

# ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA DE SOLOS RESIDUAIS GRANÍTICOS

## Chemical Stabilization of Residual Granitic Soils

Nuno Cristelo\*

Said Jalali\*\*

**RESUMO** – Este artigo descreve os resultados de um trabalho de investigação realizado para avaliar os efeitos positivos da utilização de cal na estabilização de solos cujo mineral argiloso predominante é a caulinite, como no caso dos solos residuais graníticos. Os efeitos estudados estão relacionados com a alteração da classificação e com o aumento da capacidade de carga. Foram estudadas as modificações na granulometria e plasticidade de dois solos, com diferentes percentagens de argila, quando lhes foi adicionada 2% de cal calcítica hidratada. Além disso, foram avaliados os efeitos benéficos sobre a resistência à compressão da adição de 6 e 10% de cal, ao longo de períodos de cura de até 10 semanas. A influência da saturação dos solos estabilizados foi igualmente estudada, bem como a influência da adição de uma pequena quantidade de cloreto de sódio às misturas com 6% de cal. Esta inclusão provou constituir uma vantajosa alternativa ao aumento do teor em cal, visto que as resistências alcançadas foram similares às obtidas com 10% de cal. Os resultados obtidos indicam que as propriedades deste tipo de solo podem também ser melhoradas através de aditivos químicos, com evidentes vantagens em bases e sub-bases de pavimentos rodoviários ou na construção de aterros.

**ABSTRACT** – This paper describes the results of a research work carried out for evaluating the beneficial effects when lime is used in stabilization of soils in which the predominant clay mineral is caulinite (like residual granite soils), benefits that relate to the change of classification and the improvement of load bearing capacity. The modifications in particle size distribution and plasticity of two soils, with different clay fractions, were studied when 2% calcitic hydrated lime was added. Furthermore, the beneficial effects on compressive strength were monitored when 6 and 10% lime was added, for curing times up to 10 weeks after mixing. The effects of saturation on stabilized soils were also studied. Moreover, the effects of a small percentage of NaCl added with 6% lime were studied. This addition proved to be a better alternative to the addition of larger amounts of lime, since the compressive strengths obtained were similar to those obtained with 10% lime addition. The results obtained indicate that the properties of this type of soil can also be improved by chemical additives, with advantages when used in pavement base and sub-base or in embankment construction.

## 1 – INTRODUÇÃO

A crescente preocupação com a redução dos solos disponíveis para utilização na construção conduz ao uso de terras que requerem um significativo melhoramento físico e químico, sem o qual não poderiam sequer ser consideradas. Estes melhoramentos podem ser atingidos através de um vasto leque de métodos, que incluem a densificação, a remoção da água intersticial e a alteração das propriedades do solo. As propriedades do solo podem, por sua vez, ser alteradas *in situ* através do congelamento do solo, da mistura com outros materiais e da estabilização química. A estabilização química de um solo consiste no seu endurecimento através da ligação das partículas com um agente cimentício produzido por reacções químicas. Em Ozkan (1998) estão sintetizados os

---

\* Assistente da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro [ncristel@utad.pt]

\*\* Professor Associado da Universidade do Minho [said@civil.uminho.pt]

produtos químicos mais estudados na estabilização de solos: ácido fosfórico, sais, resinas, silicato de sódio, cátions orgânicos e hidróxidos. Este estudo visa precisamente a estabilização química de um solo argiloso (solo residual granítico) através da adição de hidróxido de cálcio (cal hidratada), e o uso de um aditivo económico capaz de potenciar os efeitos da cal (cloreto de sódio – sal). O diagrama da Figura 1 pretende situar a estabilização química no contexto geral do melhoramento dos solos tendo em vista a sua utilização na construção.

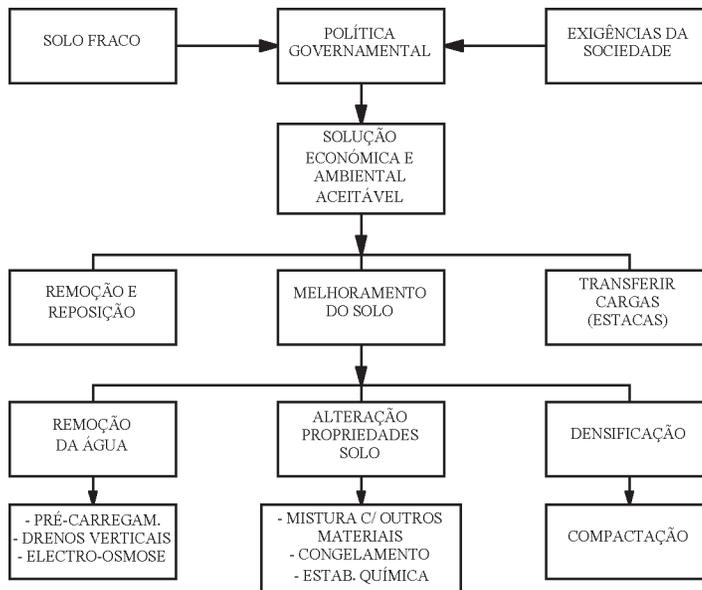


Fig. 1 – O melhoramento dos solos para uso na construção: diagrama esquemático.

A estabilização com cal é utilizada há mais de 5000 anos na construção. A grande muralha da China e as Pirâmides de Shersi no Tibete são dois dos exemplos mais famosos do seu uso (Barker, 2002). Hoje em dia constitui um método muito utilizado em obras de terra, normalmente mais económico do que a remoção e substituição do solo não satisfatório. Para além disto, em locais em que o solo está contaminado, a estabilização com cal é particularmente atractiva visto que evita o manuseamento e transporte do referido solo, o que poderia provocar efeitos negativos no ambiente.

A adição de cal melhora as características de um solo argiloso, incluindo a trabalhabilidade, resistência, deformabilidade, permeabilidade e susceptibilidade às alterações de volume. O grau de alteração destas características depende de factores como as propriedades e quantidades dos agentes estabilizantes (cal e outros aditivos que tendem a melhorar o seu desempenho), do tempo e temperatura de cura, e do tipo e qualidade da fracção argilosa do próprio solo (Cristelo, 2001).

A cal pode ser aplicada no solo através de vários métodos, como o das estacas ou colunas de cal, injeção de leite de cal sob pressão ou mistura superficial. As alterações resultantes são função das reacções físicas e químicas que ocorrem quando o cálcio, a água e os minerais argilosos do solo entram em contacto. Segundo Little (1995), os solos tratados com cal podem ser classificados em duas categorias: reactivos e modificáveis. Os solos reactivos são aqueles que apresentam melhorias na resistência à compressão simples superiores a 345 kPa aos 28 dias, a uma temperatura de 22°C. O termo “reactivos” refere-se assim às reacções pozolânicas entre os constituintes da argila, nomeadamente a sílica e a alumina, e a cal, do que resulta o desenvolvimento de materiais cimentícios entre as partículas de solo. O termo “modificáveis” aplica-se aos solos cujas melhorias na resis-

tência são pouco significativas, mas com importantes alterações nas propriedades físicas como a plasticidade, alteração de volume, textura e trabalhabilidade.

Os efeitos imediatos da adição de cal, cujo conjunto é neste estudo denominado por “melhoramento”, devem-se quase exclusivamente ao mecanismo de troca de cátions, em que o cátion  $\text{Ca}^{++}$  vai substituir os cátions de menor valência e (ou) dimensão existentes no sistema água-solo. Este mecanismo origina a floculação das partículas, responsável pela diminuição da plasticidade e por ligeiros ganhos de resistência. Praticamente todos os solos finos, independentemente do nível de reactividade entre o solo e a cal, apresentam melhorias mais ou menos consistentes das suas características. Com o aumento do período de cura, e no caso de ainda estar disponível parte da cal adicionada, verifica-se o desenvolvimento das reacções pozolânicas, responsáveis pelas ligações mais fortes entre as partículas de solo. O conjunto de alterações proporcionadas por estas reacções pozolânicas é denominado, neste estudo, por “estabilização”.

Os solos residuais graníticos do tipo “saprólito” constituem o tipo de solo residual granítico mais interessante no que respeita à estabilização com cal, devido aos teores de sílica e alumina ainda presentes, e podem ser encontrados em várias áreas da zona norte do país. Possuem uma fracção argilosa que, embora possa atingir quantidades significativas, é constituída maioritariamente por caulinite, mineral cuja reacção com a cal não é tão significativa como a verificada noutros minerais argilosos. Daqui resulta que a experiência ao nível da estabilização destes solos relatada na bibliografia não seja tão extensa como no caso de outros tipos de solos argilosos. Ao mesmo tempo, a fracção argilosa presente neste tipo de solo dificulta a sua estabilização com cimento. Assim, em última análise, a cal constitui o mais eficaz aditivo químico para a estabilização de solos residuais graníticos.

## 2 – ENSAIOS E MATERIAIS UTILIZADOS

Os solos reagem de formas diferentes à estabilização química. Os ensaios em laboratório indicam o grau de alteração conseguido, em função do tipo de solo e do tipo e quantidade de aditivo, sendo sempre necessário ter em conta que os efeitos obtidos *in situ* podem ser consideravelmente diferentes daqueles obtidos em laboratório. O problema com qualquer ensaio, laboratorial ou de campo, é a determinação dos efeitos que as condições reais têm sobre o comportamento a longo prazo. Assim, a questão da verosimilhança em ensaios laboratoriais permanece um desafio.

A ferramenta mais eficiente será provavelmente o ensaio triaxial simples. Este ensaio é uma solução de compromisso visto que a rotação das tensões principais não é possível, mas fornece um meio para determinar, de forma muito aproximada, a rigidez e resistência do material sob uma larga gama de tensões aplicadas. Contudo, o ensaio de compressão simples fornece toda a informação necessária ao projecto de uma mistura solo-cal, visto que a resistência à flexão, à compressão e à tracção podem ser deduzidas, com confiança, a partir deste ensaio (Little, 1995). Além disso, e segundo Mendonça *et al* (2000), a influência da tensão de confinamento nos resultados dos ensaios triaxiais é progressivamente reduzida com o desenvolvimento das reacções pozolânicas nas misturas. Assim, optou-se por determinar a resistência das misturas através de ensaios triaxiais apenas no caso das misturas com reduzidas quantidades de cal, tendo sido utilizado o ensaio de compressão simples no caso das misturas com maiores teores em cal. Em ambos os casos os resultados indicados foram sempre obtidos a partir da média de 3 ensaios por cada caso.

Segundo as recomendações francesas SETRA-LCPC (1972), os ensaios de laboratório devem focar os seguintes aspectos:

- identificação e caracterização dos solos;
- identificação e caracterização da cal;
- estudo da mistura estabilizada.

O Comité Técnico n.º 12 da AIPCR (1990) recomenda que a formulação varie consoante a utilização pretendida para a mistura solo-cal, o que permite classificar as principais finalidades das misturas da seguinte forma:

- melhoramento com vista à utilização em aterros;
- estabilização para utilização como camada de coroamento de aterros ou como fundação de pavimentos.

No primeiro caso o objectivo do estudo de formulação visa determinar o valor mínimo do teor em cal a adicionar ao solo para que este possa ser compactado ou sobre ele se possa circular. Assim, o estudo laboratorial deve consistir sobretudo na determinação dos limites de consistência e dos parâmetros de compactação.

Quando o objectivo é a estabilização a longo prazo dos solos, o estudo laboratorial a levar a cabo deve ser mais aprofundado, visando determinar a evolução das características de resistência em função do teor em cal e do período de cura. Serão então necessários, para além daqueles já referidos, os ensaios de resistência mecânica que melhor simulam as condições reais a que os solos serão submetidos.

Os dois solos utilizados neste trabalho foram fabricados em laboratório, através da mistura de 65% de caulino e 35% de areia (solo S1C0) e de 35% de caulino e 65% de areia (solo S2C0). Este procedimento garante a homogeneidade das características dos vários provetes ensaiados, o que implica que as diferenças nos resultados obtidos resultam apenas da variação controlada dos parâmetros cuja influência na estabilização se procurou estudar, como a quantidade de cal, o período de cura, o uso de aditivos, etc. Na preparação das amostras foi efectuada a mistura do solo e água 24 horas antes da adição de cal, de modo a permitir a homogeneização do teor em água. A cal adicionada foi convenientemente homogeneizada na mistura, tendo esta sido armazenada, durante o período de cura pretendido, em câmara húmida.

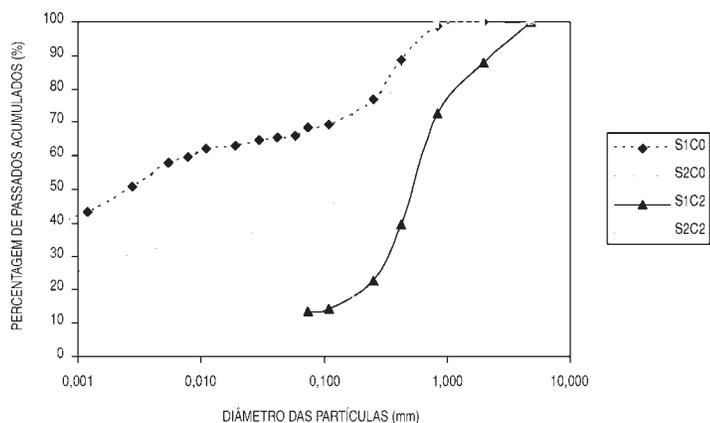
Foi utilizada uma cal hidratada, em pó. As suas características químicas, obedecem aos critérios da norma francesa NF P 98-101 (1991). Para determinar a influência do teor em cal na resistência das misturas, foram preparados provetes com 2, 6 e 10% de cal. Para avaliar o melhoramento resultante da utilização do cloreto de sódio (NaCl), foram também preparadas misturas com 6% de cal e 0,12% de NaCl. Este aditivo possuía um grau de pureza de 99%, superior ao valor mínimo de 95% exigido pela especificação ASTM D632 (1966).

Em relação à classificação unificada, proposta pela norma ASTM D2487 (1985), o solo S1 é classificado como “CL - Argila Magra Arenosa” e o solo S2 como “SC - Areia Argilosa”. Estes resultados estão assim de acordo com o que é normalmente obtido para os solos residuais graníticos. Quanto à classificação rodoviária AASHTO M145-42 (1986), verifica-se que o solo S1 pertence ao grupo A-6 (9). O solo S2, com maior percentagem de areia, pertence ao grupo A-2-6 (1).

No que respeita à mineralogia dos solos em análise verificou-se, através do método de difracção de raios X, a presença de minerais argilosos do grupo da caulinite. Em ambos os solos é também bem visível a presença de quartzo. As análises químicas revelaram que os constituintes do solo se encontram em percentagens semelhantes às que normalmente se verificam numa rocha granítica. A alumina e sobretudo a sílica, importantes para o desenvolvimento do gel cimentício responsável pelos ganhos de resistência, encontram-se em elevadas quantidades nos dois solos ( $\text{SiO}_2$ : 54,6 e 69,4%;  $\text{Al}_2\text{O}_3$ : 28,7 e 20,1%). Em relação à capacidade de troca iónica, verifica-se que esta é consideravelmente reduzida (1,53 e 1,90 me/100g, respectivamente nos solos 1 e 2), o que pode ser justificado pelo facto dos constituintes mineralógicos destes solos possuírem uma reduzida capacidade de troca catiónica.

### **3 – MELHORAMENTO DOS SOLOS ESTUDADOS - ANÁLISE DOS RESULTADOS**

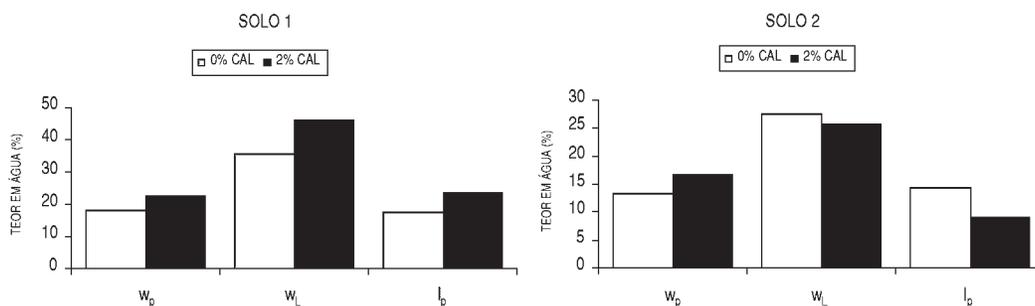
Pode deduzir-se, através da comparação das curvas granulométricas (Figura 2), que a adição de cal alterou significativamente a dimensão original das partículas. De facto, as partículas finas



**Fig. 2** – Curvas granulométricas das misturas S1C2 e S2C2 e dos solos naturais S1 e S2.

dos solos aglutinaram-se, formando flocos de dimensões superiores. Esta reacção é visível através das alterações que ocorreram na forma das curvas granulométricas. A percentagem de partículas inferiores a 0,074 mm passou de 68 e 41% para 13 e 5%, nos solos S1 e S2, respectivamente.

No que respeita à plasticidade (Figura 3), verifica-se que no solo S2 o índice de plasticidade ( $I_p$ ) diminuiu, o que está de acordo com os resultados indicados na literatura. Porém, o  $I_p$  do solo S1 aumentou, devido a um aumento significativo do limite de liquidez ( $w_L$ ), que não foi acompanhado pelo aumento do limite de plasticidade ( $w_p$ ). Existem na literatura vários relatos do aumento do  $w_L$ , mas estes são normalmente acompanhados de relatos de aumento ainda maior do  $w_p$ , o que conduz à redução do  $I_p$ . Boardman (1999) sugere que os aumentos pouco significativos, ou mesmo a redução do limite de plasticidade, pode ficar a dever-se à elevada proporção de pontos cuja carga eléctrica é dependente do valor do pH em relação aos pontos cuja carga eléctrica se mantém constante, situação frequente em alguns minerais. De qualquer forma, este resultado necessita de ser confirmado por outros estudos, por forma a verificar se este comportamento é típico dos solos classificados como CL.



**Fig. 3** – Evolução dos limites de consistência dos solos S1 e S2.

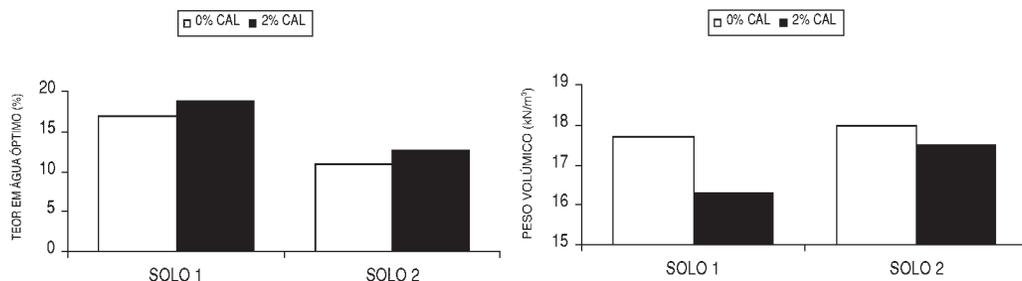
Quanto à classificação registaram-se também algumas alterações. Devido ao fenómeno de floculação das partículas após a mistura com cal, verificou-se a tendência para uma aproximação aos solos arenosos. Assim, e de acordo com a classificação unificada, o solo S1 passou de “CL - argila magra arenosa” para “SW - Areia Bem Graduada” (Tabela 1). Quanto ao solo S2, passou de “SC - areia argilosa” a “SP - Areia Mal Graduada”.

**Tabela 1** – Alterações à classificação dos solos originais.

CLASSIFICAÇÃO	SOLO		MISTURA	
	S1C0	S2C0	S1C2	S2C2
UNIFICADA (ASTM-D2487/85)	CL - ARGILA MAGRA ARENOSA	SC - AREIA ARGILOSA	SW - AREIA BEM GRADUADA	SP - AREIA MAL GRADUADA
RODOVIÁRIA (E240-1970)	A - 6 (9)	A - 2 - 6 (1)	A - 2 - 7 (0)	A - 2 - 4 (0)

Quanto à classificação rodoviária, verifica-se que o solo S1, inicialmente pertencente ao grupo A – 6 (9), pertence agora ao grupo A – 2 – 7 (0). O solo S2, que no estado natural foi classificado como pertencente ao grupo A – 2 – 6 (1), pertence agora ao grupo A – 2 – 4 (0). Notar que em ambos os casos houve uma melhoria da qualidade do material no que respeita ao seu comportamento quando utilizado em pavimentos rodoviários.

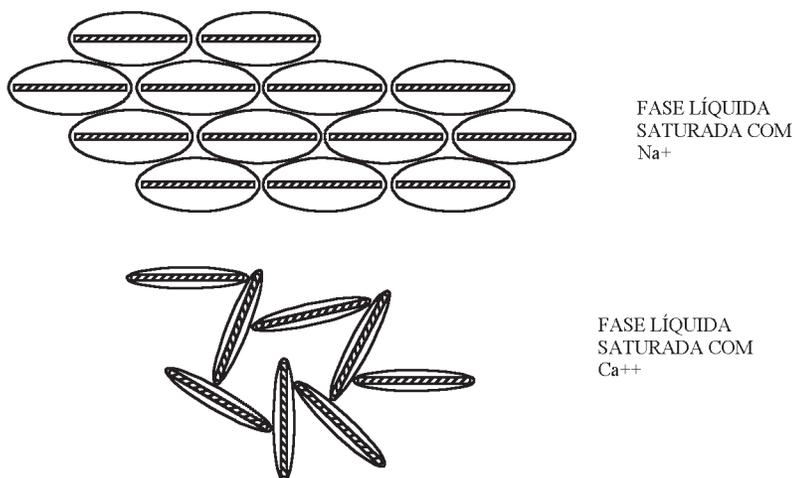
Em relação aos teores em água óptimos de compactação, verifica-se uma subida do teor óptimo (Figura 4) em 1,8% e 1,7% para os solos S1 e S2. Já os valores da baridade seca máxima mantêm-se praticamente constantes. Em relação à compressibilidade, e de acordo com vários autores, a adição de cal altera o comportamento do solo de tal forma que, após o carregamento, muito do assentamento ocorre imediatamente. Este comportamento, comum a vários tipos de solo, deve-se ao facto de o solo se tornar mais granular, possibilitando assim uma mais rápida dissipação das pressões neutras.



**Fig. 4** – Evolução do teor em água óptimo e do peso específico seco na compactação pesada.

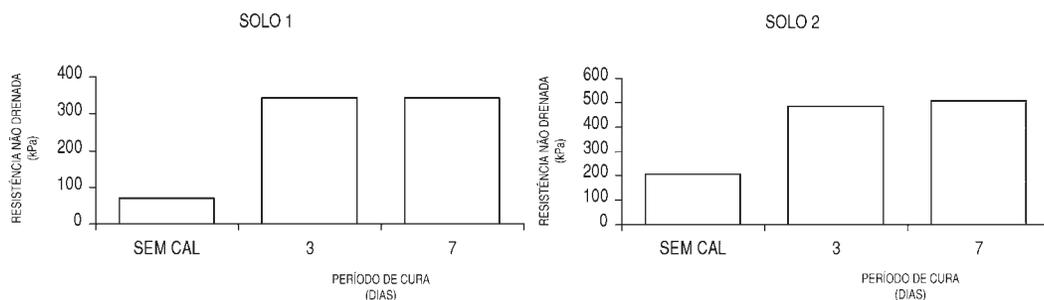
No que respeita aos ganhos de resistência imediatos, deve ser notado que as primeiras reacções, de troca iónica e floculação, ocorrem tão rapidamente quanto são intimamente misturados o solo e a cal. Assim, e de acordo com a Figura 5, verifica-se que antes da adição da cal a estrutura ordenada das plaquetas de argila, rodeadas pelas consecutivas películas de água adsorvida, proporciona uma reduzida resistência ao corte. Pelo contrário, numa estrutura floculada, o somatório dos vários contactos do tipo borda-face resulta num aumento da referida resistência.

A resistência das misturas com 2% de cal foi determinada através de ensaios triaxiais não consolidados, não drenados, com tensões de confinamento de 50, 100 e 200 kPa, efectuados sobre provetes moldados no teor em água óptimo. O aumento da resistência não drenada ( $C_u$ ) registado aos 3 dias de cura (Figura 6) deve-se em parte à floculação das partículas mas também, e sobretudo, ao desenvolvimento de reacções pozolánicas entre a argila e a cal. Verifica-se contudo que este



**Fig. 5** – Efeito do cálcio na estrutura das partículas de argila.

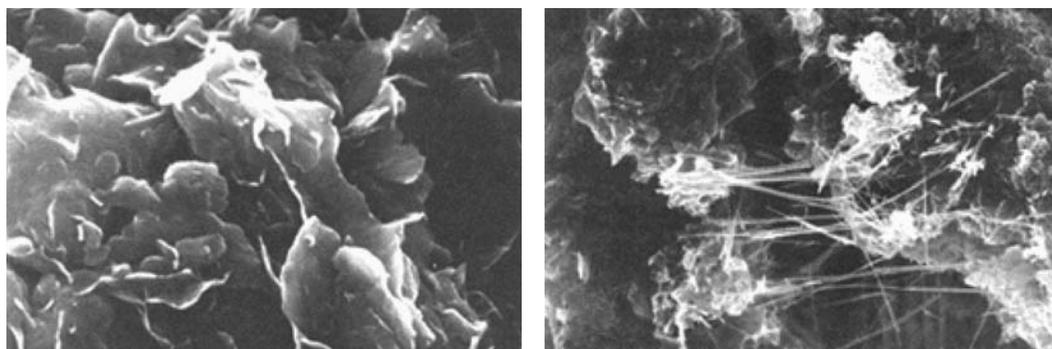
aumento não tem continuidade do terceiro ao sétimo dia, o que é explicado pelo facto de a cal se ter esgotado, visto que grande parte foi utilizada nas reacções de permuta catiónica que conduzem à flocculação. No entanto, a pouca cal ainda disponível para as reacções pozolânicas produziu aumentos significativos de 395 e 140% na resistência não drenada dos solos S1 e S2, relativamente aos valores obtidos antes da mistura.



**Fig. 6** – Evolução da resistência não drenada a partir do valor inicial (sem adição de cal).

#### 4 – ESTABILIZAÇÃO DOS SOLOS ESTUDADOS – ANÁLISE DOS RESULTADOS

Quando a cal é adicionada a um solo, ocorrem basicamente três processos consecutivos: troca de catiões entre a micela (zona em torno de uma partícula de argila em que os iões se encontram afectos à referida partícula) e a zona intermicelar; flocculação da argila devido ao aumento da carga eléctrica provocado pela troca catiónica; e desenvolvimento de reacções pozolânicas responsáveis pelo aparecimento dos produtos cimentícios (Figura 7). Um outro processo vai ainda ocorrendo ao longo das fases anteriormente descritas: trata-se da carbonatação. A carbonatação consiste na reacção do cálcio com o dióxido de carbono, do que resulta carbonato de cálcio. Trata-se pois da



**Fig. 7** – Desenvolvimento de ligações pozolânicas.

reação inversa à verificada na formação da cal, sendo que qualquer carbonatação que ocorra antes da reação com o solo reduz a quantidade de cal disponível.

Serão agora estudadas as alterações aos solos originais provocadas durante a fase de desenvolvimento dos materiais cimentícios, e cujo conjunto é denominado por “estabilização”. Este processo pode ser resumido desta forma: a adição de cal produz um aumento do pH relativamente ao solo original, que por sua vez facilita a dissolução da sílica e alumina presentes nos minerais argilosos e a sua consequente combinação com o cálcio, formando silicato hidratado de cálcio e aluminato hidratado de cálcio, que vão cimentar as partículas. Conforme foi já referido, as referidas reações ocorrem enquanto:

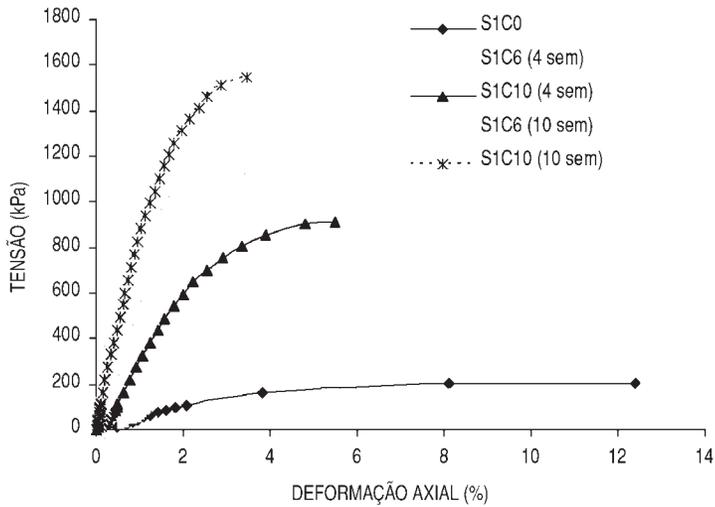
- a sílica e a alumina das partículas de solo estiverem disponíveis.
- o cálcio fornecido pela cal for suficiente.
- estiver disponível a quantidade de água necessária.

#### **4.1 – Deformação axial das misturas solo-cal**

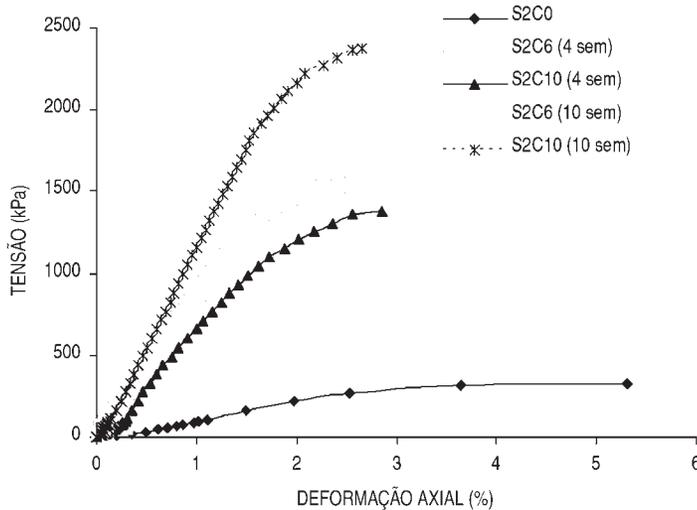
À medida que a mistura vai curando a resistência aumenta, sendo a deformação na rotura cada vez mais reduzida. A vantagem da estabilização de um solo com cal pode, em muitos casos, ser determinada e quantificada através do módulo de deformabilidade.

Segundo Little (1995), um solo normalmente consolidado comporta-se, após a adição de cal, como um solo sobreconsolidado, ou seja, sofrendo apenas pequenas variações de volume para tensões inferiores à tensão de pré-consolidação. Além disso, e de acordo com o mesmo autor, o próprio valor da tensão de pré-consolidação aumenta com a cal, verificando-se ainda um aumento do coeficiente de consolidação e uma diminuição do índice de compressibilidade. Já no que respeita ao coeficiente de Poisson, e de acordo com Neves (1993), a adição de cal provoca geralmente uma diminuição do seu valor.

No caso das misturas sem cal (C0) a rotura é típica de um material dúctil, ou seja, apresentando um valor de pico pouco pronunciado. Já nas misturas com 6 e 10% de cal (C6 e C10) pode observar-se que a ductilidade é inversamente proporcional ao tempo de cura e ao teor em cal, como se pode concluir através da comparação das curvas tensão-deformação após 4 e 10 semanas de cura (Figuras 8 e 9).



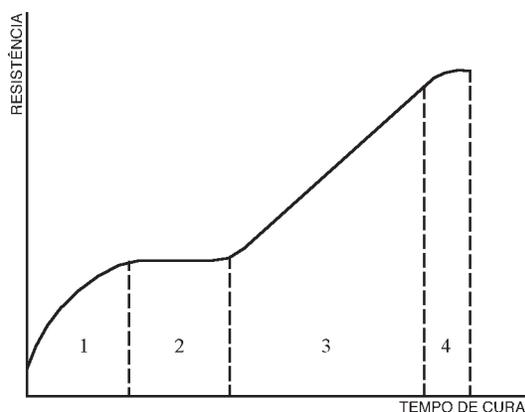
**Fig. 8** – Evolução da relação tensão-deformação no solo S1 obtida em ensaios à compressão simples.



**Fig. 9** – Evolução da relação tensão-deformação no solo S2 obtida em ensaios à compressão simples.

#### 4.2 – Evolução da resistência com o tempo de cura

A resistência da mistura depende de factores como a mineralogia, tipo e quantidade de cal adicionada, tempo e temperatura de cura, teor em água e grau de compactação inicial. As reacções iniciais que conduzem à floculação das partículas permitem, através da compactação, aumentar o peso volúmico da mistura o que, por sua vez, implica uma maior resistência inicial. Contudo, deve ser notado que as referidas reacções podem reduzir o valor da coesão enquanto aumentam o ângulo de atrito interno embora, com o prolongar do período de cura e o conseqüente desenvolvimento dos materiais pozolânicos, se verifique novamente uma subida do parâmetro coesão. No que respeita à duração de cada uma das fases a seguir descritas, verifica-se que esta é também dependente da quantidade de cal adicionada, conforme se constata ao comparar a evolução da resistência após a mistura com 2% de cal (Figura 6) e com 6 e 10% (Figura 11). O modelo proposto de evolução da resistência de uma mistura solo-cal está representado na Figura 10 (Cristelo e Jalali, 2002).



**Fig. 10** – Evolução da resistência à compressão simples de uma mistura solo-cal.

Na fase 1 regista-se um aumento da resistência devido à já analisada troca iónica e consequente floculação dos constituintes do solo. A fracção argilosa assume assim o comportamento típico de um solo mais granular. Este processo, embora seja também responsável por um acréscimo da resistência devido ao aumento do ângulo de atrito, não está directamente relacionado com os ganhos mais significativos a longo prazo.

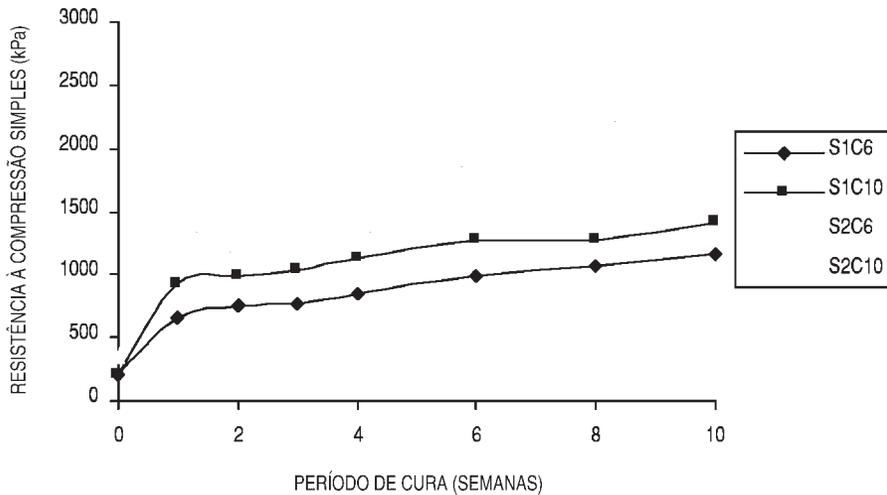
O intervalo 2 é designado por período de indução. É nesta fase que se inicia a formação dos núcleos de silicato de cálcio hidratado nos pontos de contacto entre as partículas de argila. Estes núcleos, uma vez instalados, iniciam o processo de dissolução dos constituintes minerais da argila. Nesta fase, cuja duração é variável de acordo com o tipo de solo e a quantidade de cal adicionada, o aumento da resistência é praticamente nulo. Isto porque enquanto a quantidade de núcleos já estabelecidos não for significativa, as ligações entretanto desenvolvidas não são suficientes para tornar perceptível um aumento de resistência.

A fase 3 corresponde ao aumento de volume dos núcleos, quer através da referida dissolução da sílica e alumina presente nos minerais argilosos, quer através da aglomeração, a partir da cal que ainda se encontra livre na mistura, de mais partículas de cálcio. É este processo que conduz à formação dos materiais cimentícios responsáveis pelos ganhos de resistência e durabilidade mais importantes.

O aumento de resistência cessa (fase 4) quando o volume dos núcleos já é tal que não permite a sua expansão, ou quando a cal disponível já não é suficiente para que mais cálcio continue a ser adicionado aos núcleos. A partir do momento em que os núcleos entram em contacto, acaba o seu crescimento.

Relativamente à resistência das misturas S1C6 (6% de cal) e S1C10 (10% de cal), moldadas no teor em água óptimo, verifica-se uma primeira fase de rápido crescimento (Figura 11), em que a mistura S1C10 atinge uma resistência (930 kPa) 40% superior à da mistura S1C6 (665 kPa). Esta diferença resulta do facto de a maior quantidade de cal disponível na mistura S1C10 permitir o estabelecimento de um número superior de núcleos de material cimentício nos pontos de contacto entre partículas. Verifica-se em seguida um período de alguma estabilidade, correspondente ao referido “período de indução”.

Quando a dissolução da sílica e alumina das partículas argilosas é já significativa, reinicia-se o aumento de resistência, que atinge os 460 e 580% relativamente à resistência inicial do solo 1 (1159 e 1412 kPa). Verifica-se assim uma diferença de 22% entre a resistência das duas misturas, após 10 semanas de cura. A evolução da resistência das duas misturas é muito semelhante, sendo



**Fig. 11** – Evolução da resistência à compressão simples das misturas com 6 e 10% de cal.

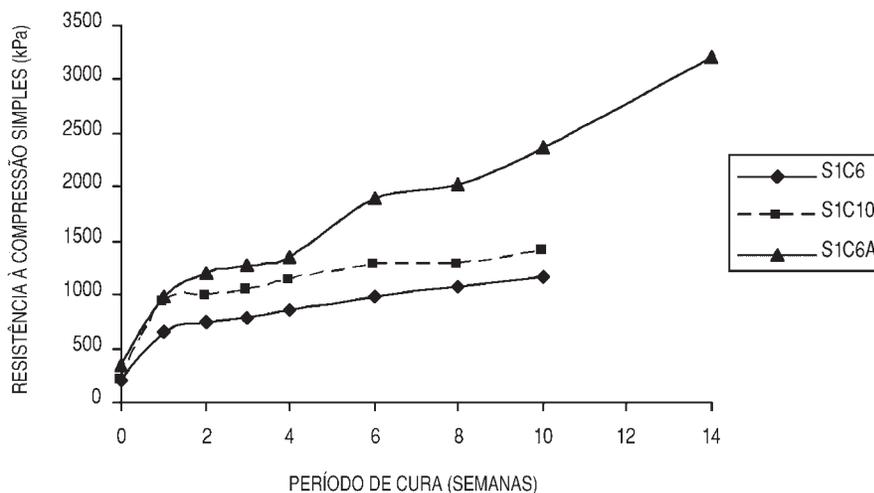
porém provável que, com o aumento do tempo de cura, se venha a verificar que o abrandamento dos ganhos de resistência se inicie mais cedo na mistura S1C6.

No que respeita às misturas com o solo 2 (S2C6 e S2C10) registou-se, após 10 semanas de cura, um aumento de 345 e 615% relativamente à resistência inicial. Assim, a resistência de 353 kPa do solo original foi aumentada para 1575 kPa (solo S2C6) e 2530 kPa (solo S2C10). A diferença de 60% na resistência das duas misturas foi obtida com apenas mais 4% de cal (Figura 11) e é substancialmente superior à verificada para as misturas do solo S1 (22%). Tal resulta do facto do solo S2 possuir uma maior densidade de material granular, exigindo assim menos material cimentício para interligar as suas partículas. Ou seja, se as partículas a aglutinar se encontram mais próximas, requerem menos gel cimentício.

#### 4.3 – Evolução da resistência com a inclusão de cloreto de sódio

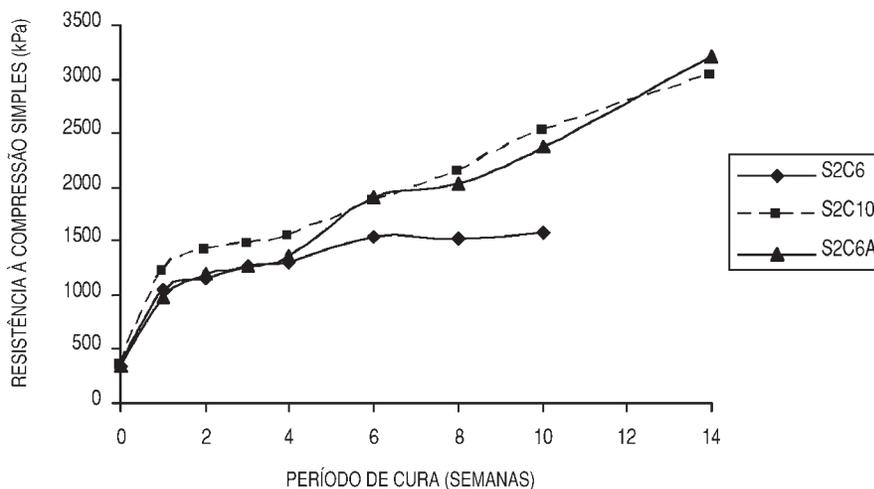
Segundo Bergado *et al* (1994), a adição de sal (NaCl) à mistura solo-cal pode funcionar como um catalisador, enquanto os iões  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{+2}$  aceleram a reacção pozolânica. Assim, com o intuito de conhecer a influência deste aditivo na estabilização de solos residuais graníticos, ensaiaram-se misturas de solo, cal e cloreto de sódio, designadas por S1C6A e S2C6A. Os resultados da evolução da resistência à compressão simples estão indicados na Figura 12. De referir as eventuais dificuldades relacionadas com a utilização deste tipo de aditivos, nomeadamente no que respeita à corrosão dos equipamentos metálicos usados na fase de execução das misturas. O carácter altamente cáustico da solução ( $\text{H}_2\text{O} + \text{NaCl}$ ) pode assim obrigar à substituição destes elementos por outros não metálicos.

É perceptível que a diferença inicialmente registada entre a resistência à compressão simples das misturas S1C6A e S1C10 foi progressivamente anulada com o tempo de cura, sendo que após 8 semanas a resistência da mistura S1C6A é já significativamente superior (23%) à da mistura S1C10. A diferença entre os valores da resistência das misturas S1C6 e S1C6A é também elucidativa das vantagens deste aditivo, visto que a taxa de crescimento da mistura S1C6A é muito superior à da mistura S1C6. Após 10 semanas, a resistência S1C6A é 42% superior à resistência S1C6.



**Fig. 12** – Evolução da resistência à compressão simples das misturas S1C6, S1C10 e S1C6A.

No caso do solo S2 (Figura 13), e ao contrário do que se verifica no solo S1, é notória a semelhança nos valores respeitantes às misturas S2C6A e S2C10. Isto significa que, no que diz respeito à resistência à compressão simples, adicionar 10% de cal ao solo S2 é equivalente a adicionar 6% de cal e 0,12% de cloreto de sódio. No que diz respeito à diferença entre a resistência dos provetes S2C6 e S2C6A, verifica-se que também neste caso, e à semelhança do solo S1, a taxa de crescimento da mistura com NaCl é superior à registada na mistura S2C6, atingindo os 51% ao fim de 10 semanas.



**Fig. 13** – Evolução da resistência das misturas S2C6, S2C10 e S2C6A.

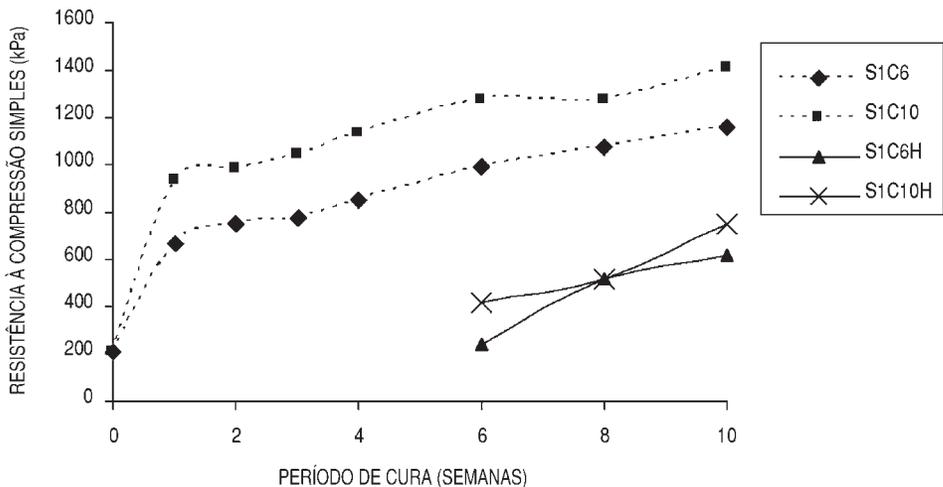
#### 4.4 – Análise da durabilidade das misturas

Tendo em vista o estudo do efeito da água na durabilidade (outro importante aspecto relacionado com a durabilidade tem a ver com os ciclos de gelo-degelo, que neste trabalho não foi considerado), foram efectuados ensaios à compressão simples em amostras próximas da saturação (segundo Little, 1995, o grau de saturação máximo possível de obter nas misturas solo-cal ronda os 90 a 95%). É de notar que a própria imersão dos solos originais resultou em provetes sem qualquer

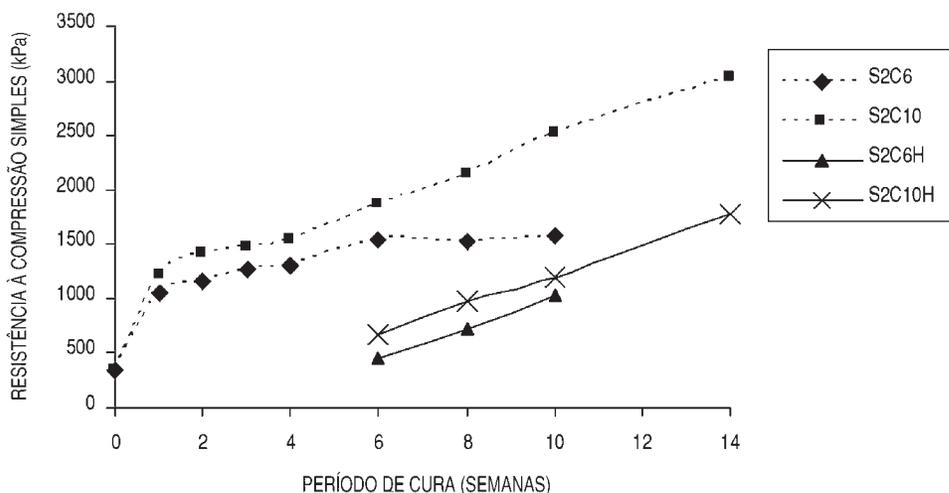
rigidez, o que traduz uma total susceptibilidade à água por parte destes solos, antes da adição de cal. As amostras submetidas a um período de imersão em água prévio de 48 horas foram denominadas por S1C6H e S1C10H, para o solo 1, e por S2C6H e S2C10H no caso do solo 2.

Relativamente ao solo S1, e analisando os resultados obtidos nos referidos ensaios (Figura 14), constata-se que a perda relativamente aos valores obtidos para as misturas não saturadas é tanto menor, em termos percentuais, quanto maior o período de cura da amostra saturada.

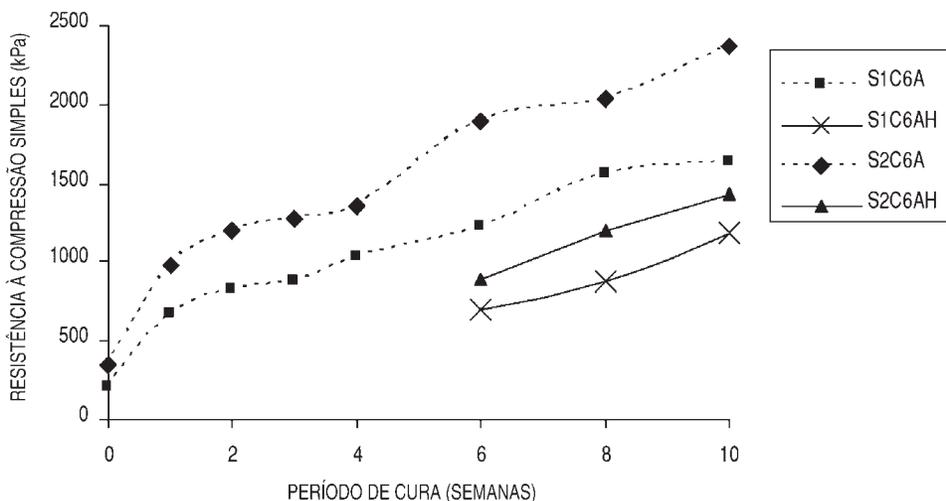
No que respeita ao solo 2 (Figura 15), verifica-se que a evolução da resistência da mistura S2C10, saturada e não saturada, é semelhante. Visto que a perda inicial verificada nas amostras saturadas relativamente às amostras não saturadas não aumenta com o tempo, pode concluir-se que a diferença inicial se deve apenas à eliminação do potencial de sucção dos interstícios do solo. Esta perda ocorre porque o material cimentício desenvolvido durante o período de 6 semanas ainda não é suficiente para impedir a entrada de água nos vazios, sendo previsível que, caso o contacto da mistura com a água ocorra após um período de cura significativamente longo, a perda de resistência seja desprezável.



**Fig. 14** – Resistência das misturas saturadas e não saturadas do solo S1.



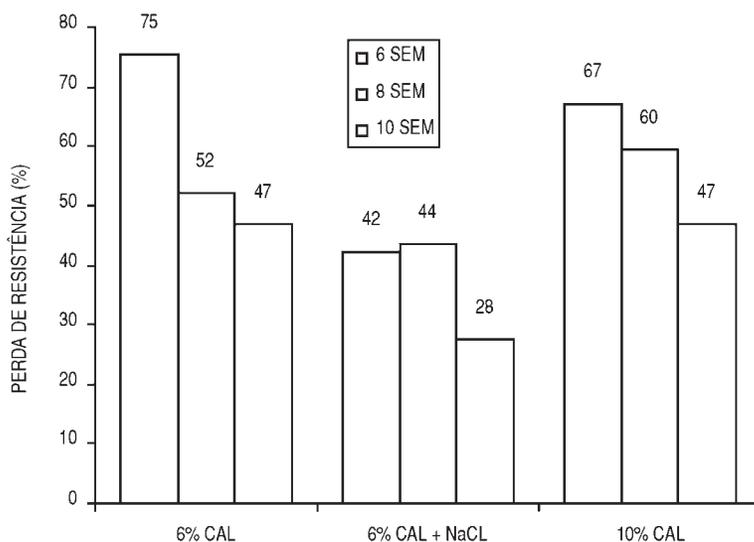
**Fig. 15** – Resistência das misturas saturadas e não saturadas do solo S2.



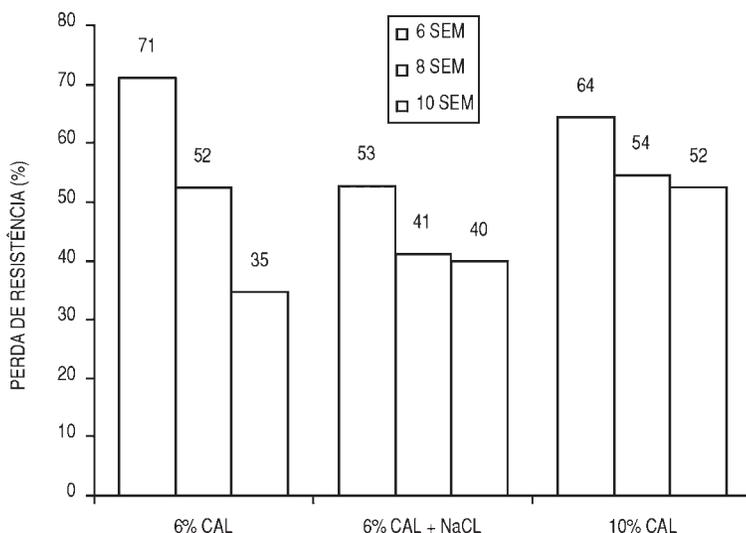
**Fig. 16** – Resistência das misturas saturadas (S1C6AH e S2C6AH) e não saturadas (S1C6A e S2C6A).

Foram ainda ensaiadas misturas com NaCl saturadas, designadas por S1C6AH e S2C6AH, tendo-se novamente constatado, à semelhança do que tinha ocorrido nas misturas sem cloreto de sódio, que a diferença entre a resistência da mistura preparada no seu teor óptimo e a resistência da mistura saturada mantém-se praticamente constante (Figura 16), após a perda inicial devido à eliminação da sucção.

As Figuras 17 e 18 permitem perceber a forma como evoluíram as perdas de resistência devido à saturação das misturas, ao indicarem a razão entre a diferença das resistências saturadas e não saturadas e a resistência não saturada. Verifica-se que as perdas tendem a diminuir com o período de cura. De destacar a reduzida diminuição da resistência da mistura S1C6A, quando comparada com a diminuição registada nas restantes misturas.



**Fig. 17** – Perda de resistência por saturação em percentagem da resistência não saturada (solo S1).



**Fig. 18** – Perda de resistência por saturação em percentagem da resistência não saturada (solo S2).

Esta redução progressiva das perdas relativamente à resistência obtida com os provetes não saturados, era já esperada, visto que a redução do potencial de sucção é, em princípio, idêntica para os períodos de cura de 6, 8 e 10 semanas, enquanto que a referida resistência dos provetes não saturados vai aumentando com o tempo. As perdas registadas em ambos os solos, e para os diferentes teores em cal, são superiores aos valores indicados em Little (1995) em solos do Estado do Illinois, que registou relações entre 0,7 e 0,85 entre as resistências à compressão simples saturadas e não saturadas.

## 5 – CONCLUSÕES

Os principais efeitos da cal sobre os solos foram divididos em dois grupos: **melhoramento e estabilização**. Esta classificação faz sentido visto que, no primeiro caso, se incluem os efeitos sobre a trabalhabilidade e sensibilidade do solo à água (plasticidade, granulometria, compactação), obtidos com recurso à inclusão de pequenas percentagens de cal (1 a 3%), enquanto que o segundo termo engloba os efeitos sobre as características mais relevantes a longo prazo (resistência mecânica, durabilidade, permeabilidade), e que só são atingidos com a adição de teores em cal mais elevados (5 a 10%).

No que respeita ao **melhoramento**, as alterações registadas para um teor em cal de 2%, indicam uma diminuição da plasticidade, um melhoramento das características de compactação, a alteração da granulometria através da diminuição da percentagem de finos e o aumento imediato da resistência mesmo sem a formação de material cimentício em quantidades significativas.

Relativamente ao processo de **estabilização**, verificou-se que a resistência à compressão simples das misturas aumentou com o período de cura e com o teor em cal da mistura. O solo S2, com uma matriz arenosa mais densa, atingiu valores de resistência máxima mais elevados do que aqueles atingidos pelo solo S1. Ou seja, uma estrutura granular mais compacta necessita de menos material cimentício para intensificar as ligações entre partículas. Também o parâmetro durabilidade foi significativamente melhorado, visto que a diferença entre a resistência das misturas saturadas e não saturadas manteve-se aproximadamente constante no tempo, o que permite concluir que as perdas se ficaram a dever à eliminação do potencial de sucção.

De destacar ainda as vantagens da adição de cloreto de sódio, que conduziu não só a aumentos significativos na resistência, mas também à diminuição da susceptibilidade à água, ao acelerar o desenvolvimento do material cimentício. É mais rentável a inclusão de pequenas quantidades deste aditivo do que o aumento do teor em cal.

De acordo com os resultados obtidos, a estabilização através da adição de cal de solos em que o mineral argiloso predominante é a caulinite constitui uma alternativa exequível e vantajosa em muitas situações. Sendo assim, a possibilidade de estabilizar este tipo de solos pode e deve ser encarada com maior frequência, resultando em projectos com melhor desempenho em termos de capacidade de carga e durabilidade, e com menores custos ambientais devido à preservação dos recursos naturais não renováveis.

## 6 – AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Laboratório de Materiais e Solos da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro e ao Laboratório de Engenharia Civil da Universidade do Minho.

## 7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO M145-82. Specifications for Highway Materials. American Association of State Highway and Transportation Officials, 1986.
- AIPCR (1990). Le Traitement en Place des Sols a la Chaux et aux Liants Hydrauliques et Pouzzolaniques. Comité Technique n° 12.
- ASTM D2487-85. Standard Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). ASTM International, 1985.
- ASTM D632-66. Standard Specification for Sodium Chloride. Standards, Part 10. ASTM International, 1966.
- Barker J.E. (2002). Fundamental Studies of Lime Migration. PHD Thesis. University of Birmingham.
- Bergado, D.; Chai, J.; Alfaro, M., Balasubramaniam, A. (1994). Improvement Techniques of Soft Ground in Subsiding and Lowland Environment. A.A Balkema Publishers, BrookField.
- Boardman, D. (1999). Lime Stabilisation: Clay-Metal-Lime Interactions. PHD Thesis. Loughborough University.
- Cristelo, N. (2001). Estabilização de Solos Residuais Graníticos Através da Adição de Cal. Dissertação de Mestrado. Universidade do Minho. Guimarães.
- Cristelo, N.; Jalali, S. (2002). Avaliação do Melhoramento e Estabilização de Solos Graníticos com Cal e um Activador Químico. VIII Congresso Nacional de Geotecnia. LNEC. Lisboa.
- Little, D.N. (1995). Handbook for stabilization of pavement subgrades and base courses with lime. National Lime Association, Kendall/Hunt Publishing Company.
- Mendonça, A.; Lima, D.; Bueno, B.; Fontes, M. (2000). Resultados de Ensaio Triaxiais de Misturas Solo-Cal. VII Congresso Nacional de Geotecnia, Vol I, 523-530. Porto.
- Neves, J.M.C. (1993). Estabilização de Solos com Cal – Estudo e Aplicações Rodoviárias. Dissertação de Mestrado. Universidade Nova de Lisboa. Lisboa.
- NF P 98-101 (1991). Assises de Chaussées – Chaux Aérienne Calcique pour Sols et Routes – Spécifications. Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes.
- Ozkan, S.; Gale, R.; Seals, R. (1998). Chemical Stabilization of Kaolinite by Electrochemical Injection. Soil Improvement for Big Digs, Geotechnical Special Publication Number 81. ASCE.
- SETRA-LCPC (1972). Recommendation pour le Traitement en Place des Sols Fins à la Chaux. Paris.