

4.1 INTRODUÇÃO

Como foi já referido no Capítulo 2, a utilização da cal constitui um dos métodos de estabilização química, nos quais a inclusão de aditivos como o cimento, a cal, o betume ou as cinzas volantes provoca a aglutinação das partículas do solo através de reacções químicas. Neste capítulo é feita uma descrição das principais reacções que ocorrem durante o processo de estabilização com cal, e que são normalmente agrupadas nas seguintes categorias:

- ? Permuta iónica e floculação;
- ? Acção de cimentação (também conhecida por reacção pozolânica);
- ? Acção de carbonatação.

A introdução de iões cálcio, através da cal, origina a permuta de catiões com os minerais argilosos. Além disso, estes iões mantêm-se activos em redor das partículas de argila. Ambos os processos referidos alteram a densidade das cargas eléctricas junto às partículas de argila, que entretanto se atraem electricamente e causam a floculação.

A acção de cimentação (também designada por reacção pozolânica) é a principal responsável pela acção a longo prazo da cal na estabilização do solo. As reacções pozolânicas originam a formação de silicato hidratado de cálcio e/ou aluminato de cálcio através da reacção entre a cal e a sílica e alumina livres nas partículas de argila. A interacção entre a cal e a argila conduz à dissolução da sílica e da alumina das partículas de solo no ambiente de elevado pH originado pelas moléculas de Ca(OH)_2 . Os materiais dissolvidos combinam-se com os iões de cálcio formando vários tipos de agentes cimentícios que vão interligar as partículas argilosas. Estes materiais constituem a maior contribuição para o aumento da resistência verificado nas misturas solo-cal.

A reacção de carbonatação consiste na reacção entre a cal e o dióxido de carbono presente na atmosfera, formando materiais cimentícios relativamente fracos, tais como o cálcio ou o carbonato de magnésio.

O conceito de melhoramento dos solos através das reacções químicas entre as partículas de solo, a água dos vazios e os materiais adicionados, é análogo nos casos do cimento e da cal. O gráfico da Figura 4.1 mostra

claramente que os efeitos da estabilização com cal ocorrem muito mais rapidamente do que no caso da estabilização com cimento. Porém, o sucesso da estabilização com cal depende de forma decisiva (ao contrário da estabilização com cimento, em que as limitações são muito menores), da quantidade de partículas inferiores a 60 μ que existem no solo. Estas terão de constituir pelo menos 35% da massa de solo a estabilizar (Van Impe, 1989). Em contrapartida, a estabilização com cal pode em vários casos ser altamente beneficiada pela adição conjunta de cinzas volantes, nomeadamente no que respeita à resistência do solo estabilizado.

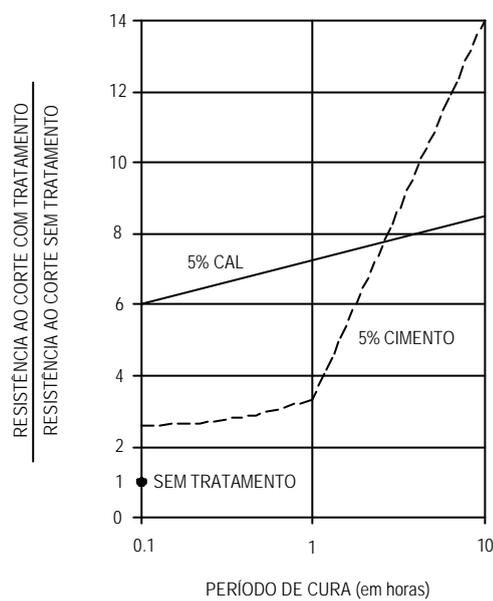


Figura 4.1: Evolução no tempo da resistência ao corte de um solo tratado com cal ou com cimento (adaptado de Van Impe, 1989)

A estabilização com cal é feita com óxido de cálcio (cal viva) ou hidróxido de cálcio (cal apagada). A cal agrícola é usualmente carbonato de cálcio, e é ineficaz para o melhoramento e estabilização dos solos. A estabilização depende das reacções entre a cal e os minerais de argila. Os principais resultados desta reacção são:

- ? O aumento da resistência mecânica e da capacidade de carga do solo;
- ? A redução da susceptibilidade à dilatação e retracção;
- ? A redução da humidade e o melhoramento da trabalhabilidade e das características de compactação.

A maioria das argilas encontradas nas regiões temperadas são suficientemente reactivas quando estabilizadas com cal. Contudo, à temperatura ambiente, a reacção é lenta, podendo o solo estabilizado continuar a ganhar resistência ao longo de vários anos.

Desde sempre a principal aplicação do método de estabilização de solos com cal foi nas obras rodoviárias, nomeadamente no melhoramento das sub-camadas argilosas que constituem solo de fundação para os pavimentos e na execução de aterros com solos argilosos húmidos. O tratamento dum estrato argiloso permite ainda o fornecimento dum suporte à compactação dos estratos superiores. Uma boa compactação não pode ser alcançada sobre um material mole. Milhares de quilómetros de auto-estradas em todo o mundo, bem como os aeroportos mais importantes, foram construídos sobre solos estabilizados com cal e/ou cimento.

O objectivo que se pretende alcançar com a estabilização com cal numa sub-camada é, para além do aumento da resistência, a compactação no teor óptimo em água após o espalhamento e mistura da cal. O material começa então a cimentar, tornando-se cada vez mais forte e granular. Pode agora ser considerado um material agregado contendo partículas de granulometria superior, com um maior ângulo de atrito. A maior estabilidade adquirida permite melhorar a resposta dos solos relativamente a movimentos de assentamento ou deslizamento, tornando possível a sua utilização também em aplicações estruturais.

Sintetizando, o método de estabilização de solos com cal pode ser usada nas seguintes situações:

- ? Quando os materiais forem consideravelmente húmidos ou plásticos;
- ? Quando são necessários melhoramentos na trabalhabilidade e compactação;
- ? Quando é necessária maior resistência;

- ? Quando, num pavimento rodoviário, são necessários materiais de qualidade superior ao da sub-base a partir dos solos in situ;
- ? Quando são necessários trabalhos temporários ou fazer estradas com niveladora por arrasto;
- ? Quando os locais são afectados por condições meteorológicas adversas;

4.2 CARACTERIZAÇÃO DAS REACÇÕES FÍSICO-QUÍMICAS ENTRE OS SOLOS E A CAL

4.2.1 INTRODUÇÃO

As alterações químicas resultantes do contacto da cal com os minerais argilosos na presença de água podem ser divididas em duas categorias principais: permuta iónica e reacções pozolânicas. A permuta iónica inclui todos os iões que normalmente envolvem as partículas de argila assim como aqueles que estavam inicialmente sobre a superfície dessas partículas e foram entretanto trocados por iões permutáveis de valência superior. Para qualquer tipo de solo o índice de reacção pozolânica inicial, a uma temperatura constante, depende da concentração de cal ionizada na solução. A concentração iónica depende, em qualquer altura, da velocidade a que são substituídos os iões presentes na dupla camada eléctrica (taxa de solubilidade). Outras reacções são também referidas na literatura: a reacção de floculação e a reacção de carbonatação. A Figura 4.2 representa as principais reacções físico-químicas que ocorrem num solo estabilizado com cal.

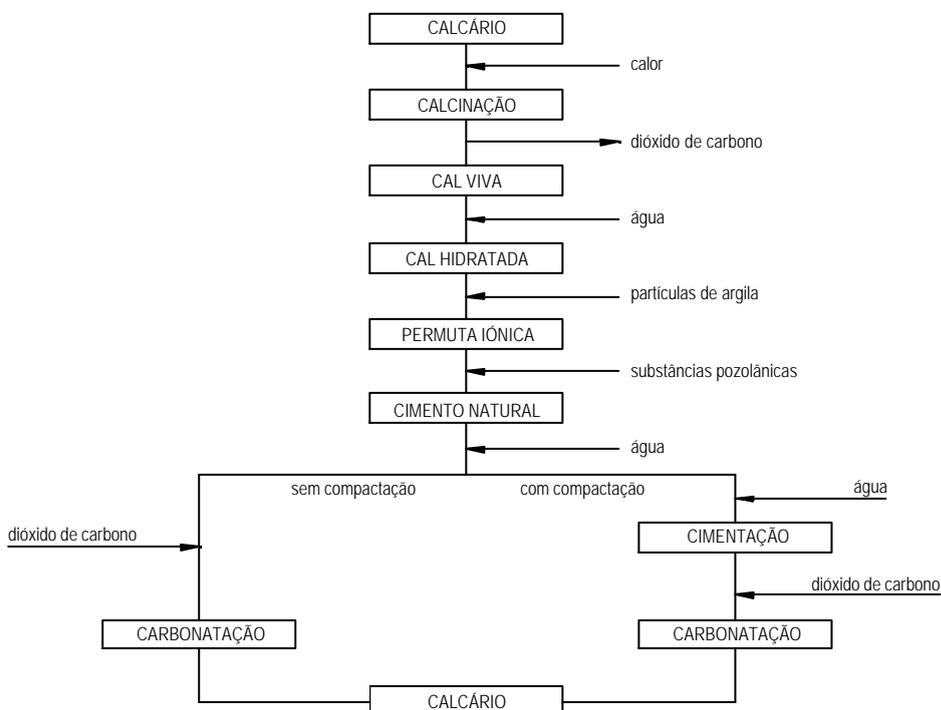


Figura 4.2: Esquema das principais reacções físico-químicas que ocorrem num solo tratado com cal
(adaptado de Arman, 1988, in Neves, 1993)

A existência e intensidade destas reacções estão normalmente relacionadas com o tipo de solo, nomeadamente com a sua composição granulométrica e natureza mineralógica das partículas; com o seu peso volúmico; com o tipo e quantidade de cal utilizada; com o teor em água de compactação das misturas e com a temperatura. Estas reacções não são simultâneas, sendo que as reacções de permuta iónica e de floculação ocorrem imediatamente, iniciando logo a alteração de algumas das características físicas do solo, como o teor em água, a granulometria, a compactação, a plasticidade e a resistência.

4.2.2 PERMUTA IÓNICA E FLOCULAÇÃO

A permuta iónica e a floculação constituem as primeiras reacções desenvolvidas após a mistura de solo e cal. A floculação, consequência da permuta iónica, consiste na aglomeração das partículas finas do solo em flocos estáveis. Trata-se, assim, da principal responsável pelas alterações das características geotécnicas do solo, verificadas logo após a adição da cal: granulometria, compactação, plasticidade, trabalhabilidade e resistência mecânica imediata.

As partículas de argila encontram-se carregadas electricamente, com predominância de cargas negativas distribuídas nas faces (Capítulo 3.2.2.6), enquanto as cargas positivas se encontram em maioria nos bordos, mas em quantidades consideravelmente inferiores, pelo que as partículas se comportam, de forma geral, como electricamente negativas (se submetidas a um campo eléctrico deslocam-se para o cátodo). Esta

característica das argilas é a principal responsável pela capacidade de adsorver cátions permutáveis na sua superfície. Estabelece-se então uma troca contínua entre os referidos iões adsorvidos, contidos na dupla camada iónica (solução micelar), e outros com a mesma carga eléctrica pertencentes à solução exterior (solução intermicelar) onde se encontram os iões livres. Os cátions de valência inferior são normalmente preteridos pelos cátions de valência superior, o que conduz à diminuição da repulsão eléctrica entre as partículas.

Ao adicionar cal a um solo, as moléculas de Ca(OH)_2 existentes na superfície dos cristais de cal entram em contacto com as partículas argilosas e a fase líquida do solo, dissociando-se em cátions Ca^{2+} e em aniões OH^- segundo a reacção:



Os cátions alcalino-terrosos Ca^{2+} , agora em excesso na solução intermicelar, vão substituir os cátions alcalinos Na^+ e K^+ de valência inferior existentes na solução micelar. Quanto menor a carga electropositiva dos cátions de troca adsorvidos na superfície das partículas (como por exemplo: H^+ , Ca^{2+} ou Mg^{2+}), menor o número destes cátions que podem ser atraídos pela referida superfície. Então, como existem agora mais cargas positivas na solução intermicelar, verifica-se uma diminuição da carga negativa das partículas em suspensão e, conseqüentemente, das forças de repulsão entre estas. Além disso, o menor número de cátions adsorvidos permite uma diminuição da espessura da solução micelar, o que significa que as partículas passam a estar menos afastadas. Resumindo, à medida que os cátions Ca^{2+} são adsorvidos pela superfície das partículas, as forças repulsivas vão-se reduzindo. No caso da solução intermicelar se encontrar saturada de iões Ca^{2+} antes da adição de cal, tal significa que a micela já não tinha cátions para troca e portanto o efeito da cal será mínimo.

Com a diminuição das forças de repulsão entre as partículas de argila, assumem preponderância as forças de atracção, constituídas na sua maioria pelas forças de Van der Waals. Verifica-se assim a floculação das partículas. Os efeitos resultantes consistem sobretudo numa redução do índice de plasticidade e do limite de expansibilidade, para além duma redução da densidade máxima. As partículas de argila, actuando agora como agregados, comportam-se como um solo siltoso (Figura 4.3).



Figura 4.3: Alteração da textura de um solo argiloso devido à adição de cal

A reacção de hidratação do óxido de cálcio é altamente exotérmica e processa-se rapidamente, mas a hidratação do óxido de magnésio é lenta e promovida pelo calor. O calor libertado pela reacção durante a mistura é rapidamente dissipado pela água quando a reacção acontece numa quantidade de água superior à necessária para a hidratação.

Quando a quantidade de água está próxima da requerida para a hidratação o calor desenvolvido terá de ser dissipado pelo material imediatamente em redor, podendo ficar concentrado no próprio local. A própria formação da crosta é em parte devido à absorção de algum do calor da reacção. O calor em excesso pode também permanecer suficientemente localizado para permitir que parte do MgO da cal dolomítica se transforme em $Mg(OH)_2$ (Sheeler, 1959).

A quantidade mínima de cal a adicionar de forma a desenvolver ao máximo os efeitos da floculação situa-se normalmente abaixo dos 3%, estando o valor exacto dependente da quantidade de minerais argilosos presentes no solo.

Quantidades de cal na ordem do 1% ou inferiores produzem um estado metaestável, mas quando são adicionadas quantidades superiores de cal a floculação das partículas de argila assume uma natureza mais permanente e progressiva. A floculação iónica e as ligações através dos silicatos iniciam-se ao mesmo tempo, mas enquanto que no primeiro caso o efeito é imediato, no segundo caso é necessário algum tempo para que se complete o processo.

Segundo Hilt (1960), as alterações às propriedades dos solos argilosos provocadas pela adição de cal dependem largamente da quantidade de cátions inicialmente adsorvidos na superfície das partículas de argila e do tipo de fracção argilosa. A natureza dos cátions permutáveis não tem grande importância em argilas à base de caulino, mas é fundamental em argilas montmoriloníticas.

Argilas expansivas contendo montmorilonite reagem rapidamente com a cal, perdendo plasticidade e ganhando lentamente resistência pozolânica. Argilas à base de illite, clorite, vermiculite ou caulinite são normalmente estabilizadas de forma menos eficaz pela cal.

4.2.3 ACÇÃO DE CIMENTAÇÃO

Após a rápida reacção inicial entre o solo e a cal, e quando a cal se encontra em excesso, continuam a verificar-se continuamente novas reacções químicas. Os constituintes da argila, nomeadamente a sílica e a alumina, reagem lentamente com a cal, do que resulta o desenvolvimento de materiais cimentícios dentro e entre as partículas de argila.

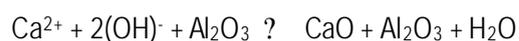
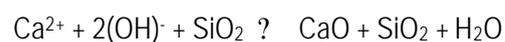
As pozolanas são materiais naturais ou artificiais que possuem constituintes passíveis de reagir com o Ca(OH)_2 para formarem, em presença da água, novos compostos estáveis de poder aglomerante e endurecedor, tais como os aluminatos e os silicatos de cálcio hidratado (Neves, 1993). Os minerais de argila são pozolanas naturais, e têm a capacidade de reagir com a cal adicionada ao solo produzindo materiais cimentícios. Estes materiais são bastante similares, na sua composição, aos produtos da pasta de cimento. Contudo, enquanto que o cimento constitui um ligante hidráulico, capaz portanto de aglutinar as partículas de argila, a cal terá de reagir com essas partículas de modo a poder uni-las. O processo é relativamente lento, dado que a cal disponível tem que se difundir através da estrutura do solo e atacar e remover a sílica das partículas argilosas, conduzindo contudo a consideráveis ganhos de resistência.

Uma diferença fundamental em relação à estabilização com cimento consiste no facto da taxa de aumento de resistência ser neste caso constante, enquanto na estabilização com cal a velocidade do aumento de resistência depende do tipo de solo a estabilizar.

Croft (1964, in Biswas, 1972) sugere que a reacção de cimentação está relacionada com a quantidade de sílica e alumina solúveis presentes na argila. As partículas são rapidamente envolvidas por um produto amorfo, formando-se uma estrutura cimentícia a partir dos pontos de contacto entre as partículas de argila.

Contudo, Hilt (1960) sustenta a teoria de que é o processo de troca de cationes, já descrito no Capítulo 3.2.2.7, que constitui o principal responsável pelo rápido melhoramento do solo. Outra hipótese foi ainda levantada por vários outros autores, entre os quais Diamond e Kinter (1966, in Biswas, 1972), segundo a qual seria a adsorção de cal pelas partículas o mais importante factor de influencia nas alterações verificadas. Estes autores defendem que o Ca(OH)_2 , inicialmente adsorvido na superfície das partículas através da troca de cationes, penetra na própria estrutura da argila quando esta é atacada quimicamente pela cal. Este processo de substituição desenvolve-se lentamente com o tempo, quebrando gradualmente a estrutura da argila, até se constituir uma fina camada de gel envolvente que origina a cimentação entre as partículas.

Duma forma geral, a reacção de cimentação é explicada da seguinte forma: a cal adicionada ao solo resulta em acréscimos consideráveis do pH, o que facilita a dissolução da sílica presente nos minerais argilosos e a entrada de cal na solução saturada, onde ocorre a combinação da sílica com o cálcio, formando silicato hidratado de cálcio. Simultaneamente, o ataque das argilas pela cal e a sua provável decomposição e destruição conduz à formação de aluminato hidratado de cálcio. As referidas reacções desenvolvem-se enquanto houver Ca^{2+} e silicatos e aluminatos disponíveis, e podem escrever-se da seguinte forma:



Estes novos elementos encontram-se inicialmente em forma de gel, revestindo as partículas do solo formando um encadeamento que eventualmente resulta em novos compostos minerais: silicatos e aluminatos de cálcio hidratados. Ou seja, a reacção da cal com os minerais de argila origina um gel de silicato/aluminato de cálcio

insolúvel em água que, após cristalizar, leva à cimentação das partículas entre si, constituindo uma estrutura envolvente das mesmas (Figura 4.4). Contudo, este gel só se forma se houver água suficiente para permitir a transferência dos iões Ca^{2+} e OH^- para a superfície do mineral argiloso. Kézdy (1979, in Neves, 1993) considera que a fase de formação do gel é a mais importante no aumento da resistência mecânica do solo estabilizado com cal, podendo ser facilmente identificada ao microscópio.

É sabido que a cal terá, antes de mais, de satisfazer a afinidade em relação ao solo. Sendo assim, a cal não estará disponível para iniciar as reacções pozolânicas com as partículas do solo até compensar a referida afinidade. Esta compensação foi designada por “fixação da cal” (Hilt, 1960), visto que a cal “aderiu” às partículas do solo, não estando portanto disponível para outras reacções. O mesmo autor identificou como “capacidade de fixação da cal”, dum determinado solo, a percentagem de hidróxido de cálcio que pode ser “fixado” por este. Quando se adicionam pequenas quantidades de cal ao solo, e caso ocorra a referida fixação desta durante a mistura, a resistência mecânica não aumenta mesmo com uma correcta compactação e cura.

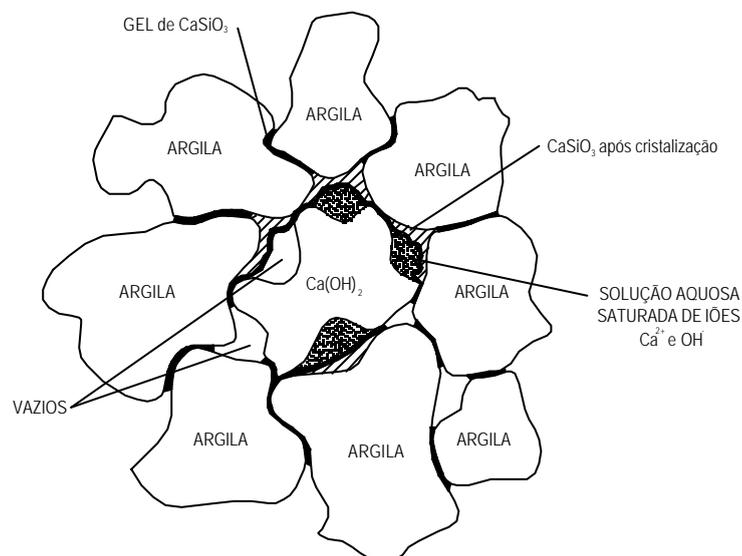


Figura 4.4: Formação de material cimentício numa mistura solo-cal

(adaptado de Van Impe, 1989)

A adição de água à cal viva provoca uma crosta cimentícia em redor das partículas de cal. Em resultado, a parte exterior do aglomerado transforma-se em cal hidratada enquanto o núcleo permanece óxido de cálcio. A formação da crosta retarda a velocidade com que a água se mistura com a cal, pelo que as condições de equilíbrio podem não ser rapidamente atingidas. Com o tempo, porém, a crosta será dissolvida e o núcleo atingido pela água. Contudo, na presença de solo e com o passar do tempo, os produtos resultantes da reacção pozolânica acabam por selar os iões presentes nos núcleos de cal viva. Na melhor das hipóteses, qualquer nova reacção pozolânica irá depender da velocidade de difusão dos iões ao longo do cimento pozolânico circundante (Hilt, 1960).

A permuta iónica é relativamente rápida e provavelmente estará completa antes de se iniciar a reacção pozolânica. De facto, a troca de iões é tão rápida quando comparada com esta reacção que, inicialmente, todos os iões de cálcio presentes na solução estão envolvidos na referida troca, pelo que a reacção pozolânica não poderia ser iniciada antes de estar completa a permuta iónica. Mas após este impedimento inicial, o único factor a limitar a velocidade desta reacção é a própria concentração da solução, sendo que as misturas solo-cal apresentam uma estagnação no ganho de resistência mecânica ao fim de um determinado tempo de cura, o que se deve principalmente aos seguintes aspectos (Sheeler, 1959):

- ? A cal foi já totalmente consumida, não estando disponível para posteriores reacções pozolânicas;
- ? No caso de ainda existir cal em excesso na mistura, o pH desta não é suficientemente elevado para permitir a dissolução da sílica e alumina das partículas argilosas.

Pode ainda acontecer que toda a cal seja consumida na fase inicial de permuta iónica, o que implica que muito poucos ou nenhum dos produtos da reacção pozolânica se venham a formar, não havendo portanto ganhos significativos na resistência mecânica da mistura.

O óxido de magnésio, quer enquanto componente da cal, sobretudo dolomítica, quer enquanto aditivo à cal calcítica, aumenta a resistência do solo estabilizado com cal. Já o hidróxido de magnésio não se revelou benéfico em nenhuma das situações. Uma provável explicação para este superior desempenho do MgO

consiste em admitir que este componente funciona como catalizador da reacção entre o hidróxido de cálcio e os minerais pozolânicos (Sheeler, 1959). Contudo, vários estudos relatados na bibliografia evidenciam o facto de existir um valor para a razão Ca/Mg para o qual a resistência devida à cimentação é máxima, o que sugere que o MgO faz parte da reacção pozolânica, tornando-se assim parte integrante da estrutura cristalina dos materiais pozolânicos cimentícios resultantes. Estes materiais cristalizam com maior facilidade e possuem uma estrutura cristalina mais estável, que pode ser formada pelo hidróxido de cálcio sem a presença do óxido de magnésio. Isto implica que a reacção pozolânica envolvendo cal dolomítica será mais rápida do que a mesma reacção envolvendo cal calcítica (Sheeler, 1959).

4.2.4 ACÇÃO DE CARBONATAÇÃO

Quer a cal viva quer a cal apagada, se expostas ao ar durante longos períodos, reagem com o dióxido de carbono e revertem ao carbonato de cálcio. Trata-se pois da reacção inversa à verificada na formação da cal viva, ou seja, obtenção de óxido de cálcio a partir do carbonato de cálcio. Claramente, qualquer carbonatação que ocorra antes da cal reagir com o solo reduz a quantidade de cal disponível para tal.

A carbonatação consiste na alteração química dos minerais argilosos devido à reacção do ião carbonato ou bicarbonato com qualquer substância mineral, especialmente com os iões cálcio contidos nos minerais, formando carbonato de cálcio (Jeremias, 1991, in Neves, 1993).

A reacção de carbonatação depende de dois factores: exposição ao ar da mistura ou existência de CO₂ no seu interior; disponibilidade de alguma cal que não tenha ainda reagido com as partículas do solo. Este último factor, segundo Winterkorn e Pamukcu (1991, in Neves, 1993), ocorre quando existem algumas partículas argilosas no solo que não são afectadas pela reacção de cimentação promovida pela cal e/ou quando se verifica um excesso na quantidade de cal adicionada ao solo.

O carbonato de cálcio resultante constitui um cimento fraco que prejudica o normal desenvolvimento das reacções pozolânicas, impedindo que atinjam resistências mecânicas mais elevadas. Além disso, o carbonato de cálcio é uma substância com elevada plasticidade, o que conseqüentemente aumenta a

plasticidade do solo e floclula as partículas de cal, dificultando assim a sua reacção com as partículas argilosas. Estes nódulos de cal carbonatados constituem elementos fracos da mistura solo-cal (Neves, 1993).

Em circunstâncias adversas o dióxido de carbono também pode reagir com os produtos de hidratação dos solos estabilizados com cal, causando uma redução na resistência e inclusive aumentos da plasticidade. Este aspecto não é normalmente relevante, mas roturas em solos estabilizados na África do Sul provaram ser originadas pela carbonatação do agente estabilizante. Bagonza et al (1987, in Little, 1995) e Paige-Green et al (1990, in Little, 1995) concluíram que, presumivelmente devido à decomposição da matéria orgânica presente no solo, o teor em dióxido de carbono nos vazios, que pode atingir os 15%, pode por vezes ser bastante superior ao que normalmente se encontra no ar, e que é da ordem dos 0.03%.

Boas condições de cura constituem, segundo Little (1995), a melhor forma de prevenir a carbonatação do material estabilizado. Se o material possui boas características de durabilidade os problemas causados por este fenómeno são mínimos. Como forma de reduzir o risco de carbonatação da mistura, Paige-Green et al (1990, in Little, 1995) sugerem que se deve manter o material sempre húmido, durante a cura, evitando ciclos de molhagem-secagem; manter afastado o dióxido de carbono, minimizando o tempo de exposição da mistura ao ar; e melhorar a prática construtiva, compactando logo que possível, de forma a obter maiores densidades e menor permeabilidade, e até serem atingidos volumes de vazios reduzidos.

4.3 PRINCIPAIS FACTORES QUE INFLUÊNCIAM A ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS COM CAL

4.3.1 INTRODUÇÃO

A adição de cal aos solos conduz a várias alterações nas suas características de plasticidade e resistência. A grandeza destas alterações depende dum número considerável de factores, tais como o tipo de solo a estabilizar, a quantidade e tipo de cal utilizada, a temperatura e o tempo de cura, e o teor em água e a baridade de compactação da mistura. O grau de envolvimento no processo de cada um destes factores condiciona o resultado final, podendo inclusive acontecer que determinada combinação influa negativamente no desenvolvimento dos mecanismos de estabilização já referidos.

4.3.2 TIPO DE SOLO

No mecanismo de estabilização dum solo pela cal, as acções de permuta catiónica desempenham um papel importante (Capítulo 4.2), pelo que a capacidade de permuta catiónica do solo está directamente relacionada com a sua aptidão à estabilização com cal. Isto porque a troca entre os iões adsorvidos pelas partículas argilosas e os iões cálcio fornecidos pela cal constitui um dos factores mais importantes na flocculação da mistura. Castro (1969), admitindo que a variação da expansibilidade era representativa da melhoria proporcionada pela cal às características do solo, relacionou a variação máxima da expansibilidade com a capacidade de permuta catiónica do solo sem cal. Verificou então que as grandes reduções na expansibilidade ocorreram nos solos de mais elevada capacidade de permuta catiónica.

O principal critério de avaliação da susceptibilidade do solo à estabilização pela cal é a sua plasticidade. Quanto mais plástico for o solo, maiores os benefícios devido à adição de cal. Solos com reduzida plasticidade não são significativamente melhorados pela cal (Castro, 1974).

As argilas do tipo da caulinite são menos sensíveis à acção da cal, reagindo de forma progressiva e muito lenta. A ligação entre as folhas de caulinite é do tipo hidrogénio, em que o ião hidrogénio sofre a atracção dos iões oxigénio de cada folha e das próprias forças de Van der Waals. Uma ligação deste tipo é suficientemente forte para não permitir que a solução de ataque constituída pelos iões Ca^{2+} circule entre as folhas (Le Roux, 1969, in Neves, 1993).

As argilas à base de montmorilonite possuem uma tripla camada, com elevado grau de substituição isomórfica e, conseqüentemente, com elevada capacidade de permuta catiónica. A ligação entre as camadas estruturais deste mineral argiloso é extremamente fraca, baseada apenas nos catiões de permuta e nas forças de Van-der-Waals, o que permite a fácil circulação da solução de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, responsável pela dissolução da sílica e alumina das partículas de argila.

Verbrugge (1989, in Neves, 1993) refere que a estabilização de solos siltosos só é viável quando o índice de plasticidade é superior a 10%, enquanto Castro (1974) compila outros critérios constantes da bibliografia:

- ? No XIV Congresso Mundial de Praga (1971) foram indicados valores mínimos de 15% para o material passado no peneiro nº40 (ASTM) e de 10% para o índice de plasticidade;
- ? A "National Lime Association" americana (1965) refere também um valor mínimo do índice de plasticidade de 10%;
- ? O Departamento da Força Aérea Americana (1966) refere um valor mínimo do índice de plasticidade de 12%;
- ? O "Department of Works" australiano (1964) sugere um valor mínimo para este índice ligeiramente superior aos valores recomendados por outras entidades, e que é de 15%.

Quanto ao pH inicial do solo, facilmente se conclui que nos casos em que este seja reduzido, será necessário uma maior quantidade de cal por forma a neutralizar o carácter ácido do meio e assim facilitar as reacções de estabilização entre o solo e a cal.

4.3.3 TIPO E QUANTIDADE DE CAL

Na estabilização com cal é reconhecido por vários autores o facto de que as características dos solos podem variar dentro dum intervalo bastante lato, havendo a necessidade de ajustar o tratamento a essas variações. Inicialmente, contudo, havia a tendência para encarar a cal como um material único, desprezando as diferenças entre os vários tipos de cal. A investigação e a experiência acumuladas com o tempo depressa se encarregaram de mostrar o que é hoje uma evidência: alguns tipos de cal são mais eficazes do que outros.

Lu (1957) e Laguros (1960) demonstraram a necessidade de testar e avaliar a cal de modo a determinar a sua mais correcta utilização, tendo para o efeito realizado ensaios a um determinado solo estabilizado com diferentes rácios cálcio/magnésio e com cal viva e cal apagada. Concluíram então que, relativamente à resistência à compressão simples, a cal viva é mais eficaz do que a quantidade equivalente de cal apagada (resistências em média 40% superiores). Da mesma forma, o solo tratado com cal dolomítica mostrou-se

mais resistente do que quando tratado com cal calcítica. Além disso, verificou-se que podem ser utilizadas maiores percentagens de cal dolomítica antes de se registrar uma descida na resistência. A cal dolomítica monohidratada conduziu a resistências superiores às obtidas com a cal dolomítica dihidratada.

A cal viva é mais densa e apresenta geralmente uma granulometria mais grosseira, o que se pode traduzir numa maior dificuldade em homogeneizar correctamente a mistura. Tal terá como consequência uma menor eficácia nas reacções entre as partículas argilosas e a cal. Quanto mais fina for a cal mais fácil será a sua dispersão (Neves, 1993).

Foram também comparados (Lu, 1957 e Laguros, 1960) os teores óptimos em cal necessários para atingir a máxima densidade e a máxima resistência da mistura. Para o efeito realizaram-se ensaios com 6% de cal hidratada e com o equivalente de cal viva, 4.5%. Nas amostras tratadas com cal hidratada registou-se uma diferença entre os dois teores óptimos em água de 2 a 3%, tendo o teor em água superior levado a uma menor compactidade e maior resistência. Contudo, a diferença na resistência à compressão para os dois teores em água variou apenas entre 4 a 8%. Nas amostras tratadas com cal viva as diferenças foram ainda menores. Uma importante conclusão deste estudo, mais tarde corroborada em diversas ocasiões, é o facto de, no que diz respeito à resistência mecânica, ser possível adicionar cal em demasia.

Muito provavelmente a cal em excesso actua como um material fino separando as partículas minerais, uma vez que os cristais de cal hidratada possuem uma camada estrutural do tipo gibsite. Provavelmente, com o aumento do tempo de cura, que no referido estudo foi de apenas 7 dias, o excesso de cal seria utilizado e verificar-se-ia um aumento da resistência. Contudo, existirá sempre um valor máximo.

Pode concluir-se então que é necessário uma adequada informação não só sobre o solo mas também sobre a cal, de modo a poder ser correctamente escolhida a cal cujas propriedades permitam atingir as características desejadas para a camada estabilizada.

Foi já referido que a cal viva conduz a resistências superiores aquelas obtidas com a cal hidratada, para além de ser também mais vantajosa do ponto de vista económico. Porém, a cal hidratada é mais segura e mais fácil de utilizar no seu estado pulverulento. Nesse caso, uma possível solução para tornar mais viável o recurso à cal viva na estabilização de solos será a sua utilização sob a forma de pasta. Davidson (1959) avaliou,

através da comparação dos resultados obtidos com os resultados da aplicação da cal viva em pó, a eficácia desta forma de adição da cal viva a solos argilosos. Descobriu então que as pastas de cal viva eram mais manuseáveis e conduziam a resistências à compressão não confinada equivalentes às obtidas com a cal em pó.

As indicações encontradas na literatura acerca do tipo de cal mais correcto a utilizar em cada situação podem ser agrupadas nos seguintes casos:

- ? Solos argilosos com teor em água acima do valor óptimo para compactação: será mais vantajosa a utilização de cal viva nesta situação, uma vez que as reacções de hidratação conduzem a uma secagem rápida do solo, reduzindo assim a quantidade de água até valores próximos do teor óptimo;
- ? Solos argilosos cujo teor em água é ligeiramente inferior ao seu valor óptimo: neste caso será mais indicado utilizar cal hidratada, uma vez que a utilização de cal viva implica a adição duma determinada quantidade de água, necessária para hidratar a cal e para promover as reacções físico-químicas da estabilização. Ora, hidratar a cal viva no solo leva à formação duma mistura grosseira não homogénea, e portanto menos eficiente;
- ? No caso de solos argilosos com um teor em água muito inferior ao valor óptimo para compactação, recomenda-se a utilização de leite de cal, visto estar-se assim a aumentar a quantidade de água presente no solo, facilitando a posterior compactação. Além disso, consegue-se otimizar a homogeneização da mistura.

O teor em cal a utilizar em cada situação deve ser determinada através de ensaios laboratoriais prévios. É normalmente necessária uma quantidade de cal viva inferior à de cal hidratada, de modo a atingir os mesmos resultados na estabilização duma determinada quantidade de solo.

Duma forma geral, será correcto afirmar que os ganhos na resistência mecânica a longo prazo são proporcionais à quantidade de cal adicionada ao solo. Isto porque as reacções pozolânicas, principais responsáveis pelo aumento da resistência, se desenvolvem enquanto houver cal disponível. Se uma mesma quantidade de solo for estabilizado com dois teores em cal diferentes, o aumento na resistência mecânica será idêntico enquanto a cal não for "consumida" em nenhuma das amostras. Porém, o aumento na

quantidade de cal adicionada pode ser excessivo, caso se verifiquem reacções de carbonatação capazes de produzir diminuições na resistência.

Por outro lado, em relação ao melhoramento das características de plasticidade e expansibilidade, é fácil constatar que pequenas quantidades de cal são suficientes. De facto, as reacções iniciais de permuta iónica e floculação, responsáveis pelas alterações nas referidas características do solo, são geralmente conseguidas com pequenas quantidades de cal. Jon et al (1963) concluíram que percentagens superiores a 3% resultam em melhoramentos na plasticidade do solo muito pouco significativos. A utilização de quantidades reduzidas de cal requer porém cuidados especiais na homogeneização da mistura.

Wang et al (1963) concluíram que a cal hidratada de elevado teor em cálcio, quando comparada com cal dolomítica monohidratada e dihidratada, com cal hidráulica hidratada de elevado teor em cálcio e inclusive com um cimento portland tipo I; conduz a reduções mais significativas da plasticidade dos solos, embora os outros tipos de cal tenham proporcionado resultados semelhantes. A cal hidráulica revelou-se assim um aditivo eficaz na estabilização de solos, estando ao nível da cal aérea no que respeita ao melhoramento da plasticidade. Um estudo levado a cabo por Jon et al (1963), corrobora a ideia de que as propriedades plásticas do solo são consideravelmente melhoradas com a adição de cal hidratada. A influência do hidróxido de magnésio na redução da plasticidade é negligenciável, sendo os principais responsáveis por este efeito da cal o óxido de magnésio e sobretudo o hidróxido de cálcio.

4.3.4 TEOR EM ÁGUA E BARIDADE

Conforme foi já referido no capítulo anterior, a água é fundamental para o sucesso das reacções entre a cal e a argila, sendo a influência do teor em água na forma como a cal é “consumida” pelo solo tanto maior quanto maior for a quantidade de água e cal presentes no solo. Perret (1979, in Neves, 1993) constatou que a curto prazo é possível, para um teor em cal inicial médio e um elevado teor em água, ter um consumo de cal superior ao verificado para um teor em cal inicial elevado e um teor em água menor. Isto salienta a importância dum adequado teor em água, relativamente elevado, capaz de permitir que a cal desenvolva totalmente as suas reacções com os minerais argilosos.

Quando é utilizada cal viva na estabilização deve ser adicionada água em quantidade suficiente para hidratar toda a cal. Caso contrário irão surgir núcleos de cal não hidratada, cuja fácil carbonatação implica a fragilização da mistura.

Quanto à compactação das misturas solo-cal, importa referir que a sua correcta execução é imprescindível para o desenvolvimento das reacções pozolânicas e para uma posterior redução das reacções de carbonatação. Isto porque a velocidade de reacção entre a cal e os minerais argilosos do solo depende da compactação da mistura (Neves, 1993).

4.3.5 CONDIÇÕES DE CURA

Uma revisão geral da literatura revela que os ganhos na resistência mecânica das misturas solo-cal são bastante influenciados pela duração e temperatura de cura. Os solos estabilizados com cal exibem geralmente um rápido aumento da resistência no início do período de cura, diminuindo então essa taxa de crescimento com o tempo de cura. Biswas (1972) concluiu que a velocidade de aumento da resistência está directamente relacionada com a temperatura de cura.

Embora tenham sido já utilizadas, por vários investigadores, temperaturas de cura na ordem dos 140°F, temperaturas ligeiramente inferiores parecem ser mais indicadas pelos seguintes motivos (Biswas, 1972):

- ? São mais próximas das temperaturas encontradas no terreno;
- ? Causam menos perda de mistura durante a cura;
- ? Criam tempos de cura mais convenientes e originam maior facilidade de manuseamento das amostras;
- ? Não causam mudanças significativas da resistência com pequenas variações do tempo de cura, devido ao declive menos pronunciado das curvas resistência-tempo, o que permite maior precisão na previsão dos resultados.

O calor, sobretudo se for utilizado um aditivo secundário, provou assim ser bastante efectivo no aumento das reacções pozolânicas e conseqüentemente no aumento das resistências mecânicas obtidas. Um ambiente de elevado pH é mantido no sistema solo-cal-água durante um período mais longo, em resultado das temperaturas elevadas e/ou alta alcalinidade do aditivo secundário, provocando a extensão da dissolução de sílica e alumina das partículas de argila.

O prolongamento do período de cura para além de determinado valor é desvantajoso, devido ao retrocesso das modificações verificadas. Este retrocesso deve-se, pelo menos em parte, à carbonatação da cal pelo anidrido carbónico do ar. Castro (1969) verificou que a adição de cal, quer calcítica quer dolomítica, eleva o pH dos solos para valores semelhantes aos da própria cal. Com o prolongar do período de cura o pH diminuiu, facto que se traduziu numa tendência para a recuperação da expansibilidade inicial dos solos.

A autora revela porém que este efeito não se produziu em provetes compactados e parafinados, nos quais as características conferidas pela adição de cal se mantiveram ao longo dum período de tempo considerável, o que permite admitir que tal se verifique também em obra, quando o solo estabilizado com cal estiver protegido, por exemplo por outra camada de pavimento.

4.3.6 UTILIZAÇÃO CONJUNTA DE CAL E OUTROS ADITIVOS

Alguns aditivos químicos, quando utilizados em conjunto com a cal na estabilização de solos, melhoram o desenvolvimento de produtos cimentícios resultantes das reacções pozolânicas. Esta optimização dos resultados é observada quer nos valores finais obtidos (resistências superiores e menor deformabilidade), quer na velocidade com que se processam os melhoramentos nas características da mistura.

As reacções pozolânicas, decisivas para o desenvolvimento da resistência mecânica das misturas solo-cal, processam-se lentamente. A velocidade com que ocorrem estas reacções depende bastante da temperatura, o que levou a que em alguns países de clima frio fossem testados vários aditivos químicos para acelerar a velocidade das reacções pozolânicas entre a argila e a cal, permitindo assim alguns ganhos na resistência logo em estágios iniciais. Os aditivos mais utilizados são o cloreto de cálcio; os sais de sódio, como o

carbonato, o fosfato, o hidróxido, o cloreto; e as cinzas volantes. Castro (1970) refere um estudo levado a cabo com vários aditivos, em que se conclui que os mais eficazes são o carbonato de sódio, o cloreto de sódio e o hidróxido de sódio.

A eficácia dos aditivos de sódio varia bastante com o tipo de solo e com o tipo e quantidade de aditivo, para além de ser influenciada pelo tipo de cal e pelo tempo de cura. Assim, Davidson (1961) concluiu que a adição de pequenas quantidades (1 a 2% da baridade seca do solo) de hidróxido de sódio a misturas de cal e argila montmorilonítica resulta no acelerar do mecanismo de endurecimento. A cal calcítica hidratada revelou-se a mais eficaz, enquanto a presença de quartzo no solo foi decididamente benéfica. Neste estudo foram também utilizados o fosfato de sódio e o carbonato de sódio, tendo o autor verificado que a sua eficácia no tratamento deste tipo de solos era reduzida, particularmente quando utilizados com cal dolomítica.

Castro (1970) sintetiza os mecanismos desenvolvidos com a adição dos referidos aditivos da seguinte forma:

- ? Aceleração da reacção pozolânica;
- ? Produção de compostos cimentantes secundários;
- ? Combinação com os produtos cimentantes primários.

A percentagem de aditivos é geralmente baixa (inferior a 3%), e em alguns casos quantidades tão pequenas como 0.03% de hidróxido de sódio conferiram um substancial incremento de resistência a uma mistura de areia-cal-cinzas volantes. De facto, em todos os casos a seguir referidos, só são necessárias pequenas quantidades para acelerar a formação dos compostos estabilizantes normalmente associados ao tratamento com cal. Esta aceleração da formação dos materiais pozolânicos reduz os períodos relativamente longos necessários para o desenvolvimento da resistência, o que é importante sobretudo em zonas em que as épocas ideais para a construção são curtas (sobretudo no que diz respeito às temperaturas suficientemente elevadas para a cura das misturas solo-cal). Além disso, existe um valor óptimo para a percentagem de aditivo, a partir do qual novas quantidades resultam numa diminuição da resistência (Hamzah, 1983).

4.3.6.1 CLORETO DE SÓDIO

Estudos efectuados durante a estabilização com cal de solos coesivos do Oklahoma, relatados por Hamzah (1983), revelaram aumentos significativos na baridade seca máxima e uma redução substancial no respectivo teor óptimo em água da mistura, após a adição duma pequena quantidade de cloreto de sódio. Marks e Haliburton (1972, in Hamzah, 1983) consideram que a formação dos novos minerais se inicia mais cedo se for utilizado cloreto de sódio, aumentando assim não só a velocidade de aumento da resistência como também a própria resistência máxima.

Lees (1982, in Hamzah, 1983) conclui que as mudanças nas propriedades mais importantes do ponto de vista de engenharia dependem do tipo de fracção argilosa presente no solo. A partir dos valores da resistência aos 28 dias, este autor descobriu que os ganhos na resistência devido à presença de cloreto de sódio na mistura solo-cal é superior nos solos montmoriloníticos e menos notória em solos à base de caulinite. Contudo, em ambos os casos se verificou um aumento na baridade seca máxima conjugado com uma ligeira diminuição do teor em água óptimo.

4.3.6.2 HIDRÓXIDO DE SÓDIO

A adição de pequenas quantidades de hidróxido de sódio a misturas solo-cal pouco activas resulta em pequenos aumentos na baridade seca máxima, enquanto que no caso de argilas mais activas regista-se normalmente uma ligeira diminuição nesta característica. O hidróxido de sódio, utilizado como aditivo da cal, conduz também a ganhos na resistência, que se devem sobretudo ao aumento das reacções pozolânicas (Hamzah, 1983).

4.3.6.3 CARBONATO DE SÓDIO

A adição de pequenas quantidades de carbonato de sódio resulta numa diminuição da baridade seca máxima, até se atingir um valor mínimo a partir do qual novo aumento na quantidade de aditivo conduz a um aumento do peso específico seco da mistura (Abouzakhm, 1979, in Hamzah, 1983). Este aditivo químico

provou ser muito eficaz em solos arenosos, enquanto que a sua utilização em misturas solo-cal à base de montmorilonite provoca uma diminuição nos ganhos obtidos só com cal.

4.3.6.4 CINZAS VOLANTES

As cinzas volantes constituem uma pozolana artificial, possuindo algumas propriedades em comum com certas cinzas vulcânicas. Uma vez que a cal é deficiente em material pozolânico natural, a utilização deste aditivo melhora as propriedades físicas do solo. Contudo, a actividade pozolânica das cinzas volantes depende da sua granulometria. Quanto mais fina, mais eficiente a sua acção na estabilização dos solos com cal.

A cal é utilizada normalmente para estabilizar solos coesivos. Contudo, pode ser também utilizada para estabilizar materiais granulares contendo finos não plásticos, se forem adicionadas cinzas volantes. Este aditivo promove as reacções pozolânicas de modo a criar uma mistura rígida.

4.3.7 EFEITO DOS SULFATOS E DA MATÉRIA ORGÂNICA

Vários autores demonstraram já que quantidades significativas de sulfato presentes no solo são prejudiciais à sua estabilização com cal ou cimento.

A matéria orgânica apenas retarda o aumento da resistência da mistura solo-cal provocado pelas reacções pozolânicas. Sendo assim, será lógico pensar que a matéria orgânica nem combina com a cal adicionada ao solo, impedindo o desenvolvimento das referidas reacções, nem impede a dissolução da sílica e alumina nele presentes. Segundo Sherwood (1993), é o tipo de matéria orgânica presente que é importante, e não a sua quantidade. Isto porque a matéria orgânica não interfere necessariamente com os processos de hidratação, e portanto o conhecimento da sua quantidade não é só por si decisivo.

São normalmente considerados três mecanismos básicos envolvidos na reacção da matéria orgânica com o solo estabilizado com cal:

1. Reacção de troca entre os catiões orgânicos e os iões de cálcio da cal;
2. Reacção química entre a matéria orgânica activa e os iões de cálcio;
3. Efeito de "máscara" provocado pelos catiões orgânicos sobre as partículas de argila, impedindo a dissolução da sílica e alumina.

A matéria orgânica do solo possuiu uma elevada capacidade de troca de base. Quando a cal é adicionada ao solo, alguns iões Ca^{++} da cal são utilizados para satisfazer a capacidade de troca da matéria orgânica, reduzindo a quantidade de cal disponível para a reacção pozolânica.

Thompson (1966, in Biswas, 1972), considera que apenas o terceiro mecanismo referido é válido. Isto porque se os outros dois processos são responsáveis pela perda de reactividade à cal, aumentos na percentagem de cal poderiam fornecer uma quantidade de iões cálcio suficiente para compensar os iões Ca^{++} utilizados nas reacções com os catiões orgânicos. Contudo, e ao contrário de Arman e Munfakh (1967, in Biswas, 1983), que concluíram que solos contendo quantidades significativas de matéria orgânica podiam ser estabilizados aumentando a percentagem de cal, as investigações de Thompson com solos do estado do Illinois revelaram que um aumento da cal usada na estabilização não melhora a reactividade do solo.

O mecanismo envolvido na reacção dos sulfatos com os solos estabilizados com cal foi estudado por Sherwood (1962, in Biswas, 1972). Os sulfatos presentes na mistura solo-cal podem levar à sua progressiva desintegração. Este efeito é facilitado quando o solo contém uma fracção argilosa significativa e quando o seu teor em água puder ainda ser aumentado para valores superiores ao utilizado na sua compactação. Quando o pH da mistura é elevado ocorre uma reacção entre a argila e os iões de sulfato na presença de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e da água em excesso. A reacção pode resultar na formação de sulfo-aluminato de cálcio, que ocupa um volume consideravelmente superior ao dos constituintes a partir dos quais foi formado. A expansão deste mineral destrói as ligações existentes no solo estabilizado.

4.4 MELHORAMENTO DOS SOLOS COM A ADIÇÃO DE CAL

4.4.1 INTRODUÇÃO

Os solos tratados com cal podem ser classificados, segundo Little (1995), em duas categorias: **reactivos** e **modificáveis**. Thompson (1966) definiu os solos reactivos como sendo aqueles que apresentavam melhorias na resistência à compressão não confinada superiores a 345 KPa, relativamente aos solos originais. O termo “reactivos” refere-se assim às reacções pozolânicas já caracterizadas no capítulo 4.2.3. O termo “modificáveis” aplica-se aos solos cujas melhorias na resistência, após tratamento, são pouco significativas (inferiores a 345 KPa), mas com importantes alterações nas suas propriedades físicas, tais como a plasticidade, alteração de volume, textura e trabalhabilidade (Little, 1995).

O conceito de modificação ou estabilização de misturas solo-cal pode por vezes ser algo ambíguo. Qualquer solo, reactivo ou não, pode ser modificado através da adição de quantidades apropriadas de cal, enquanto que apenas nos solos reactivos se podem atingir aumentos na resistência mecânica, desde que sejam adicionadas as quantidades correctas de cal (Little, 1995).

Os efeitos imediatos do tratamento com cal devem-se, como foi já referido no Capítulo 4.1, aos mecanismos de troca de cationes, à absorção de Ca(OH)_2 à superfície das partículas de argila e, até certo ponto, ao rápido desenvolvimento de materiais pozolânicos. O nível de alteração das propriedades de um solo misturado com cal depende, em grande parte, das características do solo. Contudo, praticamente todos os solos finos, independentemente do nível de reactividade pozolânica solo-cal, apresentam melhorias mais ou menos consistentes das suas características físicas, após a mistura com cal.

A discussão acerca das propriedades das misturas solo-cal é, de acordo com a literatura, dividida em duas categorias: propriedades imediatas ou obtidas sem período de cura; e propriedades a longo prazo ou obtidas ao fim de um determinado período de cura. O período de cura, nunca será demais referi-lo, constitui um período de tempo durante o qual a temperatura e a cal adicionada permitem o desenvolvimento de ganhos na resistência mecânica através de reacções pozolânicas.

Neste capítulo descrevem-se as alterações físicas imediatas do solo (modificação), desencadadas pelas reacções de permuta iónica e floculação, não constituindo portanto uma estabilização efectiva do solo.

Contudo, e na maioria dos casos, estas alterações constituem uma melhoria das características iniciais do solo, sendo normalmente aproveitadas na construção rodoviária.

Estas alterações originam misturas solo-cal com características muito próprias. As mais importantes, e por isso mais intensamente estudadas, são as que se refletem na plasticidade e expansibilidade, granulometria, compactação, variações volumétricas, expansão, permeabilidade, resistência e durabilidade.

4.4.2 PLASTICIDADE E EXPANSIBILIDADE

A cal tem sido aplicada desde há algumas décadas na redução da plasticidade ou das variações de volume de solos argilosos expansivos. Isto porque a adição de cal a um solo provoca alterações às suas características de plasticidade, nomeadamente aos seus limites de consistência. Em várias ocasiões foi já demonstrado que quanto mais plástico e expansivo for o solo mais significativas são as alterações motivadas pela adição de cal. Pelo contrário, a cal não provoca melhorias significativas nos solos com reduzida plasticidade. A textura siltosa e friável do solo tratado conduz também a aumentos na trabalhabilidade, o que facilita uma posterior manipulação e deslocamento da mistura.

A redução do índice de plasticidade (IP) é normalmente motivada pelo aumento do limite de plasticidade (LP) mas principalmente pela redução do limite de liquidez (LL). Quanto maior o limite de liquidez de um solo, mais acentuada será a sua diminuição após a adição de cal. Pelo contrário, Castro (1974) observou subidas do LL quando o seu valor inicial era reduzido. Brandl (1981) refere também que os solos siltosos ricos em cálcio sofrem aumentos no seu limite de liquidez quando estabilizados com cal. Contudo, mesmo quando se registam subidas no limite de liquidez, verifica-se um aumento proporcionalmente superior do limite de plasticidade (Figura 4.5).

Segundo Gomes (1986) o catião de troca influi nas características de plasticidade duma argila. Esta requer muito mais água para fluir quando os catiões de troca são o Ca^{2+} ou o Mg^{2+} . Numa argila rica em cálcio as partículas encontram-se fortemente aglomeradas devido a fenómenos de floculação ou coagulação. A arrumação das partículas lamelares de argila numa forma desordenada facilita a formação duma estrutura

“aberta”, com um significativo volume de vazios onde a água livre pode acumular-se em maior quantidade. Uma estrutura porosa implica assim uma maior quantidade de água para que ocorra a fluidez do respectivo material, o que justifica o aumento dos limites de consistência que normalmente caracteriza um solo estabilizado com cal.

Segundo Brandl (1981), o limite de plasticidade aumenta em qualquer tipo de solo, à excepção de siltes e areias ricos em cálcio em que o seu valor se mantém praticamente constante. Hilt (1960) demonstrou que o limite de plasticidade aumenta com a adição de pequenas quantidades de cal (2 a 3%). Os aumentos mais acentuados no LP são obtidos em solos com elevada quantidade de montmorilonite. Aumentos no LP de solos à base de ilite ou outro mineral argiloso menos activo são também consideráveis, mas não tanto como nos solos com uma fracção argilosa à base de montmorilonite. Os aumentos menos significativos do LP são normalmente observados em solos com fracção argilosa caolinítica.

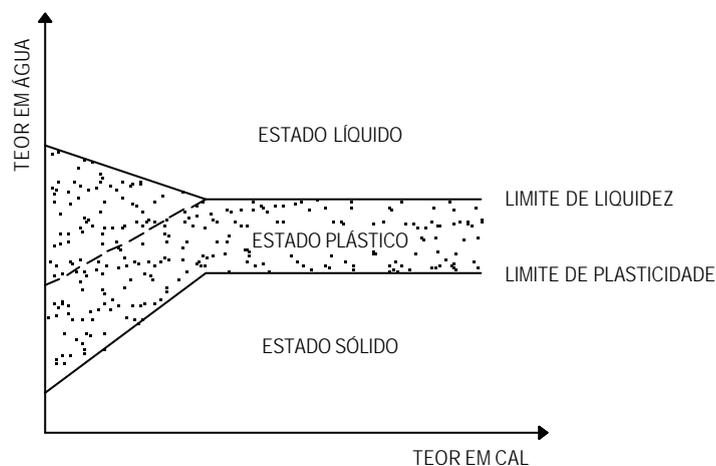


Figura 4.5: Evolução das características de plasticidade de um solo com o aumento do teor em cal
(adaptado de Neves, 1993)

O limite de plasticidade pode ser definido como o teor em água mínimo para o qual as ligações entre as partículas do solo ou agregados podem ser constantemente renovadas. Estas ligações estão normalmente associadas à troca de cationes e à acção dos iões cálcio em redor das partículas argilosas. Contudo, um outro mecanismo é também responsável pelas ligações entre as partículas de argila, afectando o limite de plasticidade. Trata-se da tensão superficial da água presente nos vazios do solo, que origina também forças de ligação entre as partículas sólidas. Ora, como as pressões de capilaridade são inversamente proporcionais ao raio de curvatura do menisco e directamente proporcionais às tensões superficiais, alterações em qualquer destes parâmetros reflectem-se na quantidade de água necessária para renovar de forma contínua as ligações entre as partículas do solo.

Sendo assim, o que acontece quando se verifica um aumento do limite de plasticidade, devido à adição de cal, não é mais do que um aumento da quantidade de água necessária para permitir que as ligações entre as partículas de solo se renovem tão rapidamente quanto se quebram. Conforme foi já referido, a adição de cal provoca a floculação das partículas devido à atracção eléctrica entre estas. A argila comporta-se agora mais como um silte, em que cada floco de partículas de argila se assemelha a uma partícula de silte. Embora as ligações entre as partículas argilosas dentro do floco sejam fortes, as ligações entre flocos são relativamente fracas. Durante a determinação do limite de plasticidade, as ligações dentro dum floco mantêm-se praticamente inalteradas, enquanto as ligações entre estes estão constantemente a ser reformuladas até ao ponto em que não podem ser reactivadas tão rapidamente quanto são quebradas, altura em que se atinge o limite de plasticidade.

A totalidade de cálcio passível de envolver as partículas do solo encontra-se presente para uma determinada percentagem de cal adicionada. A partir dessa quantidade, novas adições de cal provocam apenas um fornecimento em excesso de cálcio ao solo, que não são efectivos no aumento da floculação. Brandl (1981) conclui que a cal em excesso conduz a reduções menos significativas da plasticidade dos solos.

Os limites de liquidez e plasticidade aumentam geralmente com o tempo (Brandl, 1981). Isto porque as forças de atracção entre as partículas do solo também vão aumentando com o tempo, o que influencia a película de água adsorvida.

A composição mineralógica da facção argilosa do solo condiciona fortemente a variação do limite de liquidez com a adição de cal. Assim, e no caso de argilas à base de caulinite, o seu limite de liquidez sofre um aumento com a adição de cal viva. Pelo contrário, a adição de cal a solos montmoriloníticos ou ílíticos (mais expansivos), leva normalmente à redução do seu limite de liquidez (Van Impe, 1989).

Quanto ao limite de retracção, Castro et al. (1974) concluíram que este sofre um aumento com a adição quer de cal calcítica quer de cal dolomítica.

Segundo Kézdy (1979, in Neves, 1993), a cal viva conduz a uma maior diminuição da plasticidade (Figura 4.6), sendo essa diminuição ainda maior no caso de se tratar duma cal calcítica. A Figura 4.6 sugere que a redução do índice de plasticidade evolui com o tempo de cura, atingindo um patamar após algum tempo. Esse patamar é atingido mais cedo quando se utiliza cal viva.

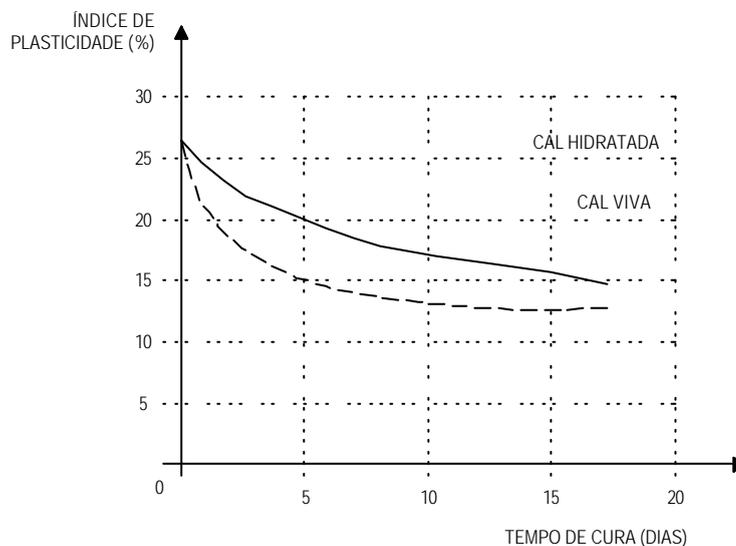


Figura 4.6: Redução do índice de plasticidade com o aumento do tempo de cura
(adaptado de Kézdy, 1979, in Neves, 1993)

O aumento do limite de plasticidade e a redução do teor em água, efeitos resultantes da adição da cal, permitem que o solo permaneça num estado "sólido" para uma margem de variação do teor em água mais alargada (Figura 4.7).

Relativamente à expansibilidade, Castro (1969) observou uma tendência, nas curvas expansibilidade / teor em cal, para a existência de valores mínimos (ou máximos), apresentando muito maiores reduções os solos inicialmente muito expansivos.

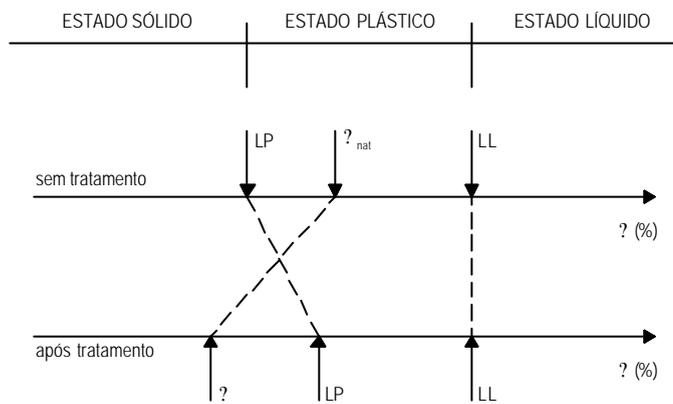


Figura 4.7: Aumento do limite de plasticidade e redução do teor em água

Após determinar a variação máxima da expansibilidade para cada solo, correlacionou este valor com a expansibilidade inicial (tomando este último como variável independente), e verificou tratar-se duma relação linear do tipo:

$$R = bE + a$$

em que:

R = variação máxima da expansibilidade obtida pela adição de cal;

E = expansibilidade do solo sem cal

sendo a e b determinados pelas expressões:

$$b = \frac{ER - nM_e M_r}{E^2 - nM_e^2}$$

$$a = M_r - bM_e$$

em que:

n = número de determinações

M_r e M_e = valores médios de E e R

Os solos com valores da expansibilidade da ordem dos 10% não são modificados pela adição de cal calcítica ou dolomítica, e os solos com valores da expansibilidade superiores sofrem uma redução dessa expansibilidade tanto maior quanto mais expansivos inicialmente. Por outro lado, solos com expansibilidade inferior a 10% sofrem um aumento e não uma redução da expansibilidade (Castro, 1969). Face ao andamento das curvas expansibilidade / teor em cal para baixos teores em cal, a autora admite que seria difícil ou mesmo impossível estabelecer ábacos para prever a redução da expansibilidade para qualquer percentagem de cal.

Castro (1969) constatou ainda que o tempo de cura influi significativamente na plasticidade e expansibilidade dos solos estabilizados com cal. Assim, o tempo de cura mais conveniente para a cal calcítica situa-se entre os 0 e 2 dias, e para a cal dolomítica entre os 0 e 4 dias. Verificou também que uma elevada percentagem da redução da plasticidade e expansibilidade ocorreu logo após a mistura, sendo a redução posterior relativamente reduzida. Verifica-se por vezes, quando se prolonga o período de cura para além do seu valor óptimo, o retrocesso nas modificações ao nível da plasticidade e expansibilidade do solo. A causa deste fenómeno é, de acordo com a generalidade da bibliografia, a carbonatação da cal através do anidrido carbónico do ar.

4.4.3 GRANULOMETRIA

Uma das características dum solo que é afectada pela adição de cal é a sua composição granulométrica. A cal produz floculações e aglomerações sobretudo das partículas finas, provocando alterações na granulometria que, combinadas com as já referidas alterações provocadas nos limites de consistência, se reflectem significativamente na classificação do solo (Castro, 1969).

Contudo, a análise granulométrica do material após a adição de cal não é um assunto pacífico: os aglomerados criados no processo podem ser desagregados com alguma facilidade, embora resistam à acção da água. Isto significa que o método da peneiração, por necessitar de uma prévia desagregação, não permite avaliar o nível de agregação das partículas. O método de peneiração húmida, descrito na Especificação LNEC E239 - 1970, revela-se assim o mais indicado para analisar a granulometria das misturas solo-cal.

Castro (1969) verificou que a influência na granulometria foi tanto maior quanto mais fino o solo inicial. A cal calcítica revelou-se também mais influente na granulometria do que a cal dolomítica. Apesar da resistência destes aglomerados, formados pela adição de cal, não ser tão elevada quanto a dos grãos individuais, a influência da cal na granulometria é significativa, tanto mais quanto maior a percentagem de finos do solo.

4.4.4 COMPACTAÇÃO

As alterações à densidade das misturas solo-cal reflectem a nova natureza do solo e constituem uma evidência das mudanças nas suas propriedades físicas após a adição da cal. Para um esforço específico de compactação, o solo estabilizado com cal possuiu uma densidade inferior e um teor óptimo em água superior ao verificado no solo original. Dallas (1995) refere um intervalo na redução da baridade seca máxima entre 0.048 g/cm³ e 0.080 g/cm³, e um aumento do teor em água óptimo tipicamente entre 2 a 4%. Contudo, em argilas muito plásticas podem ser conseguidos aumentos substancialmente maiores do teor óptimo.

Se a uma mistura solo-cal for dado o tempo necessário para curar e ganhar resistência, antes da sua compactação, podem ser observadas posteriores reduções na baridade seca máxima e adicionais aumentos no teor em água óptimo. Isto porque a mistura solo-cal não se limita a ser mais resistente e menos plástica do que o solo original, mas é também menos densa e responde de forma diferente à molhagem. A cal actua reduzindo a densidade máxima após compactação para valores inferiores aqueles que se verificariam se o solo fosse compactado antes da estabilização.

A resistência e a densidade estão normalmente associadas da seguinte forma: maior densidade conduz a maiores resistências e vice-versa. Contudo, vários estudos relativos a misturas solo-cal revelaram que a resistência aumenta com a quantidade de cal adicionada, até um valor óptimo, enquanto que a densidade máxima diminui na proporção inversa. Isto indica que a perda de resistência devido à diminuição da densidade é mais do que compensada pela cimentação pozolânica. A diminuição da densidade com o aumento da quantidade de cal, até aos 2%, deve-se precisamente a um aumento da floculação das partículas de argila. Segundo Sheeler (1959), durante a reacção a cal vai aglutinar as partículas do solo independentemente da sua maior ou menor densidade. Contudo, para uma determinada mistura solo-cal, um aumento da densidade vai geralmente melhorar a cimentação e conseqüentemente a estabilidade.

A adição de cal viva a solos coesivos muito húmidos ou saturados, ou a adição de leite de cal a solos coesivos secos (em regiões áridas), produz não só elevados benefícios à compactação superficial, devido ao aumento do limite de liquidez; como também melhora significativamente a resistência mecânica do solo compactado.

4.4.5 TEOR EM ÁGUA

Segundo Neves (1993), a rápida redução do teor em água, após a adição de cal, deve-se essencialmente aos seguintes factores:

- ? Reacção de hidratação entre a cal viva e o solo;
- ? Evaporação devida ao calor de hidratação (a reacção é fortemente exotérmica);
- ? Evaporação provocada pela própria exposição ao ar durante o processo de mistura;

? Adição de uma determinada quantidade de material seco (cal).

Após consulta bibliográfica, Gomes Correia (1990, in Neves, 1993) concluiu que a redução global do teor em água da mistura solo-cal é da ordem dos 0.6 a 1.5% do teor em água inicial do solo, para cada 1% de cal viva adicionada.

4.4.6 RESISTÊNCIA MECÂNICA E DEFORMAÇÃO

O tratamento com cal produz melhorias imediatas nas características de resistência e deformação das misturas “não curadas”. Na figura 4.8 (Little, 1995), está representada a evolução típica da resistência CBR com o teor em água de misturas solo-cal não curadas. De notar que com o aumento do teor em cal sobe também o teor óptimo de água de cada mistura. Utilizando o teor óptimo como referência, verifica-se que o CBR da argila de baixa plasticidade aumenta de 8.5 para 13.5% com 3% de cal, e para 14.5% com 5% de cal. Será também importante referir que, para o teor em água máximo de 20%, a resistência CBR aumenta de 3% para 12%, o que significa um aumento de 400%.

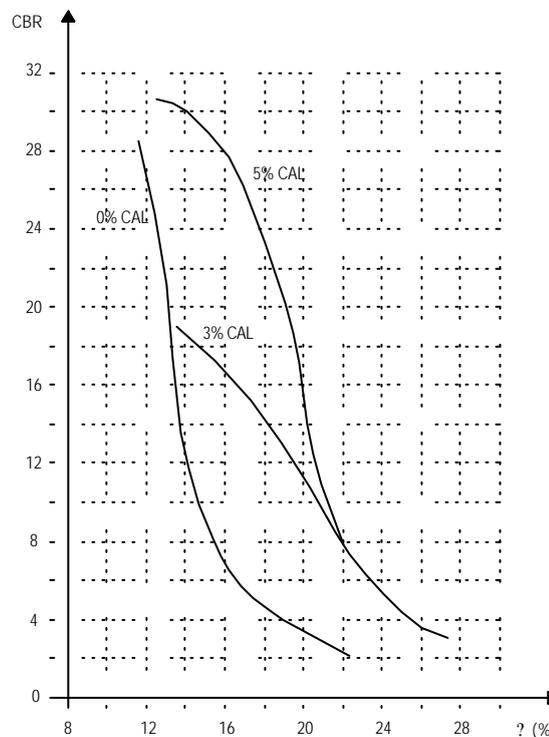


Figura 4.8
Ganhos imediatos na resistência CBR,
em função do teor em água, num solo CL
(segundo Little, 1995)

A figura 4.9 (Little, 1995) ilustra a variação entre o módulo de deformação de um solo ML, no seu estado natural (silte de reduzida plasticidade), e do mesmo solo misturado com 3% de cal. Uma vez que este aumento ocorre sem um período de cura, torna-se ilustrativo das alterações nas propriedades de deformação que podem ocorrer, sem as reacções pozolânicas a longo prazo.

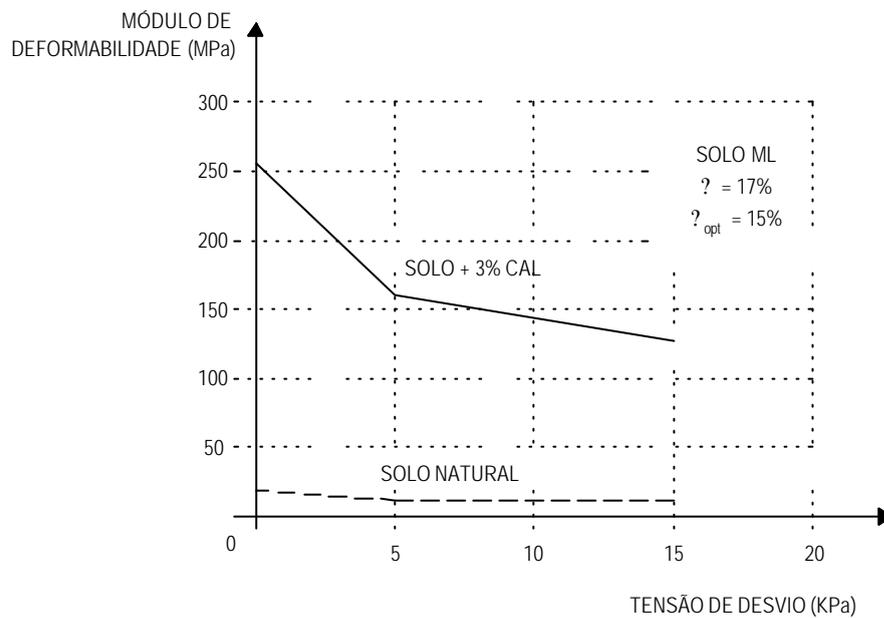


Figura 4.9: Efeitos imediatos do tratamento com cal no módulo de deformabilidade de um solo ML.
(segundo Little, 1995)

4.5 ESTABILIZAÇÃO DOS SOLOS COM A ADIÇÃO DE CAL

4.5.1 INTRODUÇÃO

A utilização da cal na estabilização de solos oferece diversas vantagens no que respeita à sua utilização enquanto material de construção. Contudo, é fundamental o conhecimento da evolução das características destas misturas com o tempo.

Neste capítulo descrevem-se algumas das situações respeitantes à evolução das características das misturas solo-cal em função de variáveis como o tempo de cura, quantidade e tipo de cal adicionada, actividade do solo estabilizado, etc. Duma forma geral, e de acordo com a bibliografia consultada, as características de resistência mecânica dos solos finos estabilizados com cal variam ao longo do tempo, de acordo com a evolução gradual da estabilização.

4.5.2 RESISTÊNCIA MECÂNICA

O efeito mais importante proporcionado por um período de cura relativamente longo é o desenvolvimento de produtos pozolânicos, conforme foi já referido no capítulo 4.2.3. Um aumento da quantidade destes produtos resulta em mais “cola” para manter as partículas de solo em contacto e numa mudança mineralógica favorável a um aumento das resistências.

Little (1995) enfatiza a importância duma escolha apropriada da mistura, bem como do teor em cal, de modo a maximizar as características de resistência mecânica a longo prazo. Este autor refere vários resultados de ensaios de compressão simples, efectuados sobre provetes com longos períodos de cura, nos quais é evidente o aumento da resistência, mesmo nos solos que não evidenciaram inicialmente uma elevada reactividade com a cal. Em ensaios efectuados sobre solos da Califórnia, e apresentados pelo mesmo autor, verificaram-se aumentos consideráveis da resistência, embora os solos apresentem valores de plasticidade reduzidos. Isto indica que mesmo pequenas quantidades de argila reactiva à cal podem ser suficientes para originar aumentos significativos da resistência.

Tuncer e Basma (1991, in Little, 1995) usaram o rácio entre a resistência do solo tratado com cal e a resistência do solo no estado natural (RSC) como uma medida do efeito da percentagem de cal e do tempo de cura no aumento da resistência mecânica das misturas. Descobriram que o RSC de uma argila CH,

proveniente da Jordânia e à qual foi adicionada 9% de cal, aumentou de 3 para 7 entre os 4 e os 28 dias.

Os aumentos significativos da resistência com o tempo põem em evidência a importância da disponibilidade de cal livre para a reacção e do elevado pH, de modo a permitir a contínua evolução das reacções pozolânicas. Enquanto estas condições se mantiverem é possível aumentar a resistência da mistura. De facto, Little (1995) refere que vários resultados permitem concluir que, sob condições apropriadas, os aumentos da resistência podem ocorrer ao longo de períodos superiores a 10 anos.

Os valores da resistência obtidos com as pastas de cal viva são superiores aos valores obtidos com o óxido de cálcio em pó. Tal deve-se à já referida formação de crostas em redor dos aglomerados de cal viva, que se formam durante a mistura com o solo, e à hidratação parcial do MgO (na cal dolomítica). Quanto à cal hidratada, a sua utilização em pasta ou em pó conduz a valores semelhantes da resistência, sobretudo porque não se verifica a formação de crostas em qualquer um dos métodos de utilização. Sheeler (1959) refere, após um estudo comparativo entre pastas de cal viva e de cal hidratada, que os valores da resistência obtidos em cada caso são muito semelhantes, uma vez que em nenhuma das situações se verifica a formação das referidas crostas.

Muitas equações, estabelecidas de forma empírica, têm sido propostas para prever a evolução da resistência mecânica das misturas solo-cal. Contudo, e segundo Jalali (1994), estas aproximações têm uma aplicação limitada e falham na explicação dos mecanismos de aumento da resistência envolvidos. Daí a ideia de que solos diferentes devem ser estudados separadamente.

Embora a resistência à compressão não confinada seja a forma mais utilizada para medir a resistência de misturas solo-cal fabricadas em laboratório, são também usadas outras medidas, tais como a resistência CBR e a resistência à compressão triaxial.

4.5.2.1 RESISTÊNCIA CBR

Os resultados CBR para misturas solo-cal são normalmente elevados (Figura 4.10), em resultado do extenso desenvolvimento dos materiais pozolânicos. Em misturas com CBR igual ou superior a 100, os resultados deste tipo de ensaio têm pouco significado, sendo neste caso preferível o ensaio à compressão não confinada, como indicador do aumento da resistência mecânica. Isto porque, segundo Little (1995), a resistência à compressão não confinada constitui uma medida da resistência ao corte (uma propriedade básica deste material), e apresenta-se em unidades correntes em engenharia, o que significa que os resultados assim obtidos podem mais facilmente ser utilizados em cálculos, análises e projectos de engenharia. Além disso, outras propriedades importantes em aplicações de engenharia podem ser deduzidas a partir da resistência à compressão não confinada, como a resistência à tracção e à flexão.

Silva (1967, in Castro, 1974) estudou a influência da cal na resistência dos solos através de ensaios CBR. Embora o próprio coloque certas reservas à utilização do CBR na avaliação da resistência das misturas solo-cal (devido à sua rigidez), foi possível verificar substanciais melhorias nos solos plásticos. Este ensaio não deixa contudo de ser bastante utilizado na avaliação da resistência das misturas solo-cal, sobretudo porque se trata de um ensaio simples e muito divulgado no dimensionamento de pavimentos; para além de constituir uma medida indirecta da resistência ao corte, podendo assim ser utilizado para "ordenar" os ganhos de resistência. Constitui inclusive um ensaio de referência no projecto de camadas compactadas de solos estabilizados com cal, bem como no controlo de qualidade da sua construção, através de amostras carotadas (Neves, 1993).

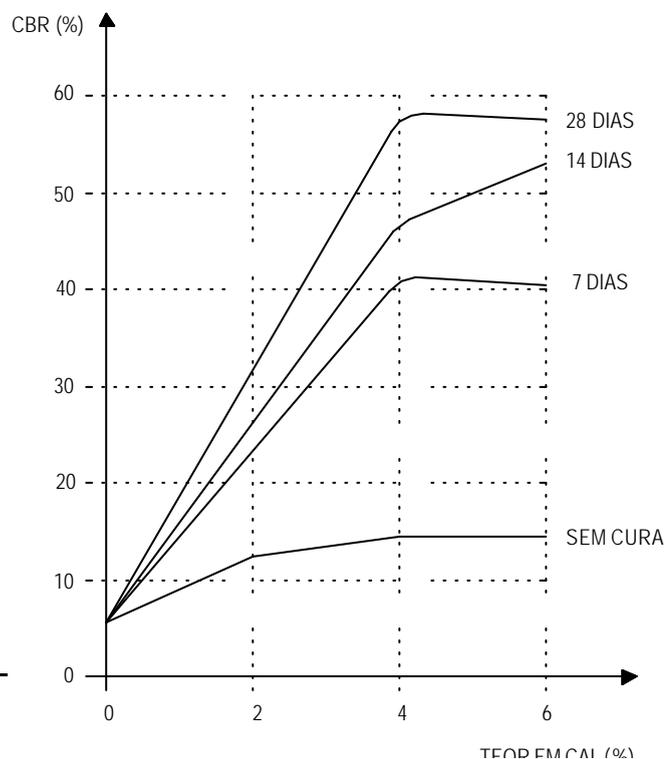


Figura 4.10: Aumento da resistência de uma argila estabilizada com cal
(adaptado de Littleton, 1988, in Greaves, 1996)

4.5.2.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

Um dos parâmetros mais utilizados como referência para a qualidade das misturas solo-cal é a resistência à compressão simples. Segundo Neves (1993), esta característica tem sido muito utilizada como parâmetro quantitativo da avaliação da eficácia das reacções pozolânicas a longo prazo, responsáveis pelo desenvolvimento dos produtos cimentícios na estabilização com cal.

Existem inúmeras referências na bibliografia ao facto da adição de cal aumentar a resistência à compressão não confinada de solos activos. Este aumento será tanto maior quanto maior a actividade do solo. Assim, e embora os solos à base de caulinite apresentem ganhos consideráveis neste parâmetro, estes serão inferiores aos verificados em solos montmoriloníticos.

Contudo, Hilt (1960) verificou que a resistência à compressão uniaxial dos solos com uma fracção argilosa à base de ilite não foi substancialmente melhorada. Já a adição de cal e cinzas volantes provocou aumentos na resistência da ordem dos 30%. Concluiu-se então que a montmorilonite e a caulinite, ao contrário da ilite, seriam pozolanas naturais que, reagindo com a cal, produziam materiais cimentícios. Nesse caso, a adição de um material pozolânico (cinzas volantes) na estabilização com cal de um solo permite obter aumentos na resistência à compressão não confinada mais significativos do que aqueles obtidos com a adição exclusiva de cal.

A forma plana inicial das curvas resistência compressão / teor cal reveste-se de especial interesse. Nesta região da curva as pequenas porções de cal adicionada não produzem correspondentes aumentos da resistência (este assunto será estudado no Capítulo 7). Este facto torna claro que uma determinada quantidade de cal deve ser adicionada a um solo argiloso antes que se possam formar os produtos cimentícios que vão aumentar a resistência do solo. Isto acontece devido ao fenómeno que no capítulo 4.2.3 foi denominado por fixação da cal, e que consiste no processo através do qual esta é atraída pelas partículas do solo, não estando disponível para as reacções pozolânicas (Hilt, 1960).

Mendonça (2000) simulou as condições adversas que podem ocorrer com as misturas em serviço. Assim, submeteu alguns provetes à imersão em água durante 4 horas antes de serem ensaiados à compressão simples. Verificou então que os desenvolvimentos das curvas de resistência à compressão simples, com e sem imersão após a cura, apresentam alguma semelhança geométrica, mas são significativamente diferentes no que respeita à ordem de grandeza dos seus valores, que são inferiores nas amostras submetidas à imersão em água. Esta redução na resistência situou-se, nos solos estudados, entre os 20 e os 40%.

Subramaniam (1989) efectuou um estudo relativo à estabilização de um solo argiloso com vários teores em cal, tendo concluído que um teor de 2.5% não representa ganhos significativos da resistência à compressão simples. Além disso, a diferença entre os teores de 10% e 15% de cal na resistência da mistura só é evidente para períodos de cura de 2 meses, sendo que quando as amostras foram ensaiadas ao fim de um mês, os valores obtidos foram idênticos. Interessante também o facto de que, segundo o autor, se as amostras tivessem sido todas ensaiadas após um período de cura de um mês, o teor óptimo de cal no que respeita à resistência à compressão não confinada teria sido de 5%, ao contrário dos 10% que foram admitidos quando se prolongaram os períodos de cura até 2 meses.

Biswas (1972) estudou o efeito da temperatura nas misturas solo-cal e descobriu, de forma empírica, que a evolução da resistência à compressão simples é satisfatoriamente descrita pela equação seguinte, em que b e c são constantes, determinadas utilizando uma análise de regressão não-linear, em que t representa a temperatura.

$$UCS = UCS_0 + b[1 - \exp(-ct)]$$

Esta equação constitui uma aplicação directa do modelo proposto por Jalali (1994), modelo esse que pretende prever a evolução da resistência à compressão simples de misturas de solo-cimento, solo-cal e solo-cal-cinzas, e cuja equação se apresenta a seguir:

$$UCS = UCS_{max} [1 - \exp(-k^2 N_0 t)]$$

UCS_{max} representa a resistência final; k ($mm / s^{1/2}$) é a constante de crescimento, dependente da difusidade das espécies; N_0 (mm^{-2}) é o número total de locais de formação de núcleos por unidade de área; e t (s) é o tempo de cura. De notar que as constantes b e c da equação superior são equivalentes aos valores UCS_{max} e $k^2 N_0$ desta última.

Jalali (1994) conclui ainda que a resistência inicial das misturas solo-cal, para reduzidas temperaturas de cura, apresenta uma evolução exponencial com o tempo, aproximando-se duma relação linear com o aumento do tempo de cura. Contudo, para elevadas temperaturas de cura, a fase inicial da curva resistência-tempo é aproximadamente linear. O autor sugere que o aumento inicial da resistência das misturas, a baixas temperaturas, se deve à reduzida taxa de formação de núcleos (Capítulo 7). Com o aumento da temperatura de cura, esta taxa aumenta e altera a forma da relação resistência / tempo.

4.5.2.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO TRIAXIAL

O principal efeito da adição de cal a solos muito activos, do ponto de vista dos parâmetros de resistência ao corte determinados em ensaios triaxiais, manifesta-se em aumentos substanciais da coesão e em aumentos menos significativos do ângulo de atrito. Este aspecto origina algumas dificuldades na adequada avaliação do efeito da adição de cal neste último parâmetro (Little, 1995). Por outro lado, foi já referido o facto de que os solos argilosos, quando estabilizados com cal, adquirem uma textura friável, de aspecto mais granular do que o solo no seu estado natural. Sendo assim, será por vezes justificável estudar com o mesmo rigor a coesão e o ângulo de atrito das misturas solo-cal.

Já no que se refere às aplicações rodoviárias, nas quais predominam baixas tensões de confinamento nas camadas do pavimento, desenvolvem-se significativos efeitos de placa nas misturas solo-cal, o que reduz consideravelmente as tensões transmitidas às camadas inferiores do pavimento. Neste caso, os aumentos na coesão constituem o aspecto mais importante para o dimensionamento da estrutura do pavimento rodoviário.

A coesão aumenta com a resistência da mistura. Segundo Little (1995), o seu valor é aproximadamente 30% do valor da resistência à compressão não confinada. Mendonça (2000) conclui que solos muito plásticos estabilizados com cal exibem substanciais aumentos no parâmetro coesão, com o aumento do teor em cal e do tempo de cura, observando contudo a existência dum valor óptimo em ambos os casos. Ou seja, para os solos ensaiados, verificou-se que a partir de determinado valor da quantidade de cal e do tempo de cura, a coesão da mistura solo-cal diminuíu. Alcântara (1995, in Mendonça, 2000), trabalhando com o mesmo tipo e quantidade de cal, mas com solos diferentes, obteve resultados semelhantes no que diz respeito à redução da coesão a partir de determinado valor do tempo de cura.

Foram então levantadas algumas hipóteses pelos autores, incluindo uma possível dispersão nos resultados devido a factores relacionados com o grau de compactação das amostras e/ou com a homogeneidade das misturas, bem como a ocorrência de microfissuração nos provetes de ensaio ao longo do tempo de cura. A primeira hipótese foi logo posta de lado, uma vez que a referida redução da coesão se verificou em dois estudos distintos, conduzidos em locais e alturas diferentes. Em relação à segunda possibilidade apontada, os autores indicam como principal causa para a sua exclusão o facto de, nas misturas com 2% de cal, não se ter verificado esta redução, o que diminui a hipótese de ocorrência de microfissuração nos provetes.

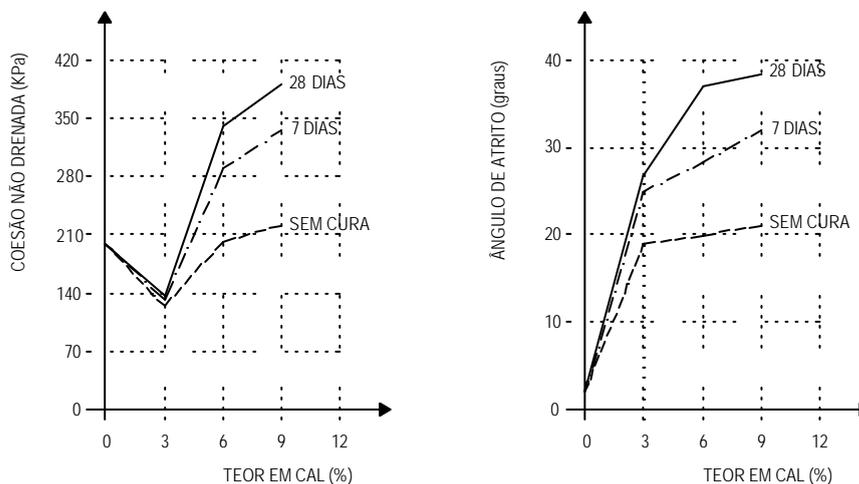


Figura 4.11: Efeito do teor em cal e do tempo de cura na coesão não drenada e no ângulo de atrito interno

(adaptado de Tuncer e Basma, 1991, in Little, 1995)

Outro aspecto a destacar do estudo conduzido por Mendonça (2000), é a perda de influência da tensão de confinamento nos resultados dos ensaios triaxiais, com o desenvolvimento das reacções pozolânicas nas misturas.

Tuncer e Basma (1991, in Little, 1995) relataram importantes melhoramentos na resistência ao corte não drenada de uma argila plástica típica da Jordânia. Os resultados obtidos ilustram o aumento significativo da coesão não drenada e do ângulo de atrito interno, em função da quantidade de cal adicionada e do tempo de cura (Figura 4.11).

4.5.2.4 RESISTÊNCIA À TRACÇÃO

Os pavimentos constituídos por camadas de elevada resistência mecânica e altos módulos de deformabilidade exibem, geralmente, um comportamento típico de placa, o que reduz consideravelmente as tensões transmitidas às camadas inferiores. Contudo, a relação entre os módulos de deformabilidade das camadas inferiores do pavimento e das misturas solo-cal que constituem a base e sub-base podem gerar elevadas tensões de flexão nestas últimas (Mendonça, 2000). Este factor pode inclusive, segundo Thompson (1969), ser decisivo no projecto de camadas solo-cal integrantes de pavimentos rodoviários. Assim, a consideração da resistência à tracção reveste-se de alguma importância, sendo normalmente utilizado na sua determinação o ensaio de compressão diametral.

À medida que aumenta a resistência à compressão não confinada, aumenta também a resistência à tracção. Para medir a resistência à tracção são normalmente utilizados dois tipos de ensaio: o ensaio de compressão

diametral e o ensaio à flexão (Little, 1995). Existem algumas variações relativamente ao primeiro dos ensaios referidos, dependentes da natureza da mistura solo-cal e das condições de cura.

A relação entre a resistência à tracção e a resistência à compressão não confinada é, segundo Little (1995), de 0.13, existindo uma correlação suficientemente forte para que este valor possa ser utilizado em projecto.

4.5.3 RESISTÊNCIA À FADIGA

A resistência à fadiga das misturas solo-cal está relacionada com o esforço de flexão crítico a que está sujeito o estrato estabilizado e com a resistência à flexão ou módulo de rotura da mistura. As curvas de resposta da fadiga à flexão de misturas solo-cal curadas são semelhantes às que normalmente se obtêm com materiais idênticos, tais como: misturas de cal e cinzas, misturas de solo-cimento e betão (Little, 1995).

De modo a poder ser aplicado um ciclo de carga-descarga relativamente elevado (aproximadamente 5 milhões), que irá resultar em esforços de flexão no estrato estabilizado, é necessário que a resistência à flexão da mistura seja aproximadamente o dobro do esforço de flexão induzido em cada ciclo.

Segundo Little (1995), no caso de uma mistura solo-cal com uma resistência à compressão não confinada de 2.8KPa, a resistência à flexão é aproximadamente 25% deste valor.

4.5.4 DEFORMABILIDADE

Segundo Neves (1993), o módulo de deformabilidade pode ser, por vezes, a principal referência no projecto de uma mistura solo-cal. À medida que a mistura solo-cal continua a curar, a resistência aumenta, e a deformação na rotura é cada vez mais reduzida. As misturas solo-cal ensaiadas à compressão são sensíveis à deformação.

A relação tensão-deformação constitui um aspecto essencial na análise do comportamento estrutural dum pavimento rodoviário que apresenta misturas solo-cal na sua composição. O valor do módulo de deformabilidade pode mesmo servir como indicador da vantagem em utilizar a estabilização com cal em detrimento de outras soluções. Existem várias referências na bibliografia aos acréscimos de tensão e decréscimos na deformação de rotura das misturas solo-cal, em comparação com os mesmos valores obtidos para o solo natural.

Mendonça (2000) defende a impossibilidade de, contrariamente à conclusão alcançada por Thompson (1967, in Mendonça, 2000), definir uma curva tensão-deformação generalizada que represente o comportamento mecânico dos solos estabilizados com cal. Terá inclusive observado uma dependência da deformação em relação à tensão de desvio máxima, ao tipo de solo, ao teor em cal e ao período de cura da mistura. De notar ainda a já esperada maior deformação na rotura das misturas com menor teor em cal.

Balasubramaniam (1989) concluiu, com base nas características das curvas tensão-deformação, no desenvolvimento das pressões neutras e nas características de variação de volume, que o tratamento de um solo com cal provoca uma alteração nas suas características de deformabilidade. Assim, um solo normalmente consolidado comporta-se, após a adição de cal, como um solo sobreconsolidado, com pequenas variações de volume para esforços inferiores à tensão de pré-consolidação. Além disso, o próprio valor da tensão de pré-consolidação aumentou com o tratamento com cal. Outro aspecto interessante, verificado pelo autor, constitui o aumento dos valores do coeficiente de consolidação e a diminuição do índice de compressibilidade.

Thompson (1966) concluiu que o módulo de elasticidade da mistura solo-cal pode ser estimado a partir da resistência à compressão simples (UCS), de acordo com a expressão:

$$E = 10 + 124 \text{ UCS}$$

De notar que as características de deformação, tal como as restantes propriedades relacionadas com a resistência de uma mistura solo-cal, alteram-se com o tempo e condições de cura. À medida que a cura se

processa, e desde que a actividade pozolânica continue a ocorrer, a rigidez da mistura aumenta. Isto resulta num aumento da resistência e da longevidade do estrato estabilizado.

Em relação ao coeficiente de Poisson, e sendo este um parâmetro também dependente da resistência, verifica-se que para níveis de carga relativamente baixos (inferiores a 50% da resistência à compressão não confinada), o seu valor situa-se entre os 0.1 e 0.2. Para valores de carga superiores, o coeficiente de Poisson situa-se entre os 0.2 e 0.3 (Little, 1995). A estabilização com cal diminui, de um modo geral, o valor do coeficiente de Poisson (Neves, 1993).

4.5.5 PERMEABILIDADE

A permeabilidade de um solo pode ser alterada significativamente devido à dissolução dos minerais presentes e às reacções de troca iónica. A adição de cal ao solo produz ambos os efeitos, conforme analisado no Capítulo 4.2. O resultado destes efeitos, quando o ião é o Ca^{++} , consiste num aumento da permeabilidade, pelo menos inicialmente.

Townsend e Klyn (1966, in Little, 1995) descobriram aumentos significativos da permeabilidade devido ao tratamento com cal, tendo relacionado estes aumentos com o aumento da porosidade motivado pela floculação. McCallister e Petry (1990, in Little, 1995) concluíram que, inicialmente, as misturas solo-cal registaram um aumento da permeabilidade, seguido de uma diminuição. Esta terá ficado a dever-se à acumulação, nos interstícios da mistura, dos produtos pozolânicos entretanto desenvolvidos. A permeabilidade de muitos destes solos estabilizados com cal permanece, contudo, consideravelmente mais elevada do que a dos solos originais, embora se verifique em alguns casos uma redução da permeabilidade para valores muito próximos dos originais.

McCallister e Petry (1990, in Little, 1995) verificaram que a permeabilidade de três solos expansivos do Norte do Texas era 7 a 300 superior após o tratamento com cal. Posteriormente descobriram ainda que a permeabilidade diminui com a lixiviação, especialmente se o teor em cal utilizada na estabilização for reduzido (3 a 4%). Contudo, se o teor em cal for o mais indicado para aumentar a resistência (6 a 7%), as alterações do valor da permeabilidade devido à lixiviação são negligenciáveis.

O efeito da lixiviação na permeabilidade deve-se, segundo Little (1995), à perda de íons cálcio durante o processo. À medida que a concentração de cálcio vai diminuindo, a repulsão entre partículas aumenta, aumentando a retenção de água à superfície das partículas argilosas, e diminuindo assim o espaço disponível para a circulação da água. Será ainda importante referir que a permeabilidade a longo prazo é influenciada pelo catião predominante no sistema solo-água e pelo nível de concentração desse catião (McCallister e Petry, 1990, in Little, 1995).

A permeabilidade de um solo estabilizado com cal depende, segundo Neves (1993), dos seguintes factores: tipo de solo, peso volúmico de compactação, teor em água na compactação, quantidade de cal e tempo de cura. De um modo geral, e de acordo com a bibliografia consultada, a cal afecta a permeabilidade de um solo da seguinte forma: tratando-se de um solo essencialmente argiloso, verifica-se normalmente um aumento na permeabilidade; se pelo contrário se trata dum solo mais granular, verifica-se uma tendência para a redução da permeabilidade inicial do solo.

Townsend e Klyn (1966, in Little, 1995a) observaram aumentos significativos da permeabilidade dos solos após o tratamento com cal, tendo relacionado esta variação com o aumento no volume de vazios devido à floculação. Ranganatham (1961, in Little, 1995a) relata aumentos da permeabilidade até 10 vezes o seu valor inicial em solos expansivos tratados com cal. Brandl (1981) observou aumentos máximos da permeabilidade para 1% de cal, em solos siltosos, e para 10% de cal, em solos muito reactivos.

Por outras palavras, os solos estabilizados com cal tornam-se geralmente mais permeáveis à água, tendo algumas argilas apresentado subidas da permeabilidade até 300 vezes o valor inicial. Estes aumentos significativos não são surpreendentes quando observados no contexto da dramática redução da densidade máxima e do aumento do volume de vazios, resultantes por sua vez duma estrutura expandida pelo tratamento com cal.

Contudo, com o aumento do tempo de cura, e em solos coesivos ou granulares, a permeabilidade da mistura solo-cal vai diminuir. Este fenómeno explica-se fundamentalmente pela acção de cimentação desenvolvida ao longo do tempo de cura: o esqueleto sólido é parcialmente envolto numa massa gelatinosa, enquanto se

desenvolvem nos vazios os produtos cimentícios responsáveis pelo aumento da rigidez da mistura. Verifica-se assim uma alteração da estrutura do solo, com a diminuição do volume de ar nele contido. Adicionalmente, as partículas de solo estabilizado são envolvidas numa fina película de água, de tal forma que o volume de vazios resultante começa a diminuir, o que também provoca uma progressiva redução da permeabilidade.

Em solos argilosos, cujo teor em água é inferior ao valor óptimo, a permeabilidade não é praticamente afectada pela adição de cal (Neves, 1993). Tal deve-se ao facto do solo nesta circunstância já possuir uma estrutura floculada. Quando o teor em água é igual ou superior ao óptimo a quantidade de cal adicionada já terá uma real influência no coeficiente de permeabilidade da mistura. Em solos arenosos a permeabilidade diminui com o aumento da quantidade de cal da mistura.

Quanto mais coesivo e reactivo for o solo, maior o aumento da sua permeabilidade com a adição de cal. Isto porque a floculação, fenómeno directamente responsável pelo aumento da permeabilidade numa mistura solo-cal, será tanto maior quanto maior a plasticidade do solo original.

4.5.6 DURABILIDADE

Um solo estabilizado com cal possui a capacidade de manter os aumentos de resistência e rigidez obtidos ao longo do tempo, resistindo sobretudo aos efeitos da acção da água e aos ciclos gelo-degelo. Estes efeitos foram monitorados por Little (1999) através da avaliação dos seguintes parâmetros: resposta da mistura à humedificação e aos ciclos gelo-degelo consecutivos; recuperação de resistência durante os períodos de descanso; medição de valores dieléctricos; medição da resistência a longo prazo e das alterações nas propriedades físicas e químicas em misturas solo-cal sujeitas a fenómenos de erosão.

O efeito da humedificação depende do nível de resistência ou da reacção pozolânica obtida anteriormente. Little (1999) demonstrou que, logo após o desenvolvimento duma percentagem significativa da reacção pozolânica, os efeitos da humedificação são pouco substanciais. Contudo, quando esta ocorre antes do desenvolvimento da resistência pozolânica ser significativo, os seus efeitos podem fazer sentir-se de forma

bastante vincada. O autor refere ainda perdas no valor da resistência à compressão simples na ordem dos 40%.

Thompson e Dempsey (1969, in Little, 1995) estudaram vários solos do Illinois, tendo concluído que a relação entre a resistência à compressão de misturas solo-cal saturadas e não saturadas está entre 0.70 e 0.85. Notar que as misturas solo-cal dificilmente atingem a saturação, variando o grau de saturação máximo normalmente entre os 90 e os 95%.

Os pavimentos rodoviários podem experimentar normalmente dois tipos de acção gelo-degelo: Na primeira situação o congelamento ocorre sob a forma de uma frente de gelo em movimento, sendo seguida do descongelamento. O outro tipo de acção consiste num movimento de expansão e contracção da massa de solo, e ocorre quando a frente de gelo está fixa dentro do estrato estabilizado. Esta última situação favorece a migração da água e a subsequente formação de lentes de gelo. Dependendo da natureza do clima da região, os dois tipos de acção poderão ocorrer.

A resistência à compressão não confinada inicial de uma mistura solo-cal curada (não submetida a ciclos gelo-degelo) pode, segundo Little (1995), constituir um bom indicador da sua resistência ao gelo-degelo. Os factores que influenciam o aumento da resistência mecânica são também fundamentais na evolução da resistência à variação da condição da água no solo.

McCallister e Petry (1990, in Little, 1999) estudaram a sensibilidade das misturas solo-cal à erosão com água contendo vários tipos de sais, concluindo que a perda de estabilidade pode ocorrer se a estabilização não for a mais conveniente, não sendo porém de prever tal situação se o solo estiver correctamente estabilizado.

Lu et al (1957) avaliou também a durabilidade das misturas solo-cal. Várias amostras foram sujeitas a 12 ciclos de molhagem-secagem ou gelo-degelo, tendo no final sido medida a resistência à compressão de cada uma. Os valores da resistência assim obtidos foram posteriormente comparados com os valores obtidos em amostras semelhantes que não foram sujeitas aos ciclos de desgaste referidos. Para o estudo então efectuado foi admitido que o resultado da erosão podia ser indicado por um índice de durabilidade, definido como sendo a razão entre a resistência após exposição aos ciclos e a resistência obtida com as amostras de

referência, para a mesma idade de ensaio. Assim, um índice igual a 1.0 indicava um efeito não adverso da erosão, enquanto um índice de 0.0 indicava rotura após exposição aos ciclos referidos.

O único tipo de cal que revelou uma resistência satisfatória à erosão foi a cal dolomítica não hidratada, que proporcionou ainda a mais elevada resistência à compressão. A cal dolomítica dihidratada, adicionada em proporções idênticas, revelou uma durabilidade inferior. A cal calcítica, também adicionada na mesma percentagem, originou índices de durabilidade ainda menores. Verificou-se ainda que a durabilidade é, duma forma geral, proporcional ao tempo de cura antes do início dos ciclos molhagem-secagem e gelo-degelo.

As misturas solo-cal apresentam propriedades de auto-regeneração intrínsecas. Isto significa que se o solo estabilizado pode, com o tempo, repor a resistência perdida, então as perdas durante o Inverno devidas aos ciclos gelo-degelo não serão acumuladas. Este fenómeno foi demonstrado por Thompson e Dempsey (1969, in Little, 1995), após os ensaios cujos resultados permitiram traçar o gráfico da figura 4.12.

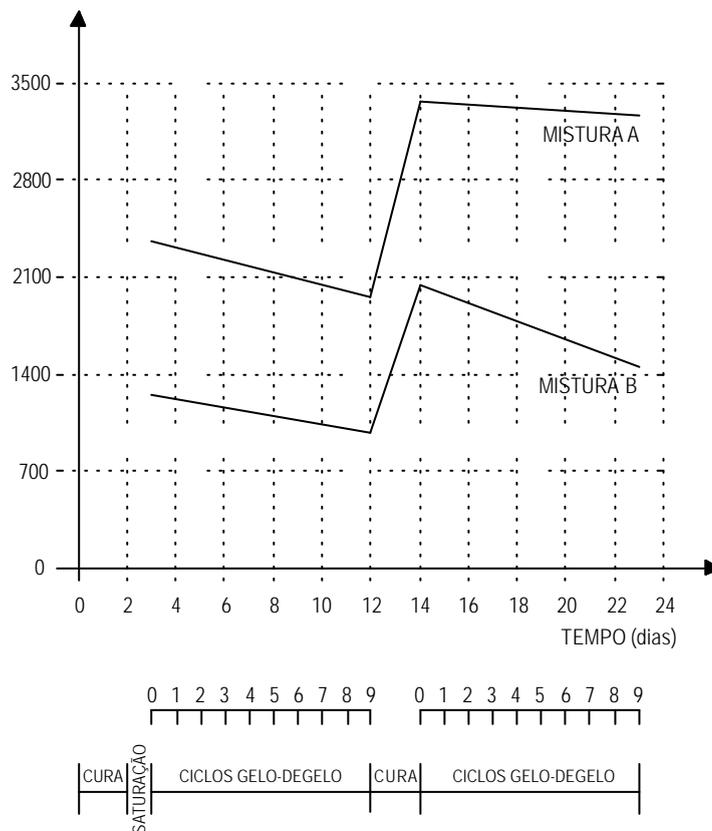


Figura 4.12: Autoregeneração de uma mistura solo-cal durante um período favorável à sua cura
(adaptado de Thompson e Dempsey, 1969, in Little, 1995)

De modo a que esta auto-regeneração possa ocorrer é necessário não só que a temperatura seja adequada, mas também que estejam presentes as condições que permitam a continuação das reacções pozolânicas, nomeadamente uma quantidade de cálcio disponível suficiente e um pH elevado (Little, 1995).

4.6 APLICAÇÃO DE MISTURAS SOLO-CAL

4.6.1 INTRODUÇÃO

Segundo Hamzah (1983), o projecto duma mistura solo-cal para efeitos de modificação ou estabilização do solo deve ser constituído por duas partes: (1) estabelecer o teor em cal mais apropriado para a obra em questão e (2) avaliar as propriedades da mistura e sua evolução no tempo.

O teor óptimo em cal é função do tipo de utilização que terá o material estabilizado. Isto porque existe uma vasta gama de teores em cal que podem ser utilizados, dependendo das propriedades que se deseja potenciar. Os objectivos podem ir da redução da plasticidade e do aumento da trabalhabilidade (melhoramento); até alterações permanentes com efeito na resistência da mistura (estabilização).

A determinação da dosagem das misturas solo-cal baseia-se normalmente nas seguintes características: limites de consistência, granulometria, classificação, compactação, resistência e durabilidade. Outros métodos foram já entretanto propostos, como o de recurso ao pH proposto por Eades e Grim (1966). A determinação da composição mineralógica, expansibilidade, teor em matéria orgânica e sulfatos e capacidade de permuta catiónica poderá também contribuir para uma correcção da dosagem, embora não seja muito frequente o recurso a estas grandezas (Castro, 1974).

Quando a estabilização de um solo visa melhorar as suas aptidões de modo a poder constituir bases e sub-bases para pavimentos rodoviários (Figura 4.13), a mistura solo-cal deve não só possuir a resistência adequada, como ser capaz de manter essa resistência perante as inevitáveis condições de humidade. Além disso, o seu custo e dificuldade de aplicação em obra, nomeadamente a pulverização, mistura e compactação, devem também ser mínimos.



Figura 4.13: Estabilização do solo de fundação de um pavimento rodoviário

4.6.2 CRITÉRIOS

Os critérios desenvolvidos para o tratamento e estabilização de solos com cal podem, segundo Little (1995), ser divididos em dois grupos. Quando o objectivo consiste na **modificação** das propriedades do solo, como a redução da plasticidade, melhoria da trabalhabilidade, aumento imediato da resistência ao corte e redução do potencial de variação de volume, é aplicado o critério para estabilização mecânica das misturas. Quando o tratamento com cal visa uma substancial e permanente **estabilização** do solo, então o critério aplicado baseia-se na resistência mecânica, de forma semelhante ao critério utilizado na estabilização com cimento. O quadro 4.1 apresenta os critérios para as diversas utilizações propostos por Ingles e Metcalf (1972).

PROCESSO	OBJECTIVO	ALTERAÇÕES NECESSÁRIAS
----------	-----------	------------------------

modificação	<ul style="list-style-type: none"> ≡melhoramento de acessos em solos argilosos húmidos ≡melhoramento da trabalhabilidade 	<ul style="list-style-type: none"> ≡grandes aumentos no limite de plasticidade ≡rápidos aumentos na capacidade de carga
estabilização	<ul style="list-style-type: none"> ≡melhoramento do material para bases e sub-bases 	<ul style="list-style-type: none"> ≡aumento da capacidade de carga ≡redução da expansibilidade e plasticidade

Quadro 4.1: Classificação, em função dos objectivos, do tratamento de um solo argiloso com cal
(adaptado de Ingles e Metcalf, 1972)

A modificação do solo é normalmente usada com três objectivos principais: redução da plasticidade dum material que no seu estado inicial não apresenta a necessária estabilidade mecânica; melhoramento da trabalhabilidade do solo e da sua resistência à desfloculação e erosão; e aumento imediato da resistência de solos argilosos húmidos como forma de melhorar um local de obra. Contudo, o processo de modificação pode também produzir importantes melhoramentos estruturais, como um significativo aumento da capacidade de carga do solo. Para o primeiro objectivo referido são determinados os limites de liquidez e plasticidade com vários teores em cal, até serem atingidos valores considerados satisfatórios. Notar que nem sempre estão disponíveis os critérios necessários para medir a adequabilidade do tratamento aplicado (Little, 1995).

A averiguação da eficácia do tratamento através das alterações da plasticidade pode, nos solos à base de caulinite e illite, induzir em erro. Isto porque, com estes solos, as alterações do índice de plasticidade são lentas e reduzidas, susceptíveis portanto de serem determinadas com pouca exactidão. Nestes solos o mais indicado serão assim os ensaios de resistência.

A "British Standards Institution" possui vários normas para ensaio de solos estabilizados, que compreendem a determinação do teor em água, ensaios de compactação, baridade seca "in situ", resistência e durabilidade, teor em estabilizante, entre outros. Estes métodos revestem-se dum character geral, sendo necessários alguns acertos em função do estabilizante em causa.

4.6.3 FORMULAÇÃO DE MISTURAS SOLO-CAL

Little (1999) definiu como uma necessidade urgente a criação dum protocolo de projecto de misturas solo-cal capaz de garantir o projecto de fundações de pavimentos fiáveis e duráveis. Sugeriu então que tal protocolo fosse criado com base nos seguintes pressupostos: (1) selecção dum solo capaz de reagir a nível mineralógico com a cal; (2) estabelecer o teor em cal ideal com base na determinação do pH e da evolução da resistência à compressão simples e (3) avaliação da resistência aos estragos provocados na mistura com um teste de sucção capilar. Com base na resistência à compressão não confinada, cuja determinação é proposta por este protocolo, será possível ao projectista ter uma ideia aproximada do módulo de deformabilidade (função da resistência da mistura e da capacidade de carga natural do solo), do potencial dos danos devidos à fadiga do material, e do potencial de deformação permanente.

Existem vários métodos para determinar as condições da mistura. Isto porque vários países e instituições desenvolveram critérios específicos para responder às condições com que normalmente se deparam. A sua formulação consiste, basicamente, na adição de várias quantidades de cal ao solo e na observação das alterações provocadas após um adequado período de cura. As alterações mais significativas e pertinentes para a percepção da quantidade ideal de cal a adicionar verificam-se, segundo Ingles e Metcalf (1972), na plasticidade, granulometria e resistência mecânica. Estes autores sugerem, como valor de referência utilizado como ponto de partida, a adição de 1% de cal (em relação ao peso de solo seco), por cada 10% de argila presente no solo. Uma determinação mais aproximada do teor em cal será posteriormente conseguida com variações de $\pm 2\%$ em relação à quantidade inicialmente adicionada.

A Força Aérea americana sugere misturas de ensaio com 2, 3 e 5% de cal, para argilas siltosas; e misturas com 3, 5 e 7% para argilas gordas. Também a National Lime Association americana recomenda valores de 3, 5 e 7% em mistura de ensaio. Embora a gama de percentagens de cal recomendadas pelas entidades referidas seja satisfatória para a maioria dos solos, não podem ser generalizadas a todos eles.

Segundo Castro (1974) o teor em cal a utilizar na estabilização de solos deve ser determinado em cada caso, estando normalmente compreendido entre 1 e 10% do peso do solo seco. Quantidades superiores não são geralmente económicas ou sequer necessárias. Quanto ao valor mínimo a utilizar, não são recomendáveis quantidades inferiores a 3%, mesmo que os ensaios laboratoriais indiquem que os resultados pretendidos

podem ser obtidos com valores inferiores. Isto porque as condições de homogeneização da mistura são, em obra, menos eficazes.

Eades e Grim (1966, in Hamzah, 1983) propuseram um método para determinar a quantidade ideal de cal para estabilizar um solo, bem como o seu nível de reactividade, o qual consiste na medição do pH da mistura ao fim de uma hora. Este valor é depois relacionado com a quantidade de cal consumida nas reacções, nesse intervalo de tempo. A elevada alcalinidade da cal vai permitir atacar a sílica e alumina da argila, com as quais o cálcio vai posteriormente reagir e formar silicatos de cálcio, desde que se mantenha um ambiente de elevada alcalinidade. A cal necessária para esta reacção contínua pode ser determinada sob vários valores da temperatura e após vários intervalos de tempo. Sendo assim, os autores consideraram que um teste ao pH da mistura, após uma hora ou após qualquer outro intervalo de tempo, podia ser utilizado para determinar a percentagem ideal de cal para a reacção. Concluíram então que a quantidade mínima de cal que conduziu a um pH de 12.4 ao fim de uma hora seria a quantidade requerida para estabilizar o solo.

Contudo, este método não constitui uma abordagem válida ao problema quando se trata de solos não coesivos ou de elevado teor em matéria orgânica. Isto porque os solos tipicamente granulares não são fragmentados em ambientes de elevada alcalinidade, de modo a libertarem a sílica e alumina que irão participar na reacção pozolânica com a cal. Da mesma forma, elevadas quantidades de matéria orgânica no solo retardam as reacções pozolânicas.

Hilt e Davidson (in Biswas, 1972), utilizaram o limite de plasticidade para determinar o que denominaram por "ponto de fixação da cal", e que segundo os autores constitui a quantidade ideal de cal para a estabilização do solo. Quando a cal é adicionada ao solo, os iões Ca^{++} são adsorvidos pelas partículas de argila, causando alterações físico-químicas que continuam a ocorrer com o aumento da quantidade de cal. Será porém atingido um determinado valor máximo para a cal, a partir do qual novos incrementos não correspondem a alterações nas características de plasticidade da mistura. Este valor foi então designado por ponto de fixação ou ponto de retenção da cal. A cal em excesso, que surge quando são adicionadas quantidades superiores ao ponto de fixação, não causa alterações significativas na plasticidade e é utilizada nas reacções de cimentação.

No método proposto por Thompson (1970, in Hamzah, 1983), a quantidade de cal necessária é determinada a partir da análise da relação entre a percentagem de cal e a resistência à compressão não confinada, considerando assim a resistência como o principal factor na estabilização dum solo. Contudo, e conforme foi já referido, quando o objectivo é a modificação das propriedades do solo, a evolução de maior importância é a da plasticidade.

O Texas Highway Department considera a mistura satisfatória quando a resistência à compressão simples exceder os 700 Kpa. Segundo Woods (in Castro, 1970), caso seja utilizado o CBR, é exigido um valor mínimo de 80 para materiais colocados directamente abaixo da superfície betuminosa, sendo permitidos valores inferiores apenas a profundidades maiores, onde as tensões geradas pelo tráfego são menores. No estado americano do Michigan verificou-se, em ensaios de campo e de laboratório, que é necessária uma resistência à compressão de cerca de 3500 Kpa, de modo a evitar estragos na mistura provocados pelos ciclos repetidos de gelo/degelo. Nos climas frios a durabilidade é porventura a qualidade mais importante das misturas solo-cal.

Ingles e Metcalf (1972) propuseram alguns valores para o teor em cal necessário para melhorar e estabilizar vários tipos de solo (Quadro 4.2).

TIPO DE SOLO	PERCENTAGEM DE CAL PARA MODIFICAÇÃO	PERCENTAGEM DE CAL PARA ESTABILIZAÇÃO
rocha muito fracturada	2 a 4%	não recomendado
argilas bem graduadas	1 a 3%	? 3%
areias	não recomendado	não recomendado
argila arenosa	não recomendado	? 5%
argila siltosa	1 a 3%	2 a 4%
argila gorda	1 a 3%	3 a 8%
argila muito gorda	1 a 3%	3 a 8%
solo orgânico	não recomendado	não recomendado

Quadro 4.2: Quantidade de cal necessária para melhorar e estabilizar vários tipos de solo

(segundo Ingles e Metcalf, 1972)

4.6.4 PREVISÃO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA MÁXIMA A PARTIR DE ENSAIOS LABORATORIAIS

Anday (1963), levou a cabo um estudo comparativo destinado a correlacionar o aumento de resistência de amostras de solo-cal curadas *in situ* e em laboratório. Para o estudo da amostra curada *in situ* foi executado um pavimento típico, enquanto as amostras curadas em laboratório foram mantidas a 49°C.

A maturidade de um solo é geralmente definida como o somatório dos produtos da temperatura pelo seu tempo de duração. Sendo assim, o elevado valor da temperatura de cura em laboratório justifica-se pela necessidade de aproximar o nível de "maturidade" da mistura ao daquela utilizada no pavimento de teste, mistura essa cujo tempo de cura foi substancialmente superior (até 45 dias), mas com temperaturas correntes. Os valores dos ensaios de compressão não confinada, obtidos em amostras retiradas do pavimento de ensaio foram comparados com os valores das amostras mantidas em laboratório.

Concluiu-se que o tempo requerido para as amostras curadas em laboratório, a uma temperatura de 49°C, atingirem uma resistência equivalente à das amostras curadas *in situ* foi de 2 dias. Ou seja, a resistência à compressão uniaxial obtida ao fim de 2 dias, para amostras curadas em laboratório à temperatura referida, estará muito próxima da resistência desenvolvida por uma mistura solo-cal ao fim de aproximadamente 45 dias (intervalo de tempo razoável para a cura duma mistura solo-cal utilizada num pavimento rodoviário).

Embora possa constituir um importante auxiliar para o projecto de camadas rodoviárias estabilizadas com cal, esta relação entre resistência em laboratório e resistência *in situ* pode ser substancialmente diferente para alguns solos.

No estado americano do Michigan (in Castro, 1970), verificou-se ainda que as misturas que aos 28 dias apresentavam uma resistência à compressão simples de 3500 Kpa, apresentavam aos 7 dias resistências na ordem dos 1750 a 2100 Kpa.