



Caracterização geológica-geotécnica de solos argilosos do Vale do Ribeira para serem empregados como barreiras selantes

Caracterización geológica-geotécnica de suelos arcillosos del Valle del río Ribeira para ser usados como barreras impermeabilizantes

Rodriguez, Jaqueline Ruiz ¹ ✉ - Rodrigues, Valéria Guimarães Silvestre ¹

Recibido: 23 de Julio de 2012 • Aceptado: 20 de Mayo de 2013

Resumen

Los sistemas de barreras impermeabilizantes y cobertura son fundamentales en el encapsulamiento de residuos, desempeñando funciones tales como aislamiento y disminución de la infiltración en el caso de las coberturas, además de minimizar la migración de contaminantes. En este contexto, la caracterización geológica-geotécnica del suelo es importante para evaluar si podrá ser usado o no como uno de estos sistemas, además de proveer datos de sus propiedades, lo que facilita la comprensión de las posibles interacciones entre el suelo y el contaminante. El objetivo de este trabajo fue caracterizar suelos arcillosos de la región del Valle del río Ribeira (Brasil). En estos suelos se realizaron ensayos de granulometría, análisis térmico, capacidad de intercambio catiónico (CIC), superficie específica (SE), conductividad hidráulica, contenido de materia orgánica y límites de Atterberg. Los ensayos granulométricos indican que los suelos analizados son materiales finos, arcilla-limo. Los ensayos de CIC, SE y los análisis térmicos, pusieron de manifiesto que la arcilla predominate es la caolinita. Los ensayos de límites de Atterberg dieron índices de plasticidad están entre 29,94 y 33,55 %, valores característicos de arcillas altamente plásticas. Todos los suelos muestran baja conductividad hidráulica (10^{-8} a 10^{-9} m / s), la que se considera adecuada para el uso en revestimientos. Se concluye que estos suelos presentan características similares, con relación a los aspectos geológicos-geotécnicos y pueden ser considerados adecuados para su empleo como barreras impermeabilizantes y coberturas.

Palabras claves: Barreras impermeabilizantes; Suelos arcillosos, Valle del río Ribeira.

Resumo

Sistemas de barreiras selantes e de cobertura são fundamentais no encapsulamento de resíduos, desempenhando funções como

1. Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo
- São Carlos - Brasil

✉ jaqueruiz@sc.usp.br; valguima@sc.usp.br

isolamento e diminuição da infiltração no caso das coberturas, além da minimização da migração de contaminantes. Neste contexto, a caracterização geológico-geotécnica do solo é importante para avaliar se ele poderá ser empregado ou não como um destes sistemas, além de fornecer dados de suas propriedades, facilitando o entendimento das interações que poderão existir entre o solo e o contaminante. Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi caracterizar solos argilosos da região do Vale do Ribeira (Brasil). Nestes solos foram realizados ensaios de granulometria conjunta, análise térmica diferencial, capacidade de troca catiônica (CTC), superfície específica (SE), condutividade hidráulica, teor de matéria orgânica e limites de consistência. Os ensaios granulométricos indicaram que os solos analisados são materiais finos, argila-silte. Nos ensaios de CTC, SE e nas análises térmicas, notou-se que o argilomineral predominante é a caulinita. Nos ensaios de limites de consistência, os índices de plasticidade estão entre 29,94 e 33,55 %, valores característicos de argilas altamente plásticas. Todos os solos exibiram baixa condutividade hidráulica (10^{-8} a 10^{-9} m/s), o que é considerado adequado para uso em barreiras selantes. Desta forma, conclui-se que estes solos apresentam características semelhantes com relação aos aspectos geológico-geotécnicos, e são considerados adequados para ser empregado como barreiras selantes.

Palavras chave: Barreiras selantes, Solos argilosos, Vale do Ribeira.

Abstract

Liners and covers systems are essential in the encapsulation of waste, performing functions such as isolation and infiltration reduction (for covers), and minimizing contaminant migration. In this context, geological-geotechnical soil characterization is important to evaluate if it may or not be used in one of these systems, also provides their data properties, making the understanding of the possible interactions between soil and contaminant easier. The purpose of this work was the characterizations of clay soils present in Ribeira Valley (Brazil). Texture, thermic, cation exchange capacity (CEC), surface area, hydraulic conductivity, organic matter content and consistency limit analyses were conducted. The texture analysis showed that the analyzed soils are fine, clay-silt. The thermic, cation exchange capacity, surface area analysis provided that kaolinite is the prevailing clay mineral. The consistency limit analysis showed plasticity indexes between 29,94 and 33,55 %, values characteristic of highly plastic clays. All soils presented low hydraulic conductivity (10^{-8} to 10^{-9} m/s), that is considered proper to be used in liners. This way, it may be deduced that these soils have similar characteristics concerning geological-geotechnical aspects and may be considered adequate to be used in liners.

Keywords: Liners; Clay soils; Ribeira Valley.

INTRODUÇÃO

A contaminação do meio ambiente produzida pela disposição inadequada de resíduos vem sendo motivo de preocupação mundial. A caracterização e o desenvolvimento de técnicas para minimizar e prevenir esta contaminação tem gerado diversos estudos no âmbito científico e/ou tecnológico. Neste contexto, a caracterização de solos argilosos para serem empregados na construção de barreiras impermeabilizantes (barreiras selantes ou liners) é extremamente importante, tanto com relação à minimização da contaminação como por ser uma solução de baixo custo.

A barreira selante é caracterizada por uma camada de baixa permeabilidade, construída de material natural (solos argilosos), artificial (geossintéticos ou geomembranas) ou pela combinação de ambos. Essas barreiras, segundo Folkes (1992) são empregadas em diversas obras de engenharia, tais como: aterros sanitários e industriais, lagoas de decantação, canais de reservatórios, diques, lagoas de tratamento de resíduos, entre outros.

Os materiais naturais a serem empregados como barreiras devem atender às várias exigências impostas para cada tipo de obra e, obviamente para diminuir os custos, tem sido dada preferência à utilização de materiais disponíveis no próprio local da obra ou em suas proximidades. Desta forma para se construir uma barreira natural, algumas especificações com respeito

ao solo devem ser respeitadas. Em geral, a condutividade hidráulica deve ser igual ou inferior a 10^{-7} cm/s, o índice de plasticidade deve ser igual ou superior a 7 ou 10%, o tamanho máximo das partículas deve variar de 25 a 50 mm, finos devem estar presentes em 20 a 30% e o máximo de areia grossa permitido é de 30% (Daniel, 1993). Já de acordo com Rowe et al. (1995), os materiais naturais empregados na construção de barreiras selantes devem seguir os seguintes critérios: a) condutividade hidráulica máxima de 10^{-7} cm/s; b) não deve apresentar fraturas naturais ou oriundas da compactação; c) deve ter uma quantidade mínima de 15 a 20% de partículas menores que $2\mu\text{m}$ e um índice de plasticidade maior que 7%; d) deve ser compatível com o resíduo descartado, não sofrendo aumentos significativos da condutividade hidráulica; e) a espessura mínima recomendada de uma camada argilosa compactada para disposição de resíduos domésticos está entre 90 a 100 cm e f) na disposição de resíduos tóxico-industriais a espessura mínima indicada é de 3 a 4m.

Diversos fatores afetam o bom desempenho de uma barreira selante argilosa. Christensen et al. (1994) relatam que os aspectos que mais influenciam a qualidade das barreiras selantes são condutividade hidráulica, grau de compactação, umidade, composição da argila, técnica de execução e espessura da barreira. Desta forma, a caracterização do solo é de fundamental importância para determinar se o mesmo é adequado ou não para ser utilizado como barreira selante.

A condutividade hidráulica é o parâmetro mais importante na determinação do solo argiloso como barreira selante. Segundo *Christensen et al. (1994)*, a maioria das documentações a respeito de obras com barreiras selantes argilosas reporta valores de condutividade hidráulica máximos de 10^{-7} cm/s. A compactação auxilia na diminuição da condutividade hidráulica. A eficiência da compactação, segundo *Sharma e Lewis (1994)*, depende de quatro fatores principais: distribuição de tamanho dos poros, mineralogia da argila, umidade de compactação e método de compactação. *Daniel (1993)* acrescenta que para a barreira selante funcionar de maneira efetiva é preciso que seja contínua e livre de imperfeições hidráulicas como fraturas, juntas e furos. O objetivo da compactação de barreiras argilosas é remover torrões de argila e transformá-las em uma massa homogênea de solo, livre de vazios grandes e contínuos, e tornar o solo mais denso (*Daniel, 1993; Sharma e Lewis, 1994*). Para atingir a condutividade hidráulica desejada, o solo deve ser úmido o suficiente para que, com a compactação, os torrões de argila se unam, eliminando os poros que havia entre eles (*Daniel, 1993*).

A argila é um material natural, de granulação fina, que geralmente, ao ser umedecido, adquire certa plasticidade (*Santos, 1989; Yong et al., 1992; Sharma e Lewis, 1994; Rowe et al., 1995*). As argilas possuem três características principais quanto à utilização na construção de barreiras selantes: adsorção, capacidade de troca iônica e baixa permeabilidade. *Velde (1992)* explica que essas características se devem ao tamanho diminuído das partículas de argila e a sua estrutura.

Além das barreiras selantes, também são empregados sistemas de cobertura (geralmente, constituídos com o mesmo material argiloso empregado na impermeabilização da base do depósito de resíduos), que servem para minimizar a infiltração de água em resíduos enterrados. Os objetivos de um sistema de cobertura podem variar de lugar para lugar, mas geralmente incluem: a) controle de erosão; b) a estabilização química na formação de drenagem ácida nos resíduos de mineração (através de um controle de entrada de oxigênio); c) o controle de liberação de contaminante (através do controle da infiltração) e d) o fornecimento de um meio de crescimento para o estabelecimento de uma vegetação sustentável.

O emprego de solos tropicais em aplicações geoambientais (barreiras selantes e sistemas de cobertura no encapsulamento de resíduos) ainda é restrito, uma vez que a prática corrente deriva bastante da experiência de países da América do Norte e da União Européia, onde predominam solos formados em climas frios e temperados. A perspectiva do emprego de solos tropicais em sistemas de barreiras selantes aumenta consideravelmente as possibilidades de países de clima tropical em proteger seus recursos naturais, pelo menos até que novas soluções técnicas sejam dadas ao problema da disposição de resíduo (*Leite, 2001*).

Desta forma, o objetivo deste trabalho foi o de avaliar a viabilidade geológica-geotécnica de solos tropicais (argilosos), coletados na região do Vale do Ribeira (São Paulo - Brasil), para serem empregados como barreiras selantes na deposição de resíduos (sólidos e de mineração). A região do Vale do Ribeira apresenta, ainda hoje, problemas decorrentes da deposição inadequada de resíduos sólidos e de mineração, necessitando desta forma de soluções que viabilizem a disposição correta de tais resíduos (com impermeabilização da base), e que sejam de baixo custo.

MATERIAIS E MÉTODOS

Os solos argilosos foram coletados na região do Vale do Ribeira (Brasil), no município de Eldorado Paulista, Foram coletadas amostras deformadas e indeformadas, em outubro de 2011, em três pontos (solo 1, solo 2 e solo 3), sendo a distância entre os pontos de 100 m (aproximadamente). Os três solos foram amostrados na estrada que liga os municípios de Eldorado Paulista e Sete Barras.

As amostras deformadas foram coletadas a partir do emprego de uma pá. Em cada ponto de amostragem foram coletados 15 kg de solo, aproximadamente. No laboratório, as amostras foram destorroadas, submetidas à secagem à sombra por aproximadamente duas semanas, quarteadas e homogêneas.

As amostras empregadas no ensaio de condutividade hidráulica foram coletadas a partir de tubo de PVC (amostra indeformada). Esse material foi envolvido com papel filme, sendo armazenado em caixa de madeira com serragem. No laboratório, essas amostras foram armazenadas em câmara úmida até a realização dos ensaios.

Para caracterização do solo foram realizadas as seguintes análises: a) granulométrica; b) capacidade de troca catiônica (CTC) e superfície específica (SE); c) análise térmica diferencial (ATD); d) limites de consistência (limite de liquidez e limite de plasticidade), e) difratometria de raios X (DRX), f) condutividade hidráulica e g) matéria orgânica.

Análise Granulométrica

Para que seja possível compreender a estrutura e textura dos solos analisados é fundamental medir a dimensão das partículas constituintes dos mesmos. Assim, segundo *Bueno e Vilar (1984)* essa aferição é feita por meio das curvas de distribuição granulométrica. Para tanto, foram realizados ensaios de análise granulométrica conjunta, compreendendo duas etapas, peneiramento e sedimentação. As práticas seguiram as recomendações da norma da *Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) – MB 32 (NBR7181)*.

Capacidade de Troca Catiônica (CTC) e Superfície Específica (SE)

A capacidade de troca catiônica, basicamente, evidencia a aptidão do solo em reter e trocar íons carregados positivamente na superfície coloidal. Logo, é fundamental na caracterização de solos, pois consiste em ser uma propriedade que distingue cada argilomineral. Segundo *Grim (1953)*, observa-se que a origem dessa propriedade compreende: 1) deficiência de carga por quebra nas bordas da folha do mineral; 2) substituição de alguns cátions tetravalentes por trivalentes, ou trivalente por divalente; 3) exposição a troca dos cátions OH da folha octaédrica por H na região da borda da folha do mineral.

As causas 1 e 3 são responsáveis pela CTC do grupo Caulinita. No caso das Esmectitas e Vermiculitas 80% da sua CTC têm origem na causa 2. Os outros argilominerais (Illita e Clorita) tem composição semelhante as 3 causas na origem de sua CTC (*Grim, 1953*).

Já o estudo da superfície específica da fração fina é fundamental para a compreensão da retenção de contaminantes, pois, segundo *Leite (2001)*, partículas de maior “área exposta” desenvolvem mais cargas em sua superfície, e, conseqüentemente

retêm mais os compostos existentes na solução. Dessa forma, quanto menor a partícula de solo, maior será sua capacidade de adsorção e, por conseguinte, maior será sua capacidade de retenção de elementos traço poluentes.

Ambas as propriedades foram determinadas através do método de adsorção de azul de metileno descrito em *Pejon (1992)* em que este corante catiônico orgânico (cloridato de metilamina) substituiu com facilidade os cátions já adsorvidos no solo. A quantidade suficiente para ocupar todos os sítios de adsorção mede diretamente a CTC e SE (*Leite, 2001*).

Para este ensaio foi utilizada 0,5 grama de solo (passante na peneira 200 #) para cada amostra investigada, um pouco de água destilada e aos poucos foi adicionada (titulada) solução de azul de metileno ($C_{16}H_{18}N_3S^+$) com concentração de 1,5 g/L. Este procedimento foi realizado com agitação constante, através de um agitador magnético, adicionando-se um pouco de solução de azul de metileno e deixando-se a argila reagir por 3 minutos. Em seguida com bastão de vidro foi retirada uma gota da suspensão, sendo esta colocada sobre papel filtro Whatman 42. Este procedimento foi repetido até o ensaio apresentar resultado positivo.

Análise Térmica Diferencial (ATD)

A análise térmica diferencial (ATD) determina energia que varia entre a amostra e o material de referência quando estes são submetidos, lado a lado, ao aumento controlado da temperatura. Quando a amostra sofre uma transformação, esta variação energética é observada através da diferença entre os picos de reações endo e exotérmica. Segundo *Tan et al. (1986)*, amostras compostas por solo na fração argila permite-nos obter resultados satisfatórios para que sejam feitas interpretações quantitativas e qualitativas. É possível, através da comparação entre as curvas obtidas em função da variação de temperatura na ATD e os padrões conhecidos, determinar os argilominerais presentes no solo.

Para a determinação em ATD utilizou-se aproximadamente 1 g de amostra. Este material foi macerado e peneirado (peneira 200 #). Os ensaios foram realizados em condições atmosféricas, com aquecimento de 0 a 1000 °C, e velocidade de aquecimento de 10 °C por minuto no alto forno BP Engenharia.

Limites de Atterberg ou Limites de Consistência

Utiliza-se o estudo da consistência dos solos argilosos para poder determinar os estados possíveis em que podem ser encontrados. Os limites são de Liquidez (LL), de Plasticidade (LP) e de Contração (LC). Neste trabalho, foram realizados os ensaios apenas para a obtenção dos dois primeiros parâmetros, já que o maior interesse desta pesquisa localiza-se na compreensão dos estados líquido – plástico – semi-sólido. A realização dos ensaios seguiu as normatizações da *ABNT: MB-30 (NBR6459)* e *MB-31 (NBR9180)*, sendo que para a determinação do LL foi utilizado o método com o aparelho de Casagrande. A partir dos resultados de LL e LP foi possível obter o índice de plasticidade (IP), para cada solo analisado. Também foi possível determinar o índice de atividade de Skempton (calculado a partir do IP e da fração argilosa).

Difratometria de Raios-X (DRX)

A difratometria de raios-X possibilita a análise de cada sistema de “organização” dos argilominerais, o que permite

classificá-los, ao identificar as amostras, entre os grupos 1:1 (Caulinitas) e 2:1 (Esmectitas).

Este ensaio foi realizado conforme procedimentos adotados em *Grim (1953)*, onde as amostras foram peneiradas e foram preparadas lâminas com o material que passou nas peneiras de 200 # e 400 #. Para cada ponto foram preparadas lâminas naturais, com etileno-glicol e aquecidas à 550° C em mufla. Estas lâminas foram analisadas em Difratômetro de Raios X Rigaku Ultima IV, modelo Ultima IV.

Condutividade Hidráulica

Este parâmetro é um dos mais importantes na escolha de um solo para ser utilizado na construção de uma barreira selante (indica a facilidade ou não da percolação de um líquido no solo). A condutividade hidráulica foi determinada conforme procedimento descrito na norma NBR 13292. Este ensaio foi realizado com amostra indeformada coletada em tubo de PVC.

Matéria Orgânica

Este parâmetro é importante, pois ele é um indicativo da interação do contaminante com o solo, pois a matéria orgânica influencia na adsorção de tais substâncias.

A determinação de matéria orgânica foi realizada conforme procedimentos descritos em *Eusterhues et al. (2005)*. Neste ensaio, foram empregados 2 g de solo e 20 mL de H₂O₂ 30 % (v/v), em duplicata, sob aquecimento de 40 a 60° C, até ocorrer digestão total da matéria orgânica presente nos diferentes solos analisados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As amostras de solo coletadas em Eldorado Paulista apresentaram granulometria fina, ocorrendo predomínio das frações argila e silte (Figura 1). Dos três solos analisados, o solo 1 foi considerado mais fino, pois apresenta maior teor de argila (68,72 %) e de silte (24,38 %), de acordo com a Figura 1.

A granulometria é uma propriedade de grande importância na escolha do solo para ser utilizado como barreira selante. Segundo *Rowe et al. (1995)*, o solo que será empregado na construção de uma barreira selante deve apresentar no mínimo 15 a 20 % da fração argila. Assim sendo, os três solos analisados satisfazem esta condição, pois apresentaram teores de argila variando de 56,80 a 68,72 % (Figura 1).

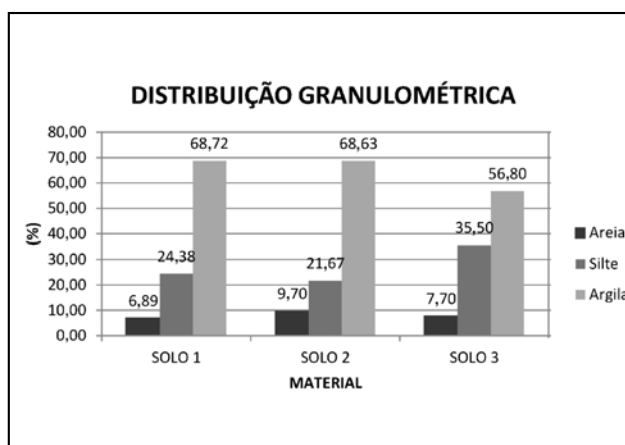


Figura 1. Distribuição granulométrica (Solo 1, Solo 2 e Solo 3)

Os valores de condutividade hidráulica obtidos para os três solos variaram de 10^{-8} a 10^{-9} m/s. De acordo com *Rowe et al. (1995)*, as barreiras argilosas naturais e compactadas devem apresentar uma condutividade hidráulica igual ou menor que 10^{-9} m/s. Desta forma, os solos investigados satisfazem este outro critério para o emprego desse material na construção de barreira selante natural. Esses valores de condutividade hidráulica, de acordo com *Pinto (2000)*, são indicativos de solos impermeáveis. Ainda segundo esse autor, os valores de condutividade obtidos nas três amostras são típicos de solos argilosos, o que foi comprovado pelas análises granulométricas.

Quanto ao índice de plasticidade, as amostras apresentaram valores elevados, entre 29,94 e 33,55 % (Tabela 1). De acordo com *Roque (2004)*, os solos argilosos para serem empregados como barreira selante devem apresentar índices de plasticidade superiores a 7%. No caso dos solos coletados no Vale do Ribeira, todas as amostras apresentaram índice de plasticidade superior a 29,94 % (IP variou de 29,94 a 33,55 %). O solo 3 apresentou o maior índice de plasticidade (33,55 %) e o solo 2 o menor (29,94 %), conforme Tabela 1.

De acordo com a Tabela 1, o maior valor de LL foi obtido para o solo 1, mesmo material que apresentou maior teor da fração argila. O solo 3, novamente foi considerado o menos adequado dos três, pois apresentou os menores valores de LL e LP (Tabela 1). Quanto ao LP, o solo 2 foi o que apresentou valor mais elevado (53,06 %), conforme Tabela 1.

Tabela 1. Limites de consistência (LP e LL), índice de plasticidade e índice de atividade de Skempton (Solo 1, Solo 2 e Solo 3).

Amostra	LP (%)	LL (%)	IP (%)	As*
Solo 1	50,48	84,00	33,52	0,50
Solo 2	53,06	83,00	29,94	0,47
Solo 3	48,45	82,00	33,55	0,61

As* - índice de atividade de Skempton

A partir dos resultados de IP e do teor de fração argila foi possível determinar o índice de atividade de Skempton (Tabela 1). Tal índice indica a influência das propriedades mineralógicas e química-coloidal da fração argila nas características geotécnicas dos solos argilosos. Os três solos apresentaram índice de atividade abaixo de 0,75, indicando que esses solos são inativos (essa atividade está ligada a reatividade, contração e expansão). Tais resultados confirmam a viabilidade destes três solos para serem empregados como barreiras selantes, uma vez que os mesmos são considerados inativos.

As análises realizadas por DRX indicaram a presença de caulinita, illita, quartzo e muscovita nos solos argilosos coletados no Vale do Ribeira. As Figuras 2, 3 e 4 exibem os difratogramas de cada solo (amostra normal, amostra aquecida e amostra tratada com etileno-glicol).

A partir dos resultados obtidos em DRX, nota-se que nas três amostras não foi detectada a presença de argilominerais expansivos, pois os difratogramas correspondentes às amostras normais e os obtidos com tratamento de etileno-glicol são iguais, não ocorrendo elevação dos picos (Figuras 2, 3 e 4).

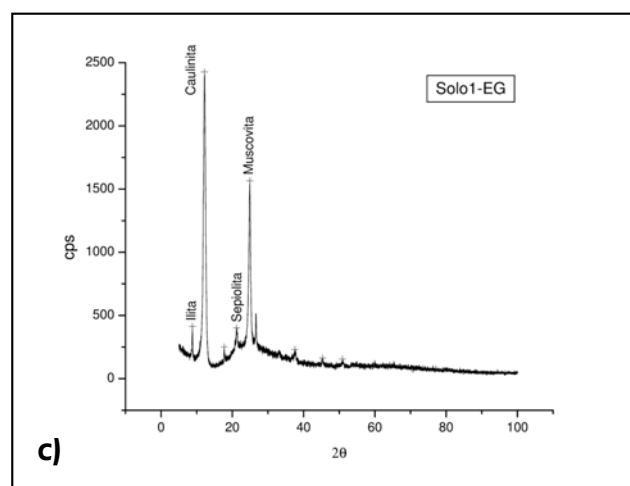
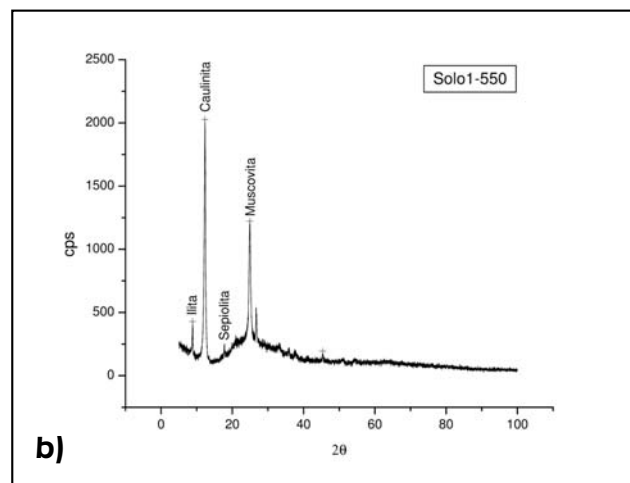
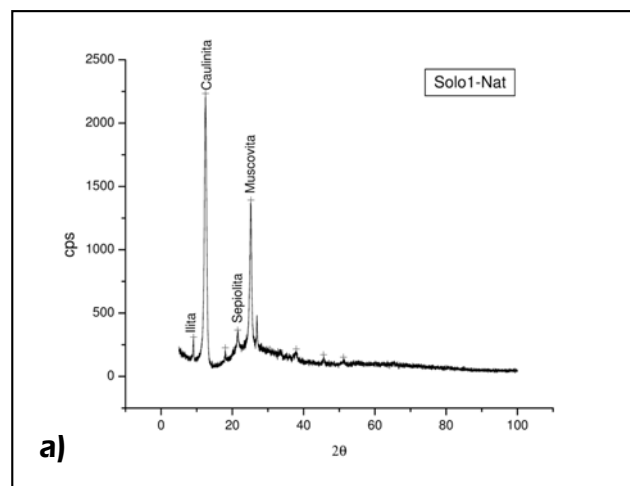


Figura 2. Difratogramas obtidos para o Solo 1, a) Amostra Normal, b) Amostra aquecida, c) Amostra tratada com etileno-glicol.

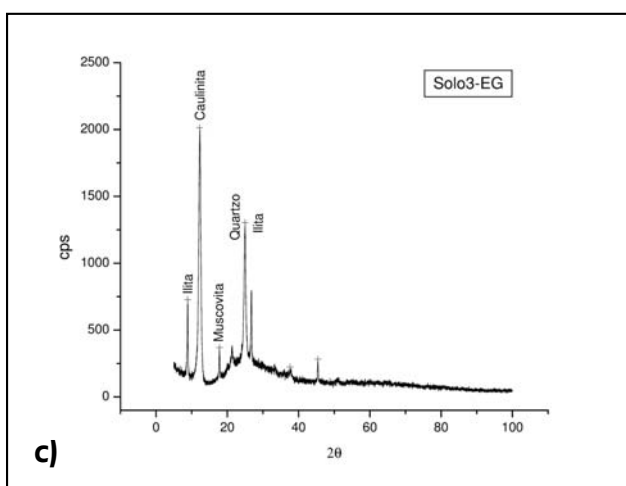
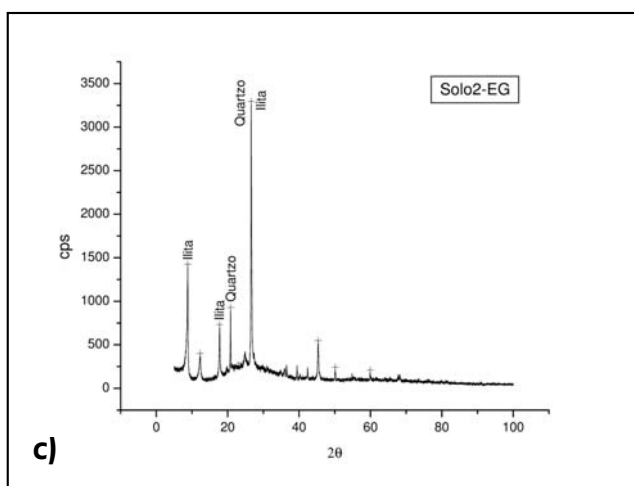
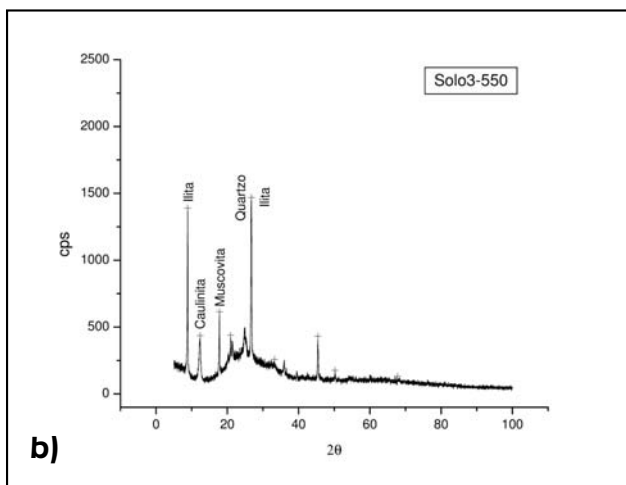
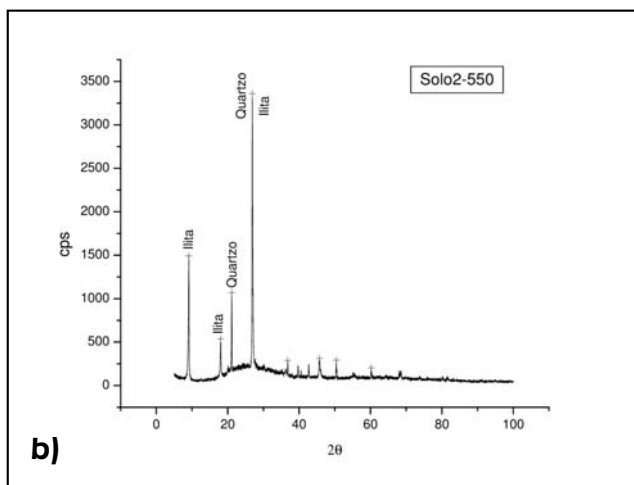
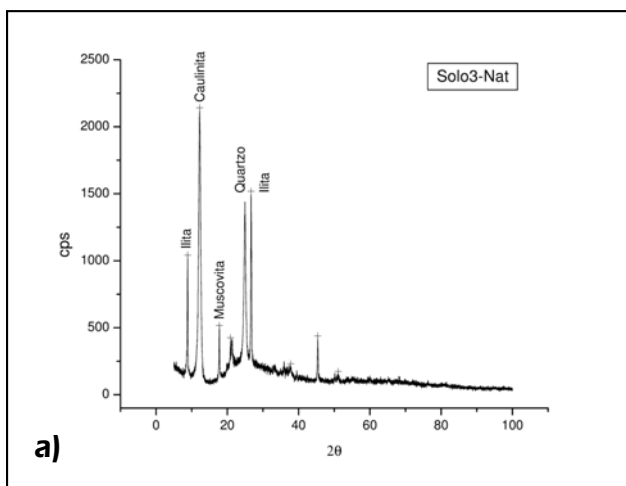
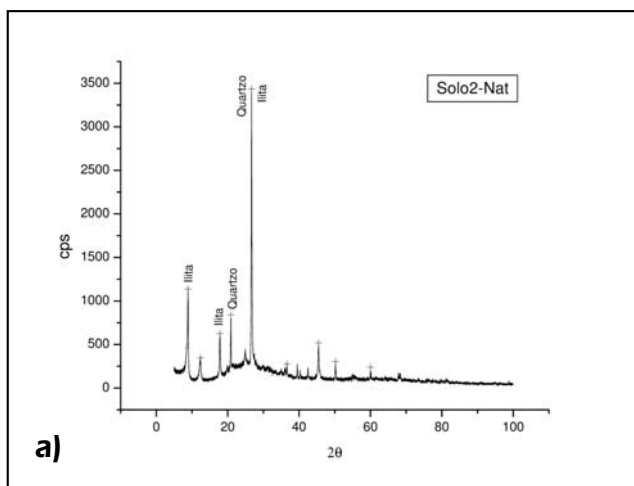


Figura 3. Difractogramas obtidos para o Solo 2, a) Amostra Normal, b) Amostra aquecida, c) Amostra tratada com etileno-glicol.

Figura 4. Difractogramas obtidos para o Solo 3, a) Amostra Normal, b) Amostra aquecida, c) Amostra tratada com etileno-glicol.

Nas Figuras 2a e 2b, nota-se pequena diminuição no pico da caulinita, esse resultado é anômalo, pois o correto era a eliminação ou maior diminuição desse pico, quando aquecido. Esse resultado pode estar ligado com a temperatura empregada no aquecimento, que possivelmente não atingiu 550°C, assim sendo, não ocorreu destruição total desse argilomineral, como era esperado. O pico referente à sepiolita (identificada no solo 1), Figura 2 a, pode ser também interpretado como sendo a muscovita, pois os dois picos são semelhantes. A sepiolita é um argilomineral do grupo das hormitas, sendo comumente encontrado em sedimentos ou depósitos aluvionares. Cabe lembrar, que os solos argilosos investigados são derivados de depósitos aluvionares, podendo indicar que realmente se trata da sepiolita.

A Figura 3 exibe os minerais detectados no solo 2. Dos três solos investigados, esse é o que apresentou maior teor de quartzo. Na DRX foi possível identificar que esse solo é composto por illita e quartzo.

A Figura 4 exibe os resultados de DRX obtidos para o solo 3. Nesta figura nota-se diminuição do pico da caulinita quando aquecido (Figura 4b), isso confirma a presença desse argilomineral. Segundo *Mitchell (1993)*, a caulinita é o único argilomineral que tem seu pico alterado quando aquecido a 550°C.

A presença de caulinita foi confirmada nas análises térmicas diferenciais (ATD), conforme Figuras 5, 6 e 7. Os resultados dos ensaios de Análise Térmica Diferencial (ATD) indicaram que, principalmente os solos 1 e 3 apresentam similar comportamento térmico ao sofrerem aquecimento (Figuras 5 e 7). Nos três solos é possível notar evento endotérmico com temperatura próxima de 130°C causado, segundo *Santos (1989)*, pela eliminação de água de umidade e de água adsorvida (Figuras 5, 6 e 7). Outro pico endotérmico foi observado nas proximidades de 300°C, nos três solos, o que possivelmente indica a presença da gibsitita (Figuras 5, 6 e 7).

Nas Figuras 5, 6 e 7, observa-se outro evento endotérmico que ilustra a reação de desidrolização (perda de hidroxilas) com posição do pico nas proximidades dos 600°C. Além dos picos endotérmicos, foi verificado pico exotérmico entre 810 a 948°C. Assim, de acordo com *Tan et al. (1986)* e *Santos (1989)*, tais transformações térmicas referem-se ao comportamento da caulinita ao aquecimento.

Nas análises térmicas diferenciais foi possível identificar a caulinita no solo 2, sendo que pela técnica de DRX o mesmo não foi identificado neste solo.

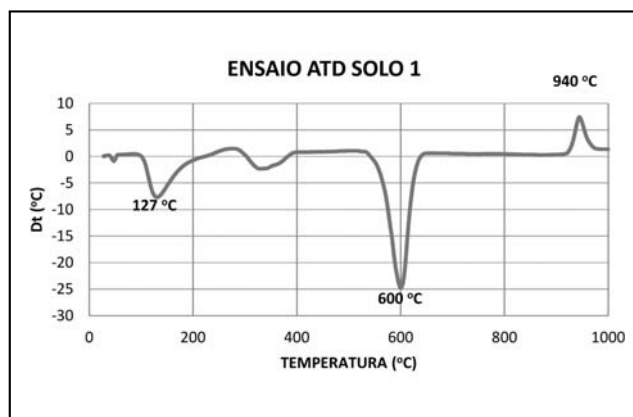


Figura 5. Análise térmica diferencial - Solo 1.

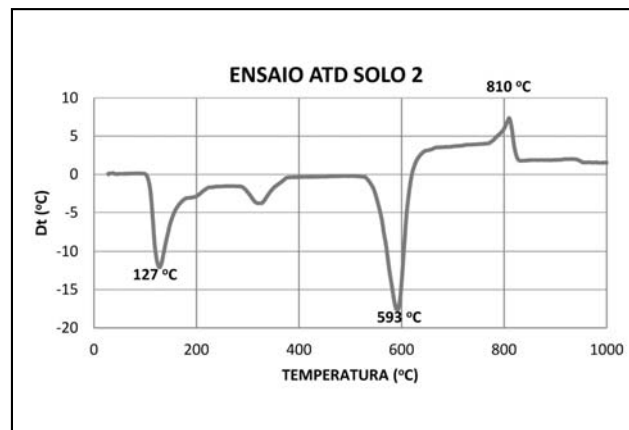


Figura 6. Análise térmica diferencial - Solo 2.

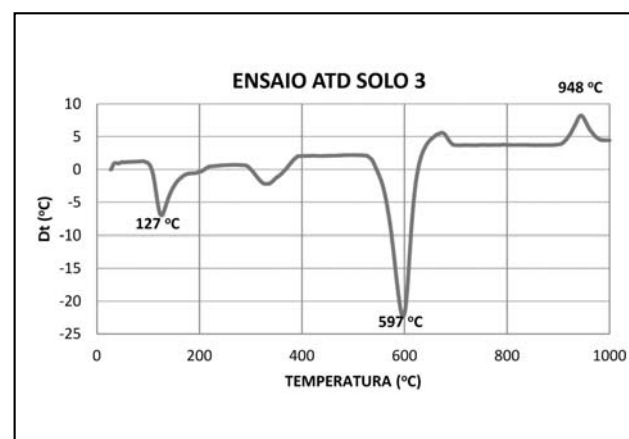


Figura 7. Análise térmica diferencial - Solo 3.

Quanto ao CTC, observou-se que nas três amostras este parâmetro é inferior a 10,0 meq/100g (Tabela 2). Este resultado indica a presença de caulinita, uma vez que o CTC deste argilomineral encontra-se no intervalo de 3 a 15 meq/100g (*Santos, 1989*).

A amostra que apresentou maior CTC foi o solo 2 (9,57 meq/100g), conforme Tabela 2. Por outro lado, a que apresentou menor CTC foi o solo 3 (7,48 meq/100g). De acordo com *Rowe et al. (1995)*, um solo para ser empregado como barreira selante deve ter um CTC de no mínimo 10 meq/100g. Os valores obtidos para os solos 1 e 2 estão relativamente próximos do limite considerado em *Rowe et al. (1995)*.

Tabela 2. Valores de CTC e SE - Solo 1, Solo 2 e Solo 3.

Amostra	CTC (meq/100g)	SE (m ² /g)
Solo 1	8,36	65,29
Solo 2	9,57	74,71
Solo 3	7,48	58,43

Quanto a superfície específica (SE), o solo 1 exibiu valor de 65,29 m²/g, o solo 2 de 74,71 m²/g e o solo 3 de 58,43 m²/g (Tabela 2). A SE está relacionada com a capacidade de retenção e/ou liberação de elementos químicos do solo. Quanto maior a SE, maior possibilidade de interação com os elementos em solução, o que pode favorecer os processos de retenção e atenuação de contaminantes. A SE obtida para o solo 2 está na proximidade da faixa da ilita (80 m²/g), segundo *Rowe et al. (1995)*. Todos os solos, quanto ao SE, podem ser classificados como caulinita (faixa de 15 m²/g).

Conforme *Rowe et al. (1995)*, a ilita quando presente nos solos argilosos geram sistemas de impermeabilização mais confiáveis, o que viabiliza o emprego dos três solos investigados, como indicado nos difratogramas de raios X (Figuras 2, 3 e 4).

Quanto à matéria orgânica, o solo 1 apresentou 11,89 %, o solo 2 apresentou 12,85 % e o solo 3 apresentou 6,34 %. Desta maneira, nota-se que a CTC e SE do solo 2 e 1 estão sendo influenciados pela presença de matéria orgânica, principalmente no caso do solo 2 que é rico em quartzo (gerando baixo CTC). O solo 3 foi o que apresentou menor CTC e SE, consequentemente menor teor de matéria orgânica.

CONCLUSÕES

A partir de todos os resultados apresentados, conclui-se que os três solos coletados na região do Vale do Ribeira são apropriados para serem empregados nos sistemas de barreiras selantes, uma vez que os valores obtidos, principalmente para condutividade hidráulica, índice de plasticidade, teor da fração argila e fração de finos estão dentro das normas técnicas empregadas para esse tipo de obra. Cabe lembrar, que dos três tipos de solos caracterizados, os solos 1 e 2 são os mais adequados para serem empregados como barreira selantes, em decorrência das propriedades geológicas e geotécnicas destes solos

apresentarem valores mais elevados nas distintas propriedades investigadas.

A condutividade hidráulica é um parâmetro de extrema importância na avaliação do emprego de solos como sistemas impermeabilizantes. Desta forma, conclui-se que os três solos analisados são considerados adequados, já que os valores de condutividade hidráulica variaram de 10⁻⁸ a 10⁻⁹ m/s, estando dentro dos valores estabelecidos nas normas técnicas empregadas para barreiras selantes.

Quanto à viabilidade geológica e geotécnica, conclui-se que o solo menos adequado para ser empregado na construção de barreiras selantes é o solo 3, em praticamente todos os ensaios esse material apresentou os menores valores.

A partir da caracterização geotécnica, o solo 1 foi considerado mais apto para ser empregado como barreira selante, em decorrência dos resultados referentes à fração granulométrica e limites de consistência.

Quanto à caracterização geológica o solo 2 apresentou os melhores resultados (valores mais elevados de CTC, SE e MO), mesmo apresentando maior concentração de quartzo. Provavelmente, esses valores estão relacionados, não com a mineralogia, e sim com a matéria orgânica presente neste solo.

A partir dos ensaios de caracterização mineralógica, conclui-se que os argilominerais presentes nos três solos não são expansivos, sendo esses a caulinita (1:1) e a ilita (2:1).

De modo geral, conclui-se que a caracterização geológica e geotécnica de solos argilosos é extremamente importante na orientação do melhor material a ser empregado na construção de barreiras selantes.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pela concessão da bolsa de estudo de mestrado.

TRABALHOS CITADOS NO TEXTO

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT-MB32 (NBR7181).

Análise granulométrica.

Rio de Janeiro. 1984. 13p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA - ABNT-MB30 (NBR6459).

Determinação do limite de liquidez.

Rio de Janeiro. 1984. 3p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA - ABNT-MB31 (NBR9180).

Determinação do limite de plasticidade.

Rio de Janeiro. 1984. 3p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA - (NBR 13292).

Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante.

Rio de Janeiro, 1995. 8p.

BUENO, B. DE S.; VILAR, O. M.

Mecânica dos solos.

Universidade de São Paulo, São Carlos, 132 p. 1984.

CHRISTENSEN, T.H., KJELDSEN, P., ALBRECHTSEN, H.-J., HERON, G., NIELSEN, P.H., BJERG, P.L., AND HOLM, P.E.

Attenuation of landfill leachate pollutants in aquifers.

Crift. Rev. Environ. Sci. Technol, (24), 1994.

DANIEL, D. E.

Soil barrier layers versus geosynthetic barriers in landfill cover systems.

In: *Landfill Closures, ASCE, Geotechnical Special Publication (53), p.1-18. 1993.*

- EUSTERHUES, K.; RUMPEL, C.; KÖGEL-KNABNER, I.
Stabilization of soil organic matter isolated via oxidative degradation.
Organic Geochemistry. (36), p.1567-1575. 2005.
- FOLKES, D. J.
Control of contaminat migration by the use of liners.
Canadian. Geotechnical Journal (Fifth Canadian Geotechnical Colloquium), 1982.
- GRIM, R. E.
Clay Mineralogy.
New York: McGraw-Hill. p. 132-133. 1953.
- MITCHELL, J. K.
Fundamentals of soil behavior.
Jhon Wiley & Sons, Inc. Califórnia. Estados Unidos. 437p. 1993.
- LEITE, A. L.
Migração de íons inorgânicos em alguns solos tropicais, com ênfase nos processos de sorção e difusão molecular.
Tese de Doutorado.
Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos. p. 120. 2001.
- PEJON, O. J.
Mapeamento geotécnico da Folha Piracicaba-SP (escala 1:100.000): Estudo de aspectos metodológicos, de caracterização e de apresentação dos atributos.
Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos. 1992. 2v.
- PINTO, C. S.
Curso básico de mecânica de solos.
Oficina de Textos. 247p. 2000.
- ROQUE, A. J. P. M.
Transfert advectif et diffusive de polluants inorganiques dans lês barrieres d'etancheite minerales presents dans les centres de stockage de dechets. Aplicacion aux sols fins portugais.
Teses e programas de investigação LNEC. Lisboa. 624p. 2004.
- ROWE, R. K.; QUIKLEY, R. M.; BOOKER, J. R.
Clayey barrier systems for waste disposal facilities.
London. 390p. 1995.
- SANTOS, P. DE S.
Ciência e tecnologia das argilas.
Editora Edgard Blucher LTDA, São Paulo, SP. 408 p. 1989.
- SHARMA, H. D.; LEWIS S. P.
Waste containment systems, waste stabilization, and landfills: Design and Evaluation.
Wiley - Interscience. U.S.A. 588p. 1994.
- TAN, K. H.; HAJEK, B. F.; BARSHAD, I.
Thermal analysis techniques. In Klute, A. Methods of soil analysis - Physical and mineralogical methods.
Second Edition. American Society of Agronomy. p.151-183. 1986.
- VELDE, B.
Introduction to clay minerals: chemistry, origins, uses and environmental significances.
Chapman & Hall: Cambridge. 198 p. 1992.
- YONG, R. N.; MOHAMED, A. M. O.; WARKENTIN, B. P.
Principles of contaminant transport in soils.
Developments in Geotechnical Engineering, Amsterdam: Elsevier Science Publishers. 327p. 1992.