

AVALIAÇÃO DO MELHORAMENTO DE TERRA ESTABILIZADA COM CIMENTO E ACTIVADORES

Maria L. S. Cruz* e Said Jalali

IPB/Instituto Politécnico de Bragança
ESTiG/Escola Superior de Tecnologia e de Gestão
DMA/Departamento de Mecânica Aplicada
Campus de Santa Apolónia, Apartado 134, 5301-857 Bragança, PORTUGAL
Tel.: +351 273 303062; Fax: +351 273 313051; E-mail: lurdes@ipb.pt
UM/Universidade do Minho, Escola de Engenharia
DEC/Departamento de Engenharia Civil
Campus de Azurém, 4800-058 Guimarães, PORTUGAL
Tel.: +351 510204; Fax: +351 253 510217; E-mail: said@civil.uminho.pt

Tema 2: Materiais e Comportamento

Palavras-chave: Activadores, Características Mecânicas, Durabilidade

Resumo

A terra é uma matéria-prima abundante, com bom comportamento térmico, reciclável e reutilizável, incombustível, não tóxica e sem necessidade de processos de transformação dispendiosos, o que permite eleger este material como uma das alternativas para a construção sustentável. As limitações da terra, enquanto material de construção, em particular o seu comportamento mecânico e a sua susceptibilidade na presença da água, podem ser minimizadas através de processos de estabilização de solos.

Este trabalho descreve os resultados de estudos laboratoriais destinados a avaliar os efeitos da utilização do cimento nas propriedades mecânicas e de durabilidade de solos residuais graníticos. As propriedades mecânicas foram avaliadas através de ensaios à compressão simples e à tracção por compressão diametral, enquanto que o desempenho relativamente à durabilidade, foi estudado através de ensaios de absorção de água por capilaridade, ensaios de molhagem-secagem e de gelo-degelo. Foi também avaliado o efeito da saturação na resistência à compressão simples. Foram utilizadas percentagens de 6 e 10% de cimento relativamente à massa de solo seco.

O efeito de activadores de baixo custo no solo estabilizado também foi considerado, de modo a tornar o material mais atractivo do ponto de vista económico e de desempenho. Os activadores usados foram: cloreto de sódio, cloreto de cálcio e hidróxido de sódio. O efeito da utilização de activadores foi avaliado no solo estabilizado com 6 % de cimento.

Os resultados dos trabalhos experimentais indicam que o cimento aumenta substancialmente o desempenho do solo, enquanto que alguns dos activadores melhoram significativamente algumas das propriedades estudadas no solo estabilizado com cimento. Pode-se portanto concluir, que o uso de alguns activadores de baixo custo pode resultar numa redução significativa no consumo de cimento. Estes resultados podem conduzir a um melhoramento do desempenho e a efeitos ambientais positivos ao mesmo tempo que os custos sofrem uma redução.

1. Introdução

A terra como material natural e económico tem marcado a arquitectura de muitos lugares, sendo o acréscimo do seu uso fomentado pelo desenvolvimento de novas tecnologias. Os actuais padrões de segurança e de durabilidade das construções, levam a que a utilização de solo na construção, material sem resistência mecânica elevada a esforços de compressão e praticamente sem resistência à tracção, possa ser complementada com outros materiais. A estabilização química, ou seja, com a introdução de componentes (ligantes) nos solos a estabilizar de que vai resultar uma acção química ou físico-química, pretende melhorar a resistência 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 maior disponibilidade e adequabilidade a uma maior variedade de solos. Uma das aplicações do solo estabilizado é no fabrico de blocos, que embora tenham um campo de aplicação mais limitado que os métodos de construção em betão armado, podem permitir uma utilização mais vasta que a actual.

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

- Avaliação da possibilidade de estabilização de solos residuais graníticos com cimento, dado que estes 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 destas misturas com recurso a reduzidas percentagens de activadores de baixo custo.

2. Materiais utilizados

O solo utilizado 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 (ASTM, 2000), estando 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 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 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 foi a água, uma vez que o cimento é um ligante hidráulico, ou seja, só ganha presa quando na presença de água. Foi utilizada água da rede pública.

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 cloreto de sódio, o cloreto de cálcio e o 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 7 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.

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	S6Ccs2	6.0	2.0
Solo-cimento + cloreto cálcio	S6Ccc2	6.0	2.0
Solo-cimento + 2% hidróxido sódio	S6Chs2	6.0	2.0
Solo-cimento + 3% hidróxido sódio	S6Chs3	6.0	3.0

Por exemplo, para a composição S6Ccs2, S designa o solo, 6C refere-se à percentagem de cimento utilizada, cs designa o nome do activador indicado pelas suas iniciais em minúsculas e o número final é a percentagem de activador utilizada.

3. Fabrico e cura dos provetes

Depois da identificação do solo, foram realizados ensaios de compactação, segundo a especificação do LNEC E197-1967 (LNEC, 1967), para o solo a estabilizar ou segundo a especificação do LNEC E262-1972 (LNEC, 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. 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. Seguiu-se o período de cura em que os provetes foram mantidos num ambiente com humidade relativa constante de 100% e temperatura de $21\pm 2^{\circ}\text{C}$.

4. Ensaio 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 (LNEC E264-1972). 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 C496-96).

4. 2. Durabilidade

Atendendo a que a humidade tem um papel importante na resistência dos materiais em estudo 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 (LNEC E393-1993). 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, foram 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 E263-1972). O valor da resistência à compressão simples obtido foi a média dos resultados registados em 4 provetes. O ensaio de molhagem-secagem foi desenvolvido para simular as forças de retracção existentes nas misturas de solo-cimento devido ao processo de secagem.

Nos ensaios de gelo-degelo, 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 D560-03). 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 os efeitos na estabilização do solo, através da comparação dos resultados das composições 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 (Fig. 1). Esta análise permite comparar em termos percentuais as resistências à compressão simples das diversas composições ensaiadas tendo como padrão as misturas de controlo S6C.

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 1, 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 e cloreto de cálcio, dado que estes activadores conduzem a resistências iguais ou inferiores às conseguidas nas misturas de controlo com a mesma percentagem de cimento, mas sem activador.

Por sua vez, das misturas que têm hidróxido de sódio na sua constituição, a composição S6Chs2 é a que se revelou mais eficaz do ponto de vista económico e 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 2, 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.

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.

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 3 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.

Todos os activadores analisados 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 os melhores resultados para o cloreto de cálcio, 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. A composição com 3% de hidróxido de sódio teve um comportamento muito próximo da mistura de controlo.

5. 2. 2. Efeito da saturação na resistência à compressão simples

Apresentam-se na figura 4, 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. 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. 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 e de gelo-degelo, mediante a indicação percentual do índice de durabilidade (resistência com ciclos/resistência sem ciclos), para as composições ensaiadas estão representados na figura 4. Dos valores obtidos, conclui-se que o único activador analisado, para cada um destes ensaios, não provoca incrementos no índice de durabilidade relativamente ao obtido nas misturas de controlo, sendo o seu efeito no sentido contrário, com diferenças de cerca de 6%. Apenas o aumento da quantidade de cimento fez com que a diminuição da resistência devido aos ciclos de molhagem-secagem ou gelo-degelo fosse menor.

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 que as composições de solo sofrem uma desagregação quando em contacto com a água.
- Na resistência à compressão simples os valores de S6Chs2 foram superiores em cerca de 23% aos das misturas S6C, ficando a cerca de 7% dos registados em S10C.
- Na resistência à tracção a composição S6Chs2 teve valores 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).
- No efeito da saturação na resistência à compressão simples, as misturas com hidróxido continuaram 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 absorção de água por capilaridade o comportamento da mistura de hidróxido foi muito semelhante às misturas S6C.
- Na avaliação da perda de resistência após os ciclos de molhagem-secagem e gelo-degelo, o comportamento das composições com hidróxido, não foi o mais adequado sendo a perda superior em cerca de 6% ao obtido nas misturas de controlo.
- Resumindo, as composições S6Chs2 permitiram obter melhorias significativas nas características mecânicas estudadas. O seu comportamento menos adequado em alguns aspectos analisados em termos de durabilidade, deve e pode ser minimizado mediante técnicas construtivas adequadas.

Bibliografia

- ASTM C496-96: “Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens”, American Society for Testing Materials.
- ASTM D560-03: “Standard Test Methods for Freezing and Thawing Compacted Soil-cement Mixtures”, American Society for Testing Materials.
- ASTM D2487-00: “Standard Classifications of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)”, American Society for Testing Materials.
- LNEC E197-1967: “Solos. Ensaio de Compactação.”, LNEC, Lisboa.
- LNEC E262-1972: “Solo-cimento. Ensaio de Compactação.”, LNEC, Lisboa.
- LNEC E263-1972: “Solo-cimento. Ensaio de Molhagem-secagem”, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- LNEC E264-1972: “Solo-cimento. Ensaio de Compressão”, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- LNEC E393-1993: “Betões. Determinação da Absorção de Água por Capilaridade”, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

Nota final

Currículo resumido Maria L. S. Cruz:

Licenciatura em Engenharia Civil (UTAD, 1998), Mestrado em Engenharia Civil, opção Estruturas, Geotecnia e Fundações (UM, 2004), Docente na Escola Superior de Tecnologia e de Gestão de Bragança (ESTiG), Responsável do Laboratório de Geotecnia da ESTiG.

Currículo resumido Said Jalali:

Professor Associado com Agregação do Departamento de Engenharia Civil da UM. Responsável pelo Grupo de Materiais de Construção. Desenvolve actividade de investigação na área da Construção Sustentável, Novos Materiais de Construção e Materiais Eco-Eficientes.

AVALIAÇÃO DO MELHORAMENTO DE TERRA ESTABILIZADA COM CIMENTO E ACTIVADORES

Maria L. S. Cruz* e Said Jalali

Figuras

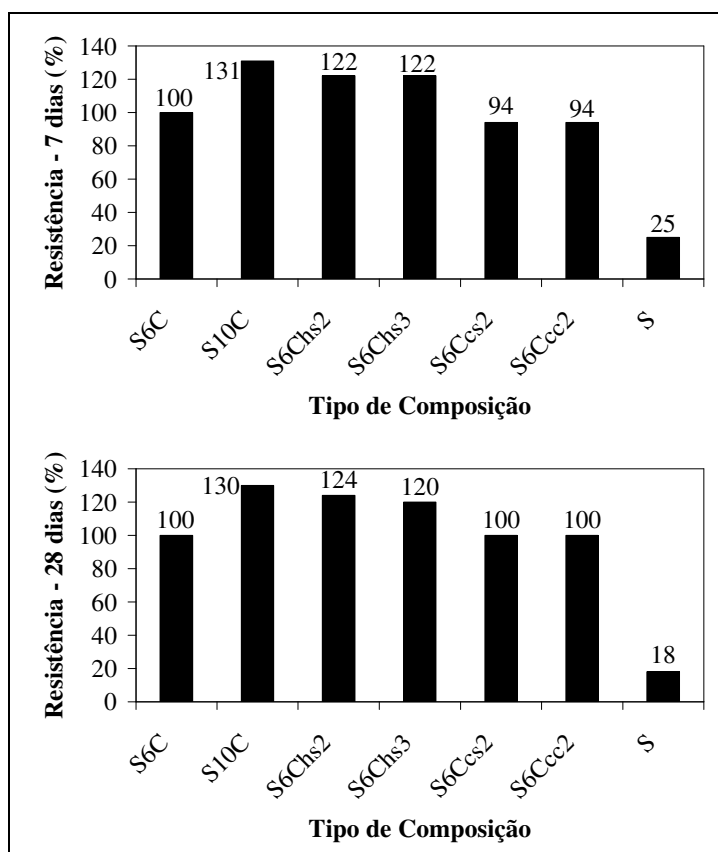


Fig.1 - Resistência à compressão simples aos 7 e 28 dias.

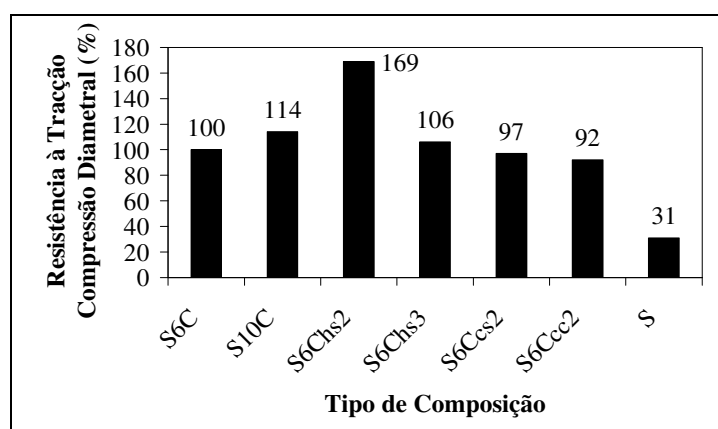


Fig.2 - Resistência à tracção por compressão diametral.

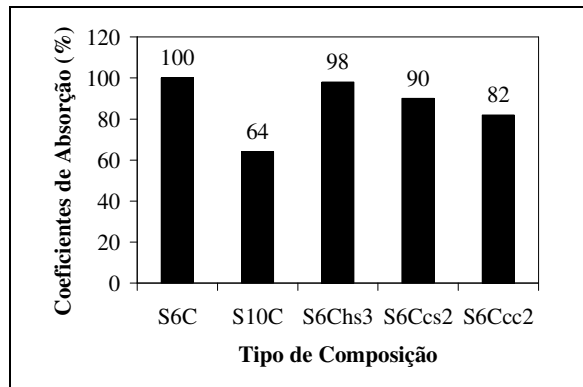


Fig.3 - Coeficientes de absorção.

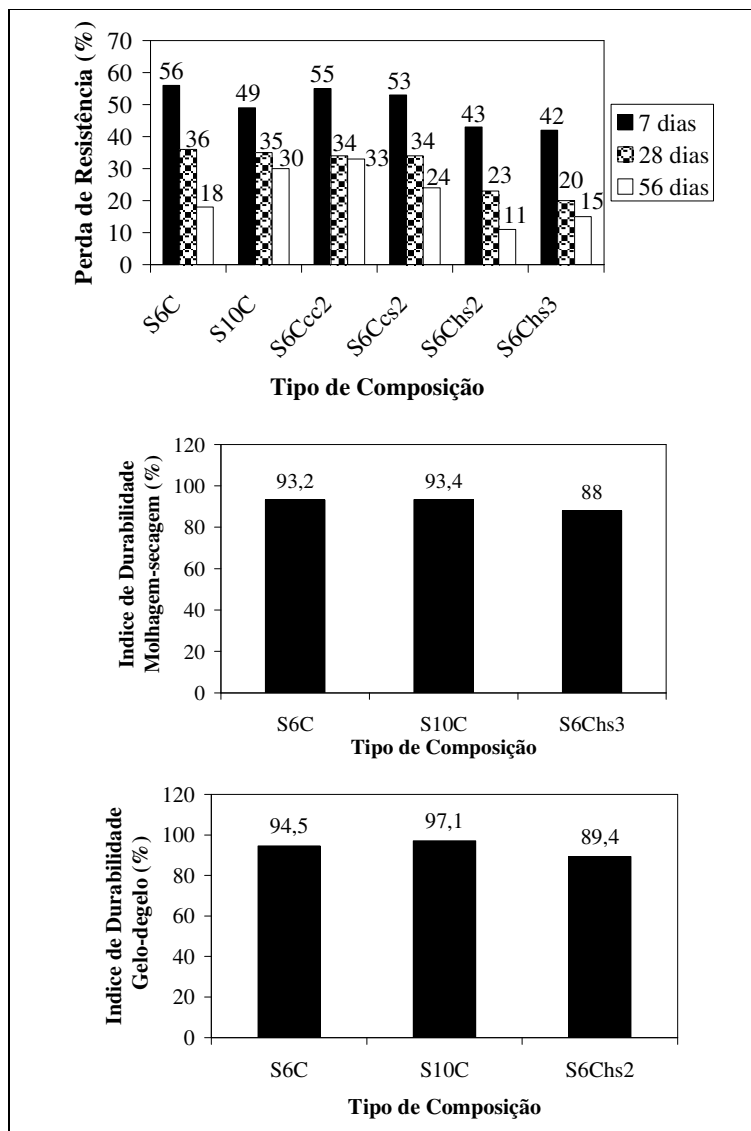


Fig.4 - Perda de resistência à compressão simples devido à saturação e índice de durabilidade dos ensaios de molhagem-secagem e gelo-degelo.