

# MELHORAMENTO DO DESEMPENHO DE MISTURAS DE SOLO-CIMENTO COM RECURSO A ACTIVADORES DE BAIXO CUSTO

Improvement of soils stabilized with cement performance using low cost activators

Maria de Lurdes Cruz\*

Said Jalali\*\*

**RESUMO** – Este artigo apresenta os resultados de um trabalho de investigação realizado para avaliar os efeitos da utilização de cimento nos solos residuais graníticos, sob o ponto de vista da capacidade de carga e da durabilidade. Registaram-se as resistências à compressão simples e à tracção por compressão diametral, para avaliação das características mecânicas, enquanto que para a durabilidade, foi avaliada a absorção de água por capilaridade e a perda da resistência à compressão por saturação e devido a ciclos de molhagem-secagem e de gelo-degelo. Para melhorar o desempenho das misturas de solo-cimento foram estudados os efeitos da utilização de activadores de baixo custo em pequenas percentagens. Os resultados demonstram que a utilização do cimento melhora o desempenho mecânico e a durabilidade dos solos residuais graníticos. Mais ainda, foi observado que alguns dos activadores estudados melhoram significativamente o desempenho mecânico das misturas, tornando-se uma vantajosa alternativa ao aumento do teor em cimento.

**SYNOPSIS** – This research work deals with estimating the beneficial effect of using Portland cement for stabilizing residual granitic soils. The mechanical behaviour of stabilized soils was evaluated through compressive strength tests and indirect tensile test using Brazilian method. The durability performance was evaluated by capillary water absorption, loss of compressive strength due to saturation, wet-dry and freeze-thaw cycles. Furthermore, low cost activators were used in small quantities in order to enhance the durability and mechanical performance of the mixtures. Results obtained indicate that, as expected, Portland cement is effective in increasing the durability and mechanical performance of residual granitic soils. Furthermore, it was observed that some activators enhance significantly the mechanical performance of soil-cement mixtures, being a worthwhile alternative to the increase of the cement content.

**PALAVRAS CHAVE** – Solo-cimento, activadores, características mecânicas, durabilidade.

## 1 – INTRODUÇÃO

Quando os solos naturais não possuem os requisitos necessários para cumprir adequadamente a função a que estão destinados, quer quando utilizados no seu estado natural, em fundações ou escavações, quer quando utilizados como material de construção, uma das soluções possíveis é a alteração das suas características de maneira a melhorar o seu comportamento, tornando-os capazes de responder de forma satisfatória às solicitações previstas. Esta alteração é o que se designa por estabilização de solos.

Os métodos existentes para a estabilização de solos podem ser divididos em três grupos, de acordo com os meios que são utilizados, sendo que cada grupo inclui várias alternativas (Figura 1).

---

\* Mestre em Engenharia Civil, Assistente do Instituto Politécnico de Bragança. E-mail: lurdes@ipb.pt

\*\* Doutor em Engenharia Civil, Professor Catedrático Aposentado da Universidade do Minho.

E-mail: said@civil.uminho.pt

A estabilização mecânica procura melhorar as características dos solos através duma melhor arrumação das suas partículas sólidas e/ou recorrendo a correcções da sua composição granulométrica. Na estabilização física as propriedades dos solos são alteradas através do uso do calor ou da aplicação de um potencial eléctrico, enquanto que na estabilização química as características dos solos são modificadas através da mistura com outros materiais.

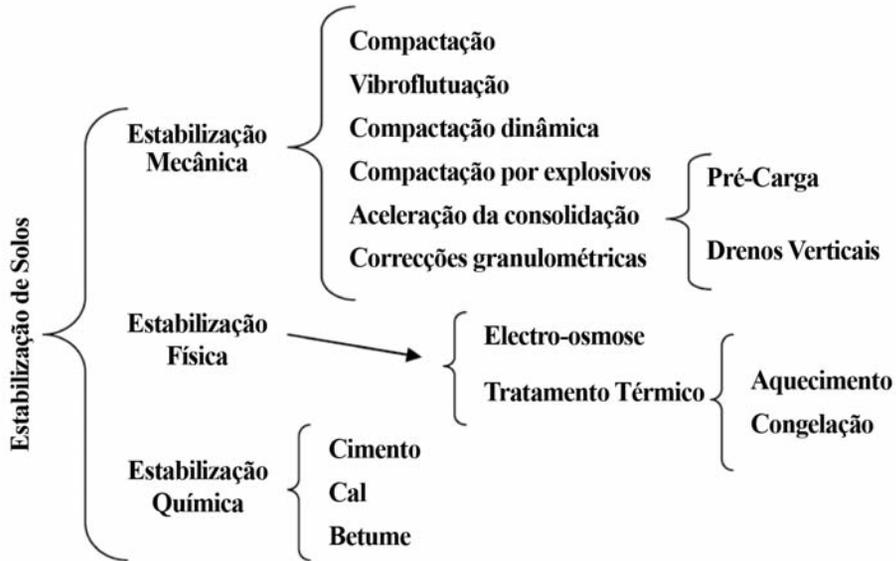


Fig. 1 – Métodos de estabilização de solos - diagrama esquemático.

Sendo os solos o mais antigo material de engenharia existem indícios para supor que esta necessidade de proceder à sua estabilização já remonta a tempos antigos. No entanto, o grande impulso verificou-se no período pós 2ª Guerra Mundial, na tentativa de dar resposta à necessidade de construção de pavimentos rodoviários. Mas, o florescimento da indústria automóvel, com a sua consequente evolução, aumento progressivo dos volumes de tráfego e das cargas por eixo dos veículos, conduziu à ruína antecipada de muitos desses pavimentos, pelo que houve necessidade de utilizar soluções mais resistentes à custa de bases tratadas com aglutinantes hidráulicos ou betuminosos e de camadas de desgaste mais espessas e de melhor qualidade (Branco, 1988).

Esta estabilização rodoviária visa sobretudo a melhoria das propriedades mecânicas dos solos e a manutenção das suas características ao longo do tempo, isto é, o aumento da sua durabilidade, o que é conseguido através da diminuição da sua susceptibilidade às variações do teor em água. De salientar que é na construção de vias de comunicação que os solos estão submetidos a condições mais severas, uma vez que estão sujeitos a cargas variáveis conduzindo à fadiga, bem como a variações de humidade que vão da quase completa secura à saturação (Nascimento, 1970).

A estabilização visa possibilitar o emprego de solos locais na construção de pavimentos rodoviários, que devido à sua baixa qualidade não poderiam ser utilizados isoladamente, dado que não se adequariam ao exigido pelas especificações para a construção de bases e sub-bases. Além deste facto, o uso de solos estabilizados em vez dos agregados naturais, cada vez mais escassos, pode ter consideráveis vantagens ambientais e económicas (Sherwood, 1993). Como tal, e uma vez que são as soluções de baixo custo ambiental e económico as mais procuradas pelos sectores públicos e privados para a construção de vias de comunicação, esta possibilidade de estabilização continua a ser promissora.

Sob o ponto de vista ambiental, económico e de segurança, podem referir-se os seguintes benefícios (Sherwood,1993):

- minimização da perda de material ocasionada pela erosão ou pelo tráfego, nas estradas de terra;
- redução dos custos de compra, transporte e distribuição de agregados;
- redução dos materiais superficiais soltos ocasionadores de acidentes (problemas de visibilidade e derrapagens);
- minimização da agressão ambiental causada pela instalação de pedreiras e britagem;
- redução do uso de combustível associado às frequentes manutenções rodoviárias;
- resguardo das jazidas de bons materiais para usos mais nobres.

A estabilização química, apresenta-se como sendo a melhor alternativa para proceder à estabilização de solos para fins rodoviários, mediante a mistura de materiais adicionados aos solos designados por agentes estabilizadores. Os materiais mais utilizados como agentes estabilizadores são a cal, o cimento e o betume.

Os agentes estabilizadores podem ter maior ou menor eficiência, consoante o tipo de solo em causa, dada a sua enorme variedade, quer a nível físico, quer a nível químico. A Figura 2 esquematiza quais os agentes mais indicados, mediante os resultados dos ensaios de análise granulométrica e dos limites de Atterberg.

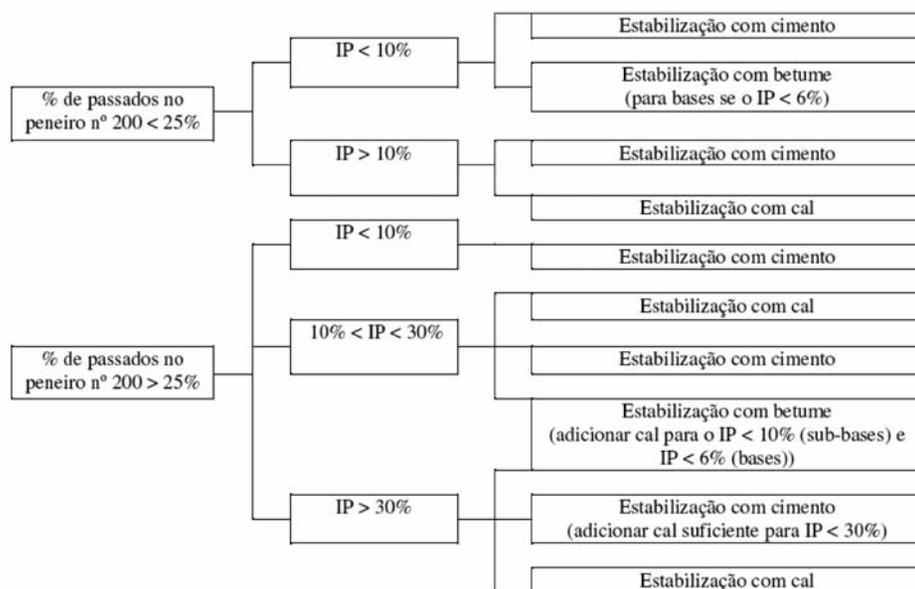


Fig. 2 – Escolha do agente estabilizador em função do tipo de solo (Little, 1995).

Verifica-se que a estabilização química com cal ou betume tem um campo de aplicação mais limitado, enquanto que a estabilização de solos com cimento é adequada para a maioria dos solos. Assim, a estabilização de solos com cimento constitui uma das mais generalizadas para melhorar o comportamento dos solos, dada a sua elevada disponibilidade e adequabilidade a uma maior variedade de solos.

A estabilização de um solo por adição de cimento consiste na preparação de uma mistura homogénea de solo pulverizado, cimento e água, em proporções determinadas, em que a acção

estabilizante do cimento pode ocorrer segundo dois mecanismos distintos, consoante o teor que é adicionado ao solo (Pereira, 1970).

O mecanismo que permite o aumento da resistência mecânica é devido à acção aglutinante do cimento, que cimenta as partículas de solo. Este efeito verifica-se quando os teores em cimento são mais elevados, em que o cimento forma núcleos interligados distribuídos pela massa de solo. Para teores em cimento mais baixos, verifica-se fundamentalmente uma modificação da fracção argilosa do solo, que diminui a sua plasticidade, podendo ser ou não acompanhada de aumento da resistência mecânica, uma vez que o cimento, nestes casos, promove a floculação das partículas de argila.

Mediante estes dois tipos de acções, podem ser distinguidos três tipos de misturas de solo com cimento, que têm geralmente utilizações distintas. O tipo de mistura aqui estudado é a designada por solo-cimento ou solo-cimento compactado, em que a quantidade de cimento é suficiente para conduzir ao seu endurecimento, devendo ser preparada com o teor em água necessário a uma compactação adequada e à hidratação do cimento. São misturas utilizadas na construção de camadas de base e de sub-base de pavimentos de estradas e aeródromos, de pavimentos de pistas ou estradas de pequeno tráfego, de faixas para aterragens de emergência, de núcleos de barragens de terra (Pereira, 1970) e ainda para blocos de terra compactados utilizados para construções em terra.

## **2 – OBJECTIVOS E METODOLOGIA**

O presente estudo foi motivado pela necessidade da utilização eficiente do cimento Portland cujo fabrico comporta produção de gases com efeito de estufa. Sabe-se que a produção de uma tonelada de clínquer liberta uma tonelada de CO<sub>2</sub> para a atmosfera. Mais ainda, o seu custo é significativo no processo de estabilização de solos. Portanto, a utilização eficiente do cimento torna-se um imperativo ambiental e económico.

Assim, um dos objectivos principais deste estudo foi a procura de activadores químicos de baixo custo que possam aumentar as reacções de partículas de solo com os produtos da hidratação do cimento. A eficácia destas reacções é avaliada em termos da sua contribuição no desempenho mecânico e na durabilidade. Os mecanismos e a cinética das reacções com os activadores mais promissores serão objecto de um estudo posterior.

A metodologia seguida consistiu em avaliar, por um lado, a eficiência de estabilização com cimento e, por outro lado, a avaliação da eficácia dos activadores escolhidos em termos de melhorias atingidas no desempenho da mistura final. As fases de avaliação estudadas foram:

- Avaliação da possibilidade de estabilização de solos residuais graníticos com cimento, dado que estes solos podem ser encontrados em extensas áreas da zona norte do país e não há muitos dados sobre a utilização do cimento neste tipo de solos;
- Avaliação da possibilidade de melhorar o desempenho do solo-cimento com recurso a reduzidas percentagens de activadores de baixo custo.

## **3 – MATERIAIS UTILIZADOS E PROCEDIMENTOS DE ENSAIOS REALIZADOS**

As características do solo podem conduzir ao sucesso ou insucesso do processo de estabilização com cimento, ou pelo menos influenciam os aspectos económicos. Sendo assim, revela-se importante escolher este processo de estabilização somente quando os solos forem adequados. Segundo a especificação do LNEC E243 (1971), a adequabilidade de um solo depende de duas propriedades físicas, a granulometria e os limites de consistência, e de propriedades químicas, tais como, a presença de matéria orgânica e a presença de sulfatos, além das condições gerais que estes solos devem possuir.

O solo utilizado obedece aos critérios referidos na especificação e foi fabricado em laboratório através da mistura de 70% de areia e 30% de caulino, o que permitiu obter um solo designado por Areia Argilosa (SC), segundo a classificação unificada proposta pela norma ASTM D2487-00 (2000) e um solo A-2-6 (1) segundo a classificação rodoviária AASHTO M145-82 (1986). Estes resultados estão assim de acordo com o que é normalmente obtido para os solos residuais graníticos.

O caulino usado foi fornecido pela Mibal, de Barqueiros, sendo um caulino branco ou levemente amarelo, moído e lavado com hidrociclone. Trata-se de um produto de alteração das rochas feldspáticas ricas em sílica e alumina, como por exemplo, os granitos, os gneisses, os pórfiros e os pegmatitos. Tem como componente essencial a caulinite, um dos minerais que aparecem em maior percentagem nas partículas de argila dos solos residuais graníticos, sendo este mineral que confere ao caulino as propriedades mais relevantes. Apesar de os solos residuais graníticos do norte contem silte na sua constituição, foi considerado para o presente trabalho, que a sua ausência não afectaria significativamente os resultados e o comportamento do solo.

O cimento utilizado foi o CEM II B-L 32.5 N, em percentagens de 6 e 10% da massa de solo seco. Foi utilizada água da rede pública que satisfaz a especificação do LNEC E304 (1974).

Os activadores seleccionados foram o bicarbonato de sódio, o cloreto de cálcio, o hidróxido de sódio e o Renolith, que é um produto recomendado para utilizar nas misturas de solo-cimento, tendo sido gentilmente cedido pela empresa que o fabrica e comercializa. As percentagens de activadores foram determinadas relativamente à massa de cimento.

A descrição das composições estudadas e as nomenclaturas adoptadas encontram-se no Quadro 1. Por exemplo, a composição S6Cbs2, refere-se a uma mistura de solo com 6% de cimento e bicarbonato de sódio como activador em 2% da massa de cimento.

**Quadro 1** – Composições analisadas.

Designação composição	Nomenclatura	% Cimento (massa solo seco)	% Activador (massa cimento)
Solo	S	0,0	0,0
Solo-cimento	S6C	6,0	0,0
Solo-cimento	S10C	10,0	0,0
Solo-cimento + bicarbonato sódio	S6Cbs2	6,0	2,0
Solo-cimento + cloreto cálcio	S6Ccc2	6,0	2,0
Solo-cimento + hidróxido sódio	S6Chs2	6,0	2,0
Solo-cimento + hidróxido sódio	S6Chs3	6,0	3,0
Solo-cimento + Renolith	S6Cr5	6,0	5,0

#### 4 – FABRICO E CURA DOS PROVETES

Foram realizados ensaios de compactação, segundo a especificação do LNEC E197 (1967), para o solo a estabilizar e segundo a especificação do LNEC E262 (1972) para as misturas de solo-cimento afim de determinar a baridade seca máxima e humidade óptima no fabrico dos provetes. Os provetes cilíndricos com 30 mm de diâmetro e 45 mm de altura, obedecem à relação altura/diâmetro de 1,5, foram preparados por compactação estática. Os provetes foram moldados com o teor em água óptimo e a baridade seca máxima determinada no ensaio de compactação pesada. Os provetes foram curados num ambiente com humidade relativa constante de 100% e temperatura de 21±2 °C.

## 5 – ENSAIOS REALIZADOS

### 5.1 – Características mecânicas

Foram realizados ensaios de compressão simples e tracção por compressão diametral para avaliar as características mecânicas dos provetes com diferentes idades.

#### 5.1.1 – *Compressão simples*

O ensaio de compressão simples permitiu determinar o endurecimento dos provetes com o tempo de cura. Foram executados ensaios aos 3, 7, 14, 28 e 56 dias de cura, sendo o resultado a média dos valores obtidos em 3 provetes. Este ensaio seguiu genericamente a especificação do LNEC E264 (1972).

#### 5.1.2 – *Tracção por compressão diametral*

O ensaio de tracção por compressão diametral permite determinar a resistência à tracção de provetes cilíndricos quando solicitados segundo a sua geratriz, tendo sido efectuado para um tempo de cura de 28 dias e em que o valor final do ensaio foi a média dos resultados obtidos para 3 provetes. O ensaio foi realizado segundo a norma ASTM C496-96 (1996). A resistência à tracção por compressão diametral é obtida por  $(2*F)/(\pi*l*d)$ , em que F é a força de rotura, l é o comprimento do provete e d é o seu diâmetro.

### 5.2 – Durabilidade

Atendendo a que a humidade tem um papel importante no desempenho dos solos estabilizados nas aplicações correntes, foram realizados os ensaios de absorção de água por capilaridade, compressão simples após a saturação, ciclos de molhagem-secagem e de gelo-degelo.

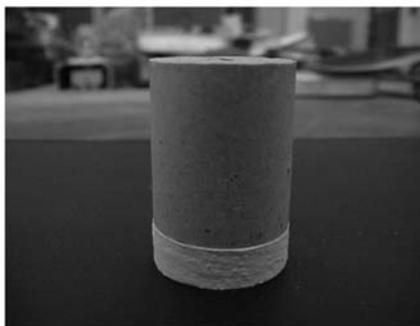
#### 5.2.1 – *Efeito da saturação na resistência à compressão simples*

Os provetes estiveram imersos em água durante as 24 horas anteriores ao ensaio. Foram executados ensaios para os 7, 14, 28, e 56 dias de cura, sendo o valor final do ensaio a média obtida em 3 provetes.

#### 5.2.2 – *Absorção de água por capilaridade*

O ensaio de absorção de água por capilaridade pretende avaliar a taxa de absorção do provete endurecido de solo-cimento quando em contacto com água. O resultado final do ensaio foi a média dos valores obtidos em 2 provetes com 28 dias de idade. Os provetes foram secos na estufa durante três dias e a parte inferior lateral dos mesmos foi impermeabilizada, para que a água fosse absorvida apenas pela sua base (Figura 3).

Seguiu-se genericamente a especificação do LNEC para os betões, E393 (1993) com as devidas adaptações para o caso em análise. Registou-se a massa dos provetes secos ( $M_0$ ) e colocaram-se em contacto com água, em que o nível desta não ultrapassava a parte impermeabilizada referida anteriormente. Foram determinadas as massas para períodos de tempo ( $M_i$ ) pré-estabelecidos. A absorção de água por capilaridade, para o tempo ( $t_i$ ), é dada por  $(M_i - M_0)/A$ , onde A é a área do provete em contacto com a água.



**Fig. 3** – Impermeabilização da zona inferior do provete.

### **5.2.3 – Molhagem-secagem**

No ensaio de molhagem-secagem os provetes, depois de um período de cura de 7 dias, foram imersos em água, durante 5 horas, sendo posteriormente colocados na estufa a 71°C durante 42 horas. A resistência à compressão dos provetes foi determinada após 12 ciclos de molhagem-secagem e o valor apresentado é a média dos resultados de 4 provetes. Este ensaio seguiu genericamente os procedimentos da especificação do LNEC E263 (1972).

### **5.2.4 – Gelo-degelo**

A susceptibilidade ao congelamento apenas é um problema se a camada estabilizada estiver a uma distância da superfície da via de comunicação que permita que o solo tratado esteja sujeito a congelamento ou se a camada estabilizada for deixada sem cobertura durante os meses de Inverno. Os provetes com 7 dias de cura foram sujeitos a ciclos de congelamento, a uma temperatura negativa de 23°C, durante 24 horas, e de degelo que dura 23 horas, a uma temperatura de 21 °C. Durante os ciclos de degelo a absorção de água dos provetes ocorre por capilaridade. Estes procedimentos são repetidos durante 12 ciclos, sendo a resistência à compressão simples registada a média dos valores obtidos em 4 provetes. Este ensaio seguiu genericamente os procedimentos da norma da ASTM D560-03 (2003). No entanto, não foram registadas as variações de volume e do teor em água, como é indicado na norma, mas sim as resistências de provetes de controlo, não submetidos aos ciclos, e de provetes sujeitos aos ciclos de gelo-degelo.

## **6 – ANÁLISE DE RESULTADOS**

Apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios realizados aos provetes de solo sem tratamento, de solo com 6% e 10 % de cimento sem qualquer activador e aos provetes de solo com 6% de cimento onde foram adicionados os activadores, afim de avaliar a sua eficiência na estabilização do solo.

### **6.1 – Características mecânicas**

#### **6.1.1 – Compressão simples**

Os resultados da resistência à compressão para tempos de cura de 3, 7, 14, 28 e 56 dias, para as composições S6C, S10C, S6Chs2 e S6Cbs2, são apresentados na Figura 4. Constata-se que o

aumento de resistência ocorre essencialmente até aos 28 dias de cura, sendo os acréscimos pouco significativos após esta idade. Também se verifica que aos 7 dias, geralmente as resistências obtidas são superiores a 50% dos valores atingidos aos 56 dias.

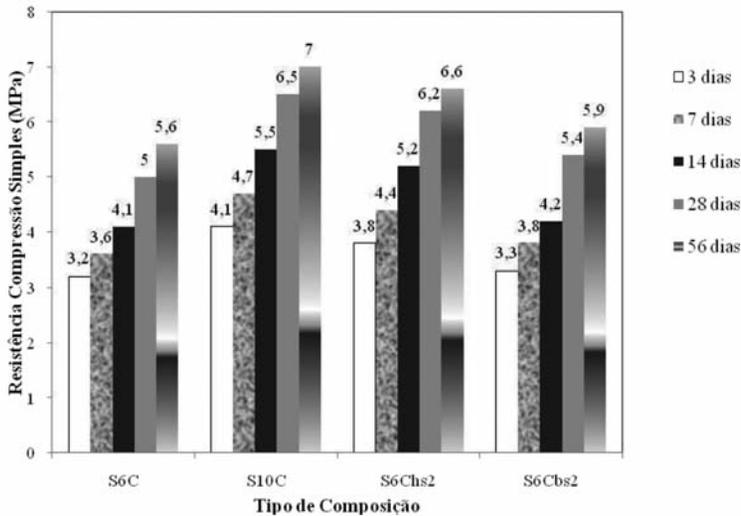


Fig. 4 – Resistência à compressão simples aos 3, 7, 14, 28 e 56 dias (MPa).

Tendo em conta os aspectos referidos, optou-se por fazer a análise global das várias composições para os tempos de cura de 7 e 28 dias. A Figura 5 mostra os valores das resistências à compressão simples, em MPa, para os tempos de cura referidos, enquanto que a Figura 6 permite comparar em termos percentuais as resistências à compressão simples das diversas composições ensaiadas tendo como padrão as misturas de controlo S6C.

Através da comparação percentual apresentada na Figura 6, verifica-se que o solo não estabilizado tem uma resistência entre 18 a 25% do solo estabilizado de controlo (S6C). Esta diferença não deixa dúvidas quanto aos efeitos benéficos da utilização de cimento na estabilização destes solos.

A análise da Figura 6, indica ainda que, do ponto de vista da resistência à compressão simples, as composições que contêm bicarbonato de sódio e renolith têm um efeito relativamente modesto, com aumentos entre 6 e 11%, comparativamente com S6C, enquanto que a composição com cloreto de cálcio demonstra um efeito negativo de 6% aos 7 dias e um efeito análogo a S6C aos 28 dias. Por sua vez, a mistura com hidróxido de sódio (S6Chs2) permite bons resultados em termos de resistência, dado que com apenas 2% de hidróxido de sódio (relativamente à massa de cimento) e 6% de cimento (em relação à massa de solo seco) conseguem-se melhorias de cerca de 23% relativamente às conseguidas nas misturas de controlo. Os valores obtidos são cerca de 6% inferiores aos resultados conseguidos com 10% de cimento. A composição com 3% de hidróxido de sódio apresenta resultados semelhantes aos da composição S6Chs2, contudo é menos económica, dada a maior percentagem de activador que utiliza.

Para os tempos de cura analisados os valores absolutos indicados para cada composição correspondem à média dos registos obtidos em 3 provetes. O Quadro 2 apresenta os valores dos coeficientes de variação, com o objectivo de se poder avaliar a variabilidade dos resultados de provetes nominalmente idênticos e fabricados e curados do mesmo modo. Embora o número de provetes para cada ensaio seja reduzido, foram calculados os coeficientes de variação para os diversos tempos de cura em estudo, apresentando-se somente o maior valor obtido nesses cálculos.

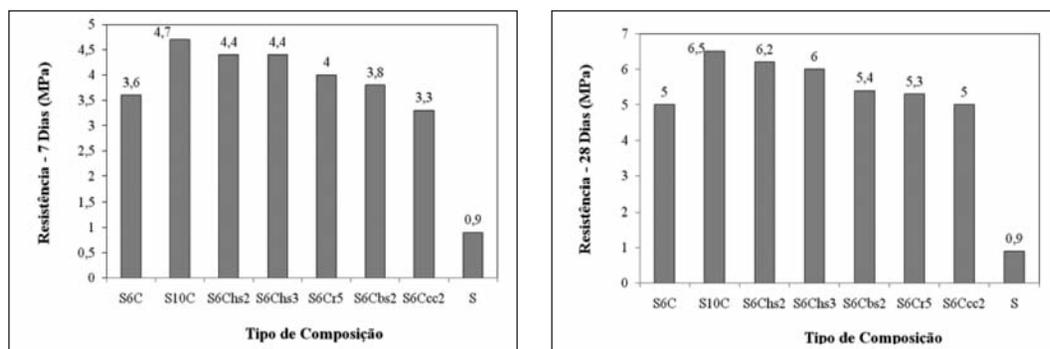


Fig. 5 – Resistência à compressão simples aos 7 e 28 dias (MPa).

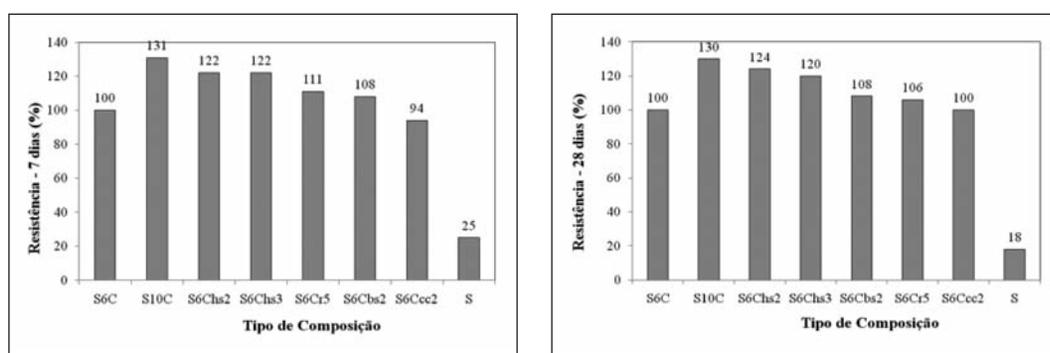


Fig. 6 – Resistência à compressão simples aos 7 e 28 dias (%).

Quadro 2 – Coeficientes de variação.

Composição	S	S6C	S10C	S6Cbs2	S6Ccc2	S6Chs2	S6Chs3	S6Cr5
Coeficiente Variação (%)	1,7	5,2	3,6	3,8	3,8	5,0	2,0	2,2

### 6.1.2 – Tração por compressão diametral

Os resultados globais para esta característica mecânica estão representados em valor absoluto na Figura 7 e a comparação em termos percentuais na Figura 8, considerando como padrão a composição S6C. As amostras de solo não estabilizado demonstram possuir uma resistência à tração de cerca 31% comparativamente com a obtida nas misturas S6C, o que permite evidenciar o melhor desempenho por parte do solo estabilizado.

Relativamente aos activadores analisados, o melhor resultado verificou-se para as amostras com 2% de hidróxido de sódio, que demonstram um ganho de resistência à tração significativo, com um acréscimo de quase 70% relativamente às composições com a mesma percentagem de cimento mas sem activador, chegando mesmo a ultrapassar os provetes com 10% de cimento em cerca de 50%. Estes ensaios foram repetidos para ter a certeza que os resultados obtidos não tinham sido afectados por outros factores, o que permitiu a confirmação destes resultados. Com valores

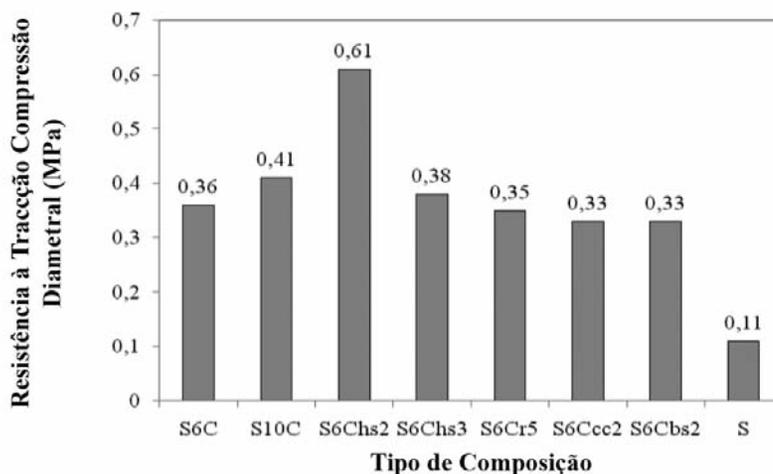


Fig. 7 – Resistência à tracção por compressão diametral (MPa).

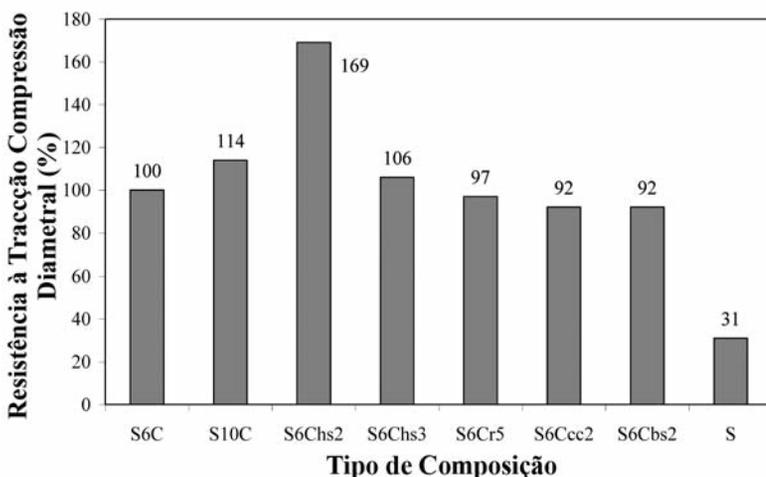


Fig. 8 – Resistência à tracção por compressão diametral (%).

inferiores ou pouco superiores aos obtidos nas misturas de controlo com 6% de cimento estão todos os outros activadores.

Para o tempo de cura considerado na resistência à tracção os valores indicados correspondem à média dos registos obtidos em 3 provetes, pelo que são apresentados no Quadro 3 os coeficientes de variação calculados para cada composição, com o objectivo de se poder avaliar a variabilidade dos resultados de provetes nominalmente idênticos e fabricados e curados do mesmo modo.

Quadro 3 – Coeficientes de variação.

Composição	S	S6C	S10C	S6Cbs2	S6Ccc2	S6Chs2	S6Chs3	S6Cr5
Coefficiente Variação (%)	3,1	3,3	1,5	1,8	6,4	1,6	3,9	1,7

## 6.2 – Durabilidade

Uma vez que os provetes de solo não estabilizado se desagregam completamente em contacto com a água, não foi possível avaliar o seu desempenho na durabilidade e, por isso, não se apresentam resultados referentes a este material.

### 6.2.1 – Perda da resistência por saturação

Apresentam-se na Figura 9, para todas as composições, as perdas de resistência, em termos percentuais, relativamente à resistência das amostras não saturadas, para 7, 28 e 56 dias de cura. A análise dos resultados indica que para todas as composições, a perda de resistência diminui com o aumento do tempo de cura, o que demonstra a diminuição da sensibilidade ao efeito da água. Este facto pode indicar que nas idades jovens a perda de resistência se deve apenas à eliminação do potencial de sucção. É de prever que para períodos de cura mais longos a perda de resistência por saturação terá um efeito mais reduzido. As composições que evidenciaram menores perdas de resistência foram as que tinham hidróxido de sódio, com valores semelhantes para as duas percentagens ensaiadas.

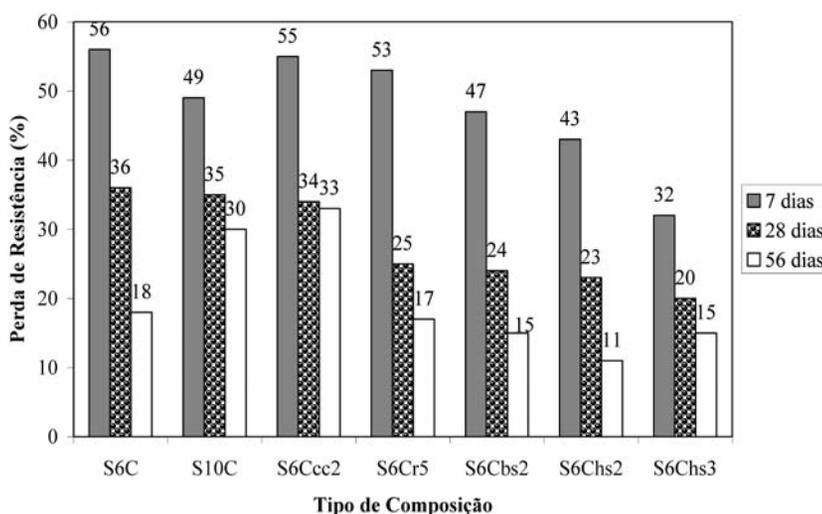


Fig. 9 – Perda de resistência à compressão simples devido à saturação (%).

As resistências à compressão simples utilizadas para calcular as perdas de resistência apresentadas na Figura 9 correspondem à média dos registos obtidos em 3 provetes, pelo que são indicados na Figura 10 os valores dos coeficientes de variação, com o objectivo de se poder avaliar a variabilidade dos resultados de provetes nominalmente idênticos e fabricados e curados do mesmo modo. Os valores dos coeficientes foram calculados para os diversos tempos de cura em análise, apresentando-se na figura somente o maior valor obtido nesses cálculos, para as amostras saturadas e não saturadas.

### 6.2.2 – Absorção de água por capilaridade

Para avaliar a absorção de água por capilaridade foi calculado o coeficiente de absorção, determinado num gráfico “absorção de água” versus “raiz quadrada do tempo” mediante o valor do

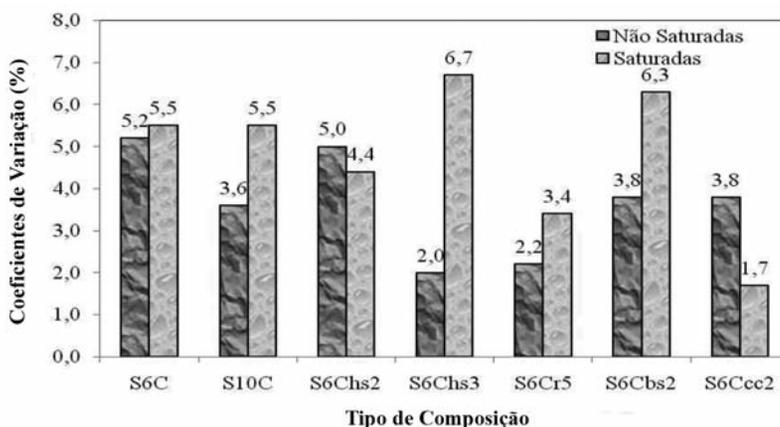


Fig. 10 – Coeficientes de variação na resistência à compressão simples (%).

declive da parte inicial da recta ajustada a esse gráfico. Apresentam-se na Figura 11 os valores dos coeficientes de absorção assim determinados, e na Figura 12 estes são comparados em termos percentuais, para as diversas composições, tendo em conta que o padrão é a mistura S6C.

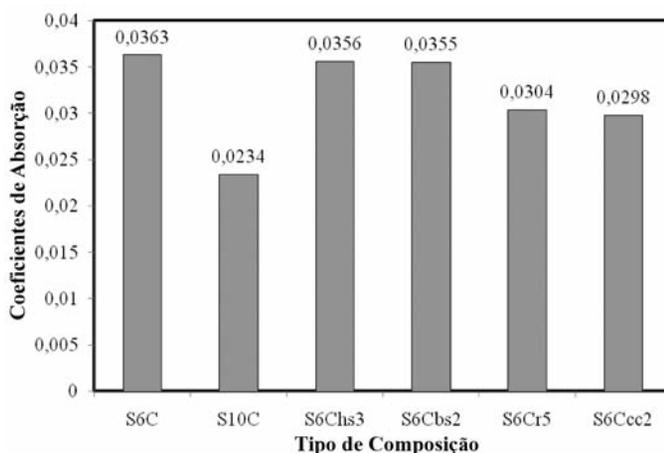
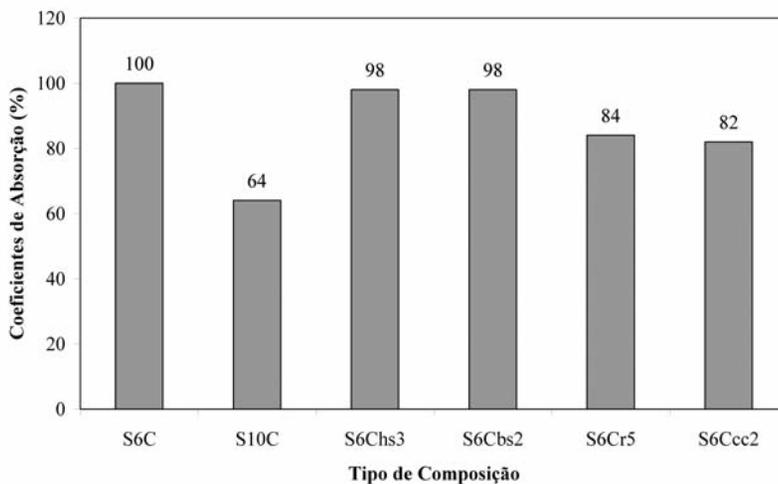


Fig. 11 – Coeficientes de absorção.

As composições com activadores apresentam coeficientes de absorção ligeiramente inferiores ao da composição padrão. Estes coeficientes indicam a velocidade de absorção de água por capilaridade nas primeiras horas de contacto com a água. As misturas com cloreto de cálcio e renolith, apresentam o melhor desempenho, com uma diferença de cerca de 20% relativamente às composições S6C. Não se realizou este ensaio para a composição S6Chs2.

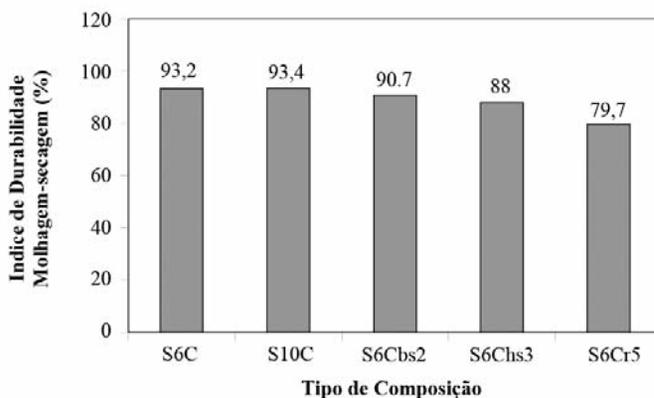
Para a obtenção dos coeficientes de absorção, foi utilizada a média dos valores das massas registadas durante a execução do ensaio dos dois provetes das diversas composições em estudo, que apresentaram pouca variabilidade nos valores medidos, tendo sido a mistura S10C a que deu origem a um maior coeficiente de variação (de 1,0%).



**Fig. 12** – Coeficientes de absorção (%).

### 6.2.3 – Molhagem-secagem

Os resultados dos ensaios de molhagem-secagem, mediante a indicação percentual do índice de durabilidade (resistência à compressão após os ciclos/resistência à compressão sem ciclos), para as composições ensaiadas, estão representados na Figura 13. Os valores obtidos indicam que todos os activadores analisados apresentam resultados inferiores à mistura de controlo.



**Fig. 13** – Índice de durabilidade: ensaios de molhagem-secagem.

Nestes ensaios, só o aumento da quantidade de cimento fez com que a perda da resistência devido aos ciclos de molhagem-secagem fosse mais pequena. As misturas com melhor comportamento, relativamente à mistura de controlo S6C, ou seja as que tiveram uma menor perda de resistência quando submetidas a ciclos de molhagem-secagem, foram as que continham bicarbonato e hidróxido de sódio na percentagem de 3%. A composição com renolith na percentagem de 5%,

sofreu uma perda de resistência significativa de cerca de 20%. O facto de não se ter realizado o ensaio para a composição S6Chs2, não permitiu avaliar se esta continuava a ter o bom desempenho evidenciado para as características mecânicas.

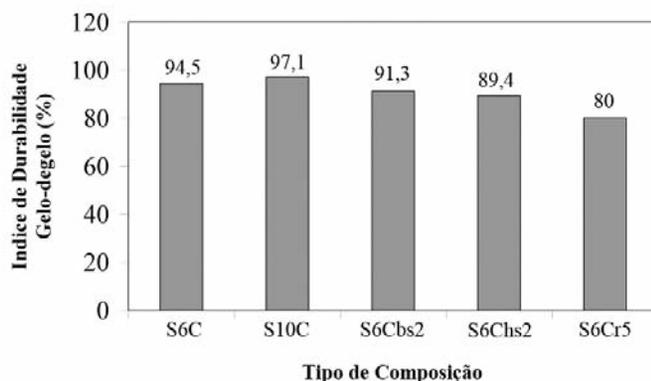
No Quadro 4 apresentam-se os valores médios absolutos das resistências medidas em 4 provetes (antes e após os ciclos). São também indicados os coeficientes de variação calculados para cada um dos casos analisados.

**Quadro 4** – Resistência com ciclos, resistência sem ciclos e coeficientes de variação.

Composição	Resistência sem ciclos (MPa)	Coefficientes de variação (%)	Resistência com ciclos (MPa)	Coefficientes de variação (%)
S6C	14,6	5,1	13,6	5,8
S10C	19,7	6,0	18,4	6,5
S6Cbs2	12,9	4,3	11,7	6,2
S6Chs3	13,3	6,9	11,7	7,4
S6Cr5	14,3	6,6	11,4	7,1

#### 6.2.4 – Gelo-degelo

Os resultados dos ensaios de gelo-degelo, mediante o valor percentual do índice de durabilidade (resistência com ciclos/resistência sem ciclos), para as composições ensaiadas, estão representados na Figura 14. Os valores obtidos indicam que misturas com activadores apresentam um índice de durabilidade mais baixo que a mistura de controlo. Apenas a mistura com 10% de cimento apresentou um índice de durabilidade superior ao da composição padrão.



**Fig. 14** – Índice de durabilidade: gelo-degelo.

No Quadro 5 podem verificar-se os valores médios absolutos das resistências medidas em 4 provetes (antes e após os ciclos). São também indicados os coeficientes de variação calculados para cada um dos casos analisados.

**Quadro 5** – Resistência com ciclos, resistência sem ciclos e coeficientes de variação..

Composição	Resistência sem ciclos (MPa)	Coefficientes de variação (%)	Resistência com ciclos (MPa)	Coefficientes de variação (%)
S6C	20,1	6,8	19,0	5,7
S10C	27,8	4,5	27,0	3,9
S6Cbs2	20,8	5,9	19,0	7,9
S6Chs2	20,8	3,2	18,6	7,6
S6Cr5	20,4	5,3	16,3	6,1

Salienta-se que nos ensaios de molhagem-secagem e gelo-degelo os coeficientes de variação obtidos permitem constatar, na maior parte dos casos, uma maior dispersão nos valores da resistência à compressão simples obtidos.

## 7 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Do estudo efectuado resultaram as seguintes conclusões relevantes:

- Na resistência à compressão simples os valores do solo não tratado foram cerca de 20% dos registados nas misturas com 6% de cimento. Enquanto que na resistência à tracção os valores obtidos nas amostras de solo (S) foram sensivelmente 30% dos resultados de S6C.
- Na avaliação da durabilidade é significativo o melhor desempenho das misturas de solo estabilizado com cimento, dado o facto de as composições de solo não tratado terem sofrido uma desagregação completa.
- Quanto aos activadores, as composições S6Chs2 permitiram obter melhorias significativas nas características mecânicas estudadas. Na resistência à compressão simples atingiu um aumento de 23% em relação à mistura S6C, ficando apenas a cerca de 6% dos registados nas amostras S10C. Na resistência à tracção os valores foram surpreendentes, sendo superiores em cerca de 70% aos das misturas S6C e superiores em 50% aos registados nas amostras S10C. Isto indica que com apenas 0.12% de activador os resultados são próximos ou mesmo superiores aos conseguidos com um aumento de 4% de cimento.
- A avaliação do efeito da saturação na resistência à compressão simples mostrou que a mistura com hidróxido de sódio evidencia melhor desempenho, comparativamente com as outras composições ensaiadas, apresentando menores perdas de resistência, inclusive que as misturas S10C.
- Na avaliação da perda de resistência após os ciclos de gelo-degelo, o comportamento da composição S6Chs2 demonstrou uma perda superior, cerca de 5% ao verificado nas misturas de controlo.

## 8 – AGRADECIMENTOS

Ao Laboratório de Engenharia Civil da Universidade do Minho e ao Laboratório de Geotecnia do Instituto Politécnico de Bragança.

## 9 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO M145-82 (1986). *Specifications for Highway Materials*. American Association of State Highway and Transportation Officials.
- ASTM C496-96 (1996). *Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. American Society for Testing Materials.
- ASTM D560-03 (2003). *Standard Test Methods for Freezing and Thawing Compacted Soil-cement Mixtures*. American Society for Testing Materials.
- ASTM D2487-00 (2000). *Standard Classifications of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*. American Society for Testing Materials.
- Branco, F. E. F. (1988). *Usos Rodoviários de Alguns Subprodutos Industriais*. Memória nº 720, LNEC, Lisboa.
- Little, D. N. (1995). *Handbook for Stabilization of Pavement Subgrades and Base Courses with Lime*. National Lime Association, Kendall/Hunt Publishing Company.
- LNEC E197-1967 (1967). *Solos. Ensaio de Compactação*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- LNEC E243-1971 (1971). *Solos. Solo-cimento*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- LNEC E262-1972 (1972). *Solo-cimento. Ensaio de Compactação*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- LNEC E263-1972 (1972). *Solo-cimento. Ensaio de Molhagem-secagem*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- LNEC E264-1972 (1972). *Solo-cimento. Ensaio de Compressão*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- LNEC E304-1974 (1974). *Pavimentos Rodoviários. Solo-cimento*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- LNEC E393-1993 (1993). *Betões. Determinação da Absorção de Água por Capilaridade*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- Nascimento, U. (1970). *Estabilização de Solos*. Curso de especialização 108, LNEC, Lisboa.
- Pereira, O. A. (1970). *Estabilização de Solos*. Curso de especialização 108, Lab. Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- Sherwood, P. T. (1993). *Soil Stabilization with Cement and Lime – State of the Art Review*. Transport Research Laboratory, HMSO, London.