

MELHORAMENTO DO DESEMPENHO DE MISTURAS DE SOLO-CIMENTO

ENHANCING PERFORMANCE OF SOIL-CEMENT MIXTURES

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

Os avanços na estabilização dos solos com cimento têm sido modestos apesar da sua crescente utilização. Este trabalho de investigação teve como objectivo a utilização de activadores afim de tornar mais efectivo o desempenho do cimento Portland nas características do solo-cimento, quer ao nível mecânico, quer ao nível 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. Os resultados obtidos indicam que alguns dos produtos analisados conferem melhorias significativas em algumas propriedades do solo-cimento.

ABSTRACT

Advances in soil stabilization with cement have been modest despite its increasing use. This research aimed at using activators in order to enhance the effective performance of Portland cement on characteristics of soil-cement both in mechanical and in terms of durability. Compressive strength tests and indirect tensile test by diametric compression were performed to evaluate the mechanical characteristics, whereas for durability, the capillary absorption, the loss of compressive strength due to saturation, wet-dry and freeze-thaw cycles. The results indicate that some of the activators evaluated have significant effect in enhancing certain properties of soil-cement.

1. INTRODUÇÃO

Os solos são um dos elementos mais importantes no sector da construção, quer quando no seu estado natural, em fundações ou escavações, quer quando utilizados como material de construção. No entanto, é frequente encontrar solos naturais sem os requisitos necessários para cumprir adequadamente a função a que estão destinados, pelo que 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, ou seja, proceder à sua estabilização ou melhoramento.

Existem várias possibilidades de estabilização de solos, sendo a mais indicada para fins rodoviários a estabilização química, com o objectivo de melhorar a capacidade de carga dos solos e diminuir a sua susceptibilidade às variações de humidade. Dos diversos produtos químicos utilizados para a estabilização, o cimento é o de utilização mais generalizada, devido à sua disponibilidade e maior adequabilidade a solos não coesivos.

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).

Quando os teores em cimento são mais elevados o cimento forma núcleos interligados distribuídos pela massa de solo, o que permite o aumento da resistência mecânica devido à acção aglutinante do aditivo, que cimenta as partículas de solo. Para teores em cimento mais baixos, verifica-se principalmente uma modificação da fracção argilosa do solo, que diminui a sua plasticidade, podendo ser ou não acompanhada do aumento da resistência mecânica, uma vez que o cimento, nestes casos, forma núcleos independentes na massa de solo (Pereira, 1970).

Perante estes dois tipos de acções, consoante o teor em cimento utilizado, podem ser obtidos três tipos de misturas de solo com cimento, que têm geralmente utilizações distintas. A 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 (Pereira, 1970).

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

- Avaliação da 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 do melhoramento do 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, pelo que se torna importante escolher este processo de estabilização somente quando os solos forem adequados. Segundo a especificação do LNEC E243 (1971), 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 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 (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 o Mibal, de Barqueiros, que é um produto resultante da 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, tendo sido utilizada água da rede pública. As características a que a água deve obedecer encontram-se fixadas na especificação do LNEC E304 (1974).

Foram seleccionados activadores 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 bicarbonato de sódio, o silicato de sódio, uma mistura de silicato com hidróxido de sódio e hidróxido de sódio. 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 S6Cbs2, S designa o solo, 6C refere-se à percentagem de cimento utilizada, bs 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 + bicarbonato sódio	S6Cbs2	6.0	2.0
Solo-cimento + silicato sódio	S6Css3	6.0	3.0
Solo-cimento + (hidróxido sódio + silicato sódio)	S6Chs2ss2	6.0	2.0 + 2.0
Solo-cimento + hidróxido sódio	S6Chs2	6.0	2.0
Solo-cimento + hidróxido sódio	S6Chs3	6.0	3.0

3. FABRICO E CURA DOS PROVETES

Identificado o solo, para verificação da sua adequabilidade à estabilização com cimento, foram realizados ensaios de compactação, segundo a especificação do LNEC E197 (1967), para o solo a estabilizar ou segundo a especificação do LNEC E262 (1972) 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, com 30 mm de diâmetro e 45 mm de altura obedecendo 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 realizados 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 (LNEC, 1972). Foram executados ensaios aos 3, 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 (ASTM, 1996).

4.2. Durabilidade

Tendo a humidade um papel importante na resistência dos materiais de bases de pavimentos é fundamental que esta seja um aspecto 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 (LNEC, 1993). 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 3, 7, 14, 28, e 56 dias de cura, sendo o valor final do ensaio a média dos resultados registados em 3 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 (LNEC, 1972). 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 (ASTM, 2003). Estes procedimentos são repetidos durante 12 ciclos, sendo a resistência à compressão simples registada a média dos valores obtidos em 4 provetes. Este ensaio pretende 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 nas 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 as resistências obtidas eram superiores a 50% dos valores registados 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 (figuras 1 e 2, respectivamente). Esta análise permite comparar em termos percentuais as resistências à compressão simples das diversas composições ensaiadas tendo como padrão as misturas de controlo S6C.

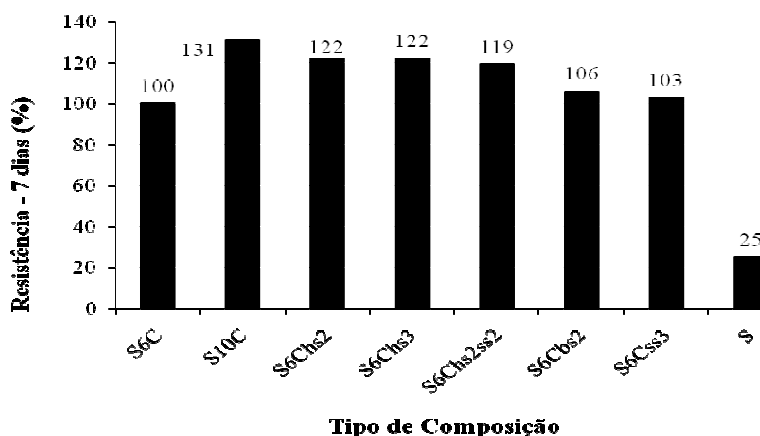


Figura 1 - Resistência à compressão simples aos 7 dias.

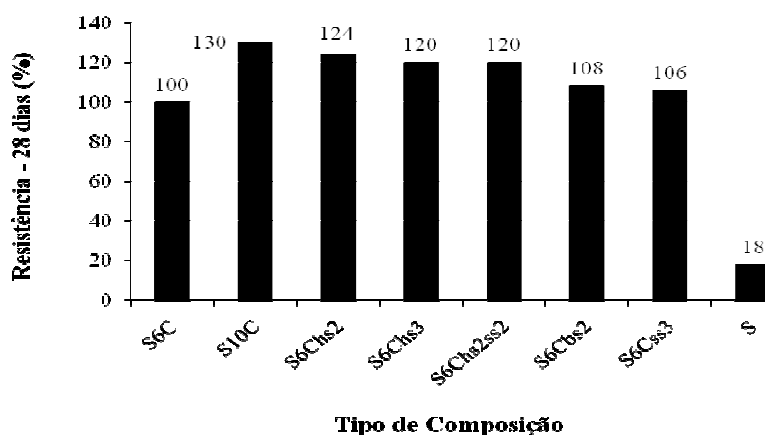


Figura 2 - Resistência à compressão simples aos 28 dias.

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, é esclarecedor quanto aos efeitos benéficos da utilização de cimento.

Da análise das figuras 1 e 2, pode-se ainda concluir que não são consideradas muito vantajosas, do ponto de vista da resistência à compressão simples, as composições que contêm bicarbonato de sódio e silicato de sódio, dado que estes activadores conduzem a resistências pouco superiores às conseguidas nas misturas de controlo com a mesma percentagem de cimento, mas sem activador.

Por sua vez, as misturas que têm hidróxido de sódio na sua constituição (S6Chs2, S6Chs3 e S6Chs2ss2), permitem bons resultados em termos de resistência com acréscimos de cerca de 20% quando comparativamente com a mistura de controlo. Entre estas três misturas a que mostra melhores resultados, tendo em conta também o aspecto económico, é a composição S6Chs2, visto 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, S6C, têm uma resistência à tracção superior em cerca de 70% à obtida nas misturas de solo sem tratamento, o que permite evidenciar o melhor desempenho por parte do solo estabilizado.

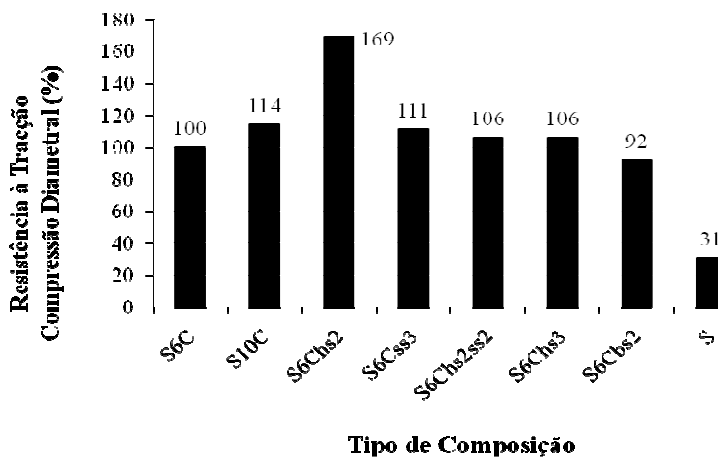


Figura 3 - Resistência à tracção por compressão diametral.

Relativamente aos activadores analisados, o melhor resultado verificou-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 registados. Com valores pouco superiores aos obtidos nas misturas de controlo com 6% de cimento estão todos os outros activadores, com particular destaque, pela negativa, para o bicarbonato de sódio que evidenciou pior desempenho que a mistura S6C.

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.

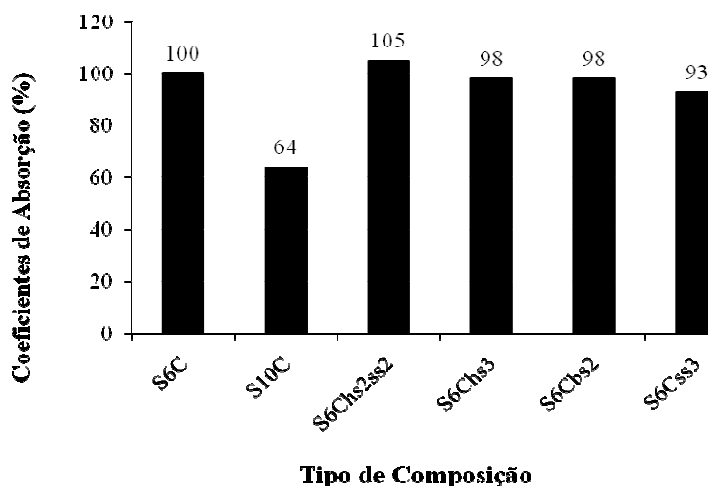


Figura 4 - Coeficientes de absorção.

Dos activadores analisados todos, com excepção da composição que continha uma mistura de silicato e hidróxido, têm valores para o coeficiente de absorção inferiores aos das composições S6C, o que indica o seu melhor comportamento, dada a menor absorção de água, sendo o melhor resultado para o silicato de sódio, com uma diferença percentual em termos de absorção de água de 7% 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 resistência à compressão simples

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

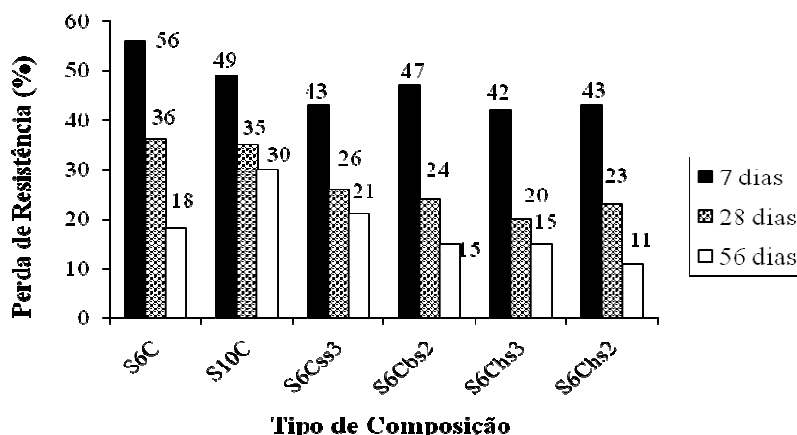


Figura 5 - Perda de resistência à compressão simples devido à saturação.

Através da análise da figura 5, pode-se verificar que para todas as composições ensaiadas 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 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. Tendo em conta os três tempos de cura em análise, as composições que evidenciaram melhor desempenho com menor perda de resistência relativamente à obtida nas amostras não saturadas, foram as que tinham hidróxido de sódio, inclusive com melhores resultados que S10C.

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.

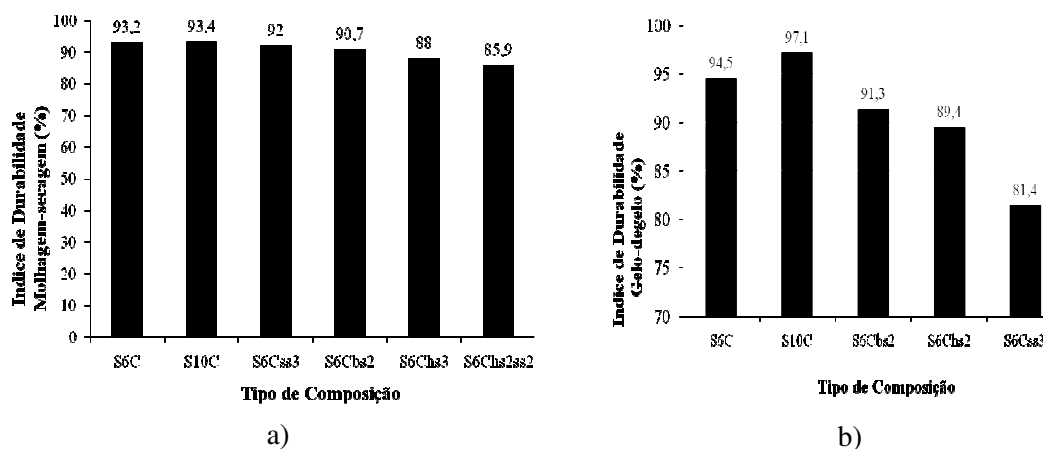


Figura 6 - Índice de durabilidade: a) ensaios de molhagem-secagem; b) gelo-degelo.

No ensaio de molhagem-secagem, apenas o aumento da quantidade de cimento fez com que a diminuição da resistência devido aos ciclos 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 silicato de sódio. As misturas S6Chs3 e S6Chs2ss2 sofreram uma perda de resistência de cerca de 6% comparativamente com a mistura de controlo. 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 outras características estudadas.

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 quando submetida a ciclos de gelo-degelo, foi a que continha bicarbonato de sódio, estando no lugar oposto desta avaliação a composição com silicato de sódio. A mistura S6Chs2 apresenta em comparação com a mistura S6C um comportamento pior em cerca de 5%.

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 sofreram 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 que 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 que as outras composições, inclusive que as misturas S10C, 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.

REFERÊNCIAS

- AASHTO, American Association of State Highway and Transportation Officials (1986). AASHTO M145-82: Specifications for Highway Materials.
- ASTM, American Society for Testing Materials (1996). ASTM C496-96: Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens.
- ASTM, American Society for Testing Materials (2003). ASTM D560-03: Standard Test Methods for Freezing and Thawing Compacted Soil-cement Mixtures.
- ASTM, American Society for Testing Materials (2000). ASTM D2487-00: Unified Soil Classification System.
- LNEC, Lab. Nac. Eng.^a Civil (1967). Especificação LNEC E197-1967: Solos; Ensaio de Compactação, LNEC, Lisboa, Portugal.
- LNEC, Lab. Nac. Eng.^a Civil (1971). Especificação LNEC E243-1971: Solos; Solo-cimento, LNEC, Lisboa, Portugal.
- LNEC, Lab. Nac. Eng.^a Civil (1972). Especificação LNEC E262-1972: Solo-cimento; Ensaio de Compactação, LNEC, Lisboa, Portugal.
- LNEC, Lab. Nac. Eng.^a Civil (1972). Especificação LNEC E263-1972: Solo-cimento; Ensaio de Molhagem-secagem, LNEC, Lisboa, Portugal.
- LNEC, Lab. Nac. Eng.^a Civil (1972). Especificação LNEC E264-1972: Solo-cimento; Ensaio de Compressão, LNEC, Lisboa, Portugal.
- LNEC, Lab. Nac. Eng.^a Civil (1974). Especificação LNEC E304-1974: Pavimentos Rodoviários; Solo-cimento, LNEC, Lisboa, Portugal.
- LNEC, Lab. Nac. Eng.^a Civil (1993). Especificação LNEC E393-1993: Betões; Determinação da Absorção de Água por Capilaridade, LNEC, Lisboa, Portugal.
- Pereira, Orlando Almeida (1970). Estabilização de Solos. Curso de especialização 108, LNEC, Lisboa, Portugal.