

Estudo Preliminar de um Solo para Utilização em Barreira Mineral em um Município da Amazônia Brasileira

Géremy Carlos Freitas

PUC-Rio, Rio de Janeiro, Brasil, geremy_pib@hotmail.com

José Tavares Araruna Júnior

PUC-Rio, Rio de Janeiro, Brasil, araruna@puc-rio.br

RESUMO: O município de Rorainópolis está localizado no Sul do Estado de Roraima e está entre os municípios que ainda não atende as exigências da Lei da Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei Federal nº 12.305/10), quanto a disposição final adequada dos resíduos sólidos urbanos. Diante dessa deficiência o presente trabalho visa auxiliar o município a se adequar à nova lei, para isso propôs-se o estudo preliminar de um solo proveniente de uma jazida deste município para ser utilizado como material de construção para barreira mineral de aterros sanitários, analisando comparativamente as características do solo em estudo com os critérios preliminares para seleção de solos para a construção de barreiras minerais consagrados na literatura. O solo foi caracterizado química, física e mineralogicamente. Os resultados mostraram que o solo apresenta granulometria fina, sendo 63,5 % das partículas tamanho silte e 35,7% de tamanho argila e, além disso, apresenta Limite de Liquidez de 64,2% e Limite de Plasticidade de 35,8%. Quanto a sua caracterização mineralógica, os argilominerais predominantes são: caulinita e ilita. Com relação a sua composição química, observou-se a predominância dos óxidos de silício, correspondente a 57,6 % do total da amostra, o que se deve a presença do mineral quartzo, seguido dos óxidos de alumínio, correspondendo a 30,5 %, e em menores quantidades os óxidos de ferro, de potássio e de titânio. A partir dos resultados obtidos nos ensaios e utilizando critérios preliminares para seleção de solos para a construção de barreiras minerais pôde-se concluir que o solo não atende a todos os critérios especificados, devido a sua classificação não estar entre os tipos mais indicados para este tipo de obra e, além disso, a presença de minerais 2:1 que pode influenciar no comportamento contráctil do solo propiciando elevados valores de contração que podem levar a formação de fissuras na barreira mineral em um processo de ressecamento. Contudo, ressalta-se que estes fatores não restringem o uso do solo como material de construção de barreiras minerais, e que o conhecimento de suas propriedades é de grande importância pois direciona os estudos a serem desenvolvidos caso haja real interesse em utilizar o solo para o fim pretendido.

PALAVRAS-CHAVE: Aterro Sanitário, Barreira Mineral, Caracterização de Solos, Rorainópolis.

1 INTRODUÇÃO

No Brasil a preocupação com o meio ambiente, e especialmente com a destinação final adequada dos resíduos sólidos, tem sido tema de intensas discussões já há bastante tempo. O capítulo mais recente dessa história foi a aprovação da Lei Federal nº 12.305/10, que dispõe sobre a Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS, que instituiu, entre outras, que a única forma de disposição ambientalmente adequada de rejeitos são os aterros sanitários e

fixou o prazo de até o dia 02 de agosto de 2012 para o encerramento dos lixões e aterros controlados em todo o Brasil.

Diante disso, os municípios brasileiros tem o desafio de se adequarem à nova lei, no entanto, a maioria deles, em especial os de menor porte, ainda não cumpriram as exigências emanadas da lei.

No caso particular do Estado de Roraima, quase 90 % da destinação de resíduos sólidos ainda é feita de forma irregular (ABRELP, 2014). Além disso, a Associação Brasileira de

Resíduos Sólidos e Limpeza Pública (ABLP, 2012) acredita que Roraima necessite da implantação de pelo menos três aterros sanitários de grande porte, e quatro aterros sanitários menores.

O município de Rorainópolis, foco deste estudo, localiza-se no Sul do estado de Roraima. Criado em 1995 é o segundo maior município do estado em área e população, estimada em 27 mil habitantes, segundo dados do IBGE (2015).

O sistema de limpeza pública do município atende uma população de aproximadamente 13 mil habitantes.

Todo resíduo sólido gerado no município é descartado numa área de 06 (seis) hectares, localizado na vicinal 01 do município (Figura 1), a aproximadamente 5 km do centro de geração, o local é conhecido como ‘Lixão de Rorainópolis’ ou ‘Lixeira’.

Este trabalho tem como objetivo avaliar de forma preliminar o uso de um solo proveniente deste município como material de construção de barreiras minerais, que é o principal componente do sistema de impermeabilização de base de um aterro sanitário, com a função de proteger a fundação do aterro, evitando a contaminação do subsolo e aquíferos subjacentes, pela migração de lixiviado e/ou biogás (CEMPRE, 2010).



Figura 1: Localização do “Lixão de Rorainópolis”, Google (2003).

Quando se opta pela construção de barreiras minerais, como parte do sistema de impermeabilização de base é preciso definir critérios para a escolha do solo a ser utilizado.

A CETESB (1993) sugere a adoção de um critério preliminar para a escolha do solo a ser

utilizado como barreira impermeável, que é apresentado a seguir:

- Classificação unificada CL, CH, SC ou OH;
- Porcentagem que passa na peneira # 200 maior que 30,0 %;
- $LP \geq 30,0\%$ e $IP \geq 15,0$;
- $pH \geq 7,0$;
- $k_{sat} \leq 10^{-7}$ cm/s.

Benson *et al.*, (1994), em um estudo realizado com 67 amostras de solo de aterros sanitários dos Estados Unidos, relacionaram a condutividade hidráulica dos solos com fatores como atividade dos argilominerais, grau de compactação, limites de consistência, tipo de compactador, entre outros fatores.

Fatores intrínsecos ao solo, como a sua composição mineralógica influenciam diretamente a plasticidade do material assim como em sua condutividade hidráulica. Em um estudo realizado por Mesri e Olson (1971), analisou-se o comportamento hidráulico de três argilas e observou-se que há uma tendência de redução da condutividade hidráulica com o acréscimo da plasticidade. Os resultados estão reunidos na Tabela 1, onde percebe-se claramente a redução do valor da condutividade hidráulica com o acréscimo do valor do índice de plasticidade.

Tabela 1: Condutividade hidráulica dos argilominerais, adaptado de MESRI e OLSON, 1971.

Argilomineral	Índice de Plasticidade (IP)	Condutividade Hidráulica (m/s)
Caulinita	20	$1,5 \times 10^{-8}$
Ilita	60	$2,0 \times 10^{-11}$
Montmorilonita	500	$1,0 \times 10^{-13}$

Além do valor de condutividade hidráulica abaixo de 10^{-9} m/s, os solos escolhidos devem apresentar outras características que garantam seu bom desempenho, uma delas é a capacidade de retenção de íons.

De acordo com Costa (2002) à medida que ocorre o transporte de contaminantes no solo, diversos fatores relacionados ao fluido percolante, ao próprio solo e às condições ambientais, influenciam o processo de migração e retenção. Dentre estes fatores destacam-se: o tipo de solo, a mineralogia, a capacidade de troca catiônica, as espécies de cátions adsorvidos, a velocidade de percolação, o teor de matéria orgânica; a concentração do

contaminante, a presença de outras substâncias na solução percolante, as condições hidrogeológicas e a temperatura e pH do meio.

O teor de matéria orgânica presente no solo influencia bastante na capacidade de retenção de cátions. Segundo Sparks (1996) *apud* Costa (2002) a matéria orgânica apresenta valores de CTC e Superfície Específica da ordem de 150 a 300 cmol/Kg e 800 a 900 m²/g, respectivamente, e afirma ainda que mesmo em solos arenosos, que apresentam, comumente, teor de matéria orgânica inferior a 1,0 %, esta exerce influência significativa nas reações químicas que ocorrem no solo.

2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1 Materiais

O solo utilizado neste trabalho foi coletado em uma jazida de argila, pertencente ao município de Rorainópolis, a Figura 2 apresenta um panorama da área, que é coberta por floresta nativa densa.

A amostra foi coletada com o auxílio de enxada e pá e acondicionada em sacos plásticos e posteriormente transportada até o Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio, por via aérea, em embalagens de papelão e pelo Correios.



Figura 2: Vista do local de amostragem, Géremy Freitas.

2.2 Procedimentos

2.2.1 Ensaios de Caracterização Física

A caracterização física compreendeu a determinação da curva de distribuição granulométrica do material e a determinação dos limites de consistência, observando as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

A partir dos ensaios de limites de consistência e distribuição granulométrica foram determinados os seguintes índices:

- Índice de plasticidade (IP, %), obtido pela diferença entre o limite de liquidez (LL, %) e o limite de plasticidade (LP, %);
- Índice de atividade das argilas (IA), determinado segundo proposta por Skempton (1954), como:

$$I_a = \frac{IP}{\% < 2\mu m} \quad (1)$$

Em que, % < 2,0 μm representa a fração argila.

2.2.2 Ensaios de Caracterização Mineralógica

Para a caracterização mineralógica foram realizados dois ensaios, um bastante simples e rápido, que é o ensaio denominado Azul de Metileno e outro mais sofisticado que é o ensaio de difração de raios X.

O ensaio de Azul de Metileno nos fornece os valores de CTC e Superfície Específica, que correlacionando com os valores típicos para cada argilomineral, pode-se identificar preliminarmente a presença de diferentes argilominerais.

A fim de determinar, de forma qualitativa, a composição mineralógica das frações do solo utilizou-se os ensaios de difração de raios X, que foi realizado no Laboratório de Difractometria de Raios-X do DEQM da PUC-Rio.

As amostras para o ensaio de Difração de Raios X foram preparadas pelo método do gotejamento de acordo com as orientações presentes em Mitchell (1993).

Para o solo utilizado neste estudo, não foi necessário realizar nenhum tipo de tratamento com o intuito de diferenciar os argilominerais presentes.

Foram preparadas três lâminas de material, como pode se ver na Figura 3. A primeira

lâmina foi preparada com o material passante na peneira # 40 (amostra total), as outras duas lâminas foram preparadas com o material passante nas peneiras #200 (fração silte) e #400 (fração argila), respectivamente.

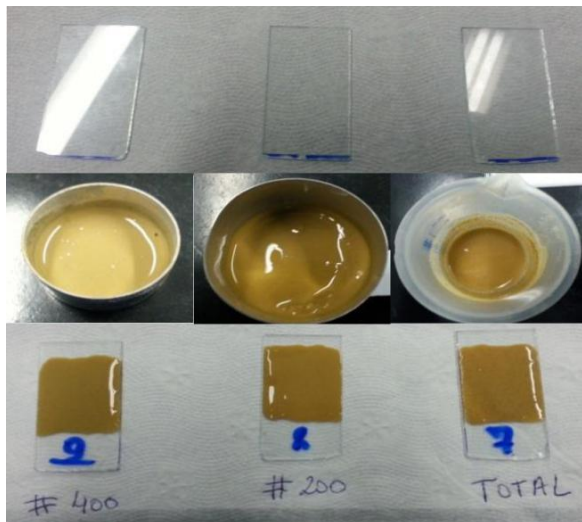


Figura 3: Preparação das lâminas pelo método do gotejamento, Géremy Freitas.

2.2.3 Ensaios de Caracterização Química

A amostra do solo foi submetida aos ensaios listados a seguir, seguindo as(%) suas respectivas normas:

- Azul de Metileno (Capacidade de Troca Catiônica e Superfície Específica);
- pH;
- Matéria Orgânica;
- Composição química por Fluorescência de Raios X.

O ensaio de Azul de Metileno fornece o valor total em mL de Azul de Metileno acrescentado a solução com o solo, com este resultado pode-se então calcular os parâmetros de Capacidade de Troca Catiônica e Superfície Específica, com o auxílio das equações a seguir:

Capacidade de Troca Catiônica

$$CTC = \left(\frac{mesq}{100g} \right) = \frac{CN \cdot AM \left(\frac{mesq}{mL} \right) \times VAM (mL) \times 100}{W_{solo} (g)} \quad (2)$$

Em que:

CTC é a capacidade de troca catiônica;

CN é a Concentração normal do azul de metileno utilizado;

$$CN = \frac{C (g/L)}{\text{Equivalente em grama}} \quad (3)$$

$$CN = \frac{(C (g/L)) / (\text{Equivalente em grama})}{PM / \text{valência}} \quad (4)$$

Em que:

V é o volume da solução de azul de metileno utilizada (mL);

C é a concentração da solução de azul de metileno (normalidade);

M é a massa de solo seca (g).

Superfície Específica

$$SE = \text{Fator Azul de Metileno} \quad (5)$$

Onde:

SE é a superfície específica (m²/g);

Fator Azul de Metileno equivale a 7,8043;

CTC é a capacidade de troca catiônica.

3 RESULTADOS DOS ENSAIOS E ANALISE

3.1 Ensaios de Caracterização Física

A Figura 4 apresenta a curva de distribuição granulométrica obtida no ensaio de granulometria conjunta (peneiramento e sedimentação), com adição do defloculante hexametáfosfato de sódio. Na Tabela 2 tem-se um resumo das frações que compõem o solo estudado.

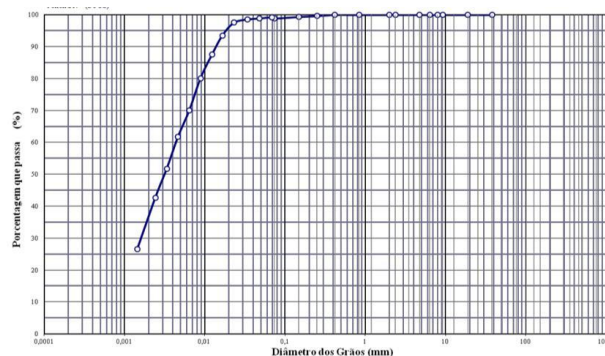


Figura 4. Curva Granulométrica da areia pura.

Os limites de consistência (liquidez e plasticidade) foram obtidos a partir da execução dos ensaios especificados. Com estes dados foi calculado o índice de plasticidade (dado pela

diferença de ambos os limites) e a atividade do material, que estão reunidos na Tabela 3.

Tabela 1: Resumo das características granulométricas dos materiais, em porcentagem.

Frações	(%)
Pedregulho	0,0
Areia Grossa	0,0
Areia Média	0,4
Areia Fina	0,4
Silte	63,5
Argila	35,7

Tabela 3: Limites de Consistência (%), índice de plasticidade, densidade aparente dos grãos e atividade.

Limite de Liquidez (WL)	64,2 %
Limite de Plasticidade (WP)	35,8 %
Índice de Plasticidade (IP)	28,4 %
Índice de Atividade (I _a)	0,79

Com os dados de WL, IP (Tabela 3) e da análise granulométrica (Tabela 2) o solo foi classificado de acordo com o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), com emprego da norma D 2487 (ASTM, 2011).

Na Figura 5 apresenta-se a Carta de Plasticidade do SUCS, com o posicionamento do solo em análise.

A amostra de solo é classificada como um Silte muito plástico (MH).

Reunindo os valores obtidos na caracterização física do material e relacionando com as proposições feitas por BENSON et al. (1994) para as relação entre condutividade hidráulica e a fração granulométrica, índice de plasticidade e atividade, observa-se que o solo possui potencial de alcançar valores de condutividade hidráulica abaixo dos parâmetros especificados para ser utilizado como material de construção de barreiras minerais. Embora a sua classificação não esteja entre as recomendadas para tal atividade.

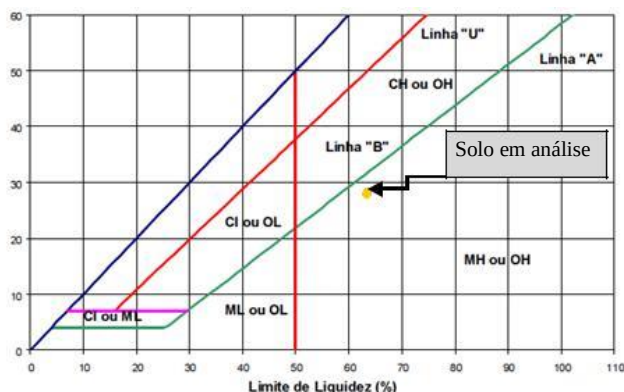


Figura 5: Carta de Plasticidade de Casagrande.

3.2 Ensaios de Caracterização Química

Com os resultados do ensaio de Azul de Metileno foram obtidos os valores de Capacidade de Troca Catiônica (CTC) e de Superfície Específica (SE), cujos resultados estão reunidos na Tabela 4.

Tabela 4: Capacidade de Troca Catiônica e Superfície Específica.

Parâmetros	Resultados
CTC – Capacidade de Troca Catiônica	5,88 meq/100g
SE – Superfície Específica	45,92 m ² /g

Através do Ensaio de Azul de Metileno o *Laboratories des Ponts et Chaussées* (LCPC, 1979) caracterizou alguns tipos de solos, obtendo valores para a superfície específica de alguns argilominerais, cujos valores encontrados estão reunidos na Tabela 5.

Tabela 5: Superfície específica de alguns argilominerais, LCPC (1979).

Tipo de Argila	Superfície Específica (m ² /g)
Montmorilonita	800
Vermiculite	200
Ilita	40 – 60
Caulinita	5 – 20

O valor de superfície específica determinado sugere a presença do argilomíneral ilita na composição do solo. Verificou-se ainda um valor bem baixo para a Capacidade de Troca Catiônica. Segundo Stevenson (1985), citado por de Paula (1999), esse valor de CTC é pouco superior ao valor típico de solos caulíníticos conforme ilustra a Tabela 6.

Tabela 6: CTC para alguns argilominerais, adaptado de Stevenson (1985)

Tipo de Argila	CTC (meq/100g)
Montmorilonita	80 – 150
Ilita	30 – 40
Caulinita	3 – 5

Um fator que pode ter influenciado os resultados da CTC e Superfície Específica é a presença da matéria orgânica no solo. Segundo Sparks (1996), *apud* Costa (2002), a presença de matéria orgânica mesmo que inferior a 1,0 %

exerce influência significativa nas reações no solo. A Tabela 7 apresenta os resultados do teor de matéria orgânica e pH do solo.

Tabela 7: Teor de Matéria Orgânica e pH.

Parâmetros	Resultados
Teor de Matéria Orgânica	2,73 %
pH	6,8

O baixo valor de pH pode ser relacionado com a precipitação pluviométrica da região onde se localiza a jazida que forneceu o solo também contribui para a lixiviação das bases, resultando em solos com pH mais baixos.

O ensaio de Fluorescência de Raios X forneceu uma análise semiquantitativa das concentrações de óxidos e elementos presentes no solo e, além disso, através do resultado do espectro obtido pelo ensaio foi possível uma análise qualitativa dos compostos presentes no solo.

As porcentagens dos principais compostos químicos presente na amostra de solo são apresentadas na Tabela 8.

A predominância de SiO₂, correspondente a 57,6 % do total da amostra, deve-se ao fato de que esta é a formulação química do mineral quartzo, que é o mineral mais abundante na amostra.

Tabela 8: Concentrações dos principais óxidos e elementos do solo.

Óxidos		Elementos	
Fórmula	Concentração (%)	Fórmula	Concentração (%)
SiO ₂	57,6	O	48,4
Al ₂ O ₃	30,5	Si	26,9
Fe ₂ O ₃	5,41	Al	16,1
K ₂ O	3,25	Fe	3,79
TiO ₂	1,44	K	2,7
MgO	1,34	Ti	0,86
ZrO ₂	0,065	Mg	0,807
SO ₃	0,0614	Zr	0,0481
BaO	0,0528	Ba	0,0472

A amostra também apresentou elevada concentração de óxido de alumínio (Al₂O₃), correspondendo a 30,5 %, e em menores quantidades os óxidos de ferro (Fe₂O₃), com 5,41 %, óxido de potássio (K₂O) e óxido de titânio (TiO₂) que pode ser um dos responsáveis por conferir ao solo pontos de coloração alaranjada.

3.3 Ensaios de Caracterização Mineralógica

Os difratogramas do solo indicam que ele é composto principalmente pelos minerais silicatados ilita/mica e caulinita.

Estes minerais fazem parte de todas as frações do solo, visto que são encontrados em todas as lâminas, como pode ser melhor visualizado na Figura 9.

As Figuras 6 a 8, apresentam os difratogramas obtidos para cada uma das lâminas analisadas separadamente.

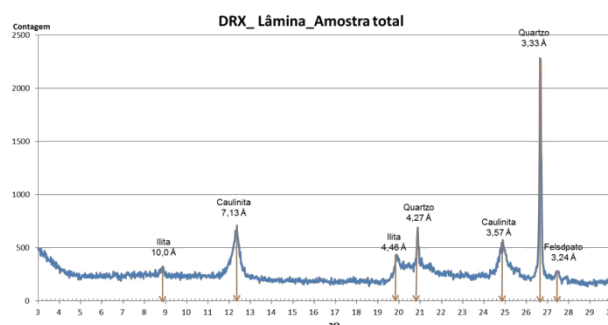


Figura 6: Difratograma da amostra de solo natural.

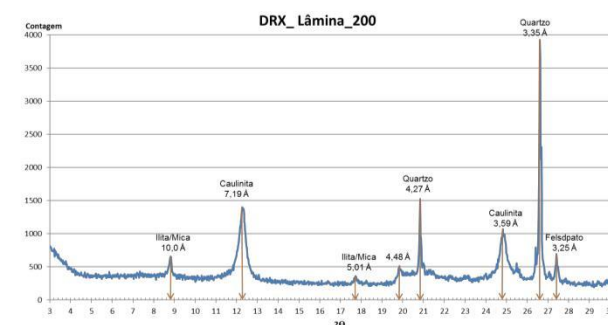


Figura 7: Difratograma da amostra de solo passante na peneira #200.

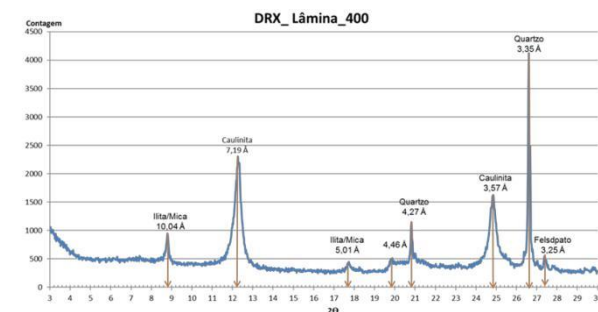


Figura 8: Difratograma da amostra de solo passante na peneira #400.

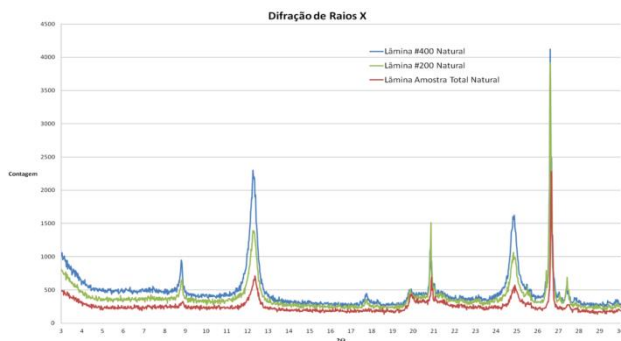


Figura 9: Difrátogramas reunidos, amostra total, material passante nas peneiras #200 e #400.

Comparando as intensidades dos picos, observa-se, de forma geral, maior intensidade nos correspondentes ao mineral quartzo, seguido dos da caulinita, e com menor intensidade os da illita/mica. Sendo que os picos da caulinita e da illita/mica aumentaram nas lâminas cujo material é passante na peneira #200 e #400, respectivamente, em relação ao da amostra total (passante na peneira #40).

A intensidade pode dar uma ideia da proporção entre os minerais presentes, ou seja, se um mineral apresenta pico mais intenso que o outro, provavelmente este existe em maior quantidade no solo. Com isso infere-se que nestas frações estão mais presentes.

Já a agudez e a simetria indicam o grau de cristalinidade do mineral. A princípio, foi considerado que o pico I/M correspondia apenas ao argilomineral illita, no entanto, devido à detecção da simetria destes picos em todos os difratogramas, supõe-se que este indique a presença de uma illita bem cristalizada e de uma mica.

Os ensaios de caracterização mineralógica mostraram que os minerais illita/mica e caulinita são os argilominerais predominantes e estão presentes na fração argila e silte do solo. Em materiais com a presença destes argilominerais existe a possibilidade de obter valores de condutividade hidráulica inferiores ao requisitos mínimos para construção de barreiras minerais, de acordo com MESRI e OLSON (1971).

4 CONCLUSÃO

O solo foi classificado como um silte muito plástico (MH), de acordo com a USCS (Unified Soil Classification System). Este tipo de solo

não está na lista dos solos sugeridos pelo critério da CETESB (1993), indicando que a princípio ele pode não apresentar os valores de condutividade hidráulica requisitados.

No entanto, o solo apresentou quantidade elevada de finos 99,6 %, e valores de índice de plasticidade e de atividade que sugerem que o solo possui potencial de alcançar valores de condutividade hidráulica abaixo dos parâmetros especificados para ser utilizado como material de construção de barreiras minerais.

Portanto, ressalta-se que apenas este fator não restringe o uso do solo como material de construção de barreiras minerais.

A realização de um estudo sobre o comportamento hidráulico do solo em diferentes teores de umidade e diferentes energias de compactação é indicado para que se possa avaliar melhor este parâmetro.

A caracterização química do material mostrou que o quartzo é mineral mais abundante no solo. Este mineral é quimicamente inerte o que para a aplicação em barreiras minerais, para fins de retenção de íons não é interessante. Mas, por outro lado, o quartzo pode conferi-lo uma elevada resistência, requisito também importante.

Além disso, o material possui alguns óxidos importantes para a adsorção de metais presentes no lixiviado; os óxidos de alumínio e de ferro, por exemplo, no entanto, não se pode concluir que o solo apresente ou não potencial de retenção de contaminantes, sendo necessário a realização de ensaios adicionais tais como: ensaios de difusão, coluna e adsorção.

A caracterização mineralógica do material, por sua vez, mostrou que os argilominerais predominantes são a illita/mica e a caulinita. O resultado é compatível com aqueles obtidos com o ensaio de Azul de Metileno, que indicava a presença destes minerais. A presença de minerais 2:1, como a illita, pode influenciar negativamente no comportamento contrátil do solo, não se pode aqui avaliar o grau de influência, sendo necessário o estudo do comportamento contrátil do solo. Por outro lado, a presença desses argilominerais indica que a obtenção de valores baixos para a condutividade hidráulica.

Embora não conclusivo sobre a possibilidade de uso direto do material em análise, este

trabalho foi de grande relevância, pois ao estudar as propriedades de um solo jamais estudado mostra as possíveis dificuldades a serem enfrentadas, e mais ainda, direciona os estudos necessários para avaliar o uso deste solo como material de construção para barreira mineral em sistemas de impermeabilização de base de aterros sanitários.

AGRADECIMENTOS

Os escritores desejam expressar sua gratidão à Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, assim como a agência brasileira CNPq pelo apoio financeiro a esta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- ABRELP. (2014). Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil*. São Paulo. 114p.
- ASTM (2011). *Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*, ASTM D 2487.
- Benson, C.H.; ZHAI, H; WANG, X. (1994). Estimating the Hydraulic Conductivity of Compacted Clay Liners, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 120, No. 2, pp. 366-387.
- Brasil. Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. CETESB, 1993, Resíduos Sólidos Industriais, 2a edição. Compromisso Empresarial para a Reciclagem (CEMPRE). (2010). *Lixo Municipal: Manual de Gerenciamento Integrado*. São Paulo.
- Costa, P. O. S. (2002) Avaliação em laboratório, do transporte de contaminantes no solo do aterro sanitário de Sauípe/Ba. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – Geotecnia) – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- De Paula, E. H., Almeida, M. S. S., Barbosa, M. C. (1999). Determinação de Parâmetros de Sorção e Difusão Pura em um Solo Arenoso de Jacarepaguá, RJ. *Anais do 4º Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental – REGEO'99*, eds. T.M. de Campos & Vidal, D. E., São José dos Campos, pp. 352-361.
- LCPC-SETRA. (1979). *Les Ouvrages en Terre Armée, Recommendations et règles de l'art*, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées - Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes, Ministère des Transports, France.
- MESRI, G.; OLSON, R.E. (1971). *Mechanisms Controlling the Permeability of Clays, Clays and Clay Minerals*, Pergamon Press., Great Britain, Vol.19, pp.151- 158.
- MITCHELL, J.K., (1993). *Fundamentals of Soil Behavior*, Ed. John Wiley and Sons, Inc. University of California, USA, 437 p.
- SKEMPTON, A.W. (1954). The pore-pressure coefficients A and B. *Geotechnique* Vol. 4, Issue 4, p.143–147.