

ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE UM SOLO DE BAIXA RESISTÊNCIA DA REGIÃO DE CONCÓRDIA, SC, ESTABILIZADO COM CAL

Fernanda Cordeiro¹

Lucas Quiocca Zampieri²

Resumo

Na constante busca por soluções que proporcionem melhoria em solos, surgiu este estudo que apresenta a estabilização de um solo argiloso da região de Concórdia, SC, por meio de adição de cal. O solo foi submetido a ensaios de caracterização a fim de classificá-lo e determinar suas principais propriedades. A resistência das misturas foi determinada em ensaios de resistência à compressão simples (RCS) e Índice de Suporte Califórnia (ISC) em corpos de prova cilíndricos com 7 e 14 dias de cura para adições de teores de 3%, 6% e 9% de cal em relação à massa seca do solo. Os resultados demonstram que a capacidade de suporte no ensaio de ISC cresce quando também são acrescidos os teores de adição de cal para a cura aos 7 dias, e para as medidas de expansão, quanto maior o teor de adição de cal menos o solo sofre alteração de volume. Nos ensaios de resistência à compressão simples não confinada, somente as amostras com 9% de adição de cal propiciaram cimentação suficiente para o ensaio de rompimento. Os corpos de prova com 6% de adição somente apresentaram cimentação a partir dos 20 dias de cura. Partindo dessa premissa, concluiu-se que o teor de 9% de adição de cal proporcionou ao solo melhor resultado quanto à compressão simples, ISC e expansão em comparação aos outros teores avaliados, levando em consideração que para a utilização em obras a liberação dos trechos a serem estabilizados deve demandar o menor tempo possível, combinando bom desempenho e agilidade.

Palavras-chave: Solo-cal. Estabilização de solos. Índice de Suporte Califórnia. Resistência à compressão simples.

¹ Graduanda no Curso de Engenharia Civil da Universidade do Oeste de Santa Catarina de Joaçaba; fernandacdr@outlook.com

² Professor Mestre na Universidade do Oeste de Santa Catarina; lucas.zampieri@unoesc.edu.br

1 INTRODUÇÃO

Conforme relatado por Consoli *et al.* (2012), quando os solos naturais não possuem requisitos mínimos necessários para cumprir adequadamente a função a que estão destinados, uma das soluções possíveis é a alteração das suas características de maneira a melhorar os seus comportamentos, tornando-os capazes de responder de forma satisfatória às solicitações previstas.

No entanto, essencialmente, existem duas soluções do ponto de vista técnico: adaptar a estrutura ao solo por meio de diferentes tipos de fundações ou, então, adaptar o solo para as novas necessidades.

Por conseguinte, a necessidade de utilização de aditivos químicos para o melhoramento das características desses solos vem com a vantagem de utilizar o material disponível no local da obra sem que necessite de transporte de base rígida para a substituição dessas camadas instáveis.

Em decorrência da fragilidade do solo, um dos fatores primordiais para a determinação da técnica a ser utilizada para a estabilização dos solos é a condição ambiental, sendo compromisso do profissional da engenharia civil harmonizar os fatores do meio ambiente com as técnicas econômicas requerentes do projeto.

O estudo foi realizado com um solo argiloso proveniente de uma obra de pavimentação na região de Concórdia, SC. Assim, quando melhoradas as propriedades

físicas do solo, também ocorre um aumento na sua capacidade de resistência.

O presente trabalho teve os seguintes objetivos específicos: avaliar o comportamento do solo (resistência à compressão simples, ISC) com e sem cal; analisar o comportamento da expansão do solo com adições de três teores de cal para os tempos de cura de 7 e 14 dias; definir qual teor de adição proporciona melhor resultado; quantificar a influência isolada de cada uma das variáveis de interesse (teor de cal e tempo de cura) quanto à resistência à compressão simples do solo-cal em estudo.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Em obras rodoviárias linearmente extensas são frequentemente encontrados terrenos de natureza e características diferentes, e, sobretudo à terraplanagem, sucedem-se trechos em aterro e trechos em escavação, visto que, quando se variam as profundidades, também ocorre a variação nos tipos de solos encontrados, exigindo um cuidadoso estudo geotécnico da região (BRANCO; PEREIRA; SANTOS, 2008).

Um solo estabilizado é aquele que passou por aplicações de processos e técnicas cujo objetivo era a melhoria de suas propriedades mecânicas, como aumento da resistência, rigidez, durabilidade, deformabilidade e permeabilidade (INGLES; METCALF, 1972).

Sales (1998) afirma que o termo melhoria se dá ao tratamento de um

maciço natural, onde, por meio de algum procedimento, pretende-se obter aumento da resistência no solo tratado. Com isso, o resultado da estabilização é um novo material geotécnico, com propriedades individuais capazes de preencher de maneira adequada as exigências de sua utilização.

A melhoria das propriedades físicas do solo pode ser obtida de várias formas, como, por exemplo, por compactação, drenagem, estabilização granulométrica, estabilização por processos físico-químicos, estabilização térmica, injeções de materiais estabilizantes, entre outras (MITCHELL; KATTI, 1981).

Para verificar qual aditivo é mais indicado a ser utilizado na estabilização de solos, deve-se levar em consideração a granulometria do solo e a plasticidade. Solos com média a alta plasticidade são mais reativos à cal, a qual aumenta a trabalhabilidade, diminui a expansão volumétrica e aumenta a resistência (USACE, 1994).

Segundo Vendruscolo (2003), os métodos de estabilização de solos são frequentemente classificados em três grupos: estabilização mecânica, cujo objetivo é melhorar as características do solo por meio de uma melhor "arrumação" das suas partículas constituintes e/ou recorrendo a correções da sua composição granulométrica; física, em que as propriedades do solo são alteradas mediante a ação do calor, da eletricidade, etc.; e química, a qual modifica permanentemente as propriedades do solo por intermédio de aditivos. A escolha do método a ser utilizado é baseada nas

análises econômicas e técnicas do problema em questão, a fim de se escolher aquele mais adequado ao processo.

Segundo o *Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes* (2006), quando o solo for aplicado em subleito ou ao reforço do subleito, à capacidade de carga e à expansão deve-se obedecer aos seguintes critérios:

- a) $CBR \geq 2\%$; expansão $\leq 2\%$, para subleito;
- b) $CBR \geq 2\%$ e $\leq 1\%$, para reforço do subleito.

2.1 SOLO-CAL

O uso da cal como aditivo no tratamento de solos é o mais antigo método de estabilização química conhecido, utilizado nas mais variadas aplicações, como a Via Apia, construída pelos Romanos e no Brasil nas cidades de Diamantina e Ouro Preto, MG, e Parati, RJ (SAMANIEGO, 2015).

Guimarães (2002) afirma que, de modo geral, a cal afeta favoravelmente certas propriedades dos solos, o que se reflete em variações das características físicas, como granulometria, plasticidade, contração e retração, umidade de campo, peso específico seco, trabalhabilidade, compactação, resistência e condutividade hidráulica.

A estabilização com adição de cal (solo-cal) é uma técnica fundamentada em reações químicas e físico-químicas que se desencadeiam entre os compostos constituintes da cal, hidróxido de cálcio ou cálcio e magnésio, e os compostos constituintes

do solo, principalmente sua fração argilosa, capazes de reduzir a sensibilidade dos materiais à ação da água e aumentar a sua capacidade de suporte (NÓBREGA, 1995).

Righetto (2008) afirma que a etapa inicial rápida, para um solo fino estabilizado com cal, é composta pela sucessão de alguns fenômenos iniciados pela troca catiônica, floculação/aglomeração, compressão da dupla camada elétrica, adsorção de cal e reações químicas. Do mesmo modo, a etapa lenta é caracterizada pelas reações de carbonatação e pelas reações pozolânicas, sendo as primeiras prejudiciais e as segundas responsáveis pelo contínuo aumento da resistência mecânica. Esse aumento ocorre porque as fontes de sílica, alumina e ferro, presentes no solo, reagem com a cal e água formando produtos cimentantes.

Ingles e Metcalf (1972) afirmam que os géis de silicato cobrem as partículas de argila e ligam-nas, obstruindo os vazios. Esses géis se cristalizam lentamente e são transformados em silicatos hidratados de cálcio. Contudo, visto que essa reação só ocorre em presença de água, a função desse processo é carregar os íons de cálcio e hidroxila para a superfície da argila. Consoante Johann (2013), na presença de água, a cal reage com a sílica (Si) e alumina (Al_2) presentes no solo, o que origina vários compostos cimentantes.

Segundo Ingles e Metcalf (1972), a resistência à compressão simples aumenta linearmente com a quantidade de cal até certo nível, usualmente 8% para solos argilosos. A partir desse ponto a taxa de acréscimo

de resistência diminui com a quantidade de cal, em razão de as misturas solo-cal apresentarem uma cimentação lenta, que dependerá do tipo de solo.

Felt (1955 apud FOPPA, 2005), em seus estudos com areias, siltes e argilas, observou um aumento exponencial da resistência à compressão simples com o aumento da densidade da mistura, mantendo-se constante o teor de umidade. Verificou também que as misturas testadas apresentaram características satisfatórias quando compactadas no teor de umidade ótimo e massa específica aparente seca máxima do ensaio de compactação.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Esse programa experimental foi dividido em duas etapas. A primeira foi realizada por meio de ensaios de caracterização do solo e quantificação do teor ideal (porcentagem) de adição de cal sobre a massa seca de solo, a fim de classificar o solo e, assim, desenvolver os ensaios seguintes.

A segunda etapa baseou-se na realização de ensaios de compactação e de compressão simples sobre teores de adições preestabelecidos. Essa etapa objetivou analisar o comportamento do solo enquanto modificado química e mecanicamente.

3.1 ENSAIO DE LABORATÓRIO

Todos os ensaios executados para este estudo foram realizados no Laboratório

de Solos e Asfalto da Universidade do Oeste de Santa Catarina de Joaçaba.

Os ensaios realizados foram:

- a) análise granulométrica: a fim de classificar o solo granulometricamente;
- b) limites de consistência: para conhecer o solo quanto a seu estado físico;
- c) peso específico real: para determinar a massa específica da argila utilizada;
- d) compactação Proctor: para a determinação da umidade ótima de compactação, bem como a massa específica aparente seca da amostra;
- e) determinação do teor ideal de cal: utilizando o método do pH a fim de encontrar o teor que geraria melhor cimentação ao solo;
- f) ensaio de CBR: para a determinação da capacidade de suporte de carga do solo sem adição e com teores de 3%, 6% e 9% de cal, para cura de 7 e 14 dias;
- g) resistência à compressão simples: para detectar a tensão máxima resistente das amostras com teores de cal de 3%, 6% e 9%, para cura de 7 e 14 dias.

Cada ensaio visou à utilização de sua respectiva norma vigente.

A determinação do teor ideal de cal ocorreu de maneira a misturar as porcentagens calculadas em relação à massa seca de solo e medir o pH da mistura. O menor teor que atingisse o valor de 12,4 seria o teor ideal a ser adicionado ao solo; o ensaio estabeleceu o valor de 6% de adição de cal.

Para os ensaios de ISC, os corpos de prova (CPs) foram moldados de maneira a compactar certa quantidade de solo com umidade preestabelecida e submetê-los à cura para os períodos de 7 e 14 dias. Foi moldado um CP para cada teor e tempo de cura. O rompimento ocorreu ao fim desse período, realizado em uma prensa hidráulica com velocidade constante de 1,27 mm/min, aferindo leituras de penetrações em relação ao tempo.

Para a resistência à compressão simples, os corpos de prova foram moldados em triplicata para cada teor e tempo de cura, resultando em 18 CPs. Estes foram curados em recipientes vedados e posteriormente submetidos à inundação por um período de um dia, prévio ao rompimento.

Com a finalidade de aferir a tensão máxima alcançada pelos corpos de prova, o rompimento ocorreu de modo que o carregamento da prensa permanecesse contínuo até o rompimento do conjunto, quando cessou o carregamento. A tensão máxima alcançada foi adotada como a tensão de ruptura, sendo aferida a média dos três corpos de prova submetidos ao ensaio.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO

Os parâmetros necessários para a classificação de uma amostra de solo são descritos na Tabela 1, a qual resume os resultados dos ensaios de análise granulométrica, determinação dos limites de consistência e densidade real dos grãos da amostra de solo em estudo.

Tabela 1 – Resumo da caracterização do solo

Análise granulométrica	Argila (%)	42
	Silte (%)	34
	Areia fina (%)	9
	Areia média (%)	3
	Areia grossa (%)	10
Limites de consistência	Pedregulho (%)	2
	LL	57
	LP	32
	IP	25
Peso específico (g/cm ³)		2,60

Fonte: os autores.

Com base nos parâmetros expostos por Maciel Filho (1997), o Índice de Plasticidade (IP) do solo, com resultado de 25, corresponde a um solo altamente plástico.

Com relação ao Índice de Consistência, Caputo (1988) classifica a argila como sendo uma argila dura, a qual quando submetida a esforços de grande monta, se desagrega e perde sua estrutura original.

Dispondo do método de classificação H.R.B., o solo é classificado como A-7-5, tendo em vista que possui mais de 35% do material passante na # 200 e $IP \leq LL - 30$.

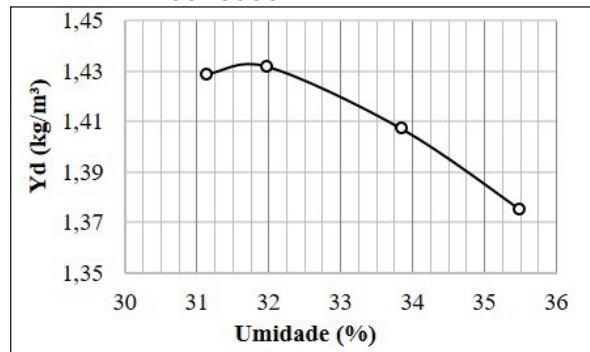
O solo é enquadrado como CH (argila inorgânica de alta plasticidade) quanto ao S.U.C.S., em razão de a sua graduação fina possuir mais de 50% da amostra passante na # 200 e LL maior que 50%.

Quanto aos parâmetros adotados para a classificação textural, o solo em estudo é classificado como uma argila siltosa em virtude das porcentagens de granulometria.

O resultado do ensaio de Proctor proporcionou os valores de peso específico aparente seco máximo e teor de umidade

ótimo, utilizados como parâmetros para moldagem dos corpos de prova. O resultado é apresentado no Gráfico 1.

Gráfico 1 – Curva de Compactação Proctor Modificado



Fonte: os autores.

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados relevantes à pesquisa são apresentados e discutidos nesta seção, embasados nos ensaios propostos durante o programa experimental.

4.1 ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA

O ensaio de ISC teve como princípio básico a determinação da capacidade de suporte de um solo inicialmente retirado da jazida in natura e posteriormente estabilizado química e mecanicamente.

Para o solo sem aditivo, foi moldado um corpo de prova no teor de umidade ótimo e peso específico aparente seco máximo obtidos no ensaio de compactação e submetido à inundação por quatro dias,

conforme NBR 9895 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2016).

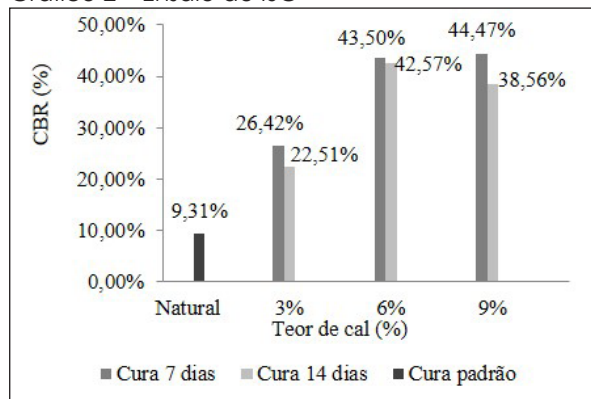
O resultado do CBR para o solo sem adições foi igual a 9,31%, estando dentro dos parâmetros recomendados pelo *Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes* (2006).

O material não pode ser utilizado como sub-base quando comparado aos parâmetros de ISC (maior ou igual a 20%) e IG (zero), e, conseqüentemente, deve-se invalidar a utilização para materiais de base, os quais devem apresentar $ISC \geq 80\%$ e $expansão \leq 0,5\%$.

Para as amostras com adição de cal nos teores de 3%, 6% e 9%, foram moldados corpos de prova em duplicata, sendo um molde para rompimento com cura de 7 dias e outro para cura de 14 dias.

O resultado dos rompimentos do CPs de CBR está ilustrado no Gráfico 2.

Gráfico 2 – Ensaio de ISC



Fonte: os autores.

Diante do exposto no Gráfico 2, observou-se o ganho de resistência quando o teor de adição foi majorado. Contudo, houve a diminuição da resistência quando

comparados os resultados dos rompimentos de 7 e 14 dias.

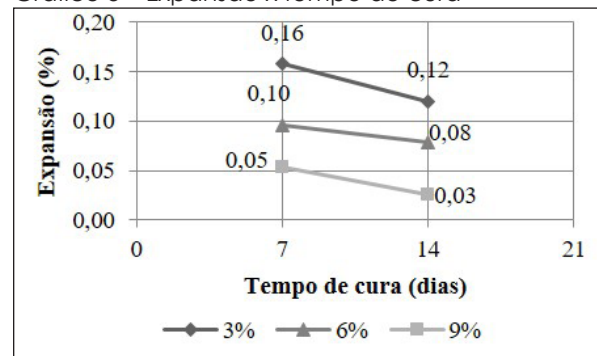
Com isso, nota-se um ganho representativo de resistência aos 7 dias para o teor de 9% de cal em relação ao solo natural.

Porém, nota-se uma perda de resistência no mesmo teor avaliando o tempo de cura de 7 para 14 dias. Enquanto os teores de 3% e 6% têm um déficit de 14,8% e 2,1% entre os tempos de cura, respectivamente, o teor de 9% tem uma perda de resistência de 13,3% quando comparado à resistência de 7 dias.

Mesmo com a diminuição da resistência ao longo dos dias, a menor das capacidades de carga obtida com a adição (3%, 7 dias de cura) corresponde a mais de duas vezes a admitida pelo solo natural.

O Gráfico 3 ilustra a expansão referente aos tempos de cura de 7 e 14 dias para os diferentes teores de cal.

Gráfico 3 – Expansão x tempo de cura



Fonte: os autores.

No que tange à expansão, esta foi inversamente proporcional ao aumento do teor de adição de cal ao solo, sendo notável a diminuição progressiva quanto aos teores de

3%, 6% e 9%, bem como aos respectivos tempos de cura, sendo a expansão menor aos 14 dias.

Para o solo no estado natural, a expansão resultou em 0,67%, valor este maior que os referentes ao solo com adição.

Esse fato se dá em razão de a cal preencher os vazios entre os grãos de solo e alterando a quantidade de água absorvida pela mistura. O teor de 9% de cal resultou na menor expansão justamente pelo solo possuir mais cal e menos quantidade de vazios, fazendo com que a quantidade de água absorvida seja menor e, conseqüentemente, sua expansão reduza.

Quando comparadas as porcentagens de expansão entre os tempos de cura, aos 14 dias a expansão é menor propriamente pela ação de cimentação da cal reagida com o solo. Os géis impermeabilizantes que provêm das reações químicas da cal com os reagentes presentes no solo se apresentam em maior quantidade em conformidade ao tempo de cura a ele proporcionado.

4.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

A moldagem dos corpos de prova de solo-cal teve como parâmetro a compactação de modo a atingir a massa específica aparente seca máxima e o teor de umidade ótimo, encontrados no ensaio de Proctor (Gráfico 1), sendo as quantidades equivalentes a cada componente da mistura (solo, cal e água) calculadas em relação à massa seca de solo.

Depois de moldados, os corpos de prova foram armazenados em sacos plásticos a fim de não perder a umidade. Antes do rompimento, estes foram colocados em um recipiente cobertas com água, com o propósito de submeter o solo à inundação, pior situação.

Os CPs referentes aos teores de 3% e 6% não apresentaram cimentação suficiente para os períodos de 7 e 14 dias de cura, desagregando-se a partir do momento que colocados em imersão.

A fragmentação dos corpos de prova com adição de 3% e 6% de cal para cura de 7 e 14 dias pode se dar em decorrência de as reações pozolânicas ocorridas entre a cal e o solo serem responsáveis pelo aumento contínuo do ganho de resistência mecânica. É necessário o fornecimento de fontes de sílica, alumina e ferro presentes no solo que resultam na cimentação.

Sobretudo o teor de 9% gerou cimentação para os dois períodos de cura estudados. As tensões máximas de ruptura estão listadas no Gráfico 4.

Gráfico 4 – Resistência à Compressão Simples (9% de cal)



Fonte: os autores.

Considerando um critério de aceitação para o ensaio de resistência à compressão simples, estipulou-se que as resistências individuais não deveriam ultrapassar 15% da resistência média dos três corpos de prova.

Os resultados obtidos foram de 237,43 kPa para os corpos de prova com cura de 7 dias e 271,60 kPa para os rompidos com 14 dias, tendo um aumento percentual de aproximadamente 14%.

Entretanto, esse resultado não pode ser comparado aos outros de 9% em razão de os tempos de cura serem diferentes.

É provável que o solo em estudo seja carecido de fontes desses reagentes, não gerando consideráveis cimentações com a adição de cal ao solo.

5 CONCLUSÃO

A partir da análise detalhada dos resultados e da avaliação da influência do teor de cal adicionada ao solo sobre a resistência à compressão simples, o Índice de Suporte Califórnia e a expansão do material em estudo foram estabelecidas algumas conclusões.

No que diz respeito à capacidade suporte de carga, o solo natural apresentou ISC igual a 9,31%. Embora com valor ainda limitado, considera-se o solo dentro dos parâmetros permitidos em norma para o uso em subleito e reforço. Porém, não atinge os requisitos mínimos para o uso em base e sub-base de pavimento.

No que diz respeito à expansão, é notória a diminuição de seus valores conforme elevados os teores de adição de cal ao solo, sendo relativamente eminente a diferença entre a expansão do solo em estado natural, resultada em 0,67%, quando comparada à adição de 9% de cal, que correspondeu a 0,03% aos 14 dias de cura. Para o teor de 3%, a expansão passou de 0,16% para 0,12%, enquanto a adição de 6% de cal resultou numa expansão de 0,10% aos 7 dias e 0,08% aos 14 dias de cura, respectivamente.

Comparado ao solo aditivado, o teor de 3% resultou num valor de ISC igual a 26,42% para cura de 7 dias e 22,51% para os 14 dias, enquanto o teor de 6% atingiu 43,50% de ISC para os 7 dias de cura e 42,57% para os 14 dias. Ressalta-se o teor de 9%, o qual obteve ISC igual a 44,47% para cura de 7 dias e 38,56% para os 14 dias.

Com relação à resistência à compressão simples, o comportamento do solo somente pôde ser avaliado entre os corpos de prova com adição de 9% de cal sobre a massa seca de solo, visto que as adições equivalentes a 3% e 6% não propiciaram cimentação no período de 7 e 14 dias. O teor de 6% gerou cimentação apenas após 21 dias de cura.

Para os corpos de prova com adição de 9% e cura de 7 dias a tensão máxima de ruptura média atingiu 237,43 kPa e 271,60 kPa para os rompidos com 14 dias. Esse aumento de aproximadamente 13% se deve ao fato de o tempo de cura ser maior, fazendo com

que a impermeabilização dos grãos de solo gerada pela cal também se majore.

Dessa forma, o teor de 9% assegurou ao solo melhor resultado quanto à RCS para cura de 14 dias e melhor capacidade de suporte de carga aos 7 dias, muito embora o teor de 6% tenha proporcionado menor diferença entre os resultados de ISC para os 7 e 14 dias. Com isso, conclui-se que quanto maior o teor de cal adicionado ao solo, maior é a capacidade de suporte aferida a ele.

Considerando o melhor resultado para resistência à compressão simples, sendo de 9% e para os 14 dias de cura, explica-se o fato de que a resistência mecânica é proporcional ao tempo em que esse solo é curado e à quantidade de adição de cal a ele.

Ao empregar solos argilosos em obras de pavimentação, admite-se que a partir do momento que é adicionada a cal ao solo e interrompido o uso para que o tempo de cura mínimo seja alcançado a estabilização já ganhe forma. No entanto, relacionando à RCS e considerando a premissa que o solo estabilizado não será modificado novamente, pode-se concluir que a cada dia a resistência tende a aumentar até o ponto em que o solo fique em sua maioria impermeabilizado e, por consequência, estabilizado.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9895 – Solo – índice de suporte Califórnia (ISC): método de ensaio**. 2. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- BRANCO, Fernando; PEREIRA, Paulo; SANTOS, Luís Picado. **Pavimentos rodoviários**. Rio de Janeiro: Almedina, 2008.
- CAPUTO, Homero Pinto. **Mecânica dos solos e suas aplicações: fundamentos**. 6. ed. rev. ampl. Rio de Janeiro: LTC, 1988.
- CONSOLI, N. C. *et al.* **Parameters controlling stiffness and strength of artificially cemented soils. Technical Note. Géotechnique**, London, v. 62, n. 2, p. 177-183, 2012.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de pavimentação**. 3. ed. Rio de Janeiro: [s.n.], 2006.
- FOPPA, Diego. **Análise de variáveis-chave no controle da resistência mecânica de solos artificialmente cimentados**. 2005. 144 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.
- GUIMARÃES, José Epitácio Passos. **A Cal – Fundamentos e Aplicações na Engenharia Civil**. 2. ed. São Paulo: PINI, 2002.
- INGLES, Owen Graeme; METCALF, John B. **Soil Stabilization – Principles and Practice**. Sidney: Butterworths, 1972.
- JOHANN, Amanda Dalla Rosa. **Metodologias para a previsão do comportamento mecânico e para a análise da variação da porosidade de um solo siltoso tratado com cal em diferentes tempos de cura**. 2013. 273 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

MACIEL FILHO, Carlos Leite. **Introdução à geologia de engenharia**. 2. ed. Santa Maria, RS: UFSM, 1997.

MITCHELL, J. K.; KATTI, R. K. **Soil improvement**. State-of-the-art report. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 10., 1981, Stockholm. **Proceedings [...]**. Rotterdam: A. A. Balkema, 1981. v. 4, p. 261-317.

NÓBREGA, Maria Teresa de. **Características e mecanismo de estabilização de solos tropicais com cal e cimento em pista experimental**. 1995. 233 p. Tese (Doutorado em Geociências) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

RIGHETTO, Guilherme Lima. **Validação dos fatos vazios/agente cimentante na análise da resistência mecânica de um solo tratado com cal, cimento e resíduo de britagem de rocha**. 2008. 93 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

SALES, L. F. P. **Estudo do Comportamento de Fundações Superficiais Assentes em Solos Tratados**. 1998. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 1998.

SAMANIEGO, Rúben Alejandro Quiñónez. **Estabilização de um solo dispersivo com adição de cal**. 2015. 171 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

USACE. **Army Corps of Engineers. Soil stabilization for pavements**. Technical Manual. Norma americana TM 5-822-14. Washington, D.C., 1994.

VENDRUSCOLO, Marcio Antonio. **Estudo do comportamento de materiais compósitos fibrosos para a aplicação como reforço de base de fundações superficiais**. 2003. 224 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

