

AVALIAÇÃO DO MELHORAMENTO DE SOLOS RESIDUAIS GRANÍTICOS COM CIMENTO E ACTIVADORES

EVALUATION OF THE IMPROVEMENT OF RESIDUAL GRANITIC SOILS WITH CEMENT AND ACTIVATORS

Cruz, M. Lurdes S., *Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, Portugal, lurdes@ipb.pt*
Jalali, Said, *Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, said@civil.uminho.pt*

RESUMO

Este trabalho apresenta os resultados de estudos laboratoriais destinados a quantificar os efeitos da utilização de cimento nos solos residuais graníticos, sob o ponto de vista da capacidade da 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 analisada a absorção de água por capilaridade e o efeito na resistência à compressão simples da saturação, de 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. 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.

ABSTRACT

This research work deals with estimating the beneficial effect of using Portland cement for stabilizing residual granitic soils. The mechanical performance of stabilized soils was evaluated through compressive strength tests and indirect tensile test by diametric compression. The durability performance was evaluated by measuring capillary water absorption, and the loss of compressive strength due to saturation, and wet-dry and freeze-thaw cycles. Furthermore, in order to enhance the durability and mechanical performance of the mixtures activators were used. The results obtained indicate that Portland cement is effective in durability and mechanical performance of residual granitic soils. It was also observed that certain activators enhance significantly the mechanical performance of soil-cement mixtures studied.

1. INTRODUÇÃO

A alteração das características dos solos de maneira a melhorar o seu comportamento, tornando-os capazes de responder de forma satisfatória às solicitações previstas é designada por estabilização ou melhoramento de solos.

Sendo os solos o mais antigo material de engenharia pode-se supor que a 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 [1].

A 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. Para tal, existe a estabilização química que provoca alterações nos solos, mediante a mistura de materiais adicionados aos solos (agentes estabilizadores), as partículas de solo e a água. 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 1 esquematiza quais os agentes mais indicados, mediante os resultados dos ensaios de análise granulométrica e dos limites de Atterberg.

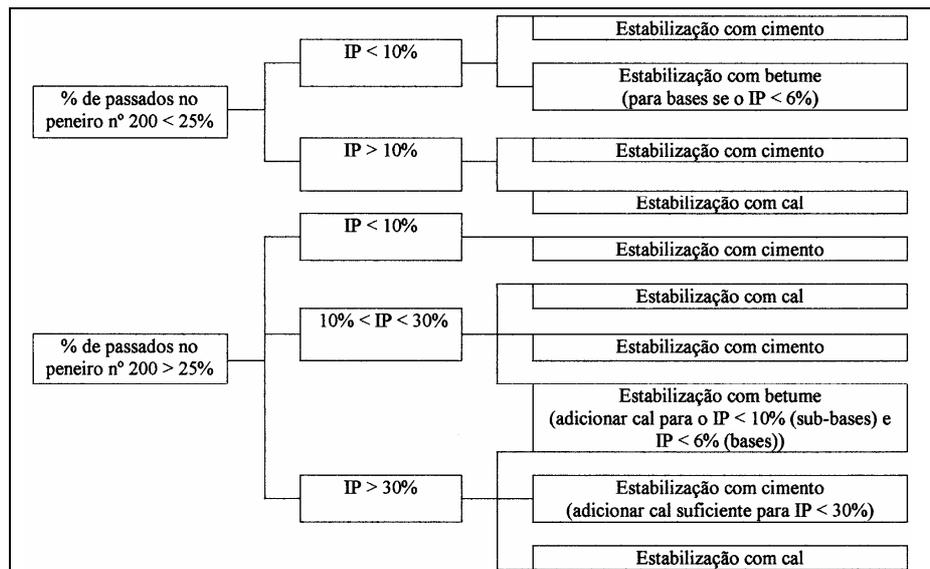


Figura 1 - Estimativa para a escolha dos agentes estabilizadores [2].

A figura 1 permite verificar 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 todos os solos, embora para os que possuem índices de plasticidade superiores a 30% seja necessário adicionar cal para reduzir esse valor. Assim, pode-se dizer que a estabilização de solos através da adição de cimento constitui uma das aplicações 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 [3].

Um dos mecanismos permite o aumento da resistência mecânica devido à acção aglutinante do aditivo, 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, forma núcleos independentes na massa de solo.

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 em estudo é a designada por solo-cimento ou solo-cimento compactado, em que a quantidade de aditivo 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 e de núcleos de barragens de terra [3].

É sobre esta estabilização de solos com cimento que incidiram os trabalhos, sendo este estudo motivado pelas seguintes razões:

- 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.

2. MATERIAIS UTILIZADOS

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 [4], a adequabilidade ou não 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 [5] e um solo A-2-6 (1) segundo a classificação rodoviária AASHTO M145-42 [6]. Estes resultados estão assim de acordo com o que é normalmente obtido para os solos residuais graníticos. O caulino usado foi o Mibal, de Barqueiros, que é um caulino branco ou levemente colorido, moído e lavado com hidrociclone, sendo depois seco. 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 conterem silte na sua constituição, foi considerado para o presente trabalho, que a sua ausência não afectaria significativamente os resultados e o comportamento dos solos.

O cimento utilizado foi o cimento Portland II B-L 32.5 N, tendo sido escolhidas percentagens de 6 e 10% da massa de solo seco.

Outro componente é a água, uma vez que o cimento é um ligante hidráulico, ou seja, só ganha presa quando na presença de água. As características a que este material deve obedecer encontram-se fixadas na especificação do LNEC E304-1974 [7]. Foi utilizada água da rede pública.

Foram seleccionados activadores químicos para averiguar o seu efeito sobre as características das misturas, mediante a sua possível intervenção na reacção entre o cimento e as partículas de solo. Os activadores seleccionados foram o cloreto 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.

Para avaliar o efeito do cimento e dos activadores foram adoptadas 8 composições de misturas, de modo a averiguar quais as alterações em termos mecânicos e de durabilidade. A identificação destas composições está esquematizada no quadro 1. Por exemplo, para a composição S6Ces2, S designa o solo, 6C refere-se à percentagem de cimento utilizada, es designa o nome do activador indicado pelas suas iniciais em minúsculas e o número final é a percentagem de activador usada.

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 + cloreto sódio	S6Ces2	6.0	2.0
Solo-cimento + cloreto cálcio	S6Ccc2	6.0	2.0
Solo-cimento + hidróxido sódio	S6Chs2	6.0	2.0
Solo-cimento + renolith	S6Cr5	6.0	5.0
Solo-cimento + renolith	S6Cr10	6.0	10.0

3. FABRICO E CURA DOS PROVETES

Depois da identificação do solo, para verificação da sua adequabilidade, foram realizados ensaios de compactação, segundo a especificação do LNEC E197-1967 [8], para o solo a estabilizar ou segundo a especificação do LNEC E262-1972 [9] para as misturas de solo-cimento. A baridade seca máxima permitiu estabelecer as quantidades de materiais necessárias para cada provete. Seguiu-se a elaboração de inúmeros provetes cilíndricos por compactação estática. Os provetes de dimensões 30 mm de diâmetro e 45 mm de altura, obedecem à relação altura/diâmetro de 1.5. As características de moldagem foram aproximadamente o teor em água óptimo e a baridade seca máxima, do ensaio de compactação pesada. Seguiu-se o período de cura em que os provetes foram mantidos num ambiente com humidade relativa constante de 100% e temperatura de 21 ± 2 °C.

4. ENSAIOS REALIZADOS

Depois da elaboração dos provetes e decorrido o período de cura, foram efectuados os ensaios para obter indicação acerca da eficácia da estabilização.

4.1 Características mecânicas

Neste trabalho foram realizados dois tipos de ensaios para averiguar as características mecânicas das composições em estudo.

O ensaio de compressão simples permite determinar a resistência ou tensão de rotura de provetes cilíndricos, visando obter indicações acerca do endurecimento das misturas e da resistência do material estabilizado, sendo a qualidade dos solos estabilizados com cimento usualmente baseada nos valores obtidos nestes ensaios. Foram executados ensaios aos 7, 14, 28 e 56 dias de cura, sendo o resultado final do ensaio a média dos valores obtidos em 3 provetes.

O ensaio de tracção por compressão diametral permite determinar a resistência ou tensão de rotura de 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.

4.2 Durabilidade

Atendendo a que a humidade tem um papel importante na resistência dos materiais de bases de pavimentos é fundamental que esta tenha um papel predominante nos ensaios de durabilidade. Assim, foram realizados ensaios de absorção de água por capilaridade e à compressão simples de provetes saturados, após 12 ciclos de molhagem-secagem e 12 ciclos de gelo-degelo.

O ensaio de absorção de água por capilaridade pretende averiguar, depois de um período de cura dos provetes de 28 dias, a sua maior ou menor absorção de água ao longo do tempo, mediante o cálculo da diferença entre a massa do provete endurecido de solo-cimento, que esteve em contacto com água durante um determinado tempo e a massa do provete seco, dividida pela área da superfície em contacto com a água. O resultado final do ensaio foi a média dos valores obtidos em 2 provetes.

Para averiguar o efeito da saturação na resistência à compressão simples, os provetes de solo foram 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 dos resultados registados em três provetes.

No ensaio de molhagem-secagem os provetes, depois de um período de cura de 7 dias, são completamente imersos em água, durante cada ciclo de molhagem, que dura 5 horas, sendo posteriormente colocados na estufa a 71 °C durante 42 horas, que é o chamado ciclo de secagem. Estes procedimentos repetem-se durante 12 ciclos. O valor da resistência à compressão simples obtido foi a média dos resultados registados em 4 provetes. O ensaio de molhagem-secagem foi desenvolvido originalmente para simular as forças de retracção existentes nas misturas de solo-cimento devido ao processo de secagem.

A susceptibilidade ao congelamento apenas é um problema se a camada estabilizada estiver a uma distância da superfície da via de comunicação que seja inferior ao esperado para a máxima profundidade de congelamento ou se a camada estabilizada for deixada sem cobertura durante os meses de Inverno. Nestes ensaios cada congelamento, a uma temperatura de -23 °C, dura 24 horas, e cada degelo 23 horas, a uma temperatura de 21 °C, sendo que nos ciclos de degelo a absorção de água por parte dos provetes é por capilaridade. Estes procedimentos são repetidos durante 12 ciclos, sendo a resistência à compressão simples registada, a média dos valores obtidos em 4 provetes. Estes procedimentos pretendem ter em conta as forças internas devidas às variações de humidade e temperatura.

5. ANÁLISE DE RESULTADOS

Neste ponto faz-se a apresentação dos 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, através da comparação dos resultados das composições com activadores com os valores obtidos nas misturas de controlo S6C.

5.1 Características mecânicas

5.1.1 Compressão simples

Na análise feita relativamente a esta característica para as várias composições estudadas, constatou-se que os acréscimos de resistência acontecem essencialmente até aos 28 dias de cura, sendo depois os acréscimos de resistência pouco significativos. Também se verificou que aos 7 dias de cura, geralmente as resistências obtidas eram superiores a 50% relativamente às que se registavam aos 56 dias. Sendo assim, optou-se por fazer a análise global das várias composições para os tempos de cura de 7 e 28 dias (figura 2). Esta análise permite comparar em termos percentuais as resistências à compressão simples das diversas composições ensaiadas tendo como padrão as misturas de controlo S6C.

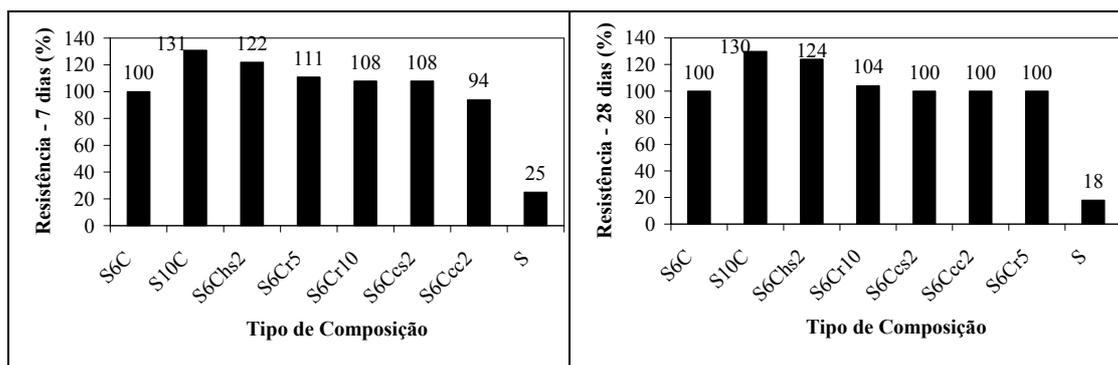


Figura 2 - Resistência à compressão simples aos 7 e 28 dias.

A comparação entre os valores do solo estabilizado com cimento e o solo sem tratamento, com diferenças de cerca de 80% para as composições de controlo, não deixa dúvidas quanto aos efeitos benéficos da utilização de cimento.

Da análise da figura 2, pode-se ainda concluir que não são consideradas vantajosas, do ponto de vista da resistência à compressão simples, as composições que contêm cloreto de sódio, cloreto de cálcio e o renolith nas duas percentagens analisadas, dado que estes activadores conduzem a resistências iguais, inferiores ou pouco superiores às conseguidas nas misturas de controlo com a mesma percentagem de cimento, mas sem activador.

Por sua vez, a mistura que tem hidróxido de sódio na sua constituição, S6Chs2, permite bons resultados em termos de resistência, dado que com apenas 0.12% de hidróxido de sódio (relativamente à massa de solo seco) e 6% de cimento, conseguem-se melhorias na resistência à compressão simples de cerca de 23% relativamente às conseguidas nas misturas de controlo, sendo os valores obtidos inferiores em cerca de 7% aos resultados conseguidos com 10% de cimento.

5.1.2 Tracção por compressão diametral

Os resultados globais para esta característica mecânica estão representados na figura 3, em termos percentuais, considerando como padrão as composições S6C. As amostras de solo estabilizado com cimento têm uma resistência à tracção superior em cerca de 70% à obtida nas misturas padrão, o que permite evidenciar o melhor desempenho por parte do solo estabilizado.

O melhor resultado verifica-se para as amostras com 2% de hidróxido, sendo impressionante o ganho de resistência à tracção nestas misturas, que têm 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 55%. Estes ensaios foram repetidos para ter a certeza que os resultados obtidos não tinham sido afectados por outros parâmetros, o que permitiu a confirmação dos anteriormente obtidos. Com valores inferiores ou pouco superiores aos obtidos nas misturas de controlo com 6% de cimento estão todos os outros activadores.

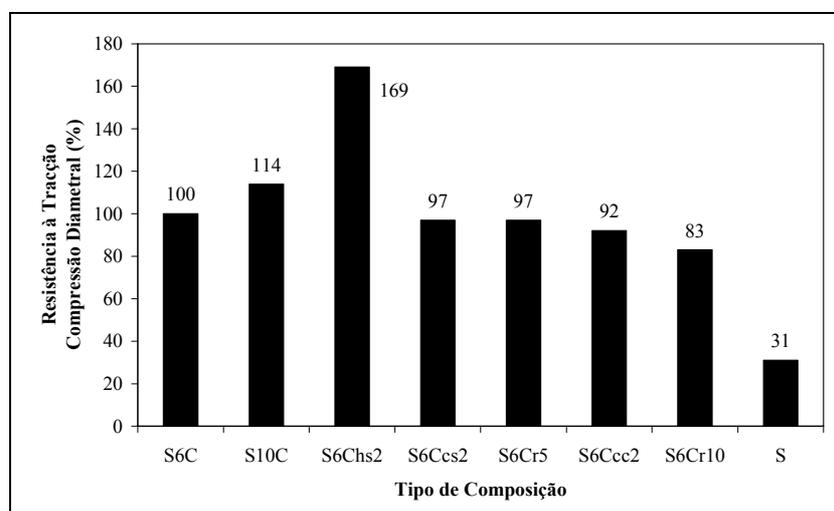


Figura 3 - Resistência à tracção por compressão diametral.

5.2 Durabilidade

Na avaliação da durabilidade, não se apresenta nenhum resultado para as composições de solo sem tratamento, devido ao facto de estes ensaios envolveram o contacto dos provetes com a água o que provocava a sua desagregação, quer através da sua imersão completa, caso do efeito da saturação na resistência à compressão simples e dos ciclos de molhagem-secagem, quer mediante a absorção de água por capilaridade, caso do ensaio da absorção de água e dos ciclos de gelo-degelo.

5.2.1 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 declive da parte inicial da recta ajustada a esse gráfico. Apresenta-se na figura 4 a relação entre os valores dos coeficientes de absorção, em termos percentuais, que foram determinados para as diversas composições submetidas ao ensaio, tendo em conta que o padrão são as misturas de controlo S6C.

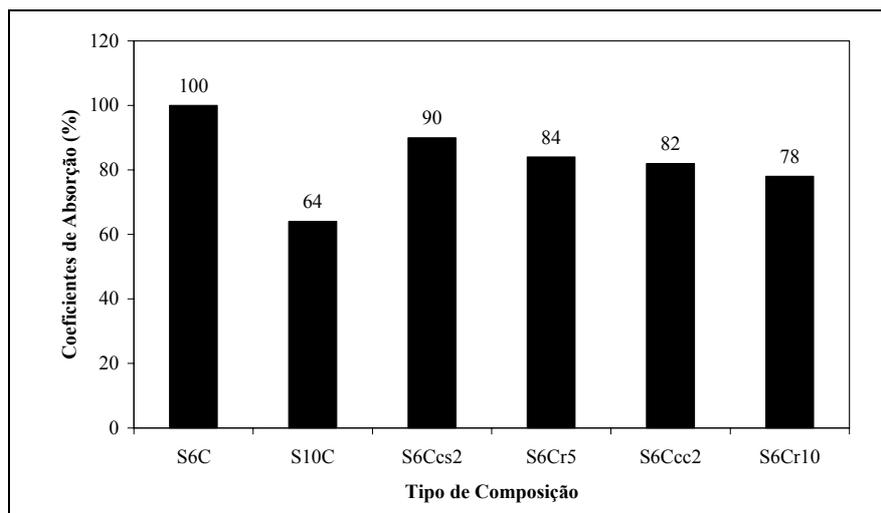


Figura 4 - Coeficientes de absorção.

Todos os activadores analisados têm valores para o coeficiente de absorção inferiores aos das composições S6C e S10C, o que indica o seu melhor comportamento, dada a menor absorção de água, sendo os melhores valores para o cloreto de cálcio e para as misturas que têm renolith, com uma diferença percentual em termos de absorção de água de cerca de 20% relativamente às composições S6C. Dado que não se realizou o ensaio para a composição S6Chs2 não foi possível avaliar se esta continuava a ter o bom desempenho evidenciado para as características mecânicas.

5.2.2 Efeito da saturação na compressão simples de misturas saturadas

Apresentam-se na figura 5, para todas as composições, as perdas de resistência, em termos percentuais, relativamente à resistência das amostras não saturadas, para os 7, 28 e 56 dias de cura.

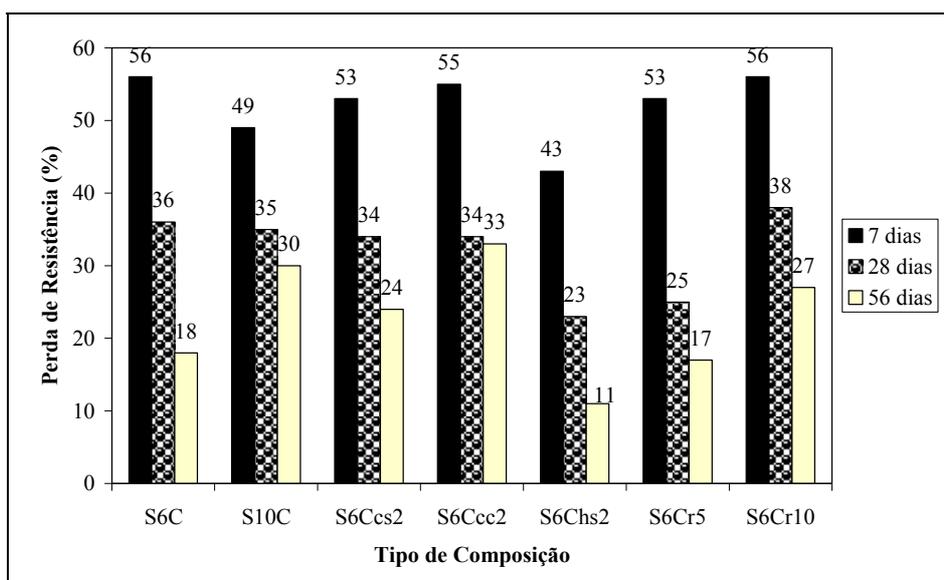


Figura 5 - Perda de resistência à compressão simples devido à saturação.

Através da análise da figura 5 pode-se verificar que para todas as composições, a perda de resistência apresenta uma diminuição em termos percentuais, à medida que aumenta o tempo de cura, o que demonstra a diminuição da sensibilidade ao efeito da água. Visto que a perda de resistência inicial, verificada nas amostras saturadas relativamente às não saturadas, diminui com o tempo, pode concluir-se que a referida perda inicial se deve apenas à eliminação do potencial de sucção. Pode-se prever que para períodos de cura relativamente longos a perda de resistência por saturação terá um valor percentual mais reduzido. A composição que evidenciou menor perda de resistência relativamente à obtida nas amostras não saturadas foi a que tinha hidróxido de sódio

5.2.3 Molhagem-secagem e gelo-degelo

Os resultados dos ensaios de molhagem-secagem, mediante a indicação percentual do índice de durabilidade (resistência com ciclos/resistência sem ciclos), para as composições ensaiadas estão representados na figura 6a. Dos valores obtidos conclui-se que nenhum dos activadores analisados provoca incrementos no índice de durabilidade relativamente ao obtido nas misturas de controlo, sendo sempre o seu efeito no sentido contrário.

Apenas o aumento da quantidade de cimento fez com que a diminuição da resistência devido aos ciclos de molhagem-secagem fosse mais pequena. A mistura com melhor comportamento, relativamente à mistura de controlo com 6% de cimento, ou seja, que teve uma menor perda de resistência quando submetida a ciclos de molhagem-secagem, foi a que continha renolith na percentagem de 10%. A outra composição ensaiada, com renolith na percentagem de 5%, sofreu uma perda de resistência significativa de cerca de 20%. Dado que não se realizou o ensaio para a composição S6Chs2 não foi possível avaliar se esta continuava a ter o bom desempenho evidenciado para as características mecânicas.

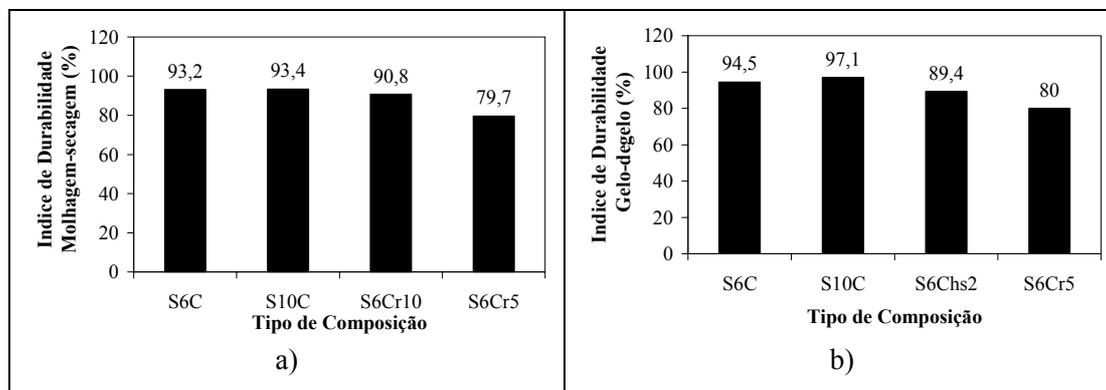


Figura 6 - Índice de durabilidade: a) ensaios de molhagem-secagem; b) gelo-degelo.

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 6b. Dos valores obtidos conclui-se que nenhum dos activadores analisados provoca incrementos no índice de durabilidade relativamente ao valor da mistura de controlo, sendo sempre o seu efeito no sentido oposto, tal como acontecia nos ensaios de molhagem-secagem. Apenas o aumento da quantidade de cimento fez com que a diminuição da resistência devido aos ciclos de gelo-degelo fosse menor. A mistura com melhor desempenho, ou seja, com menor perda de resistência relativamente à mistura de controlo, foi a que continha hidróxido de sódio. A outra composição ensaiada com renolith na percentagem de 5%, sofreu uma perda de resistência de cerca de 20%.

6. CONCLUSÕES

Do estudo efectuado resultaram as seguintes conclusões relevantes:

- Na resistência à compressão simples os valores das misturas com 6% de cimento foram superiores em cerca de 80% aos das misturas de solo sem tratamento.
- Na resistência à tracção os valores foram superiores em cerca de 70% aos das misturas de solo sem tratamento por parte das composições 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 sofrerem uma desagregação.
- Quanto aos activadores, as composições S6Chs2 permitiram obter melhorias significativas nas características mecânicas estudadas.
- Na resistência à compressão simples os valores foram superiores em cerca de 23% aos das misturas S6C, ficando apenas a cerca de 7% 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 55% aos registados nas amostras S10C.
- Os resultados do comportamento mecânico permitem verificar que a resistência à compressão com 10% de cimento é apenas 7% superior à de uma mistura com 6% de cimento e 0,12% de hidróxido de sódio, da massa de solo seco, enquanto a sua resistência à tracção é 55% menor (com apenas 0.12% de activador os resultados são próximos ou mesmo bastante superiores aos conseguidos com um aumento de 4% de cimento relativamente à massa de solo seco).
- Nos aspectos que visavam avaliar a durabilidade, nem todos os ensaios foram efectuados para a mistura de hidróxido, pelo estão em curso estudos que serão apresentados futuramente.
- No efeito da saturação na resistência à compressão simples, a mistura com hidróxido continuou a evidenciar melhor desempenho, comparativamente com as outras composições ensaiadas, apresentando menores perdas de resistência em relação às misturas não saturadas.
- Na avaliação da perda de resistência após os ciclos de gelo-degelo, o comportamento da composição S6Chs2, não foi o mais adequado sendo a perda superior em cerca de 5% ao obtido nas misturas de controlo.

7. AGRADECIMENTOS

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

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Branco, Fernando E. F., “Uso Rodoviário de Alguns Subprodutos Industriais”, Memória nº 720, LNEC, Lisboa, 1988
- [2] Little, Dallas N., “Handbook for Stabilization of Pavement Subgrades and Base Courses with Lime”, National Lime Association, Kendall/Hunt Publishing Company, 1995
- [3] Pereira, Orlando Almeida, “Estabilização de Solos”, Curso de especialização 108, LNEC, Lisboa, 1970
- [4] LNEC E243-1971, “Solos. Solo-cimento.”, Lab. Nacional de Engenharia Civil, Lisboa
- [5] ASTM D2487-00, “Standard Classifications of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)”, American Society for Testing Materials
- [6] AASHTO M145-42, “Specifications for Highway Materials”, American Association of State Highway and Transportation Officials
- [7] LNEC E304-1974, “Pavimentos Rodoviários. Solo-cimento.”, LNEC, Lisboa
- [8] LNEC E197-1967, “Solos. Ensaio de Compactação.”, LNEC, Lisboa
- [9] LNEC E262-1972, “Solo-cimento. Ensaio de Compactação.”, LNEC, Lisboa