

**Avaliação do coeficiente hidráulico de solos arenosos a partir de
acréscimos percentuais gradativos de cimento visando a
impermeabilização de fundos de aterros e lagoas de estabilização**

*Evaluation of the hydraulic coefficient of sandy soils from graded percentage increases
of cement aiming the waterproofing of funds of landfills and stabilization ponds*

*Evaluación del coeficiente hidráulico de suelos arenosos a partir de aumentos porcentuales
gradados de cement visando la impermeabilización de fondos de vertederos y lagunas de
estabilización*

Matheus Henrique Magagnato

Graduando, UNESP, Brasil
magagnato_matheus@hotmail.com

Paula Mayumi Hatano

Graduando, UNESP, Brasil
paulamayumi2015@gmail.com

Paulo César Lodi

Professor Doutor, UNESP, Brasil
plodi@feb.unesp.br

RESUMO

Devido à necessidade de impermeabilização de determinadas obras no contexto geotécnico e ambiental, torna-se necessária a criação de mecanismos de controle de parâmetros como o coeficiente de permeabilidade uma vez que este é responsável pelo controle do fluxo que poderá migrar para o subsolo e/ou lençol freático. Nesse sentido, este trabalho avaliou a determinação do coeficiente de permeabilidade de solo arenoso de Bauru (SP) na condição natural e com adição de diferentes percentuais de cimento (2, 4, 6, 8 e 10%). Os ensaios foram conduzidos com permeâmetro de carga variável de acordo com a NBR 14545. O solo utilizado é uma areia média à fina pouco argilosa retirado da Faculdade de Engenharia (FE) na profundidade de 0,95m. Foram utilizadas amostras deformadas e os corpos de prova foram moldados com grau de compactação de 95% e umidade de 10,8%. A moldagem foi realizada em função dos parâmetros ótimos (Proctor Normal) obtidos: massa específica seca máxima $1,955 \text{ g/cm}^3$ e umidade ótima 10,8%. Os percentuais de cimento foram adicionados em relação à massa seca do solo. Os principais resultados mostram que a adição de cimento no solo diminui o coeficiente de permeabilidade. Essa diminuição é proporcional ao aumento do teor de cimento. A adição de 2%, por exemplo, apresentou um valor de $2,2 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$. Aumentando-se o teor para 6%, esse valor alterou-se para $9,0 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$. Finalmente, com 10% de cimento, o valor obtido foi de $2,3 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$. Os resultados obtidos estão em concordância com a literatura técnica.

PALAVRAS-CHAVE: Impermeabilização. Solo-cimento. Ensaio de laboratório.

ABSTRACT

Due to the need to waterproof certain works in the geotechnical and environmental context, it is necessary to create parameters control mechanisms such as the permeability coefficient since it is responsible for controlling the flow that can migrate to the subsoil and / or water table. In this sense, this work evaluated the determination of the permeability coefficient of sandy soil of Bauru (SP) in the natural condition and with the addition of different cement percentages (2, 4, 6, 8 and 10%). The tests were conducted with variable load permeability according to NBR 14545. The soil used is a medium sand to the clayey thinned from the Faculty of Engineering (FE) at a depth of 0,95m. Deformed samples were used and the specimens were molded with a degree of compaction of 95% and humidity of 10.8%. The molding was performed according to the optimum parameters (Proctor Normal) obtained: specific dry mass maximum $1,955 \text{ g/cm}^3$ and optimum moisture 10.8%. The percentages of cement were added in relation to the dry mass of the soil. The main results show that the addition of cement in the soil decreases the permeability coefficient. This decrease is proportional to the increase in cement content. The addition of 2%, for example, showed a value of $2.2 \times 10^{-4} \text{ cm/sec}$. Increasing the content to 6%, this value changed to $9.0 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$. Finally, with 10% cement, the value obtained was $2.3 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$. The results obtained are in agreement with the technical literature.

KEYWORDS: Waterproofing. Soil-cement. Laboratory test.

RESUMEN

Debido a la necesidad de impermeabilización de determinadas obras en el contexto geotécnico y ambiental, se hace necesaria la creación de mecanismos de control de parámetros como el coeficiente de permeabilidad ya que éste es responsable del control del flujo que podrá migrar al subsuelo y / o de agua subterránea. En este sentido, este trabajo evaluó la determinación del coeficiente de permeabilidad de suelo arenoso de Bauru (SP) en la condición natural y con adición de diferentes porcentajes de cemento (2, 4, 6, 8 y 10%). Los ensayos fueron conducidos con permeaje de carga variable de acuerdo con la NBR 14545. El suelo utilizado es una arena media a la fina poco arcillosa sacada de la Facultad de Ingeniería (FE) en la profundidad de 0,95m. Se utilizaron muestras deformadas y los cuerpos de prueba fueron moldeados con grado de compactación del 95% y humedad del 10,8%. El moldeado fue realizado en función de los parámetros óptimos (Proctor Normal) obtenidos: masa específica seca máxima $1,955 \text{ g/cm}^3$ y humedad óptima 10,8%. Los porcentajes de cemento se añadieron a la masa seca del suelo. Los principales resultados muestran que la adición de cemento en el suelo disminuye el coeficiente de permeabilidad. Esta disminución es proporcional al aumento del contenido de cemento. La adición del 2%, por ejemplo, presentó un valor de $2,2 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$. Aumentando el contenido al 6%, este valor se alteró a $9,0 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$. Finalmente, con un 10% de cemento, el valor obtenido fue de $2,3 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$. Los resultados obtenidos están en concordancia con la literatura técnica.

PALABRAS CLAVE: Impermeabilización. Suelocemento. Ensayo de laboratorio.

1- INTRODUÇÃO

A permeabilidade de solos corresponde à facilidade com que um fluido penetra em determinado solo. O solo é composto por ar, água e sólidos e seu volume total corresponde à soma da parte ocupada pelos sólidos com a parte ocupada pelo ar e água (vazios). Quanto maior o volume de vazios do solo, maior será o coeficiente hidráulico do mesmo visto que o fluido terá mais espaço para fluir. O apelo ambiental, neste sentido, remete à prevenção de erosões ocasionadas pelo fluxo descontrolado da água bem como a condução de obras geotécnicas sustentáveis. Agentes transportadores como a água são por si só capazes de movimentar partículas e comprometer a estabilidade do solo (MITCHELL, 2005). A fim de verificar o comportamento do solo quando em contato com a água, são realizados ensaios de permeabilidade com o intuito de obter um valor consistente para que seja feita uma análise da região de controle. O grau de permeabilidade de determinada região é medido por meio de um coeficiente hidráulico, correspondente a velocidade em que o fluido percorre os espaços vazios do solo.

Com base na demanda por novas tecnologias referente à engenharia de solos, a hipótese levantada é de que acréscimos de percentuais controlados de cimento em relação à massa seca do solo acarretam em mudanças em relação ao valor do coeficiente hidráulico. O estudo da permeabilidade é proveniente da necessidade de elaboração de sistemas controlados cuja aplicação segura depende do controle da vazão de um fluido por determinada região. Tendo como base a área geotécnica da Engenharia Civil, o fluido considerado na maioria das obras de terra corresponde à água. Esta, quando em contato com o solo, ocasiona variações de tensões (seja em situações de acréscimo ou alívio – pressão neutra) que podem e devem ser controladas com base em parâmetros estudados em projeto para garantir a segurança da estrutura. O estudo da percolação da água nos solos é de suma importância para evitar problemas práticos agrupados em razão da vazão, da análise de recalques e do estudo de estabilidade da área objeto (PINTO, 2006).

A análise precária do coeficiente hidráulico quando em projeto tende a problemas que vão desde recalques em fundações de estruturas verticais ou barragens, adensamento inconsistente de aterros à má qualidade em obras de drenagem. Quando em obras referentes a controle de vazão de aterros, tais que envolvem um volume considerável de solo comprimido, o grau de permeabilidade tem empregabilidade em relação ao volume de fluido que percolará a camada de solo, este que deve possuir uma faixa máxima de tolerância, determinada por norma, para garantir a durabilidade e segurança do projeto. Um volume excessivo de fluido percorrendo o solo pode acarretar diversos problemas como recalques e carreamento de partículas sólidas, ocasionados pela perda de resistência do solo dada a variação de tensões efetivas promovidas pelo fluxo da água, que comprometeria a eficiência/segurança da obra assim como sua utilização plena. Particularizando, casos de aterros localizados em fundo de lagoas ou zonas de proteção ambiental que visam a proteção do lençol freático, cujo objetivo da obra é impermeabilizar o solo natural local e impedir a

passagem de substâncias nocivas ao meio-ambiente, é possível atingir esse fim utilizando camadas de solo compactado para diminuir a vazão através da diminuição do grau de permeabilidade. Além disso, é possível ainda utilizar-se de métodos de estabilização química aumentando-se a resistência do solo e diminuindo sua compressibilidade e permeabilidade. Nesse sentido, diversos produtos podem ser utilizados. Os mais comuns são a adição de cal hidratada e de cimento. Num cenário mais atual, encontram-se na literatura diversos trabalhos que abordam a utilização do solo com cimento e cal (vide, por exemplo, os trabalhos de LIMA et al., 1996; BUENO, 1996; BUENO et al., 1996; CONSOLI, ULBRICH, & PRIETTO 1997b; CONSOLI, PRIETTO & ULBRICH, 1998a; CONSOLI, VENDRUSCOLO & PRIETTO, 2003a; CONSOLI et al., 2004; SANTOS, 2004; CASAGRANDE, 2005; BENTO & CARVALHO, 2006; FATAHI, LE & KHABBAZ, 2013; LI & ZORNBERG, 2013; CRISTELO et al., 2015; FESTUGATO et al., 2018; WEI et al., 2018).

A grande utilização de solo com cimento pode ser justificada pelo fato desse material compósito causar aumento significativo de resistência e rigidez quando comparado ao solo natural, o que faz com que ele possua várias aplicações: em fundações superficiais, em proteção de taludes, em barragens, e, principalmente, em base e sub-base de pavimentos flexíveis. Normalmente são utilizados teores de cimento entre 5 e 10% em relação à massa seca e com padrões rígidos de qualidade (durabilidade e resistência à compressão simples). Além disso, o cimento tem sido adicionado aos solos para impermeabilização de fundos de aterros e de lagoas de estabilização. O objetivo é sempre de diminuir o coeficiente de permeabilidade do solo de forma a proteger o subsolo bem como o lençol freático.

Dessa maneira, este trabalho avaliou a variação do coeficiente de permeabilidade de um solo arenoso com acréscimos de diferentes teores de cimento.

2. OBJETIVOS

Avaliar o coeficiente de permeabilidade de solos arenosos quando acrescidos com percentuais controlados de cimento em relação à sua massa seca.

3. METODOLOGIA

3.1 EQUIPAMENTOS

Todo o procedimento prático, realizado em laboratório, foi desenvolvido por meio da utilização dos seguintes equipamentos:

- Estufa de Secagem e Esterilização FANEM Modelo 315 SE
- Balança de precisão 0,01g QUIMIS Modelo BG4000
- Permeâmetro
- Paquímetro digital DIGIMESS
- Cronômetro TECHNOS
- Molde metálico
- Cilindro de compactação

- Sistema com válvulas e tubos graduados
- Macaco Garrafa Hidráulico MARCON Modelo GM-8T

3.2 MÉTODOS DE ANÁLISE

O solo utilizado na pesquisa foi retirado de uma profundidade de 0,95m do Campus Experimental da Faculdade de Engenharia de Bauru (FEB-UNESP) (Figura 1). Para sua classificação foi realizado ensaio de granulometria conjunta.

Figura 1 – Local de extração do solo estudado: Faculdade de Engenharia de Bauru/UNESP.



Fonte: Google Maps, 2019.

Para a moldagem dos corpos de prova, foram realizados ensaios de compactação do tipo Proctor Normal (ABNT NBR 7.182/86). Com esse ensaio foi possível determinar os parâmetros ótimos do solo: massa específica aparente seca máxima ($\rho_{d,Max}$) e umidade ótimo (w_{ot}). Assim, os corpos de prova utilizados no ensaio de permeabilidade foram moldados com esses parâmetros utilizando-se, no entanto, para a compactação do solo no permeâmetro o valor referente a 95%.

Para realizar os procedimentos experimentais coletaram-se valores de umidade natural do solo utilizando a estufa FANEM. O acréscimo de cimento (2, 4, 6, 8 e 10%) foi realizado em relação à massa seca do solo. A Figura 2 ilustra o processo de homogeneização da mistura solo-cimento.

Considerando o grau de compactação de 95% e as dimensões do molde metálico (altura 10 cm, diâmetro 5 cm), a modelagem do corpo de prova cilíndrico de mesmas dimensões foi dividida em três camadas de volumes iguais, compactadas ao grau ótimo por meio de um cilindro de massa 2,5 kg em queda livre. Após a compactação, o corpo de prova foi removido do cilindro metálico com auxílio de Macaco Garrafa Hidráulico MARCON e compactado em outro cilindro denominado permeâmetro. Este, possui entradas que são conectadas ao fluxo

de água tanto em sua superfície superior quanto na parte inferior de sua área lateral. O permeâmetro é um instrumento empregado na obtenção do gradiente hidráulico e em casos de fluxo de percolação vertical também é possível desenvolver temas importantes como o gradiente crítico (PINTO, 2006).

Figura 2 – Acréscimo de cimento em relação à massa seca do solo.



Com o intuito de impermeabilizar totalmente as laterais do corpo de prova a fim de induzir o fluxo de água a percolar apenas na direção vertical do CP, camadas de parafina são sobrepostas por toda área de superfície lateral. A parafina funciona como uma camada de isolamento entre o solo que foi moldado e a área externa, impedindo as trocas de massas.

A montagem interna do sistema é baseada em camadas sequenciais de mesma altura: na base localiza-se uma camada de pedregulho cuja função é filtrar o fluxo de água e impedir que impurezas obstruam os pontos de saída do fluido. Acima da camada de pedregulho, o corpo de prova que se encontra no centro do permeâmetro é envolvido por uma camada espessa de parafina (separada por uma fina membrana de borracha em relação a camada de pedregulho). A camada de parafina, por possuir um coeficiente hidráulico extremamente baixo, funciona como impermeabilizante e gera um fluxo preferencial, induzindo a água a percolar apenas no corpo de prova, impedindo passagens laterais. Com essa mesma função tem-se uma camada de Bentonita (argila coloidal montmorillonita) e, posteriormente, outra de parafina que se estende até o limite entre a área lateral e a superfície do CP. Outra camada de pedregulho é sobreposta no topo do CP com a função de regularizar o fluxo que percorrerá o CP, e então o sistema estará totalmente montado e pronto para a coleta de medidas (Figura 3).

O ensaio de permeabilidade descrito anteriormente, foi realizado seguindo-se a recomendação da ABNT NBR 14545 (2000). O tubo graduado possui diâmetro de 80 mm.

O ensaio de permeabilidade é realizado submetendo o permeâmetro (com CP já saturado) a um gradiente hidráulico, interligando um sistema com válvulas e tubos graduados ao permeâmetro através de conectores, de forma a induzir o fluxo de água ao corpo de prova. Por conta do cimento, realizou-se o experimento a partir do modelo de carga variável (Figura 4) uma vez que existe a hipótese de a permeabilidade diminuir consideravelmente.

Figura 3 – Detalhe da montagem do ensaio no permeâmetro (corpo de prova envolto por parafina).



Figura 4 – Permeômetros submetidos ao ensaio de permeabilidade, sob carga variável



A vazão de saída do permeâmetro é medida por meio dos tubos graduados e com base nesses valores, obtêm-se os valores do coeficiente hidráulico. O coeficiente de permeabilidade é dependente do peso específico do material e da viscosidade do líquido. Como estas duas propriedades variam com a temperatura (PINTO, 2006), foram utilizados fatores de correção para uniformizar a temperatura a 20°C.

4. RESULTADOS

O ensaio de granulometria forneceu a classificação do solo como “areia média a fina pouco argilosa marrom avermelhada”. Os resultados obtidos do ensaio de compactação estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros ótimos de compactação definidos pelo Ensaio de Proctor Normal

Ensaio de Proctor Normal ABNT NBR 7.182/86	
ρd_{Max}	1,955g/cm ³
w_{ot}	10,8%

A Tabela 2 apresenta uma síntese do trabalho realizado. São apresentados os percentuais de cimento adicionados, os detalhes pertinentes ao permeâmetro bem como os valores obtidos para os coeficientes de permeabilidade.

Tabela 2 – Resultados dos ensaios de permeabilidade para taxas variáveis de cimento

Teor de Cimento (%)	Área do tubo de carga (cm ²)	i (m/m)	k (cm/s)	T (°C)	Fator de correção (CK)	K ₂₀ (cm/s)
2	0,51	9,05	2,8 x 10 ⁻⁴	31	0,781	2,2 x 10 ⁻⁴
4	0,51	9,95	5,1 x 10 ⁻⁵	29	0,815	4,1 x 10 ⁻⁵
6	0,51	9,80	1,1 x 10 ⁻⁵	27	0,851	9,0 x 10 ⁻⁶
8	0,13	9,90	3,5 x 10 ⁻⁶	26	0,870	3,1 x 10 ⁻⁶
10	0,13	9,90	2,9 x 10 ⁻⁶	27	0,851	2,3 x 10 ⁻⁶

i = gradiente hidráulico; k = coeficiente de permeabilidade; T = temperatura; K₂₀ = Coeficiente de permeabilidade à temperatura de 20°C.

Note-se que a Tabela 2 representa o valor médio do coeficiente de permeabilidade (“k₂₀”) para cada ensaio, visto que para cada taxa de cimento foram coletadas 10 medidas em um intervalo de tempo de três dias. Os valores médios equivalem aos valores do terceiro dia de leitura, quando o K₂₀ tende a se estabilizar. O coeficiente de permeabilidade é calculado com base na Lei de Darcy, que considera o fluxo de um fluido a escoar por um meio poroso. Importante salientar que dentre os fatores principais que afetam as propriedades do material solo-cimento, o tipo de solo é sem dúvidas o mais importante, visto que um solo inadequado pode não corresponder conforme o desejado. Além disso, o efeito da umidade na qualidade do solo-cimento é relevante para que ocorra a reação química água-cimento. A umidade necessária para a hidratação do cimento é suprida pela umidade ótima obtida no ensaio de Proctor Normal (GRANVILLE, 1951).

O valor obtido do coeficiente de permeabilidade do solo natural foi de 2,0 x 10⁻³ cm/s. Nota-se que este sofre drásticas alterações com a adição do cimento. Inicialmente com o acréscimo de

2% em massa de cimento, a permeabilidade da amostra analisada passou a $2,2 \times 10^{-4}$ cm/s que, apesar de não representar grande variação, simboliza uma mudança de valor significativa para dada porcentagem de cimento considerada. Quando a quantidade de cimento passou a representar 4% da massa dos sólidos a permeabilidade diminuiu para $4,1 \times 10^{-5}$ cm/s (grande variação quando em comparação ao acréscimo anterior (2%). Posteriormente, em 6% de acréscimo em massa de cimento, o coeficiente médio de permeabilidade diminuiu ainda mais atingindo o valor de $9,0 \times 10^{-6}$ cm/s. Para 8%, obteve-se um coeficiente de $3,1 \times 10^{-6}$ cm/s. O último percentual analisado, 10%, apresentou o menor valor ($2,3 \times 10^{-6}$ cm/s), o que remete ao percentual cujo solo se torna menos permeável dentre os parâmetros analisados.

Diversos trabalhos da literatura (vide os trabalhos de HAMIDI & HOORESFAND, 2013; FATAHI, LE & KHABBAZ, 2013; CRISTELO et al., 2015; FESTUGATO et al., 2018; WEI et al., 2018) tem estudado o uso de cimento e cal no estabilização química dos solos. Dentre estes, a grande maioria tem constatado que os valores de resistência mecânica aumentam significativamente bem como ocorre a diminuição do coeficiente de permeabilidade dos solos. Loch (2013), por exemplo, avaliando barreiras para proteção ambiental utilizando solos estabilizados com cal e cimento observou nos solos estabilizados com cimento acréscimos de até 5,1 MPa na resistência e diminuição no coeficiente de permeabilidade até o valor de $9,5 \times 10^{-5}$ cm/s. Nesse sentido, os resultados obtidos na pesquisa mostram coerência com os resultados de pesquisas realizadas no cenário nacional e internacional.

Além disso, constata-se que as maiores diminuições nos valores de k ocorrem para os solos estabilizados com cimento. No entanto, é importante salientar que elevados teores de cimento (de 8 a 10%) podem tornar-se onerosos e, nesse sentido, é possível observar que, a partir de 6%, os valores do coeficiente de permeabilidade permanecem na mesma ordem de grandeza. Isso pode resultar em economia significativa a depender do tamanho da obra, pois a quantidade de cimento a ser utilizada poderá fornecer o mesmo resultado com custos bem menores.

5. CONCLUSÃO

Com base na análise dos valores determinados a partir dos ensaios em laboratório, nota-se que o acréscimo de taxas percentuais de cimento diminui consideravelmente o valor do coeficiente de permeabilidade do solo. As maiores reduções ocorreram para o teor de 10% de cimento. Esses valores corroboram a literatura técnica em nível nacional e internacional. No entanto, os resultados mostram que o teor de 6% é o valor mais interessante para se adicionar o cimento ao solo de forma que à partir desse valor, os valores do coeficiente de permeabilidade permanecem na mesma ordem de grandeza.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BUENO, B.S. **Aspectos de estabilização de solos com uso de aditivos químicos e de inclusões plásticas aleatórias**. Texto Sistematizado (Livre Docência em Geotecnia), Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 99 p., 1996.

BUENO, B.S.; LIMA, D.C.; TEIXEIRA, S.H.C.; RIBEIRO N.J. **Soil fiber reinforcement: basic understanding**. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENVIRONMENTAL GEOTECHNOLOGY, 1996, San Diego. Anais... v.1, p. 878-884, 1996.

CARVALHO, C.A.B., BUENO, B.S., MACHADO, C.C. **Estudos laboratoriais do comportamento de um solo residual arenoso reforçado com fibras de polipropileno, visando à aplicação em estradas florestais**. Revista *Árvore*, Viçosa-MG, v.30, n.2, p.215-222, 2006.

CASAGRANDE, M.D.T. **Comportamento de solos reforçados com fibras submetidos a grandes deformações**. Tese de Doutorado, UFRGS, Porto Alegre, 219 p., 2005.

CONSOLI, N. C.; MOTARDO, J. P.; DONATO, M.; PRIETTO, P. D. M. **Effect of material properties on the behaviour of sand-cement-fibre composites**. *Ground Improvement*, ISSMGE, v.8 n.2, p.77-90, 2004

CONSOLI, N.C.; PRIETTO, P.D.M.; ULBRICH, L.A. **Influence of fiber and cement addition on behavior of sandy soil**. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, New York, v.124, n.12, p. 1211-1214, 1998-a.

CONSOLI, N.C.; ULBRICH, L.A.; PRIETTO, P.D.M. **Engineering behavior of randomly distributed fiber-reinforced cement soil**. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON RECENT DEVELOPMENTS IN SOIL AND PAVEMENT MECHANICS, 1997, Rio de Janeiro. *Proceedings...* Rotterdam: A.A. Balkema, p.481-486, 1997-b.

CONSOLI, N.C.; VENDRUSCOLO, M.A.; PRIETTO, P.D.M. **Behavior of plate load tests on soil layers improved with cement and fiber**. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, New York, v.129, n.1, p. 96-101, 2003-a.

CRISTELO, N., CUNHA, V. M. C. F., DIAS, M., GOMES, A. T., MIRANDA, T., ARAÚJO, N. **Influence of discrete fibre reinforcement on the uniaxial compression response and seismic wave velocity of a cement-stabilised sandy-clay**, *Geotextiles and Geomembranes*, 43, pp. 1-13, 2015.

FATAHI, B., LE, T.M., KHABBAZ, H., 2013. **Small-strain properties of soft clay treated with fibre and cement**. *Geosynth. Int.* 20, 286-300, 2013.

FESTUGATO, L. SILVA, A. P., DIAMBRAC, A., CONSOLI, N. C., IBRAIMC, E. **Modelling tensile/compressive strength ratio of fibre reinforced cemented soils**. *Geotextiles and Geomembranes*, 46 (2018) 155–165, 2018.

GRANVILLE, W. H. **Mecânica dos Solos para engenheiros rodoviários**. Vol. 1. 1951.

HAMIDI, A., HOORES FAND, M. **Effect of fiber reinforcement on triaxial shear behavior of cement treated sand**. *Geotext. Geomembr.* 36, 1-9, 2013.

LI, C., ZORNBERG, J. **Mobilization of reinforcement forces in fiber-reinforced soil.** J. Geotech. Geoenviron. Eng. 139, 107-115, 2013.

LIMA, D.C.; BUENO, B.S.; THOMASI, L. **The mechanical response of soil-lime mixtures reinforced with short synthetic fiber.** In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENVIRONMENTAL GEOTECHNOLOGY, 3., 1996, San Diego. Proceedings... v.1, p.868-877, 1996.

LOCH, F. C. **Barreiras de solos estabilizados com cal e cimento para proteção ambiental,** 2013. Dissertação (Mestrado em Geotecnia), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2013.

MITCHELL, K. James; SOGA, Kenichi. **Fundamentals of Soil Behavior.** 3. Ed. 2005.

NBR 14545 (2000). **Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável.** Associação Brasileira de Normas Técnicas ABNT. Rio de Janeiro.

NBR 7182 (1986). **Solo – Ensaio de Compactação.** Associação Brasileira de Normas Técnicas ABNT.

PINTO, Carlos de Sousa. **Curso Básico de Mecânica dos Solos.** 3. Ed. 2006.

SANTOS, A.P.S. **Comportamento de misturas solo-cimento-fibra sob compressão confinada com medição de tensão lateral.** Porto Alegre, Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS, 125p., 2004.

WEI, L., CHAI, S. X., ZHANG, H. Y., SHI, Q. **Mechanical properties of soil reinforced with both lime and four kinds of fiber,** *Construction and Building Materials.* 172 (2018) 300–308, 2018.