

Análise do comportamento de um solo sedimentar orgânico estabilizado com cal hidratada e cimento Portland**Analysis of the behavior of an organic sedimentary soil stabilized with hydrated lime and Portland cement**

DOI:10.34115/basrv4n6-024

Recebimento dos originais: 26/10/2020

Aceitação para publicação: 27/11/2020

Aziz Tebechrani Neto

M.Sc.

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Oswaldo Aranha 99, Centro, Porto Alegre, Brasil
aziztneto@gmail.com**Marcelo Heidemann**

D.Sc.

Universidade Federal de Santa Catarina, Rua Dona Francisca, 8300, Bloco U, Joinville, Brasil
marcelo.heidemann@ufsc.br**Helena Paula Nierwinski**

D.Sc.

Universidade Federal de Santa Catarina, Rua Dona Francisca, 8300, Bloco U, Joinville, Brasil
helena.paula@ufsc.br**Breno Salgado Barra**

D.Sc.

Universidade Federal de Santa Catarina, Rua Dona Francisca, 8300, Bloco U, Joinville, Brasil
breno.barra@ufsc.br**Daniel Hastenpflug**

D.Sc.

Universidade Federal de Santa Catarina
Rua Dona Francisca, 8300, Bloco U, Joinville, Brasil
daniel.h@ufsc.br**Yader Afonso Guerrero Pérez**

D.Sc.

Universidade Federal de Santa Catarina
Rua Dona Francisca, 8300, Bloco U, Joinville, Brasil
guerrero.y@ufsc.br**RESUMO**

Este artigo apresenta um estudo sobre a estabilização química através da mistura de cimento Portland e cal hidratada em um solo sedimentar areno-siltoso. Além da presença da matéria orgânica em sua composição, este solo apresenta baixa capacidade de suporte em condições naturais, sendo pouco adequado no ponto de vista geotécnico. Avaliou-se a viabilidade do emprego de cal hidratada (CH-I) e de cimento Portland (CP II-Z 32) para aumentar a resistência

do solo. Para isso, foram moldados corpos de prova de misturas entre solo e cal hidratada e solo e cimento, compactadas sob umidade ótima. Estes foram submetidos a ensaios de resistência à compressão simples aos 7, 14 e 28 dias de idade (tempo de cura). Também foram avaliadas as características químicas naturais do solo através de difratometria de raios X e fluorescência de raios X, Os resultados mostram ganhos de resistência proporcionais aos acréscimos de agente estabilizante, porém muito abaixo dos verificados por outros autores em estudos semelhantes. Além disso, foi verificado que as resistências decaíram a partir dos sete dias de cura para a cal e a partir dos 14 dias para o cimento, sendo a formação de compostos expansivos devido a presença de carbonato de cálcio no solo uma possível explicação para que isso tenha ocorrido.

Palavras-chave: Estabilização de Solos, Matéria Orgânica, Resistência à Compressão Simples, Cal hidratada, Cimento Portland.

ABSTRACT

This article presents a study on the chemical stabilization through the mixture of Portland cement and hydrated lime in a sand-silty sedimentary soil. In addition to the presence of organic matter in its composition, this soil has a low carrying capacity under natural conditions, being little suitable from a geotechnical point of view. The viability of using hydrated lime (CH-I) and Portland cement (CP II-Z 32) to increase soil resistance was evaluated. For this, specimens of mixtures between soil and hydrated lime and soil and cement were compacted under optimum humidity. These were subjected to simple compressive strength tests at 7, 14 and 28 days of age (curing time). The natural chemical characteristics of the soil were also evaluated through X-ray diffraction and X-ray fluorescence. The results show resistance gains proportional to the increases in stabilizing agent, but much lower than those verified by other authors in similar studies. In addition, it was found that the resistances decreased after seven days of curing for lime and from 14 days for cement, with the formation of expansive compounds due to the presence of calcium carbonate in the soil a possible explanation for this. has occurred.

Keywords: Soil Stabilization, Organic Matter, Resistance to Simple Compression, Hydrated Lime, Portland Cement.

1 INTRODUÇÃO

A estabilização química de um solo é necessária quando o solo em seu estado natural não é capaz de garantir uma capacidade de suporte adequada ou quando há custos elevados para se obter bons resultados. Esses custos elevados podem ocorrer, por exemplo, devido ao transporte de um novo material mais adequado para a base de um pavimento, ou quando são necessárias estacas profundas para atender um projeto de baixo orçamento que contém um solo com baixa capacidade de suporte. (CONSOLI et al. 2007).

Esta técnica tem sido muito empregada e estudada na geotecnia e consiste em adicionar um aglomerante ao solo natural para elevar sua resistência. Dois dos aglomerantes mais empregados são o cimento Portland e a cal hidratada, visto que são facilmente encontrados e apresentam, de um modo geral, bons resultados com baixos teores.

A principal diferença entre o cimento e a cal hidratada é que o cimento passa por uma reação primária de hidratação (SALES, 1998), sendo a estabilização com cimento eficiente em solos arenosos. A cal, ao reagir, desencadeia um processo de troca catiônica com o gás carbônico do ar, que é mais eficiente em solos argilosos (BENETTI, 2015).

Solos sedimentares são formados por acumulação de partículas minerais resultantes do intemperismo e desintegração das rochas, sendo transportados até o local de deposição (LEON, 2018). Segundo Pinto (2006), o comportamento destes solos se baseiam nas forças transmitidas pelas partículas nos contatos e pelo atrito mobilizado. Além disso, as propriedades de deformabilidade e resistência são resultantes de escorregamento e rolagem entre as partículas.

A presença de matéria orgânica prejudica o ganho de resistência do solo. Rico e Castillo (1977) mostram que, para uma argila siltosa com 12% de cal, a resistência diminui quanto maior for o teor de matéria orgânica. A perda de resistência também é observada na presença de sulfatos no solo, em que há a formação de compostos expansivos e, assim, prejudicam o ganho de resistência do solo, como mostra Bhattacharja et al. (2003).

Desta maneira, o objetivo deste estudo é avaliar a influência do emprego de cimento Portland (CP II-Z 32) e cal hidratada (CH-I) para a estabilização química de um solo areno-siltoso com matéria orgânica que ocorre em área planas do litoral norte de Santa Catarina.

2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental foi dividido em duas partes. Na primeira parte foram caracterizadas as propriedades geotécnicas dos materiais e testes de pH também foram realizados a fim de determinar a acidez das misturas pelo método de Eades e Grim (1966). A segunda parte compreendeu a execução de ensaios de resistência à compressão simples em corpos de prova compactados de misturas solo-cal e solo-cimento.

2.1 MATERIAIS

O solo estudado foi retirado manualmente a 80 centímetros da superfície de uma área localizado na região de Araquari, norte de Santa Catarina. Segundo Neckel (2017), o solo é classificado como não plástico e tem massa específica real dos grãos igual a 2,582 g/cm³. Este valor indica a presença de matéria orgânica na composição do solo.

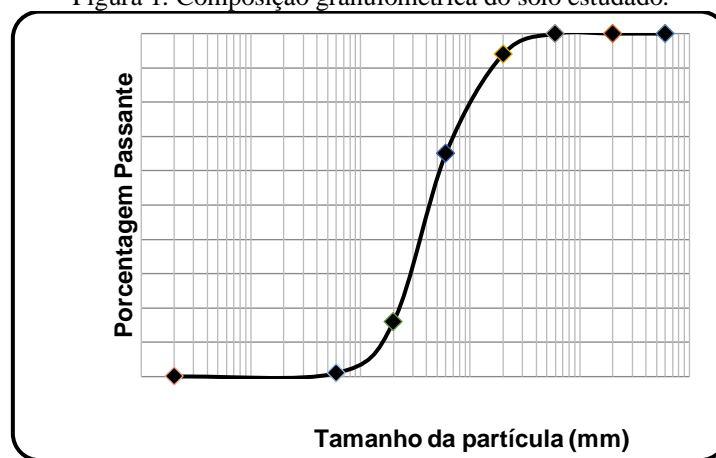
Apesar de sua natureza arenosa, o solo apresenta coloração escura, especialmente quando úmido, indicando matéria orgânica em sua composição. Pequenas quantidades de raízes também podem ser encontradas no solo, principalmente quando amostrados perto da superfície.

Quando visível a olho nu, tais restos vegetais foram removidos das amostras anteriormente à preparação dos corpos de prova.

Em termos de granulometria, o solo é caracterizado como arenoso. A curva granulométrica é mostrada na Figura 1.

Apesar da textura arenosa, tipicamente relacionada a um desempenho geotécnico melhor que o das argilas sedimentares, este material apresentou valores nulos de CBR em amostras compactadas sob densidade seca máxima e umidade ótima estabelecida em ensaios Proctor sob energia normal.

Figura 1. Composição granulométrica do solo estudado.



Cimento Portland composto por pozolana (CP II-Z 32) e cal hidratada tipo I (CH-I) são os agentes cimentantes utilizados nesta pesquisa. Este tipo de cimento difere dos demais porque sua composição inclui material pozzolânico (entre 6% e 14% em massa) com clínquer e sulfato de cálcio. A densidade real do CP II-Z-32 foi definida (de acordo com o fabricante) como 3,150 g/cm³. A cal hidratada tipo I é a cal mais pura encontrada no mercado e sua densidade real foi definida como 2,586 g/cm³ de acordo com o fabricante.

A determinação da umidade ótima e da densidade seca, para as energias normal e modificada de compactação, foi conduzida de acordo com os procedimentos descritos na ASTM D698 (2015) e ASTM D1557 (2015). Para o solo (REF) a umidade ótima determinada é de 17,6% e 16,5% para as energias normal e modificada, respectivamente, e a densidade seca é de 1,58 gf/cm³ e 1,70 gf/cm³, respectivamente.

2.2 MOLDAGEM E CURA DOS CORPOS DE PROVA

Para a determinação da resistência à compressão simples, foram moldados corpos de prova compactados de solo-cimento e solo-cal. Para isto utilizou-se moldes cilíndricos bipartidos de PVC com 10 cm de altura e 4,8 cm de diâmetro interno.

Para a dosagem das misturas procurou-se manter constante a porosidade dos corpos de prova para todos os teores de cal e cimento testados. Assim, nesta pesquisa não foram avaliados os efeitos decorrentes da mudança da estrutura que são ocasionadas quando se altera a densidade do material. O valor da porosidade foi fixado em 50% para todos os corpos de prova, resultando em densidade aparente natural de 1,55 g/cm³ e densidade aparente seca de 1,30 g/cm³, inferior portanto ao valor obtido nos ensaios proctor com energia normal no solo puro (REF). O teor de umidade desses corpos de prova foi fixado para ser igual à umidade ótima obtida no ensaio de Proctor normal para o solo natural (17,6%). Fixar estas variáveis torna possível comparar e avaliar os exclusivamente os efeitos decorrentes da adição de cal e cimento ao solo estudado.

O solo utilizado na moldagem das amostras foi seco em estufa a 60°C por um período mínimo de 24 horas. Por ser um solo com matéria orgânica é importante que o solo não ultrapasse os 100°C para não haver perda de suas propriedades devido a queima da matéria orgânica.

Foram empregadas adições/substituições de cimento e cal hidratada, em teores de 3% e 13%, em volume. As quantidades dos materiais empregados na moldagem dos corpos de prova estão na Tabela 1 (misturas com cal) e Tabela 2 (misturas com cimento).

TABELA 1. COMPOSIÇÃO DOS CORPOS DE PROVA DE MISTURAS DE SOLO E CAL

Teor de cal	W solo (gf)	W cal (gf)	W água (gf)
3%	226,81	6,81	41,12
5%	222,49	11,14	41,12
7%	218,33	15,31	41,12
9%	214,32	19,32	41,12
11%	210,46	23,19	41,12
13%	206,74	26,92	41,12

TABELA 2. COMPOSIÇÃO DOS CORPOS DE PROVA DE MISTURAS DE SOLO E CIMENTO

Teor de cimento	W solo (gf)	W cal (gf)	W água (gf)
3%	226,81	8,3	41,38
5%	222,49	13,57	41,55
7%	218,33	18,65	41,71
9%	214,32	23,53	41,86
11%	210,46	28,24	42,01
13%	206,74	32,79	42,16

Para a mistura, o solo e o agente cimentante foram adicionados primeiro. Em seguida, a água) até que a homogeneização fosse alcançada. Em seguida, a mistura foi separada em três partes iguais e armazenada em três recipientes cobertos para evitar perda de umidade antes da compactação. O material foi depositado no cilindro de PVC em três camadas de mesma altura, sendo o topo de cada camada escarificado para um melhor contato entre elas. O tempo necessário para misturar e compactar foi sempre inferior a 30 minutos.

A compactação foi realizada de modo estático, em uma prensa hidráulica. Os corpos de prova foram imediatamente desmoldados e o peso e a altura final foram verificadas. Corpos de prova que apresentaram variações de altura e diâmetro de até $\pm 0,1$ cm e variações de peso de até $\pm 1\%$ do peso total esperado foram considerados aceitáveis.

Optou-se por não conduzir a pesquisa com base em corpos de prova compactados em ensaios proctor porque a compactação realizada em campo é tipicamente estática (ao menos na área estudada) e não ocorre da mesma forma que em ensaios Proctor, em laboratório (dinâmica).

Foram moldados três corpos de prova para cada agente cimentante (3%, 5%, 7%, 9%, 11% e 13%, em volume), tempo de cura (7, 14 e 28 dias) e cada agente cimentante (cal e cimento), resultando em 108 corpos de prova.

Posteriormente, os corpos de prova foram acondicionados em caixas seladas com umidade suficiente para hidratação, até atingirem os tempos de cura de 7, 14 e 28 dias.

2.3 ANÁLISES QUÍMICAS

A caracterização da composição química do solo estudado foi realizada por meio de difratometria de raios X e fluorescência de raios X, utilizando amostras naturais do solo estudado. Ambas as análises foram realizadas no Laboratório de Cerâmica (LACER), da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

2.4 DETERMINAÇÃO DO PH

Eades e Grim (1966) desenvolveram um método para determinação do pH das misturas de solo, cal e água (não sendo aplicável ao cimento). A justificativa para esta análise se deve ao fato de a cal ter uma alcalinidade muito alta e, quando em solução, ataca os silicatos (especialmente das argilas) liberando sílica e alumina com as quais o cálcio reage para formar silicatos de cálcio.

O método consiste em realizar a mistura de 20 gramas de solo seco e 150 ml de água, aos quais são adicionadas quantidades de cal variando entre 2% e 6% em incrementos de 1%. Após uma hora, quando as trocas iônicas são completadas, o pH destas soluções são medidos e a quantidade mínima de cal que fornece uma leitura de pH de 12,4 é considerada adequada para a estabilização do solo (é permitida uma quantidade adicional de cal caso o pH necessário não seja alcançado com 6%) pois com esse pH a mistura garante a quantidade de cálcio disponível no sistema.

Os autores comentam que mesmo a mistura tendo alcançado o pH desejado, é necessário um teste de resistência para confirmação antes de sua aplicação na prática. Para esta pesquisa, foram realizados três ensaios para a medição do pH, os quais:

- 20 gramas de solo seco + 150 ml de água destilada;
- 20 gramas de solo seco + 150 ml de água destilada + 13% de cimento.

Duas observações devem ser feitas. A primeira é que mesmo não sendo aplicável ao cimento, o teste foi realizado para a título de comparação com a mistura com cal. A segunda observação é que foram adotados valores maiores de teores de cal e cimento do que o estipulado inicialmente por Eades e Grim (1966), que consideram adotar teores entre 2% a 6%. O objetivo foi estimar o pH dos teores de cal e cimento máximos utilizados no ensaio de resistência à compressão simples (13%), uma vez que mesmo as resistências obtidas nos ensaios sob esse teor não foram satisfatórias.

Para a determinação do pH, foi utilizado um indicador universal de pH, capaz de medir valores entre 1 e 14.

2.5 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

Ensaio de compressão simples foram empregados para verificar os ganhos de resistência à compressão que os agentes cimentantes forneceram ao solo. A ruptura ocorre devido à

aplicação da tensão axial na amostra, não havendo tensão de confinamento e respeitando as recomendações da norma ASTM C39.

Para o ensaio de compressão simples, utilizou-se anel dinamométrico construído em nylon com capacidade para 400 N (300 kPa) e precisão de 0,6 N (0,45 kPa). Os corpos de prova foram submetidos a deformações axiais de até 10%. Antes do teste, os corpos de prova foram novamente pesados para determinar a umidade após a cura. Corpos de prova de todos os tipos de misturas mostram a mesma aparência quando úmidas não apresentando diferenças visuais distinguíveis.

3 RESULTADOS

3.1 DETERMINAÇÃO DO PH

O pH encontrado para o solo natural ($\text{pH} = 5$) indica que as reações de hidratação não seriam bem sucedidas neste solo. Robbins e Mueller (1960) apud Nuñez (1991) argumentam que solos arenosos com pH abaixo de 5,3 normalmente não reagem com o cimento, embora o pH não seja indicativo de baixa reatividade de areia para a estabilização do cimento.

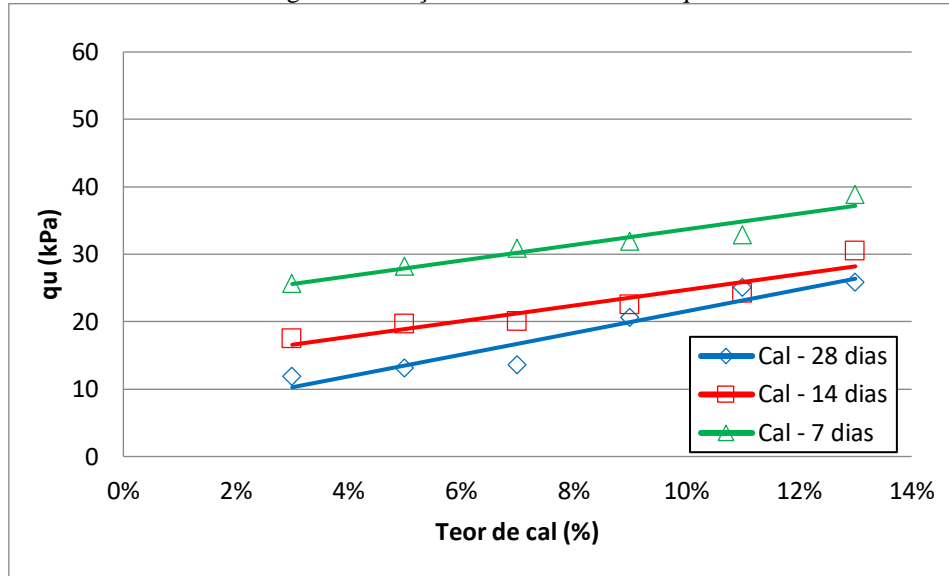
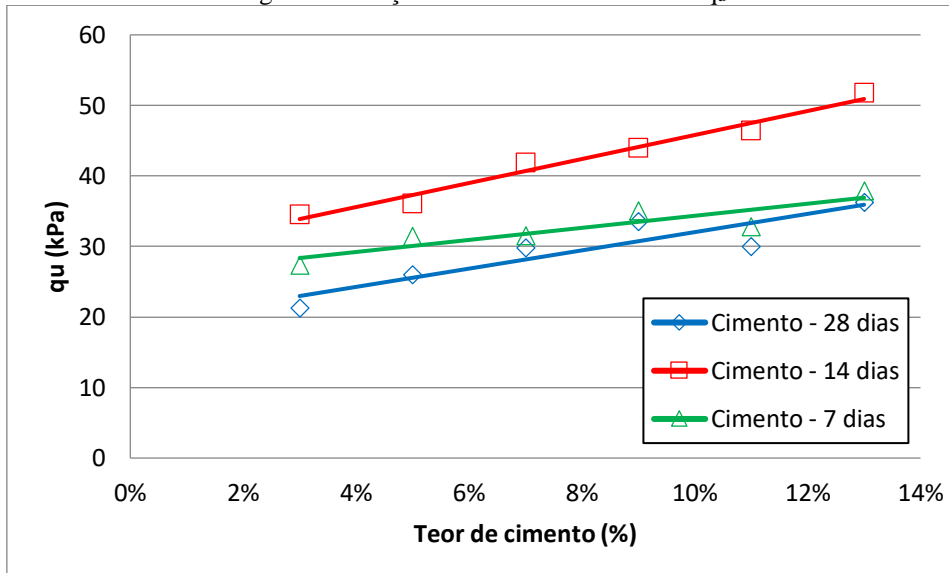
Medidas de pH indicam valores próximos a 9 para soluções de solo com 13% de cal ou com 13% de cimento. De acordo com o método de Eades e Grim (1966) não seria possível estabilizar este solo com esse teor de cal, ou menos, já que o valor do pH é inferior a 12,4. Isso foi verificado também por resultados de ensaios de resistência à compressão simples mostrados posteriormente.

3.2 ANÁLISES DE DIFRAÇÃO DE RAIOS-X E FLUORESCÊNCIA

As análises de difração de raios-X e fluorescência mostram que este solo é composto principalmente por quartzo (SiO_2), correspondendo a 70 a 75% da composição do mesmo. O teor de matéria orgânica é de 18%. Calcita (CaCO_3) também ocorre neste material e representa cerca de 10%. Poucos vestígios de sal (NaCl) também foram encontrados, o que pode ser considerado normal, já que esta área está localizada perto do mar.

3.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

A Figura 2 mostra os valores médios de resistência à compressão simples (q_u) obtidos para misturas solo-cal após diferentes tempos de cura. Observou-se que a resistência à compressão simples aumentou linearmente com o aumento do teor de cal. O mesmo é observado no solo-cimento, segundo os dados da Figura 3.

Figura 2. Relação entre o teor de cal e q_u .Figura 3. Relação entre o teor de cimento e q_u .

Ao observar as figuras 2 e 3 pode-se afirmar que a resistência à compressão aumenta em função direta à quantidade de material aglomerante empregado. Para um mesmo tempo de cura, sete dias por exemplo, os ganhos de resistência seguem uma tendência linear, tanto para o cimento como para a cal, mas a estabilização com cimento resulta em um comportamento geotécnico um pouco melhor.

No entanto, pode-se observar que houve perdas em termos de resistência à compressão não confinada após sete dias de cura, no caso de misturas solo-cal, e 14 dias para misturas solo-cimento. Aconteceu para todos os teores de cal e cimento, como mostrado nas Figuras 4 e 5.

Assim, para o solo tratado com cal, as maiores resistências ocorreram aos sete dias, diminuindo com o tempo até o 28º dia de cura. Para misturas solo-cimento, a perda de

resistência ocorreu após os 14 dias de cura, sendo os valores de q_u para 28 dias menores do que aqueles medidos após 7 dias de cura.

Figura 4. Relação entre q_u , teor de cal e tempo de cura.

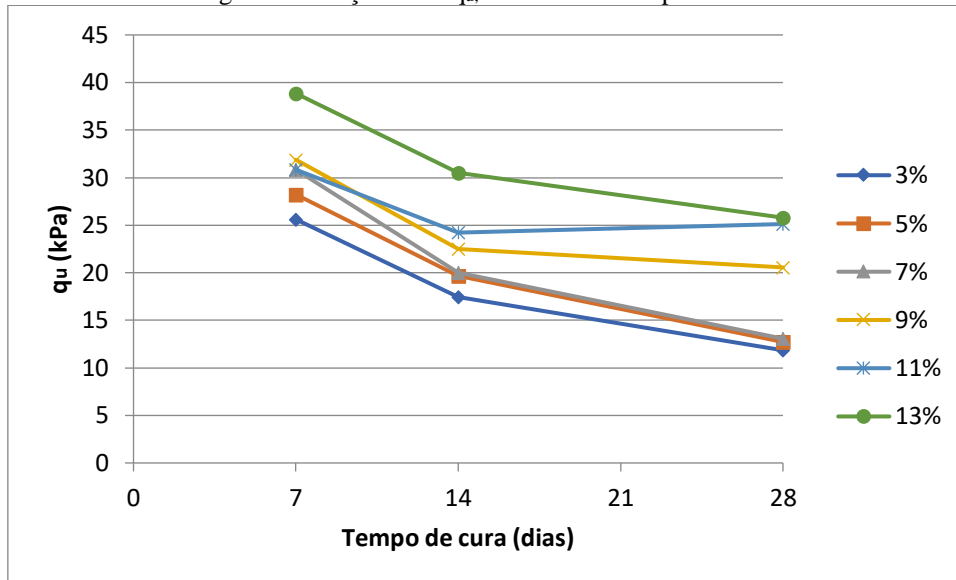
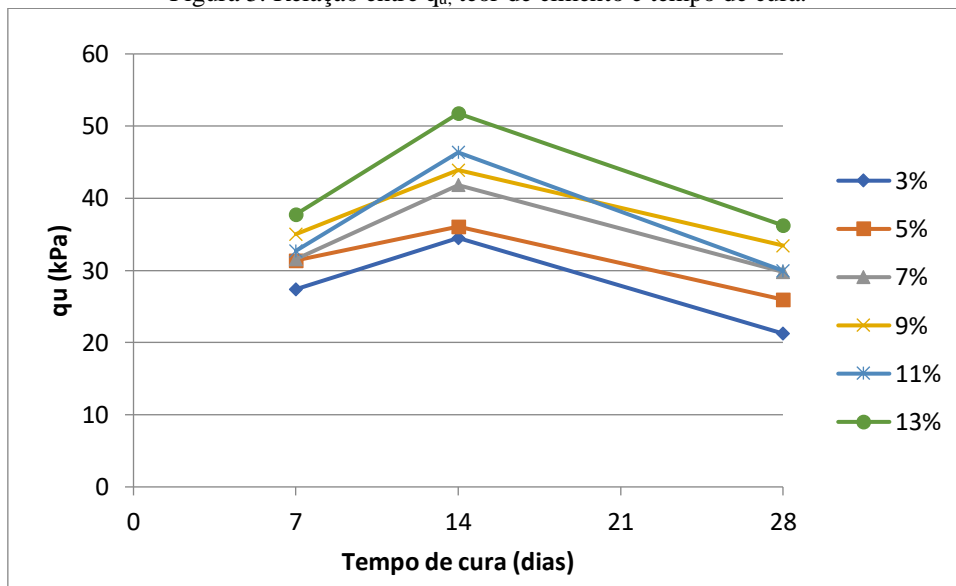


Figura 5. Relação entre q_u , teor de cimento e tempo de cura.



A perda de resistência com o tempo de cura em misturas solo-cal também foi relatada por Lovato (2004). Nesse caso, o autor sugere que a presença de compostos expansivos (por exemplo, etringita e taumasita) podem ter contribuído para a diminuição da resistência. No caso de amostras de solo de cimento, as reações de hidratação resultaram em ganhos de resistência de até 14 dias de cura, seguidas pela formação de compostos expansivos formados a partir de sulfatos no solo.

A dissociação do CaCO_3 em CO_3^{2-} é responsável pela transformação da etringita em taumasita, compostos expansivos que prejudicam os ganhos de resistência, da mesma forma que os sulfatos (BHATTACHARJA et al., 2003). No caso de Lovato (2004), esses compostos foram justificados como possivelmente responsáveis pela queda na resistência ao longo do tempo de cura. Contudo, não foram verificadas mudanças nas dimensões do corpo-de-prova (precisão de 0,1 cm).

Apesar dos ganhos de resistência decorrentes da adição de cal e, principalmente, do cimento, os valores de q_u medidos são considerados baixos se comparados com outros trabalhos encontrados na literatura, como Consoli et al. (2007), Nunez (1991), Foppa (2005) e Cruz (2008). Isso provavelmente ocorre devido à presença de matéria orgânica que prejudica a reação de cal e cimento com o solo.

Por não terem sido submersos devido à fragilidade, deve-se considerar que uma porcentagem da resistência seja decorrente da sucção.

3.4 RELAÇÃO VAZIOS/CIMENTO E VAZIOS/CAL

As Figuras 6 e 7 mostram a relação vazios/cimento expressa em termos de porosidade (η) e teor volumétrico de cal e de cimento (C_{iv}), respectivamente, em comparação com a resistência à compressão não confinada (q_u). Segundo Consoli et al. (2007), é adequado o emprego de um expoente de ajuste na relação e η/C_{iv} . As equações que governam cada curva são apresentadas nos próprios gráficos.

Figura 6. Relação entre q_u e η/C_{iv} para solo-cal, considerando um expoente de ajuste de 0,28.

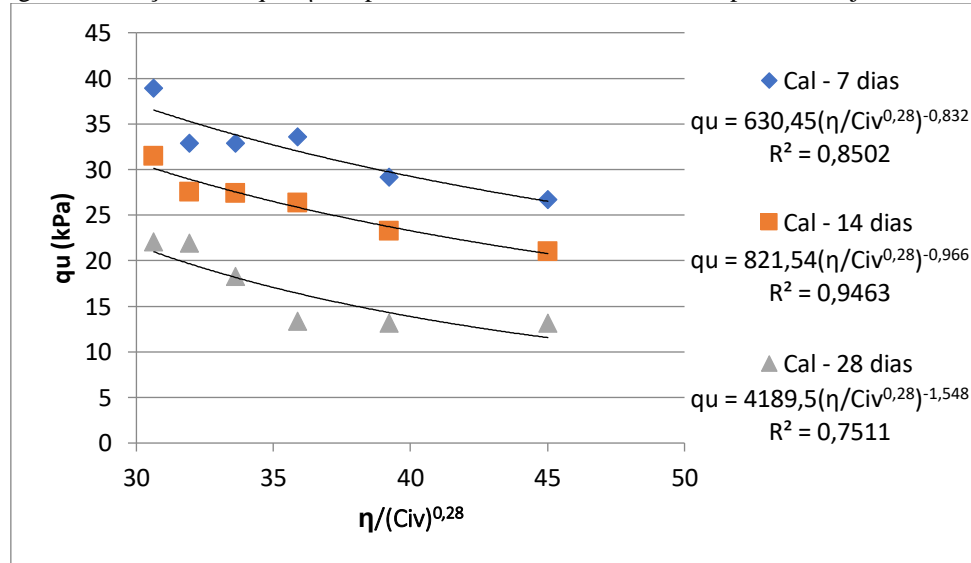
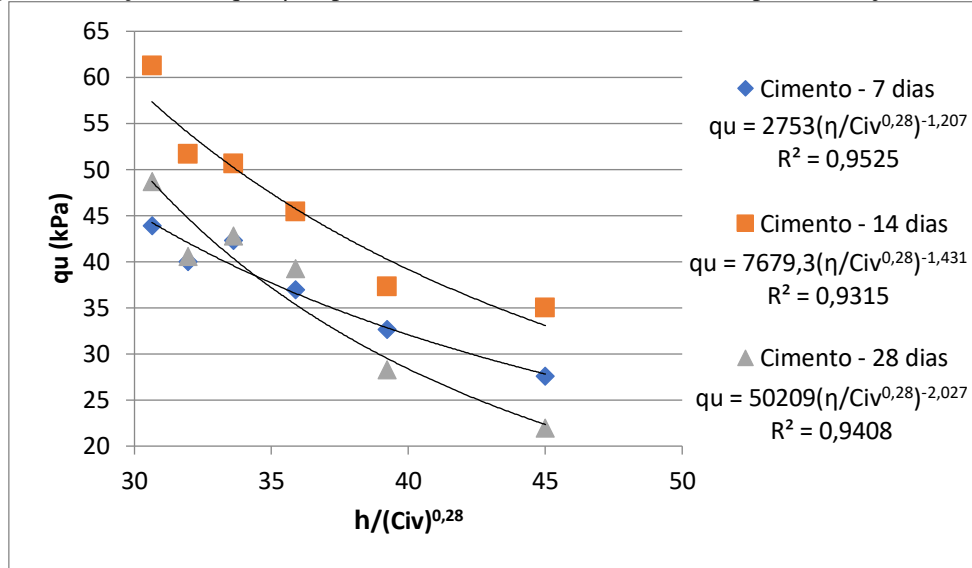


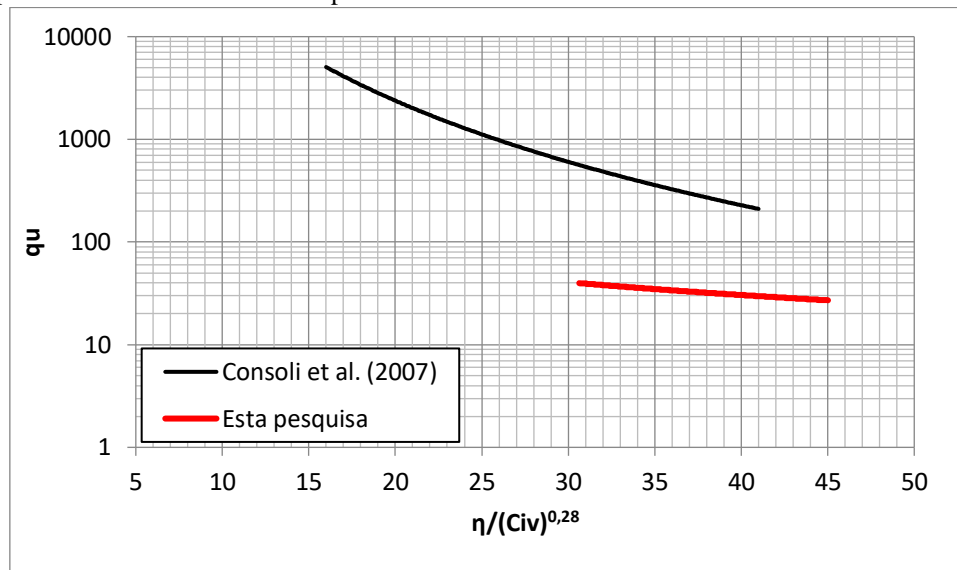
Figura 7. Relação entre q_u e η/C_{iv} para solo-cimento, considerando um expoente de ajuste de 0,28.

O mesmo expoente do denominador utilizado por estes autores (0,28) foi aqui aplicado para fins de comparação. As curvas obtidas não são tão acentuadas quanto as relatadas por Consoli et al. (2007), como mostra a Figura 8. Estes autores trabalharam com porosidades diferentes, possibilitando cobrir o termo $\eta/(C_{iv})^{0,28}$ para valores entre 16 e 42 (quanto menor o valor de $\eta/(C_{iv})^{0,28}$ mais acentuada é a curva).

Nesta pesquisa, o intervalo de $\eta/(C_{iv})^{0,28}$ abrangido foi menor, entre 30 e 45, porque a porosidade foi mantida constante, fazendo com que o termo $\eta/(C_{iv})^{0,28}$ varie apenas devido ao teor volumétrico do cimento. A Figura 8 compara os resultados desta pesquisa com os obtidos por Consoli et al. (2007), onde q_u é mostrado em escala logarítmica, devido à grande diferença entre as resistências obtida em ambas as pesquisas.

Consoli et al. (2007) obtiveram uma curva mais acentuada que esta pesquisa, mostrando que o solo utilizado pelos autores (areia argilosa) apresenta maiores ganhos de resistência, seja em função da diminuição da porosidade ou do aumento do teor volumétrico do agente cimentantes. É importante ressaltar que no estudo de Consoli et al. (2007), o cimento utilizado foi o CP V-ARI, que permite maiores ganhos iniciais de resistência.

Figura 8. Comparação entre a curva $\eta/(C_{iv})^{0,28}$ versus η obtida por Consoli et al. (2007) e nesta pesquisa em corpos de prova de solo-cimento curados por sete dias.



4 CONCLUSÕES

4.1 INFLUÊNCIA DA QUANTIDADE DE AGENTE CIMENTANTES

Verificou-se que a quantidade de agente cimentante controla o aumento de resistência das misturas solo-cal e solo-cimento. Entretanto, as resistências medidas são baixas se comparadas aos resultados obtidos por outros autores (como Consoli et al. 2007), que para os mesmos teores obtiveram resistências que excedem 1 MPa.

Neste trabalho a maior resistência foi de 51,75 kPa para uma mistura de 13% de cimento e solo, após 14 dias de cura. Fatores como a presença de matéria orgânica e a presença de calcita (CaCO_3) justificam esses baixos ganhos de resistência. Como os corpos de prova não foram submersos antes do ensaio, deve-se levar em consideração que a sucção é responsável por parte dessas resistências.

A partir dos resultados obtidos, este solo, mesmo que estabilizado, não poderia ser usado como camadas estruturais de pavimentos, uma vez que a Norma Brasileira NBR 12253 (2012) define que para tal deve-se atingir uma resistência mínima de 2,1 MPa após 7 dias de cura.

4.2 INFLUÊNCIA DO TEMPO DE CURA

Ambas as misturas sofreram queda de resistência ao longo do tempo. Quedas foram observadas em misturas de solo-cal a partir de 7 dias de cura e em misturas de solo-cimento a partir de 14 dias de cura. Isso ocorreu, provavelmente, devido à presença de carbonato de cálcio (CaCO_3) que reagiu com a fração de siltes do solo e gerou compostos expansivos nos corpos de

prova. Estes compostos podem prejudicar o ganho de resistência por danificar a estrutura do solo gerada pela cimentação.

4.3 RELAÇÃO VAZIOS/CIMENTO E VAZIOS/CAL

É possível determinar de forma razoável a relação entre a resistência, a porosidade e o teor de agente cimentante para o intervalo de $\eta/(C_{iv})$ abordado nesse trabalho. Por outro lado, observa-se que, tanto para as misturas solo-cimento como solo-cal não são alcançadas altas resistências. Porosidades mais baixas ou um teor muito alto de cal ou cimento seriam necessários para alcançar altas resistências, mas isso pode tornar a solução inviável economicamente.

4.4 DETERMINAÇÃO DO PH

Utilizando o método desenvolvido por Eades e Grim (1966) observou-se que o solo em seu estado natural apresentou um pH em torno de 5, o que caracteriza um solo ácido, não contribuindo para a liberação de íons OH necessários à estabilização. A presença de matéria orgânica é responsável pela acidez da solução.

O pH para soluções compostas por 13% de cal e cimento é próximo de 9, o que mostra que as adições contribuíram para a liberação de íons OH na solução, característica das reações envolvendo cal e cimento. No entanto, esses valores de pH não são suficientes para a estabilização do solo de acordo com o método de Eades e Grim (1966), que sugere que um pH mínimo de 12,4 deve ser atingido para as reações em misturas solo-cal.

4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O solo, mesmo com adições de cal e cimento em proporções de até 13% (em volume), não é satisfatoriamente estabilizado por não alcançar níveis de resistência suficientes. O aumento da densidade da mistura compactada pode conduzir a resultados mais satisfatórios, assim como o uso de teores de agente cimentante ainda mais elevados, mas a degradação da resistência ao longo do tempo de cura mostra-se um impedimento para o uso deste solo em obras de infraestrutura.

REFERÊNCIAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2002). NBR 12253: Solo-cimento – Dosagem para emprego como camada de pavimento. 7 p.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2007). NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de Corpos de prova cilíndricos. 8 p.

ASTM International (2017). ASTM C39 Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens. 8 p.

ASTM International (2006). ASTM D2166: Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil. 6 p.

ASTM International (2015). ASTM D698: Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort (12,000 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³)). 13 p.

ASTM International (2015). ASTM D1557: Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort (56,000 ft-lbf/ft³ (2,700 kN-m/m³)). 14 p.

Benetti, M. (2015). Comportamento hidráulico e mecânico de um solo residual tratado com cal. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. 110 p.

Bhattacharja, S., Bhatta, J.I., Todres, H.A. (2003). Stabilization of clay soils by Portland cement or lime – A critical review of literature. Portland Cement Association, PCA R&D Serial No. 2066. 60 p.

Consoli, N.C., Foppa D., Festugato, L., Heineck, K.S. (2007). Key parameters for strength control of artificially cemented soil. American Society of Civil Engineers, ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 133(2) 197-205.

Cruz, R.C. (2008). Influência de parâmetros fundamentais na rigidez, resistência e dilatação de uma areia artificialmente cimentada. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. 216 p.

Eades, J.L., Grim, R.E. (1966). A quick test to determine requirements for lime stabilization. Highway Research Record. 139 p.

Foppa, D. (2005). Análise de variáveis-chave no controle da resistência mecânica de solos artificialmente cimentados. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. 143 p.

Leon, H.B. (2018). O índice porosidade/teor volumétrico de cimento $\eta/(Civ)$ como um parâmetro de estado para areias cimentadas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. 135 p.

Lovato, R.S. (2004). Estudo do comportamento mecânico de um solo laterítico estabilizado com cal, aplicado à pavimentação. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. 144 p.

Neckel, G. (2017). Dimensionamento e análise numérica de estruturas de pavimento asfáltico aeroportuário. Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas. 387 p.

Nunez, W.P. (1991). Estabilização físico-química de um solo residual de arenito Botucatu, visando seu emprego na pavimentação. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. 150 p.

Pinto, C.S. (2006). Curso básico de mecânica dos solos. Oficina de textos: São Paulo, 3ª ed, 363 p.

Prietto, P.D.M. (1996). Estudo do comportamento mecânico de um solo artificialmente cimentado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. 150 p.

Rico, A., Castillo, H. (1977). La Ingeniería de suelos em las vías terrestres: carreteras, terrocarriles y aeropistas. Limusa, Mexico, 643 p.

Sales, L.F.P. (1998). Estudo do comportamento de fundações superficiais assentes em solos tratados. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. 129 p.

Teixeira, B.S. (2014). Resistência de solos moles orgânicos artificialmente cimentados. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. 186 p.