



Análise do comportamento de um solo sedimentar orgânico estabilizado com cal hidratada e cimento

Aziz Tebechrani Neto

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, aziztneto@gmail.com

Marcelo Heidemann

Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, Brasil, marcelo.heidemann@ufsc.br

Helena Paula Nierwinski

Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, Brasil, helena.paula@ufsc.br

Breno Salgado Barra

Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, Brasil, breno.barra@ufsc.br

Yader Afonso Guerrero Pérez

Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, Brasil, guerrero.y@ufsc.br

RESUMO: Este artigo apresenta um estudo sobre a estabilização físico-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. Para a campanha experimental foram moldados corpos de prova com teores volumétricos de cimento e cal hidratada entre 3% e 13% e com o solo em sua umidade ótima. Depois, estes foram rompidos em compressão simples aos 7, 14 e 28 dias de cura. Os resultados mostram ganhos de resistência lineares, 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.

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 no solo natural para elevar sua resistência. Dois dos aglomerantes mais



utilizados são o cimento Portland e a cal hidratada, por serem facilmente encontrados e apresentarem, 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, que é mais eficiente em solos argilosos (BENETTI, 2015). No caso desta pesquisa, previu-se que o solo reagisse melhor com o cimento, uma vez que este é um solo sedimentar areno-siltoso.

Os 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).

O objetivo deste estudo é, portanto, avaliar quanto ao aumento de resistência, a eficiência de misturas de cal hidratada e cimento para a estabilização de um solo areno-siltoso com matéria orgânica que ocorre em áreas planas do litoral norte de Santa Catarina.

2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental foi dividido em duas partes. Na primeira foram caracterizadas as propriedades geotécnicas dos materiais e na segunda foram realizados ensaios de resistência à compressão simples. Testes de pH também foram realizados a fim de determinar a acidez das misturas pelo método de Eades e Grim (1966).

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.

As propriedades físicas do solo estudado são apresentadas em Neckel (2017). Este 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. Em termos de granulometria, o solo é caracterizado como arenoso. Sua curva granulométrica é mostrada na Figura 1.

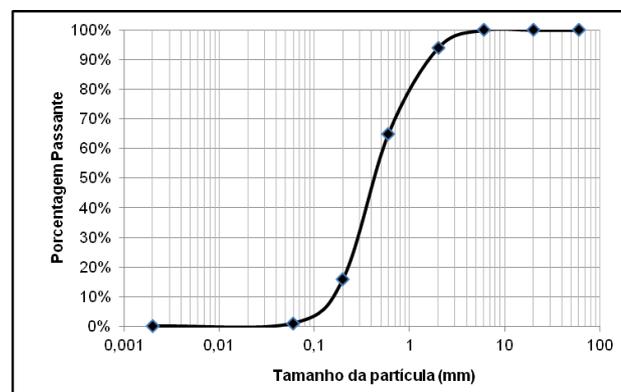


Figura 1. Composição granulométrica do solo estudado.

Apesar de sua natureza arenosa, o solo apresenta coloração escura, especialmente quando úmido, o que é uma indicação de que há matéria orgânica em sua composição. Pequenas quantidades de raízes também podem ser encontradas no solo, principalmente quando



amostrados perto da superfície. Raízes visíveis a olho nu foram removidas antes dos testes.

O interesse em estudar a estabilização deste material deve-se aos valores nulos de CBR medidos nas fases iniciais desta pesquisa, apesar da textura arenosa que tipicamente é relacionada a desempenho geotécnico melhor que o das argilas sedimentares. Areias, se confinadas (como ocorre nos testes CBR), geralmente apresentam valores significativos de capacidade de carga. Os resultados nulos de CBR foram medidos após testes em amostras compactadas sob densidade seca máxima e umidade ótima estabelecida em ensaios Proctor sob energia normal.

Quando compactado sob energias normal e modificada (de acordo com os procedimentos da ASTM D698 e D1557), a umidade ótima determinada é de 17,6% e 16,5%, respectivamente, e a densidade seca é de 1,58 gf/cm³ e 1,70 gf/cm³, respectivamente. O ensaio sob energia modificada em misturas de solo e 8% (em volume) de cal resultou em umidade ótima de aproximadamente 17,0% para uma densidade seca de 1,63gf/cm³ e para 8% de misturas solo-cimento a umidade ótima é de 14,8% com densidade seca de 1,71gf/cm³. As curvas de compactação obtidas são apresentadas na Figura 2.

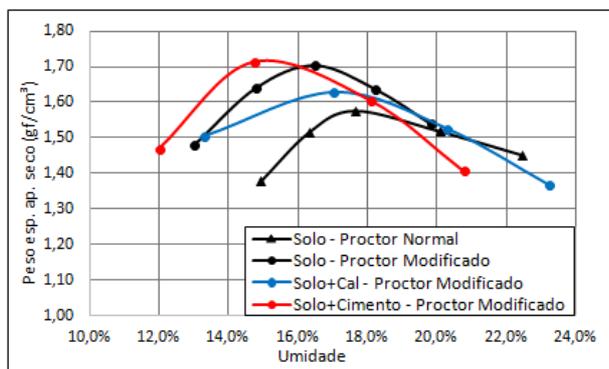


Figura 2. Curvas de compactação para o solo natural e para o solo com 8% de cal hidratada e cimento.

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.

2.2 Moldagem e Cura dos Corpos de Prova

Neste estudo foram realizados ensaios de compressão simples em corpos de prova compactados de solo-cimento e solo-cal. 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.

Para a moldagem dos corpos de prova foram utilizados moldes cilíndricos bipartidos de PVC com 10 cm de altura e 4,8 cm de diâmetro interno.

Para a dosagem 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. O teor de umidade desses corpos de prova também 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.

Optou-se por não conduzir a pesquisa com base em corpos de prova compactados em ensaios proctor porque que 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.

Depois de definir a quantidade de cada componente eles foram misturados (solo e agente cimentante foram adicionados primeiro, depois água) até que a homogeneização fosse alcançada. Após misturados, o material foi separado em três partes iguais e armazenado 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.

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. A temperatura da caixa não foi totalmente controlada, mas foram respeitadas as tolerâncias exigidas na NBR 5739 (2007). Depois de atingir o tempo de cura especificado, os corpos de prova foram submetidos a ensaios de resistência à compressão simples.

2.3 Ensaio de Resistência à Compressão Simples

Ensaio de compressão simples foram usados

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. Ensaio de resistência à compressão simples foram realizados de acordo com a norma ASTM C39. Esse teste foi utilizado porque é o mais difundido na literatura e por ser o de mais simples execução dentre os ensaios de resistência, como sugere Prietto (1996).

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 ambas as misturas mostram a mesma aparência quando úmida não sendo distinguíveis visualmente.

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.

Aqueles 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 cal;
- 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 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 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.

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 é pode ser considerado normal, já que esta área está localizada perto do mar.

3.3 Relação dos Teores de Agente Cimentantes

A Figura 3 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 4.

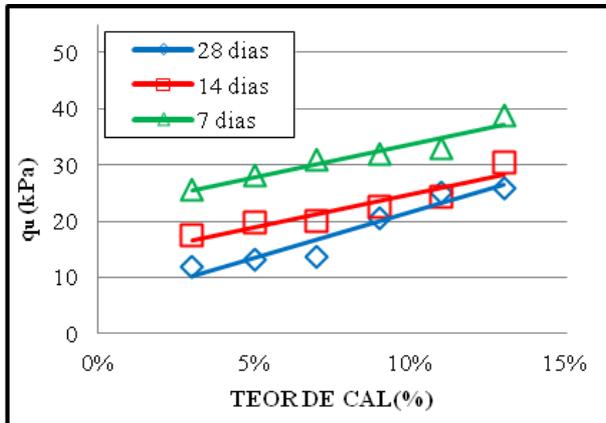


Figura 3. Relação entre o teor de cal e q_u .

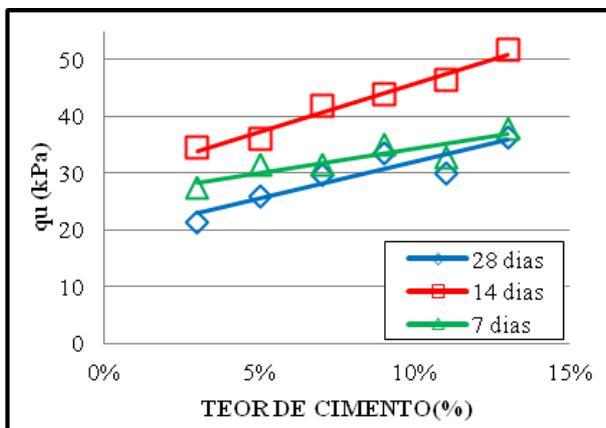


Figura 4. Relação entre o teor de cimento e q_u .

Para um tempo único de cura, os ganhos de resistência seguem uma tendência linear, tanto para o cimento como para a cal, mas a estabilização usando o 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 5 e 6.

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.

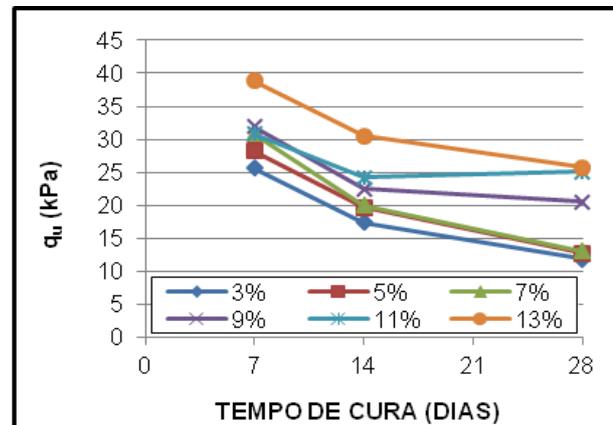


Figura 5. Relação entre q_u , teor de cal e tempo de cura.

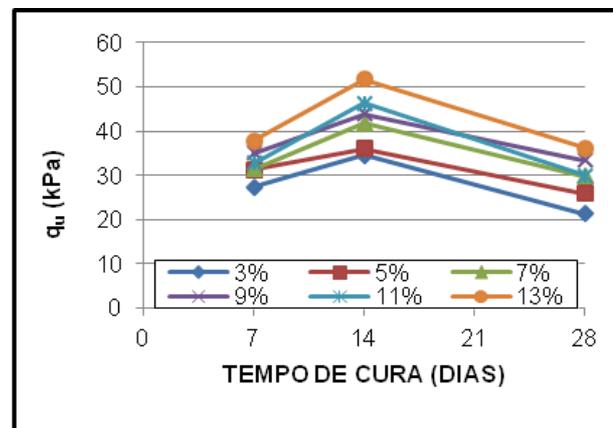


Figura 6. Relação entre q_u , teor de cimento e tempo de cura.

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-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 pode decorrer da sucção.

3.4 Relação da umidade dos corpos de prova

De acordo com a Figura 7, os corpos de prova de cal com sete dias de cura (para as quais foram obtidas as maiores resistências) tiveram o menor aumento de umidade durante a cura. Esses corpos de prova atingiram umidade média de 19% a 21% (a umidade inicial foi de 17,6%). Houve um aumento de umidade para 14 dias de cura e foi mantido aos 28 dias, onde os corpos de prova atingiram valores de umidade entre 23% e 25%.

Os corpos de prova de solo-cimento exibiram comportamento oposto aos tratados com cal em relação aos ganhos de umidade durante a cura, como mostrado na Figura 8. Os corpos de prova com 7 dias de cura mantiveram um maior teor de umidade (entre 22% e 23%). Aos 14 dias a umidade diminuiu (entre 20% e 21%) e após 28 dias de cura voltou a cair (entre 19% e 20%).

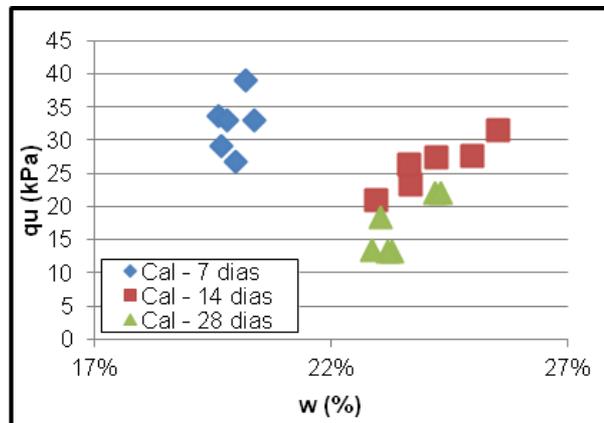


Figura 7. Relação entre umidade com a Resistência à Compressão Simples para misturas solo-cal.

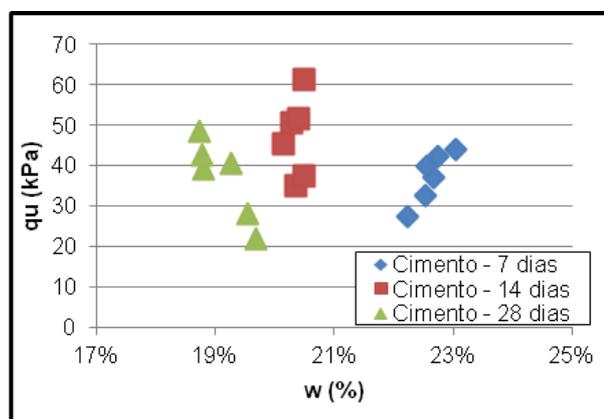


Figura 8. Relação entre umidade com a Resistência à Compressão Simples para misturas solo-cimento.

Não houve, contudo, relação clara entre a resistência à compressão simples e a umidade atingida. A matéria orgânica pode ter contribuído para isso, pois, conforme sugere Teixeira (2014), esta retém parte da água que seria utilizada para hidratação.

3.4 Relação Vazios/Cimento e Vazios/Cal

A Figura 9 e a Figura 10 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). As equações que governam cada curva são apresentadas nos próprios gráficos. Essa



maneira de expor os resultados é semelhante à utilizada por Consoli et al. (2007).

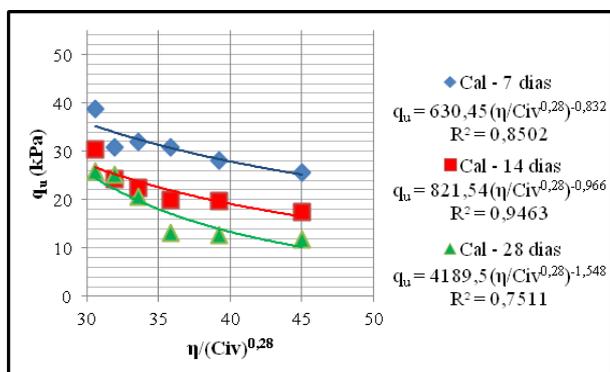


Figura 9. Relação entre q_u e η/C_{iv} para solo-cal, considerando um expoente de ajuste de 0,28.

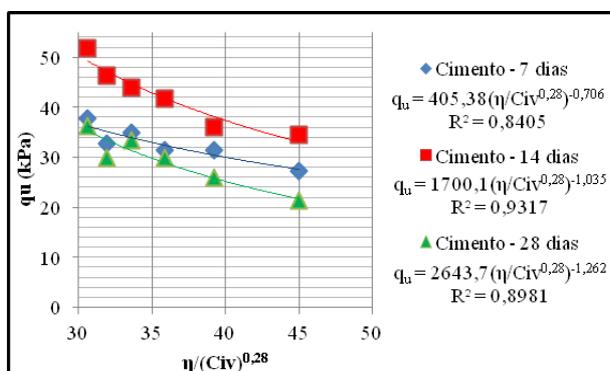


Figura 10. Relação entre q_u e η/C_{iv} para solo-cimento, considerando um expoente de ajuste de 0,28.

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 11. 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 11 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.

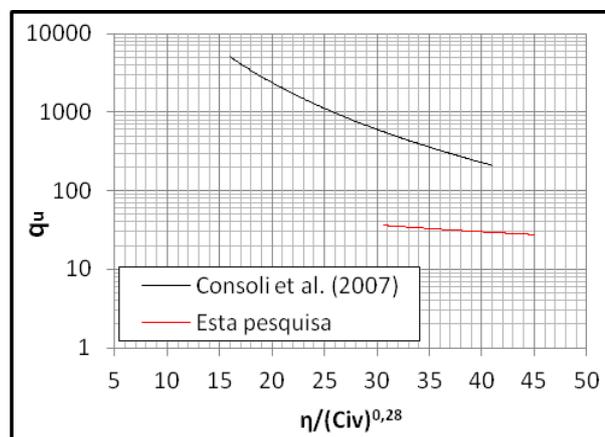


Figura 11. Comparação entre a curva obtida por Consoli et al. (2007) e a obtida nesta pesquisa por sete dias de cura em misturas solo-cimento.

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, 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 pode ser responsável por parte dessas resistências.

Este solo, mesmo tratado, não poderia ser usado como camadas estruturais de pavimentos, uma vez que a Norma Brasileira NBR 12253 (1992) 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 altas resistências. A verificação para teores maiores é válida, mas se mostra economicamente inviável. A substituição do solo atual por um com maior capacidade de suporte pode ser a melhor solução para a área estudada.

REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1992). *NBR 12253: Solo-cimento – Dosagem para emprego como camada de pavimento*. 4 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 dilatância 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 vias 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.