiónica, conferindo-lhes uma granulometria mais grosseira. No caso do cloreto de sódio a diminuição dos iões  $\text{Na}^+$ , provocada por exemplo pela água da chuva, pode dispersar novamente as partículas de argila. É possível contudo proteger as estradas estabilizadas com cloreto de sódio com aplicações superficiais periódicas de cloreto de cálcio (menos solúvel).
- Solubilização dos agregados. As soluções de cloreto de sódio aumentam consideravelmente a solubilidade de certos agregados. Por exemplo, uma solução de 5% de cloreto de sódio, no caso do calcário, dissolve duas vezes mais carbonato de sódio do que a água pura.
- Ponto de congelação. Os cloretos em solução originam um abaixamento no ponto de congelação da água, dificultando a formação de gelo nos solos tratados. Quando se atinge este ponto, apenas a água passa ao estado sólido, o que implica um aumento da concentração da solução e consequentemente um novo abaixamento do ponto de congelação. Isto permite que a congelação dum solo tratado com cloretos seja difícil de atingir.
- Tensão superficial. Os cloretos provocam um aumento da tensão superficial na água, que por sua vez fortalece as ligações entre as partículas de solo e aumenta a coesão aparente. Com a evaporação a concentração aumenta e, com ela, a tensão superficial.

- **Cristalização.** A cristalização do cloreto de sódio devida à evaporação origina a formação de crostas duras na camada superior de solo tratado (cerca de 2 a 3 cm). Por outro lado, os cristais de cloreto de sódio enchem os vazios e impedem assim a evaporação da solução, evitando a secagem.
- **Limites de consistência.** O efeito dos cloretos nos limites de consistência não é significativo em vários tipos de solos e chega mesmo a ser nulo em alguns casos.
- **Resistência.** O efeito dos cloretos sobre a resistência varia de acordo com o tipo de material a tratar. A bibliografia refere casos de aumento, diminuição e não alteração da resistência do solo quando tratado com cloretos. É reconhecido que os cloretos pouca ou nenhuma resistência conferem aos solos, devendo portanto os materiais a estabilizar possuir a estabilidade mecânica adequada.

#### **2.4.3.3.3 ESTABILIZAÇÃO COM IMPERMEABILIZANTES**

Os produtos utilizados neste tipo de estabilização destinam-se a minorar a acção prejudicial da água sobre os solos. É sabido que os solos argilosos possuem uma resistência apreciável quando secos, e que essa resistência se anula totalmente quando o solo é imerso em água. Os impermeabilizantes reduzem este efeito envolvendo as partículas de solo e repelindo a água. As suas moléculas são adsorvidas pelas partículas, numa das extremidades, e repelem a água na outra extremidade. Estes produtos não conferem nenhum aumento da resistência aos solos secos, podendo inclusive verificar-se uma redução desta.

Foram já vários os hidrorrepelentes utilizados na estabilização de solos, como as alquilclorosilanas, os siliconatos, as aminas e os sais de amónio quaternário (Castro, 1970a).

#### **2.4.3.3.4 ESTABILIZAÇÃO COM RESINAS**

As resinas podem ser definidas como complexas misturas amorfas, sólidas ou semi-sólidas, ou como substâncias orgânicas sem um claro ponto de fusão e sem tendência para cristalizar (O'Flaherty, 1978 in

Hamzah, 1983). Utilizadas como aditivos, em pequenas quantidades, ajudam a melhorar os efeitos da estabilização dum solo com betume.

Entre os vários tipos de resinas naturais utilizadas correntemente encontram-se a resina colofónia (resina do pinheiro), o copal, a resina damar, etc. Uma resina muito comum que não tem origem vegetal, visto ser segregada por um insecto, é a goma-laca. O avanço da química levou entretanto à descoberta e desenvolvimento de várias resinas sintéticas, como o estabíniol, o vinsol, a resina anilina-furfural, a resina resorcinol-formaldeído, a resina epoxi, etc. Segundo Castro (1970a), para uma resina poder ser utilizada na estabilização de solos é necessário que cumpra as seguintes características: ser solúvel em água, estabelecer ligações cimentantes entre as partículas minerais do solo, tornar-se insolúvel após a reacção, ser económica e resistir à decomposição bioquímica.

As resinas são usadas sobretudo como um agente impermeabilizante, cobrindo as partículas do solo com uma fina película que repele a água. O'Flaherty (1978, in Hamzah, 1983) concluiu que o máximo efeito impermeabilizante é atingido três dias após a mistura. Existe porém uma quantidade óptima de resina a adicionar, a partir da qual a absorção de água por parte da mistura volta a aumentar. Algumas resinas proporcionam também pequenos ganhos de resistência devido ao aumento de coesão, ganhos esses que são menores quando se verificam elevadas temperaturas. Uma importante desvantagem da estabilização de solos com resinas consiste na sua vulnerabilidade às bactérias e fungos, o que reduz a sua duração.

A adição de resinas aos solos pode fazer-se de dois modos: juntando o monómero ou os monómeros juntamente com um catalisador, que promove a reacção de polimerização simultaneamente com a reacção do monómero ou do polímero com o solo; ou juntando ao solo o polímero previamente formado, no estado sólido, dissolvido ou em emulsão, ocorrendo então as reacções entre o polímero e o solo.