

Estudo da Condutividade Hidráulica de um Solo Residual Tratado com Cal

Mozara Benetti

Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil (mozara.benetti@hotmail.com)

Nilo Cesar Consoli

Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil (consoli@ufrgs.br)

RESUMO: O solo é constituído por vazios, preenchidos por ar ou água. Dependendo das condições hidráulicas, a água presente no solo pode estar em equilíbrio hidrostático, ou percolar livremente. Obras de engenharia sobre solos com características geotécnicas deficientes tornam-se, na maioria das vezes, inviável técnica e economicamente. Uma das alternativas que se dispõe diante deste cenário é melhorar as propriedades do solo existente, de modo a criar um novo material capaz de atender às exigências de projeto. A técnica de tratamento de solos com cal vem sendo empregada com sucesso na engenharia geotécnica, melhorando as características do solo, que por ser um material complexo e variável nem sempre satisfaz as necessidades requeridas para um projeto. Solos que não apresentam fração argilosa, ou que a possuem em quantidade baixa, não apresentam melhoras significativas com adição de cal. Nestes solos, a cal deve ser utilizada em associação com adições reativas (argilas, cinza volante, resíduos de britagem) para que sejam conseguidas as melhoras esperadas. O uso de fillher proveniente da britagem de rochas balsáticas, material utilizado nesta pesquisa, é normalmente utilizado como adição no melhoramento de solos com cal, onde a matriz é predominantemente arenosa com escassez de argila coloidal, a qual não reage satisfatoriamente com a cal. Nesse sentido, este estudo tem por objetivo quantificar a influência da quantidade de cal e da porosidade sobre a condutividade hidráulica de um solo residual tratado com cal, verificando a adequação do uso da relação vazios/cal na estimativa da condutividade hidráulica. Para isso, foram realizados ensaios de condutividade hidráulica em permeâmetro de parede flexível para corpos de prova com 5%, 7% e 9% de cal, com peso específico aparente seco de 16,0 kN/m³, 17,2 kN/m³ e 18,5 kN/m³, curados por 28 dias. Foi observado que a porosidade da mistura é um parâmetro de influência sobre a condutividade hidráulica medida. Independentemente da quantidade de cal utilizada, a redução da porosidade do material promove uma diminuição considerável na condutividade hidráulica, de pelo menos uma ordem de grandeza, enquanto a quantidade de cal não exerce forte influência sobre a condutividade hidráulica do compósito estudado. A relação vazios/cal, definida pela razão entre a porosidade da mistura compactada e o teor volumétrico de cal, ajustado por uma potência, demonstrou ser um parâmetro eficaz na estimativa do comportamento hidráulico do compósito.

PALAVRAS-CHAVE: Solo-cal; Condutividade Hidráulica; Relação vazios/cal.

1 INTRODUÇÃO

O solo é um material complexo e variável, abundante, de fácil obtenção e manuseio, de

baixo custo e que oferece grandes oportunidades de emprego na engenharia. Entretanto é comum que um solo de uma determinada região não preencha parcial ou

totalmente as exigências de projeto. Obras de engenharia sobre solos com características geotécnicas deficientes tornam-se, na maioria das vezes, inviável técnica e economicamente. Uma das alternativas que se dispõe diante deste cenário é melhorar as propriedades do solo existente, de modo a criar um novo material capaz de atender às exigências de projeto.

Esforços tem sido feitos no sentido de desenvolver novos materiais que possuam características melhoradas, tais como boa trabalhabilidade, baixa condutividade hidráulica, estabilidade climática e capacidade de absorver recalques diferenciais.

A condutividade hidráulica de um solo pode ser influenciada por um grande número de fatores, dentre eles o teor de umidade na moldagem, o grau de saturação, o método de compactação, o esforço de compactação, o gradiente hidráulico, o tamanho dos aglomerados de partículas de solo, a distribuição dos tamanhos dos poros, a composição química do líquido permeante, a idade da amostra a ser testada e o índice de vazios (BOYNTON e DANIEL, 1985).

No caso das areias, o solo pode ser visto como um material constituído por diversos canais, interconectado uns aos outros, nos quais a água está armazenada em equilíbrio hidrostático, ou está fluindo dentro deles por ação da gravidade. A baixa compressibilidade dos solos arenosos possibilita pouca transferência de pressões entre grãos e água, assim este tipo de solo tem as características de ser um solo muito permeável.

Nas argilas o modelo dos canais da areia perde a validade, pois o pequeníssimo diâmetro e a forma dos grãos da argila produzem uma interação entre a água e a fase sólida do solo. Sendo tais canais tão pequenos, existe uma alta compressibilidade neste meio, diferente das areias, impedindo que o líquido saia do solo. Estas características determinam um solo de baixa permeabilidade (VARGAS, 1977).

O objetivo deste estudo foi quantificar a influência da quantidade de cal e da porosidade sobre a condutividade hidráulica de um solo residual tratado com cal, verificando a adequação do uso da relação vazios/cal na estimativa da condutividade hidráulica.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

O Solo Residual de Arenito Botucatu (SRAB) pode ser classificado como uma areia argilosa (SC), de acordo com a ASTM D 2487 (ASTM 2006).

O resíduo de britagem (RBR), utilizado como aditivo no solo-cal, é a fração fina (pulverizado) proveniente do processo britagem da rocha basáltica. O RBR pode ser classificado como um silte arenoso (ML) – não plástico de acordo com o Sistema Unificado de Classificação.

Como agente cimentante foi utilizado cal hidratada dolomítica, com massa específica de 2,49 g/cm³.

A figura 1 apresenta as curvas de distribuição granulométrica do solo residual de Arenito Botucatu, do resíduo de britagem e do solo com 25% de resíduo.

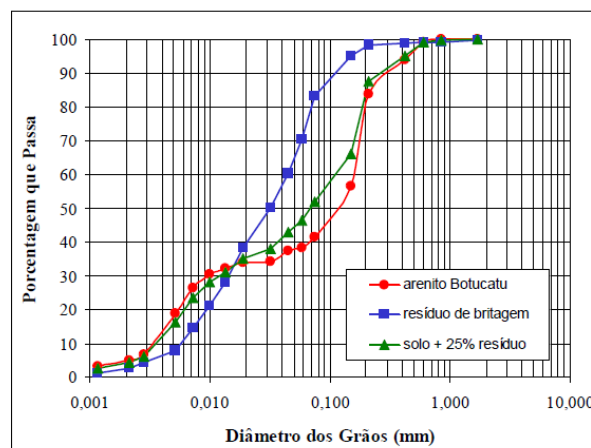


Figura 1: distribuição granulométrica dos materiais.

As propriedades físicas do SRAB e do RBR encontram-se descritas na tabela 1.

Tabela 1. Propriedades físicas do SRAB e RBR.

Propriedades	SRAB	RBR
Peso específico real dos grãos (kN/m ³)	26,4	33,3
Limite de Liquidez	23%	28%
Limite de Plasticidade	13%	20%
Índice de Plasticidade	10%	8%
Areia Média (0,2 < ϕ < 0,6mm)	16,2%	1,9%
Areia Fina (0,06 < ϕ < 0,2mm)	45,4%	38,4%
Silte (0,002 < ϕ < 0,06 mm)	33,4%	57,5%
Argila (ϕ < 0,002 mm)	5,00%	2,2%
Diâmetro efetivo (D_{10}) (mm)	0,0032	0,0066
Coefficiente de uniformidade (C_u)	50	9

Para a escolha dos finos a serem utilizados como aditivo no solo-cal e determinação do teor de resíduo em 25%, foi levada em consideração a existência de trabalhos prévios (TRB, 1976; CARRARO, 1997, LOPES JUNIOR, 2007; LOPES JUNIOR, 2011).

Nas misturas de solo-cal com 25% de resíduo de britagem foram moldados corpos de prova com 5%, 7% e 9% de cal para cada um dos três pesos específicos aparentes secos definidos.

Os teores de cal de 5%, 7% e 9% foram definidos a partir do método de ICL (*Initial Consumption of Lime*) e da experiência brasileira e internacional com solo-cal.

A figura 2 apresenta a variação do pH do solo residual de arenito Botucatu em relação à quantidade de cal. Verifica-se que é necessário um teor mínimo de 3% de cal para cessar a variação do pH e chegar à valores constantes (pH≈12,6).

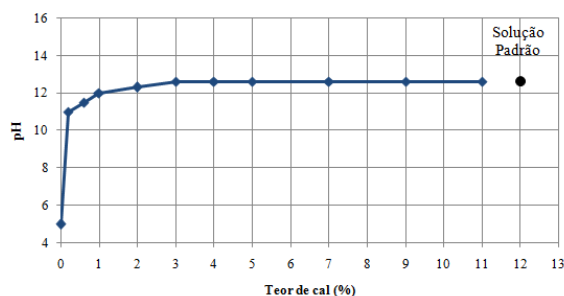


Figura 2. pH SRAB x teor de cal (LOPES JUNIOR, 2011).

2.2. Métodos

2.2.1 Moldagem e Cura dos Corpos de Prova

A moldagem dos corpos de provas para os ensaios de condutividade hidráulica foi realizada em um molde cilíndrico com dimensões suficientes para confecção de amostras com 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura. A confecção dos corpos de prova foi realizada através de procedimentos de pesagem, mistura, compactação, desmoldagem, acondicionamento, armazenagem e cura.

A quantidade de resíduo e cal necessária para a mistura foi calculada em relação à massa de solo seco utilizada e a quantidade de água (teor de umidade) em relação à soma das massas de

solo seco, resíduo e cal. A quantidade total de misturas permitia a moldagem de um corpo de prova e uma sobra para a determinação do teor de umidade.

A amostra era então compactada estaticamente em três camadas. Concluído o processo de moldagem, o corpo de prova era extraído do molde, e a sua massa e medidas anotadas com resolução de 0,01g e 0,1mm respectivamente e acondicionando em um saco plástico adequadamente identificado e vedado para evitar variações significativas do teor de umidade.

Os corpos de prova assim obtidos eram armazenados e curados por um período de 28 dias.

Foram considerados aptos para ensaios os corpos de prova que atenderam as seguintes tolerâncias: *Peso específico aparente seco* (γ_d): grau de compactação de 98% a 102%; *Teor de umidade* (ω): valor especificado $\pm 0,5$ pontos percentuais; *Dimensões*: diâmetro $50 \pm 0,5$ mm e altura 100 ± 1 mm.

2.2.2 Condutividade Hidráulica

Os ensaios de condutividade hidráulica foram realizados utilizando um permeâmetro de parede felexível (carga cosntante), de acordo com a ASTM D 5084 (ASTM 2010).

Os ensaios foram realizados para corpos de prova com 5%, 7% e 9% de cal, com peso específico aparente seco de 16,0 kN/m³, 17,2 kN/m³ e 18,5 kN/m³, curados por 28 dias.

Na saturação, primeiramente procedeu-se a percolação de água, até atingir duas vezes o volume de vazios de cada amostra. A contra-pressão de 460 kPa foi aplicada, através de estágios de incrementos de 50 kPa. A condição de saturação das amostras foi monitorada através do parâmetro B (Skempton, 1954) e valores de B da ordem de 0,9 foram alcançados em todos os casos. O gradiente hidráulico de 10 foi mantido durante todo o ensaio.

3 RESULTADOS

A tabela 2 apresenta, em síntese, os resultados dos ensaios de condutividade hidráulica para as

amostras de SRAB-25%RBR-CAL com 28 dias de cura.

Tabela 2. Resultados dos ensaios de condutividade hidráulica SRAB-25%RBR-CAL para 28 dias de cura.

Teor de cal (%)	Peso específico aparente seco (kN/m³)	Condutividade hidráulica (m/s)
5	16,0	1,63E-06
	17,2	3,47E-07
	18,5	4,82E-08
7	16,0	9,07E-07
	17,2	2,73E-07
	18,5	6,86E-08
9	16,0	1,25E-06
	17,2	2,17E-07
	18,5	3,38E-08

3.1 Efeito do Teor de Cal

A figura 3 apresenta a variação da condutividade hidráulica em função do teor de cal.

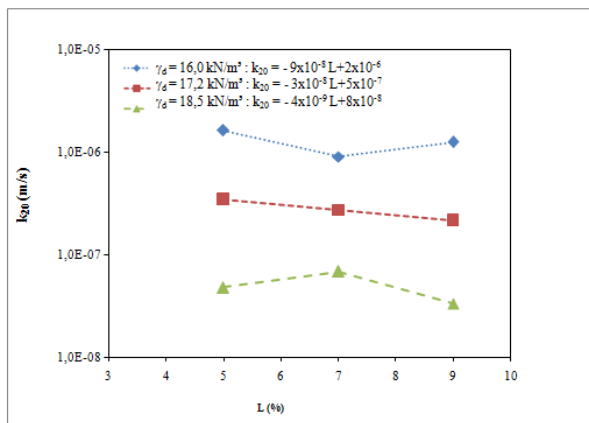


Figura 3. Variação da condutividade hidráulica em função do teor de cal.

O acréscimo de cal não resultou em uma mudança expressiva no valor do coeficiente de condutividade hidráulica para um mesmo peso específico estudado. Percebe-se que o peso específico aparente seco de moldagem expressa relevância nos resultados. Para um mesmo teor de cal, houve um padrão de comportamento, pois ocorre um paralelismo entre os resultados.

Averiguando-se um caso específico para exemplificar, no caso de 5% de cal, o coeficiente de condutividade hidráulica passou de $4,82 \times 10^{-8}$ m/s para $1,63 \times 10^{-6}$ m/s, com a redução do peso

específico de $18,5 \text{ kN/m}^3$ para $16,0 \text{ kN/m}^3$.

Segundo Thomé (1999), misturas contendo materiais siltosos, como é o caso do solo residual de arenito Botucatu, apresentam valores de condutividade hidráulica na ordem de 10^{-9} m/s, desde que adicionadas de um material estabilizante e curadas apropriadamente.

3.2 Efeito da Porosidade

Na figura 4 são apresentadas as curvas de ajuste da variação da condutividade hidráulica em função da porosidade do solo-resíduo de britagem-cal compactado ensaiados com 28 dias de cura. Cada curva, isoladamente, possui o mesmo teor de cal e todos os pontos possuem o mesmo teor de umidade ($\omega=14\%$).

Verifica-se que de maneira contrária à quantidade de cal, a porosidade da mistura compactada exerce uma forte influência sobre a condutividade hidráulica do compósito SRAB-25%RBR-CAL.

Quanto mais denso, menos poroso, com menor índice de vazios o corpo de prova, menor é a condutividade hidráulica. Independentemente da quantidade de cal utilizada, a redução da porosidade do material promove uma diminuição considerável na condutividade hidráulica, de pelo menos uma ordem de grandeza, dentro da faixa de valores avaliada.

Os materiais de cimentação formados devido à adição de cal tendem a diminuir a porosidade do solo tratado com cal e, portanto, o seu coeficiente de condutividade hidráulica.

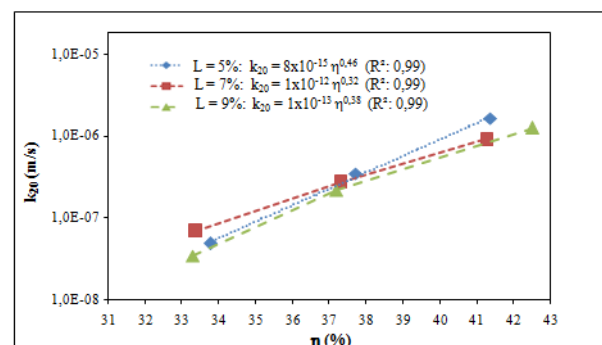


Figura 4: variação da condutividade hidráulica em função da porosidade do SRAB-25%RBR-CAL.

5.3 Efeito da Relação Vazios /Cal

Conforme Consoli et al. (2007) a relação porosidade (η) por teor volumétrico proporciona a determinação do comportamento de materiais compactados cimentados. Entretanto, o mesmo confere a necessidade de um ajuste na variável teor volumétrico de cal (L_{iv}).

Consoli et al. (2013) constataram, para solos de granulometria fina tratados com cal, que o melhor ajuste para a relação entre a porosidade / teor volumétrico de cal pode ser obtido aplicando-se uma potência igual a 0,12 para o parâmetro L_{iv} .

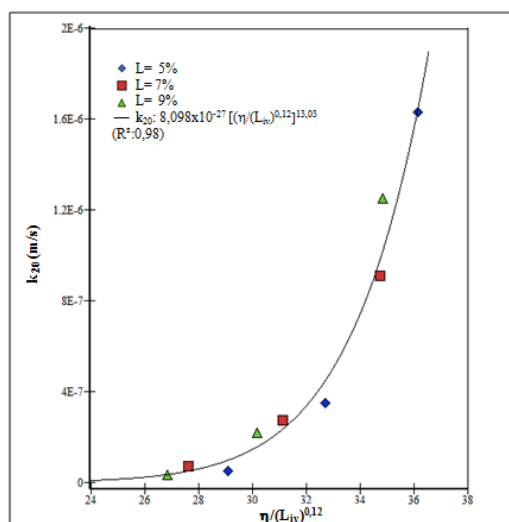


Figura 5. variação da condutividade hidráulica em função do $\eta/(L_{iv})^{0,12}$ do SRAB-25%RBR-CAL.

Pode-se observar através da figura 5 uma admissível correlação entre a porosidade/teor volumétrico de cal ajustados $[(\eta/(L_{iv})^{0,12})]$ e a condutividade hidráulica do compósito SRAB-25%RBR-CAL.

Esta relação possibilitou a geração de equação única (1) para a determinação da condutividade hidráulica curadas por 28 dias.

$$k_{20}(m/s) = 8.098 \times 10^{-27} \left[\frac{\eta}{(L_{iv})^{0,12}} \right]^{14,3} \quad (1)$$

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A quantidade de cal, não exerce uma forte influência sobre a condutividade hidráulica da mistura solo-cal estudado.

A porosidade da mistura compactada exerce uma forte influência sobre a condutividade hidráulica do compósito estudado. Independentemente da quantidade de cal utilizada, a redução da porosidade do material promove uma diminuição considerável na condutividade hidráulica, de pelo menos uma ordem de grandeza.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem as instituições que financiaram a pesquisa, e todas as pessoas que se envolveram e contribuíram para o desenvolvimento da mesma.

REFERÊNCIAS

- ASTM (2006). *Standard classification of soils for engineering purposes*. ASTM D 2487-06, West Conshohocken, Philadelphia.
- ASTM (2010). *Standard test methods for measurement of hydraulic conductivity of saturated porous materials using a flexible wall permeameter*. ASTM D5084-10, West Conshohocken, Philadelphia.
- BOYNTON, S.S.; DANIEL, D.E. (1985). *Hydraulic conductivity tests on compacted clay*. Journal of Geotechnical Engineering, New York, v.111, n.4, p. 465-478.
- CARRARO, J.A.H. (1997). *Utilização de resíduos industriais na estabilização de um solo residual de arenito*. Dissertação de Mestrado em Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- CONSOLI, N. C.; FOPPA, D.; FESTUGATO, L.; HEINECK, K. S.(2007). *Key parameters for strength control of artificially cemented soils*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. Reston, American Society of Civil Engineers, v. 133, n. 2, p. 197-205.
- CONSOLI, N.C.; LOPES JR., L.S.; DALLA ROSA, A. and MASUERO, J.R. (2013). *The strength of soil-industrial by-products – lime blends*. Proceedings of the ICE –Geotechnical Engineering, 166(GE5), 431–440.
- LOPES JUNIOR, L. S. (2007). *Parâmetros de Controle da Resistência Mecânica de Solos Tratados com Cal, Cimento e Rocha Basáltica Pulverizada*. Dissertação

- de Mestrado em Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- LOPES JUNIOR, L. S. (2011). *Metodologia de previsão do comportamento mecânico de solos tratados com cal*. Tese de Doutorado em Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- SKEMPTON, A.W. (1954). *The pore pressure coefficients A and B*. Géotechnique, 4(4), 143-147.
- TRANSPORTATION RESEARCH BOARD (1976). *Lime-fly Ash-stabilized Bases and Subbases*. Washington, D.C., 66p.
- THOMÉ, A. (1994). *Estudo do comportamento de um solo mole tratado com Cal, Visando seu Uso em Fundações Superficiais*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- VARGAS, M. (1977). *Introdução à mecânica dos Solos*. McGraw- Hill do Brasil, Universidade de São Paulo, 500p.