

CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA COMO SUBSÍDIO NA AVALIAÇÃO DE ÁREA CONTAMINADA EM INDÚSTRIA PETROQUÍMICA

Júlia Brazil Sousa¹, Helena Polivanov², Patricia Moraes³

¹ Universidade Federal do Rio de Janeiro, Avenida Brigadeiro Trompowski, s/n
juliabrazilsousa@yahoo.com

^{2,3} Universidade Federal do Rio de Janeiro, Avenida Brigadeiro Trompowski, s/n

Resumo – O presente trabalho está inserido no Sistema de Gestão Ambiental da Petroflex Indústria e Comércio S.A., desenvolvido em parceria com o Instituto de Geociências da UFRJ. O objetivo consiste na determinação da condutividade hidráulica em laboratório a partir de amostras indeformadas de argila orgânica marinha, e na estimativa da influência dessa propriedade na retenção da pluma de contaminação resultante do descarte indevido de resíduos industriais. Os resultados foram comparados àqueles obtidos em ensaios *in situ*, e relacionados a propriedades químico-mineralógicas do material em estudo para observação do comportamento do solo em relação à contaminação. Os valores obtidos em laboratório variam de 10^{-5} a 10^{-7} cm/s. Resultados de ensaios do tipo *slug test* realizados pela empresa encontram-se na ordem de 10^{-8} cm/s. Associando os reduzidos valores de condutividade hidráulica encontrados às propriedades químico-mineralógicas do material em questão, concluiu-se que a possível pluma de contaminação existente na área encontraria dificuldade em atravessar a camada de argila orgânica (uma barreira natural à pluma) sem que a concentração inicial fosse alterada, uma vez que vários fatores propiciam a interação do contaminante com o solo, diminuindo assim a concentração da substância no fluido (água), propiciando boas condições para medidas de remediação.

Palavras-Chave: condutividade hidráulica; propriedades químico-mineralógicas; contaminação

Abstract – The activities here described were undertaken in the scope of the Environmental Management System (EMS) of Petroflex Ind. & Com. S.A., done in cooperation with the Geosciences Institute (Instituto de Geociências) of the UFRJ. In order to determine the hydraulic conductivity of the media in the lab, and to estimate the influence of this property on the retention of a contamination plume resulted from unsuitable disposal of industrial residues, five undisturbed samples of marine organic clay were tested. The hydraulic conductivity values obtained in laboratory vary from 10^{-5} to 10^{-7} cm/s. Slug tests done by the company personnel yielded results with a magnitude of 10^{-8} cm/s. The small values of hydraulic conductivity, associated to chemical and mineralogical properties from the material, lead to the conclusion that the possibly existing contamination plume would hardly pass through the organic clay layer without having its concentration modified, since many factors provide interaction between soil and contaminant, reducing the substance concentration in fluid (water) and providing good conditions to remediation measures.

Keywords: hydraulic conductivity, chemical-mineralogical properties, contamination

1. Introdução

A identificação e caracterização dos condicionantes geológicos e hidrogeológicos do meio constituem uma importante etapa nos estudos relacionados às conseqüências do descarte de resíduos, bem como à investigação e remediação de áreas contaminadas, como no caso da Petroflex Ind. & Com. S.A., importante petroquímica fluminense. Um dos parâmetros que podem ser destacados, possuindo grande importância na compreensão da migração dos contaminantes no solo, é a condutividade hidráulica do meio.

Essa propriedade diz respeito à facilidade com que um fluido atravessa o meio poroso e, juntamente com outros importantes parâmetros geológicos, geotécnicos e geomorfológicos, caracteriza o meio físico em questão. Tem influência direta na maior ou menor concentração de contaminantes, assim como na maneira com que a área responde à contaminação, uma vez que a água que percola o solo é o principal responsável pelo transporte dos possíveis contaminantes, e a direção do fluxo depende das direções e relações de anisotropia das condutividades hidráulicas principais do meio (Tressoldi & Consoni, 1998).

Em geral, solos argilosos apresentam baixas condutividades hidráulicas e elevada capacidade de sorção dos contaminantes nas partículas argilosas, funcionando como barreiras naturais e dificultando sua migração.

2. Objetivos

O objetivo geral deste trabalho consiste na determinação da condutividade hidráulica em laboratório a partir de amostras indeformadas de argila orgânica marinha, e na estimativa da influência dessa propriedade na retenção da pluma de contaminação resultante do descarte indevido de resíduos industriais. Paralelamente os resultados foram comparados àqueles obtidos em ensaios *in situ*, e relacionados a propriedades químico-mineralógicas do material em questão.

3. Embasamento Teórico

A condutividade hidráulica foi quantificada em 1856 pelo engenheiro francês Henri Darcy através de um experimento que relacionava a velocidade de percolação do fluido no meio poroso e o gradiente hidráulico (Freeze & Cherry, 1979; Silveira *et al.*, 1993; Fetter, 1994; Libardi, 1995; Caputo, 1996; Pinto, 2000; entre outros).

Na tentativa de quantificar o movimento de água no solo, Darcy realizou uma experiência que consistia em introduzir, em uma coluna de areia homogênea um determinado fluxo de água (Q) até que este atingisse uma situação de equilíbrio dinâmico. Dessa maneira, concluiu que o fluxo que atravessava a coluna de areia era diretamente proporcional à área A de sua seção transversal, à diferença de carga piezométrica (h_1-h_2) e inversamente proporcional ao comprimento L da coluna de areia (Equação 1).

$$Q \propto A \frac{(h_1-h_2)}{L}, \quad (1)$$

Equilibrando-se a equação acima, obtém-se uma constante de proporcionalidade K, dando origem à chamada Lei de Darcy, expressa pela Equação 2.

$$Q = kA \frac{(h_1-h_2)}{L} \quad (2)$$

Muitos fatores influenciam a condutividade hidráulica K, entre eles: a densidade e a viscosidade da água; tamanho, forma e número de poros; e as propriedades do fluido e das partículas do solo (permeabilidade) que afetam a atração entre os dois materiais (McCarthy, 1988). No entanto, sendo a viscosidade e a densidade constantes, para fins de estudo de percolação de água dentro do solo, considera-se permeabilidade e condutividade como sinônimos e somente dependentes do número de poros e como eles estão interconectados (Silveira *et al.*, 1993).

No laboratório a condutividade hidráulica (K) pode ser determinada através de ensaios de carga constante ou variável. Quando a condutividade hidráulica é muito baixa, a determinação pelo permeâmetro de carga constante é pouco eficiente, e assim utiliza-se preferencialmente a carga variável.

No permeâmetro de carga variável, a amostra é colocada em um cilindro de área transversal (A) e comprimento (L) e fechada entre duas placas porosas. A descarga (Q) é medida em uma bureta graduada de seção a, verificando-se o tempo (t) que a água leva para baixar de uma altura inicial (h_0) até a altura final (h_f). O permeâmetro de carga variável está representado na Figura 1.

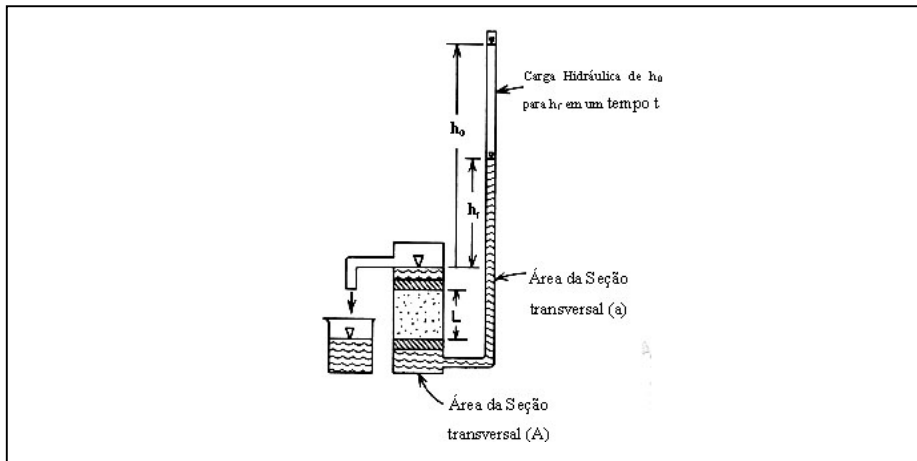


Figura 1. Esquema do permeâmetro de carga variável (modificado de Freeze & Cherry, 1979).

Conhecendo as características do cilindro (área A e comprimento L) e a área da bureta a, K é calculada a partir da Equação 3 (Bowles, 1978; Whitlow, 1983; Liu e Evett, 1990; Pinto, 2000; entre outros).

$$K = \frac{a \times L}{A \times t} \times \ln \frac{h_0}{h_f} \quad (3)$$

Também no campo é possível quantificar a condutividade hidráulica, com a vantagem de experimentar o solo não deformado em sua localização natural, com respeito à superfície do solo, ao lençol freático e outros fatores que possam interferir na taxa de fluxo. Entretanto, o baixo coeficiente de permeabilidade associado às argilas muitas vezes envolve um longo período de tempo para esse tipo de ensaio, requerendo ainda atenção especial a diversos outros fatores como a evaporação, por exemplo. O *slug test* é um método de campo relativamente rápido, e determina a condutividade hidráulica a partir da mudança instantânea do nível d'água, provocada pela rápida introdução ou retirada de um objeto, por exemplo, dentro de um poço ou piezômetro. O ensaio consiste em medir a recuperação do nível estático com o tempo, considerando-se para fins matemáticos que o meio seja homogêneo e contínuo, com regime de escoamento laminar.

4. Área de Estudo

A área em estudo está localizada na borda noroeste da Baía de Guanabara, no Pólo Industrial de Duque de Caxias, nas proximidades da REDUC. Engloba a área de passivo ambiental da Petroflex Indústria & Comércio S.A. em Campos Elíseos, Município de Duque de Caxias, no Rio de Janeiro, e está situada num complexo de manguezal, cuja sedimentação característica é de argila orgânica marinha. A estratigrafia da área pode ser observada na Figura 2, e foi levantada com base nos poços estratigráficos e monitoramento instalados em trabalhos anteriores.

A distribuição dos estratos na área é um importante condicionante da migração dos contaminantes, uma vez que as camadas apresentam valores de condutividade hidráulica variáveis.

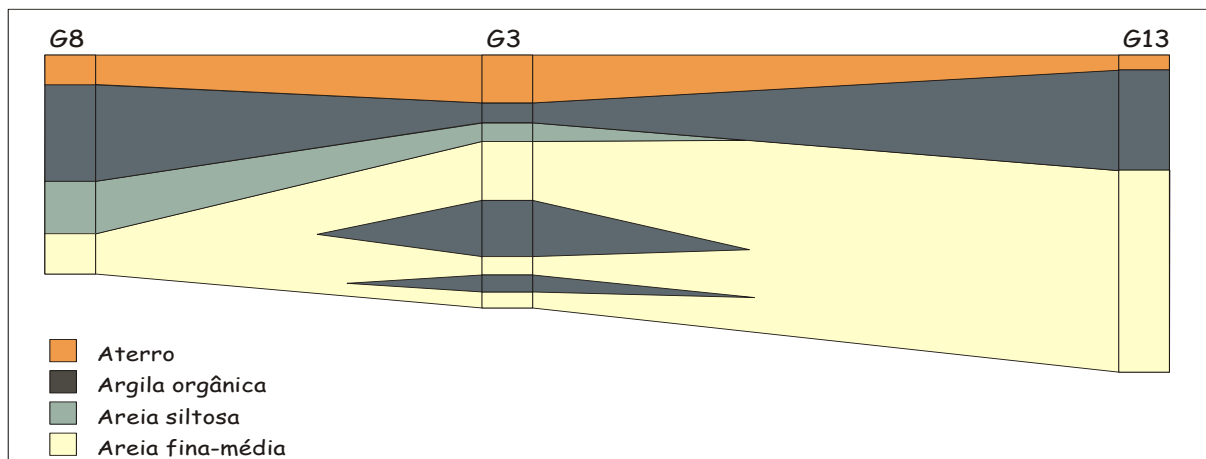


Figura 2. Seção geológica da área, mostrando a disposição das camadas (modificado de Ramos, 2002).

A Petroflex tem sua área industrial e demais dependências instaladas em áreas aterradas, prática comum na época da instalação do pólo industrial de Duque de Caxias. De um modo geral, a área está sobre depósitos quaternários predominantemente argilosos de origem marinha e flúvio-marinha, sobrepostos ao embasamento e ao solo residual.

As camadas areno-argilosas, interdigitadas, apresentam pequenas variações de granulometria e variam de 1 a 10 m de espessura aproximadamente, nem sempre apresentando continuidade lateral. Acima delas na estratigrafia ocorre a argila orgânica marinha estudada, que constitui na verdade um pacote de camadas predominantemente argilosas e extremamente plásticas. Ocorre em praticamente quase toda a extensão da área e pode atingir 20 m de espessura. O material é extremamente rico em fragmentos de vegetais e conchas e apresenta coloração variável do cinza ao negro. Sobre essa sucessão, uma camada de material silte argiloso de aproximadamente 2 metros recobre toda a área, constituindo o aterro da fábrica (Braga, 2000).

5. Materiais e Métodos

Foram coletadas 5 amostras indeformadas escolhendo-se o nível de argila orgânica marinha para a retirada das mesmas. Os perfis dos poços de monitoramento na Figura 3 mostram a disposição das camadas e indicam o nível de retirada das amostras.

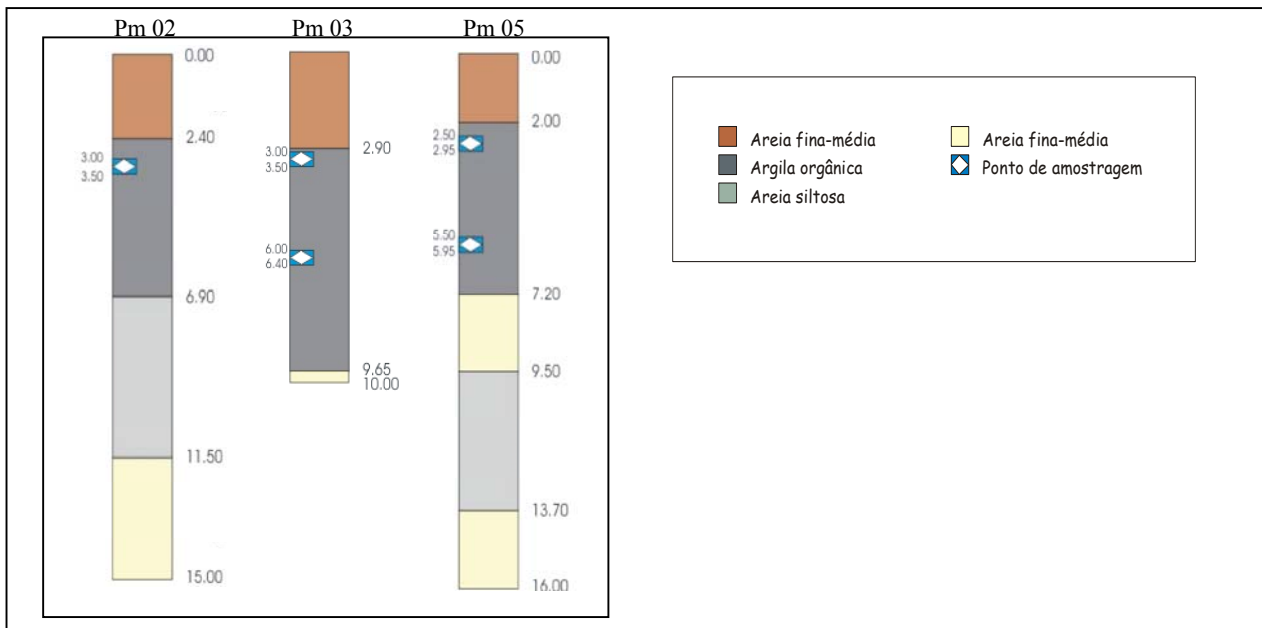


Figura 3. Perfis dos poços de monitoramento mostrando a disposição das camadas e a profundidade da amostragem (modificado de Engesolos, 2001).

5.1. Ensaio de Condutividade Hidráulica

Os ensaios de condutividade hidráulica foram realizados no permeâmetro de carga variável do Laboratório de Hidrogeologia da UFRJ, montado por ocasião desse estudo. O equipamento foi projetado tendo em vista as necessidades do laboratório, adaptando-se o projeto do permeâmetro do Laboratório de Geotecnia da PUC-Rio à realidade da UFRJ e aos meios disponíveis. O material necessário para a montagem do permeâmetro, bem como o material de apoio foi financiado pela ANP, através da taxa de bancada do PRH-18.

O procedimento do ensaio é o mesmo relatado no item 3. Devido à baixa condutividade hidráulica do material argiloso, o ensaio dura em torno de dois dias para que um número satisfatório de medidas seja realizado. Assim, são efetuadas cerca de 5 medidas de carga hidráulica (h_1 , h_2 , h_3 , h_4 e h_5). Os valores de condutividade hidráulica foram obtidos através da Equação 3.

Os ensaios de campo foram realizados pela própria empresa utilizando o *slug test*, também especificado no item 3.

5.2. Propriedades Químico-Mineralógicas

O material sob estudo foi caracterizado em laboratório quanto às propriedades pedológicas, físicas e químico-mineralógicas por Ramos (2002). As propriedades químico-mineralógicas, em especial, aliadas à condutividade hidráulica do material em questão, podem interferir diretamente na maneira como a área responde a contaminação, tornando assim importante uma análise integrada dos dados já disponíveis, na tentativa de entender melhor o comportamento da camada de argila orgânica. Foram incluídos neste trabalho textura e mineralogia, além dos percentuais de matéria orgânica e capacidade de troca catiônica, para fins comparativos.

6. Resultados e Discussões

A Tabela 1 mostra os resultados encontrados em laboratório para as amostras estudadas. Segundo a classificação de Ortigão (1993), estão dentro da faixa de condutividade hidráulica baixa, variando de 10^{-5} a 10^{-7} cm/s.

Tabela 1. Valores da condutividade hidráulica com o permeâmetro de carga variável

Amostra	K (cm/s)
2A	$5,35 \times 10^{-7}$
3A	$6,31 \times 10^{-7}$
3B	$5,21 \times 10^{-7}$
5A	$3,19 \times 10^{-5}$
5B	$5,82 \times 10^{-7}$

Os resultados obtidos para quatro das cinco amostras (2A, 3A, 3B e 4B) apresentam valores similares, divergindo em duas ordens de magnitude daquele obtido para amostra 5A. Tal fato pode ser explicado pelo teor de areia presente nesta amostra, estimado em 20%. Com o aumento de granulometria e o conseqüente aumento do espaço poroso, a passagem do fluido é facilitada, refletindo no aumento da condutividade hidráulica.

Pode-se notar, observando-se a Tabela 1 e a Tabela 2 que os valores obtidos em laboratório são superiores àqueles encontrados em campo. A utilização de amostragem pouco representativa do solo nos ensaios de laboratório, em função da dimensão reduzida, pode levar à superestimação dos valores da condutividade hidráulica, podendo a amostra conter uma porcentagem maior de poros interconectados do que o solo dentro do contexto geral. Aliado a esse fato observa-se em todas as amostras a presença de conchas e raízes, que funcionariam como condutos para o fluido.

Tabela 2. Valores da condutividade hidráulica com o *slug test*.

Material	K (cm/s)
Argila orgânica	$1,12 \times 10^{-8}$
Areia pouco argilosa	$1,75 \times 10^{-5}$

Os ensaios realizados na camada arenosa em campo apresentam valores similares aos obtidos para amostra 5A.

6.1. Relação entre os Valores de Condutividade Hidráulica e as Propriedades Químico-Mineralógica do Solo

Classificada por Ramos (2002) como horizonte C, a camada de argila orgânica apresenta teores acima de 95% da fração argila na maioria dos poços, excetuando-se aquele onde o teor de areia é significativo e alcança valores próximos a 20%.

Como pode ser observado na Tabela 3, a mineralogia do material é composta basicamente por caulinita, gibbsita, illita e argilominerais do grupo da esmectita (Ramos, 2002), sendo estes últimos expansivos e instáveis em presença de água (Santos, 1989). Além disso, a presença desse grupo de argilominerais confere plasticidade ao solo.

Tabela 3. Mineralogia da fração argila

Mineralogia Encontrada
Caulinita
Gibbsita
Illita
Esmectita

A alta capacidade de troca catiônica desses minerais fica evidenciada na Tabela 4, assim como a variação do percentual de matéria orgânica.

Tabela 4. Capacidade de troca catiônica e Teor de matéria orgânica

Capacidade de troca catiônica (CTC)	Teor de matéria orgânica (%)
Atividade da fração argila (T)	$T > 27 \text{ cmol}_c/\text{Kg}$
Saturação por Bases (S)	$S > 50\%$

No caso do teor de matéria orgânica, os valores elevados influenciam de forma relevante os mecanismos de sorção, uma vez que os compostos orgânicos são complexados pela matéria orgânica, ficando assim retidos no anel e diminuindo a concentração da substância no fluido. Da mesma forma, em função da alta capacidade de troca catiônica, principal mecanismo de retenção de íons dissolvidos no fluido, as substâncias aderem à superfície dos argilominerais, passando a fazer parte da fase sólida e deixando a fase líquida empobrecida (Freeze & Cherry, 1979).

Além disso, a fração argila, que inclui além dos argilominerais, materiais inorgânicos não cristalinos e matéria orgânica, apresenta grande área superficial e alta carga elétrica, propriedades que potencializam a interação de substâncias dissolvidas com o solo (Freeze & Cherry, 1979).

Aliada a todas as propriedades acima, a baixa condutividade hidráulica de solos finos, refletida na baixa velocidade de percolação do fluido, permite que haja interação das substâncias existentes na água com o solo em questão, propiciando tempo suficiente para que ocorram reações químicas. Quanto maior o tempo de contato direto entre o solo e o contaminante dissolvido no fluido, mais intensa a geração de novos compostos, e maior a possibilidade de retenção dos compostos pelo solo.

7. Considerações Finais

Após a realização dos ensaios de condutividade hidráulica nas amostras, observou-se que os resultados obtidos para quatro das cinco amostras (2A, 3A, 3B e 5B) estão dentro da mesma faixa de valores (10^{-7}), sugerindo uma continuidade lateral da condutividade hidráulica, evidenciando certa homogeneidade da camada de argila orgânica.

Comparando-se os valores da condutividade hidráulica estimados em laboratório e *in situ*, observa-se que ensaios em laboratório geralmente resultam em valores superiores àqueles encontrados por meio de ensaios em campo. Essa diferença pode residir na possibilidade de a amostragem, sendo pouco representativa do contexto geral do solo, mascarar e superestimar os valores reais da condutividade hidráulica.

Os reduzidos valores de condutividade hidráulica encontrados, associados às propriedades químico-mineralógicas do material em questão, levam à conclusão que a possível pluma de contaminação existente na área encontraria dificuldade em atravessar a camada de argila orgânica sem que sua concentração inicial fosse alterada, uma vez que vários fatores propiciam a interação do contaminante com o solo diminuindo assim a concentração da substância no fluido (água). A baixa velocidade imposta ao fluido, reflexo da baixa condutividade hidráulica, pode resultar no retardamento da frente de contaminação, fato que facilitaria a implantação de medidas de remediação.

Vale ressaltar que os dados químico-mineralógicos utilizados para fins comparativos são de análises realizadas em pontos adjacentes aos poços estudados nos ensaios da condutividade hidráulica. Para uma posição mais afinada acerca da influência das propriedades do solo na permeabilidade da amostra e do grau de adsorção dos contaminantes pelo material em questão, seria interessante a realização de ensaios que determinassem tais propriedades nas mesmas amostras nas quais o ensaio da condutividade hidráulica foi realizado.

8. Referências

- BOWLES, J. E. (1978). "Engineering Properties of Soils and Their Measurement," 2nd./Ed. McGraw Hill International Book Co., Tokyo. 215p.
- BRAGA, C. E. (2000). Diagnóstico das condições hidrogeológicas na área industrial ativa da Petroflex S. A. Dissertação de monografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 77p.
- CAPUTO, H. P. (1996). "Mecânica dos Solos e Suas Aplicações - Mecânica das Rochas, Fundações, Obras de Terra," 6/Ed. Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro. 234p.
- ENGESOLOS (2001). "Ensaio Geotécnicos de Campo," Relatório Interno, São Paulo. 19p.
- FETTER, C. W. (1994). "Applied Hydrogeology," 3rd./Ed. Macmillan College Publ. Co., New York. 691p.
- FREEZE, R. A., e CHERRY, J. A. (1979). "Groundwater," Prentice Hall, Englewood Cliffs. 604p.
- INFANTI Jr, N. e FILHO, N. F. (1998). Processos de dinâmica superficial. In "ABGE: Geologia de Engenharia", Oliveira, A M.S. e Brito, S. N. A (Eds), CNPq / Fapesp, São Paulo, pp.131-152.
- LIBARDI, P. L. (1995). "Dinâmica da água no solo", Edição do Autor, Piracicaba. 497p.
- LIU, C., and EVETT, J. B. (1990). "Soil Properties - Testing, Measurement, and Evaluation," 2nd./Ed. Prentice Hall, Englewood Cliffs. 375p.
- ORTIGÃO, J. A. R. (1993). "Introdução a mecânica dos solos dos estados críticos," São Paulo.
- PASTORE, E. L. e FORTES, R. M. (1998). Caracterização e Classificação de Solos. In "ABGE: Geologia de Engenharia", Oliveira, A M.S. e Brito, S. N. A (Eds), CNPq / Fapesp, São Paulo, pp. 197-210.
- PINTO, C. D. S. (2000). "Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 aulas," oficina de textos, São Paulo. 247p.
- RAMOS, D. G. B. (2002). Caracterização pedológica, químico-mineralógica e física dos solos da área da Petroflex Ind. & Com. S.A. Dissertação de monografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 68p.
- SANTOS, P. S. (1975). Tecnologia das Argilas Aplicada às Argilas Brasileiras Caracterização. Editora Edgard Blücher Ltda. Editora da USP, Vol. 1 – Fundamentos. São Paulo, 340p.
- SILVEIRA, A. L., LOUZADA, J. A., e Beltrame, L. (1993). Infiltração e armazenamento no solo. In "Hidrologia: ciência e aplicação", Vol. 1. Tucci, C. E. M., Porto Alegre. pp.335-372
- TRESOLDI, M. e CONSONI, A. J. (1998). Disposição de resíduos. In "ABGE: Geologia de Engenharia", Oliveira, A M.S. e Brito, S. N. A (Eds), CNPq / Fapesp, São Paulo, pp. 343-360.
- WHITLOW, R. (1983). "Basic Soil Mechanics", New York. 439p.