

MISTURAS DE SOLO LATERÍTICO E BENTONITA COMO BARREIRAS ALTERNATIVAS PARA ATERROS SANITÁRIOS NO BRASIL

Mixtures of lateritic soil and bentonite as an alternative barrier for sanitary landfills in Brazil

Thiago Luiz Coelho Morandini*
Adilson do Lago Leite**

RESUMO – Em meados de 2014, grande parte dos municípios brasileiros não conseguiu atender à Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), que institui que todos os resíduos sólidos urbanos não reutilizados devem ter a sua disposição em aterros sanitários. Neste contexto, a utilização de uma barreira composta por solos lateríticos pode ser uma alternativa para substituição ou complementação das barreiras geossintéticas, considerando a grande ocorrência destes solos em clima tropical. Como muitas vezes estes solos não alcançam os patamares mínimos de condutividade hidráulica (k) exigidos em projeto, a adição de bentonita poderia reduzir o k destes solos. Este artigo apresenta os resultados de um estudo laboratorial em misturas de bentonita e solo laterítico da região de Ouro Preto MG, Brasil. O estudo teve por objetivo determinar a redução da condutividade hidráulica do solo laterítico proporcionada pela adição de bentonita, assim como avaliar possíveis quedas na resistência ao cisalhamento. Isto para fins de aplicação em sistemas basais de selagem em aterros sanitários. Foram desenvolvidos ensaios de caracterização, condutividade hidráulica e resistência ao cisalhamento. De um modo geral o estudo demonstrou que a referida mistura pode ser uma alternativa construtiva para os selos basais, desde que sejam ponderados todos os fatores de interação entre a bentonita e o solo laterítico.

ABSTRACT – In 2014 most Brazilian cities had not yet managed to comply with the National Policy for Solid Waste (PNRS), which implies that all urban waste not recycled must be disposed of on proper sanitary landfills. In this context, the use of a barrier composed of lateritic soil seems to be a reasonable alternative to substitute or complement geosynthetic barriers, considering the abundance of this type of soil in the tropics. However, some lateritic soils may not exhibit the low hydraulic conductivity (k) levels demanded by landfill design and bentonite addition could reduce the k of these soils. This paper reports the results of laboratory research on mixtures of bentonite and a lateritic soil from the region of Ouro Preto MG, Brazil. The study aimed to determine the reduction of hydraulic conductivity of lateritic soil due to the addition of bentonite, and to evaluate the possible decrease in shear strength for application in landfill base sealing systems. The experimental work involved characterization, hydraulic conductivity and shear strength determination. As a general conclusion, the research indicated the suitability of these mixtures as an alternative for liner construction, once the interaction of the bentonite and the lateritic soil is correctly addressed.

PALAVRAS CHAVE – Aterro sanitário, solo laterítico, bentonita, condutividade hidráulica, resistência ao cisalhamento.

* Professor do Departamento de Engenharia Civil do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET, Belo Horizonte, Brasil. E-mail: thiagomorandini@des.cefetmg.br

** Professor do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP, Ouro Preto, Brasil. E mail: alleite@em.ufop.br

1 – INTRODUÇÃO

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída no Brasil pela lei Federal nº 12305, de agosto de 2010, dispõe que todos os municípios devem dar a destinação correta aos rejeitos provenientes de resíduos sólidos no prazo de 4 anos. Entende-se como rejeitos aqueles resíduos sólidos que não possuem recuperação por processos tecnológicos disponíveis e viáveis, devendo assim ter a sua disposição final ambientalmente adequada em aterros sanitários urbanos. Entre os rejeitos de resíduos sólidos, destacam-se os rejeitos de resíduos sólidos urbanos (RSU), de maior volume em relação aos resíduos industriais e aos resíduos de serviços de saúde.

Em meados de 2014, grande parte dos municípios brasileiros ainda não atenderiam a PNRS no que se refere à disposição adequada dos rejeitos de resíduos sólidos, empregando para tal lixões a céu aberto ou aterros controlados. Mais precisamente, segundo a última estimativa realizada pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2013), apenas 58,26% dos RSU foram corretamente destinados em aterros sanitários em 2013. Logo, 41,74% do RSU gerado no Brasil em 2013 foi disposto em lixões e aterros controlados, correspondendo a aproximadamente 79 mil toneladas por dia.

Neste cenário, ressalta-se que alternativas de novos materiais ou métodos executivos podem contribuir para os municípios adequarem ou conceberem novos projetos de aterros sanitários, sobretudo quanto às barreiras de proteção, de fundamental importância para isolar o rejeito de resíduo sólido da matriz hidrológica subjacente. De um modo geral, as barreiras de fluxo se dividem em basais (do inglês: *base liners*) ou de cobertura (do inglês: *cover systems*).

Para a utilização em aterros sanitários, dentre outros aspectos, as barreiras de fluxo devem ser compostas por materiais cuja condutividade hidráulica (k) não ultrapasse um determinado patamar. Shackelford (1994), Anderson e Hee (1995), Gleason *et al.* (1997) e Rowe (2001), mencionam o valor de k de 10^{-9} m/s como sendo o patamar mínimo para utilização em aterros sanitários. Entretanto este valor pode não ser suficiente para atender a algumas legislações. Por exemplo, as normas alemã e austríaca recomendam valores de k inferiores a 5×10^{-10} m/s (Koch, 2002). A Fig. 1 apresenta recomendações de configuração de sistemas de selagem de alguns países.

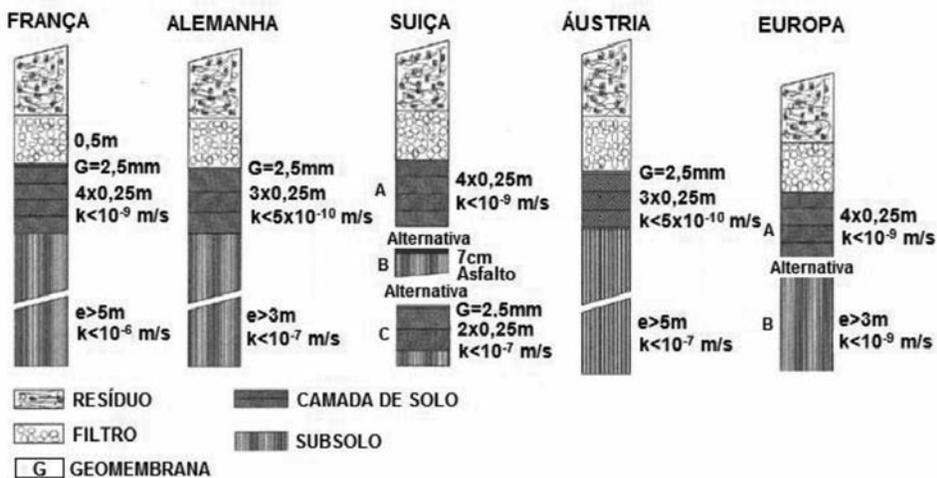


Fig. 1 – Configuração para sistemas de selagem conforme as legislações de alguns países (modificado de Koch, 2002).

No Brasil os solos tropicais argilosos possuem potencial de uso em barreiras de fluxo, sobretudo pela sua elevada resistência mecânica e grande abundância. Entretanto, mesmo compactados, eles muitas vezes não atendem aos valores mínimos de condutividade hidráulica recomendados pelas legislações anteriormente referidas. Por esta razão, a adição da argila bentonítica torna-se uma opção potencial para se reduzir a condutividade hidráulica destes materiais, e também aumentar sua capacidade de retenção de contaminantes, considerando as elevadas plasticidade e capacidade de troca catiônica destes materiais.

Em tempo, também é necessário levar em consideração que, geralmente, as barreiras constituídas por solos compactados devem resistir e não se deformar excessivamente quando submetidas às tensões de sobrecarga das camadas sobrejacentes e pela interação com os fluidos percolantes. No entanto, a adição de bentonita, necessária à redução da condutividade hidráulica, pode diminuir a resistência mecânica das misturas, sobretudo em relação ao ângulo de atrito.

Assim, além da redução da condutividade hidráulica, que por si só já justifica o estudo de misturas de diferentes solos com diferentes teores de bentonitas, avaliações da perda de resistência ao cisalhamento são fundamentais para o potencial aproveitamento de camadas argilosas compactadas em obras geotécnicas cujas principais finalidades são retardar o fluxo de água e/ou contaminantes.

Alguns estudos avaliaram a redução da condutividade hidráulica em misturas de bentonita a areia e outros tipos de solos (Chapuis, 1990; Sivapullaiah *et al.*, 1998; Stewart *et al.*, 2003 e outros). Relatos específicos sobre estudos das propriedades de solos lateríticos e suas misturas com bentonita para a finalidade de aplicações em barreiras foram apresentados em Anderson e Hee (1995), Osinubi e Nwaiwu (2002) e Farnezi e Leite (2007). Variações nas propriedades mecânicas dos solos diversos aplicados em barreiras de fluxo foram relatadas nos estudos de Mesri e Olson (1970), Madsen e Müller-Vonmoos (1989), Daniel e Koerner (1995), Santamarina (2003), Cuisinier *et al.* (2009) e Sunil *et al.* (2009). Poucos estudos foram encontrados tratando da condutividade hidráulica e resistência mecânica de solos plenamente lateríticos e suas misturas com bentonita.

O objetivo do presente trabalho é avaliar o comportamento hidráulico e mecânico em misturas de solo laterítico e bentonita. Especificamente, pretende-se elucidar variações nas propriedades geotécnicas, na condutividade hidráulica e nos parâmetros de resistência ao cisalhamento proporcionados pela adição de bentonita ao solo laterítico. Estas avaliações têm o propósito final de expor a aplicabilidade de misturas bentoníticas em barreiras de fluxo, assim como validar uma alternativa para os municípios brasileiros adequarem seus aterros sanitários conforme a PNRS.

Primeiramente o artigo apresenta um panorama atualizado sobre a disposição dos resíduos sólidos urbanos no Brasil, destacando a imensa demanda pela construção de aterros sanitários neste país. Posteriormente são apresentados os resultados de ensaios laboratoriais de caracterização dos materiais investigados (solo laterítico e suas misturas com bentonita), de ensaios de condutividade hidráulica e de resistência ao cisalhamento.

2 – CENÁRIO DA DISPOSIÇÃO DO RESÍDUO SÓLIDO URBANO NO BRASIL

De acordo com a pesquisa realizada pela ABRELPE (2013), o Brasil coleta 189 219 t/dia de RSU. Desta massa, apenas 58,3% foram devidamente destinados em aterros sanitários no ano de 2013. Se comparado ao ano anterior, os dados revelam que houve um aumento desprezível na quantidade destinada aos aterros sanitários entre os anos de 2012 e 2013, como mostra a Fig. 2. Vale lembrar que o percentual admissível para a disposição em aterros controlados e lixões deveria ser nulo, uma vez que é consenso geral que a disposição inadequada de RSU tem grande potencial de contaminação do lençol freático, trazendo, conseqüentemente, malefícios à saúde pública.

Os dados da ABRELPE (2013) se mostram ainda piores quando a disposição de RSU é abordada em termos de percentual de municípios que destinam corretamente o seu RSU, como

mostra a Figura 3. Neste caso, os dados mostram que 60,0% dos municípios brasileiros destinaram o seu RSU em lixões e aterros controlados em 2013. A divergência entre os percentuais em peso e em número de municípios leva a conclusão que os municípios de menor população (e menor produção em peso de RSU) seriam aqueles com maior dificuldade para implantação de aterros sanitários para a correta disposição de seu RSU.

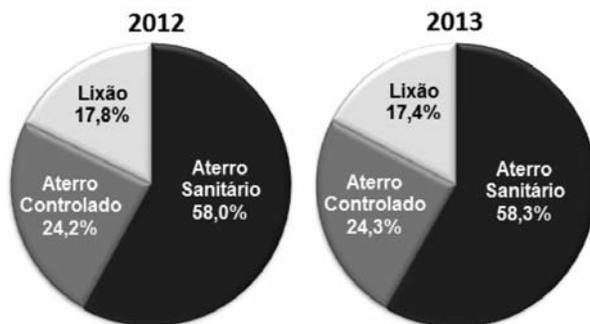


Fig. 2 – Percentual em peso de RSU quanto ao tipo de destinação final (Dados: ABRELPE, 2013).

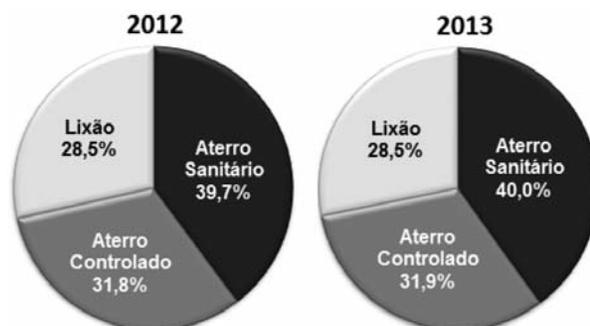


Fig. 3 – Percentual da destinação final de RSU de todos os municípios no Brasil (Dados: ABRELPE, 2013).

Analisando-se separadamente cada região do Brasil, verifica-se que a disposição incorreta de RSU é mais acentuada nas regiões Norte e Nordeste (Fig. 4), onde respectivamente 20,4% e 25,3% dos municípios destinam corretamente o RSU em aterros sanitários. Como estas regiões são as menos desenvolvidas em termos sócio-econômicos, conclui-se que o problema da disposição de RSU no Brasil está diretamente ligado à receita de cada município. A Fig. 5 mostra um comparativo entre a destinação correta e a participação no produto interno bruto (PIB) nacional para cada região do Brasil.

É possível observar na Fig. 5 que, de fato, as regiões com piores participações no PIB nacional são aquelas com menor taxa de municípios que praticam a disposição correta de RSU (regiões Norte, Nordeste e Centro-Oeste). A exceção é a região Sul, cuja participação no PIB é de 16,2%, e mesmo assim é a região com a melhor taxa de municípios que destinam corretamente o RSU (59,0%) no Brasil. Esta é uma exceção positiva, cujas práticas dos municípios desta região devem ser espelhadas e expandidas para as outras regiões do país.

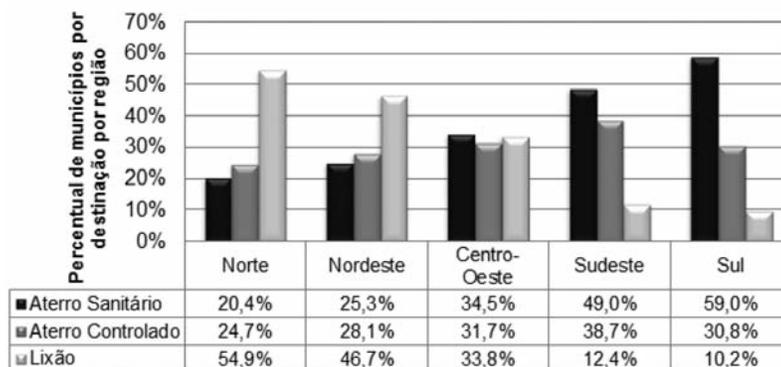


Fig. 4 – Percentual de municípios por região do Brasil quanto ao tipo de destinação final de RSU (Dados: ABRELPE, 2013).

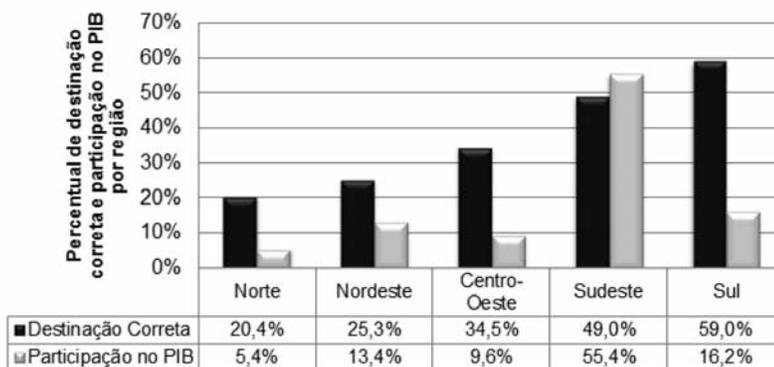


Fig. 5 – Percentual de municípios com destinação correta de RSU por região e participação destas regiões no Produto Interno Bruto do Brasil (Dados: ABRELPE, 2013 e IBGE, 2011).

3 – MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento da pesquisa, foi coletado um solo de um perfil pedológico tipicamente laterítico, cujo caráter laterítico pôde ser verificado segundo metodologia MCT-M (Vertamatti, 1998). O local da coleta foi nas redondezas do distrito de Antônio Pereira (município de Ouro Preto-MG).

Foram então confeccionadas misturas com bentonita (tipo Brasgel-PA) nos teores de 0, 3, 6, 9 e 12% (porcentagem em peso seco). As amostras foram denominadas SL (0%), SL03 (3%), SL06 (6%), SL09 (9%) e SL12 (12%) em função do teor de bentonita presente nestas amostras.

O programa experimental de laboratório foi dividido em caracterização geral, ensaios de condutividade hidráulica, e ensaios de resistência ao cisalhamento, cujos métodos são descritos a seguir.

3.1 – Caracterização geral das amostras

Anteriormente à realização dos ensaios, as amostras foram destorroadas e homogeneizadas conforme indicado na NBR 6457. A massa específica dos grãos (empregada nos ensaios de compactação) foi determinada conforme a NBR 6508.

A composição mineralógica da amostra SL (solo laterítico) foi analisada via difração de raios-X. Para isto foram elaboradas lâminas vítreas de sedimentação e também análise do pó total. Tanto para as lâminas, quanto para o pó total foram aplicadas amostras pulverizadas em um pequeno britador de bolas de aço, homogeneizadas e peneiradas (malha de 200 mesh – 0,074 mm). O procedimento do ensaio de difração de raios-X foi realizado conforme a rotina do Laboratório de Microscopia Óptica e Raios-X da Universidade Federal de Ouro Preto.

A avaliação do caráter laterítico da amostra SL seguiu os procedimentos indicados na metodologia MCT conforme as normas DNER-ME 256-94 e DER-M196-89. O ábaco de classificação adotado foi o MCT-M, conforme proposto por Vertamatti (1998).

Os ensaios de caracterização geotécnica foram aplicados para todas as amostras, incluindo as misturas, sendo: análise granulométrica conjunta (NBR 7181); determinação dos limites de liquidez e plasticidade (respectivamente NBR 6459 e NBR 7180); ensaios de compactação na energia Proctor normal (NBR 7182).

3.2 – Condutividade hidráulica

Este parâmetro foi determinado em todas as amostras por meio de ensaios em permeâmetro de parede flexível em câmara triaxial. Este equipamento permite a redução do tempo de percolação em solos argilosos pouco permeáveis e possibilita a saturação por contra-pressão, conforme indicado em Head (1986).

Para os ensaios, corpos de prova foram compactados e moldados a partir dos resultados obtidos no ensaio de compactação Proctor Normal, com teor de umidade 2% acima da ótima. Posteriormente, os corpos de prova foram moldados por desbastamento em dimensões de 0,05 m de diâmetro e 0,10 m de comprimento considerando o tamanho da câmara triaxial utilizada.

Os procedimentos de ensaios se resumiram em: saturação por contra-pressão; adensamento e percolação. As tensões confinantes empregadas foram de 20, 40 e 80 kPa, estimadas a partir das tensões frequentemente encontradas em sítios de disposição de resíduos. Para a percolação a carga hidráulica aplicada foi de 5 m de coluna d'água que, ao se considerar os 0,10 m de comprimento do corpo de prova, resultou em um gradiente hidráulico aproximado de 50 m/m. O gradiente hidráulico empregado foi mantido constante durante todo o período de percolação, caracterizando o método de permeabilidade a carga constante.

O equipamento utilizado possui sistemas de aplicação de pressão na base (p_1) e no topo de CP (p_2), além do sistema de aplicação da tensão confinante (σ_3). Um medidor eletrônico de variação de volume do tipo Wykeham Farrance 29-WF4412 de precisão de 0,00001 m³ (para determinação do percolado na amostra) e um transdutor para medição da poropressão (u) são ligados em série ao sistema de aplicação de tensão na base (p_1). Para que não ocorresse a ruptura da amostra por aumento de poropressão (além de gerar um fluxo vertical ascendente), a condição $\sigma_3 > p_1 > p_2$ foi respeitada.

3.3 – Resistência ao cisalhamento

Para a avaliação da resistência ao cisalhamento foi empregado o ensaio do tipo adensado-não drenado (CU) em câmara triaxial. Este ensaio representa a situação de uma camada de solo submetida a uma sollicitação rápida, onde ocorre a ruptura sem o tempo necessário para a dissipação das poropressões geradas (similar ao enchimento de um aterro sanitário). Os procedimentos de ensaio seguiram as indicativas da norma ASTM D 4767/95.

Foram compactadas amostras com cargas dinâmicas na energia Proctor normal conforme procedimento descrito na NBR 7182, considerando sua umidade ótima, para que posteriormente fossem moldados corpos de prova na dimensão de 50 ± 2 mm de diâmetro e 100 ± 4 mm de altura.

O carregamento se deu em um único estágio, com tensões confinantes de 100, 200 e 400 kPa, conforme magnitudes de tensões rotineiramente empregadas neste tipo de ensaio. A velocidade dos incrementos de tensão axial foi determinada conforme estimativa de 100% do adensamento em 65 minutos e estimativa de deformação axial de aproximadamente 5%. Assim, a velocidade de aplicação de tensão axial obtida foi de 0,15 mm/minuto.

Os parâmetros de resistência totais e efetivos foram determinados a partir das envoltórias de ruptura de Mohr-Coulomb. Adicionalmente, para efeito de comparação quanto à variação da rigidez em função do teor de bentonita, o módulo de elasticidade de pico foi determinado a partir das curvas tensão *versus* deformação axial.

4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 – Caracterização geral das amostras

Os minerais encontrados através da difração de raios-X na amostra SL são compatíveis com solos tropicais bastante evoluídos pedologicamente. Foram encontrados traços de caulinita, hematita, gipsita e quartzo, como mostra a Fig. 6.

O caráter plenamente laterítico da amostra SL também pôde ser comprovado pela sua localização no ábaco MCT-M, conforme apresenta a Fig. 7. Ele possui características de capacidade de suporte e perda de massa por imersão típicas dos solos lateríticos areno-argilosos.

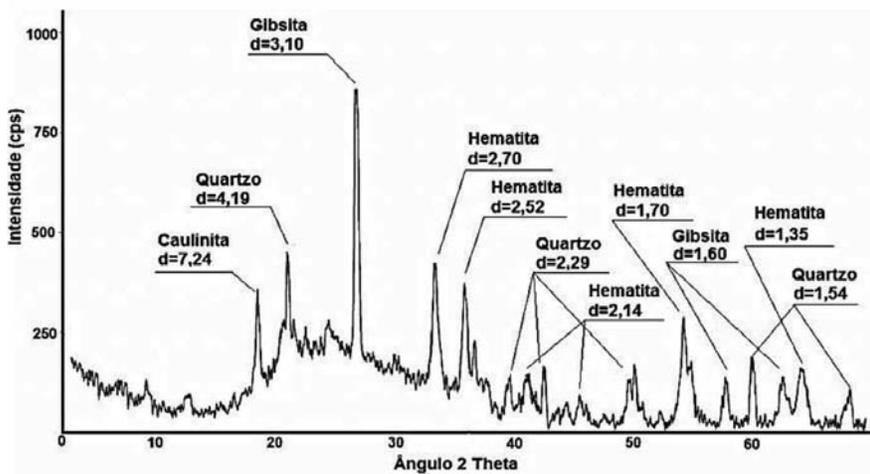


Fig. 6 – Difratogramas de raios-X da amostra de solo laterítico.

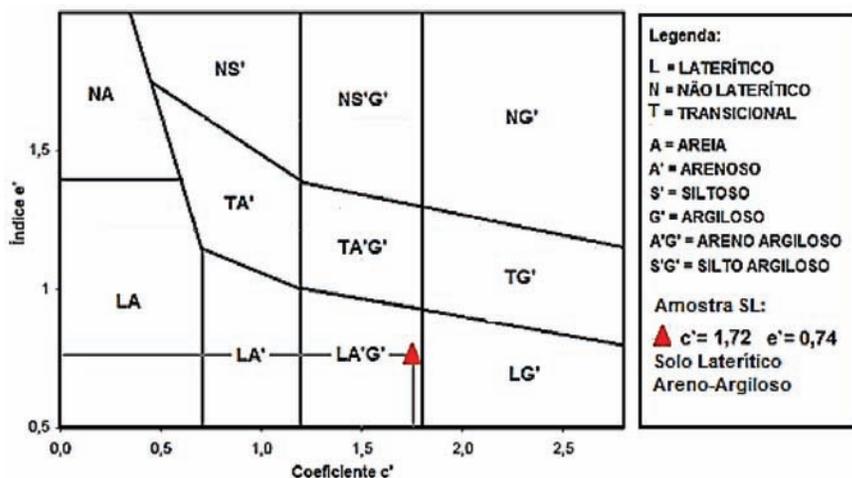


Fig. 7 – Classificação do solo laterítico segundo metodologia MCT-M (Ábaco de Vertamatti, 1998).

O Quadro 1 apresenta o resumo das propriedades geotécnicas obtidas para as amostras SL, SL03, SL06, SL09 e SL12, cujas tendências observadas são mostradas nas Figs. 8, 9 e 10, respectivamente aos resultados de limites de Atterberg, granulometria, e compactação.

Quadro 1 – Resumo das propriedades geotécnicas das amostras.

Propriedades	Amostras					
	Bentonita	SL	SL03	SL06	SL09	SL12
Limites de Atterberg ^{1,2}						
ω_L (%)	683	23	42	57	72	87
ω_P (%)	91	12	21	23	26	27
IP (%)	592	11	21	33	47	60
Faixas Granulométricas ³						
Argila (%)	91	29	29	30	30	31
Silte (%)	9	16	18	17	20	17
Areia fina (%)	0	35	34	34	29	28
Areia média (%)	0	16	15	15	15	17
Areia grossa (%)	0	3	3	4	5	7
Pedregulho (%)	0	1	1	0	1	0
Compactação Proctor Normal ⁴						
$\rho_{dm\acute{a}x}$ (kg/m ³)	NA	1823	1812	1789	1778	1764
W_{ot} (%)	NA	12,5	14,5	16,2	17,8	19,1

¹ ABNT (1984) NBR 6459; ² ABNT (1984) NBR 7180; ³ ABNT (1984) NBR 7181; ⁴ ABNT (1986) NBR 7182.

NA = Não Avaliado

A partir dos resultados do Quadro 1 e Fig. 8, é possível verificar um aumento praticamente linear de ω_L e IP das amostras com o acréscimo da bentonita (ajuste com $R^2 = 0,99$). Já o ω_P apresentou um ligeiro aumento com o aumento do teor de bentonita, assim como uma maior dispersão neste resultado (ajuste com $R^2 = 0,84$), o que leva a conclusão sobre a maior dependência do IP em relação a ω_L .

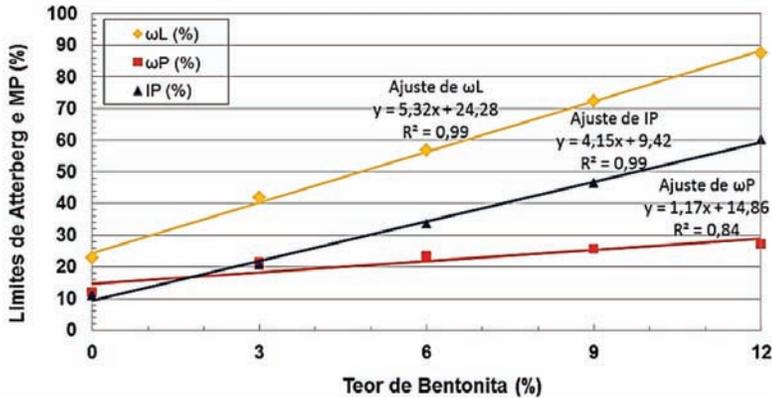


Fig. 8 – Limites de Atterberg em função do teor de bentonita.

A análise granulométrica cujas curvas se encontram na Fig. 9, apresentou uma tendência não esperada: a adição de bentonita não alterou significativamente o teor de argila das amostras SL. Comparando-se as amostras SL e SL12, por exemplo, o acréscimo no teor de argila foi apenas 2% (ver Quadro 1). Como a bentonita é praticamente em sua totalidade composta por fração argilosa, era esperado um acréscimo no teor de argila da ordem do teor de argila adicionado (12%). É possível que a bentonita adicionada se tenha aglutinado aos grãos siltosos e arenosos da amostra SL, os quais apresentam nestas frações sesquióxidos de ferro e alumínio, não acarretando em um aumento significativo da fração argilosa. Este comportamento foi verificado por Nogami e Villibor (1985) em seus estudos de solos lateríticos, mesmo na presença de defloculante (hexametáfosfato de sódio).

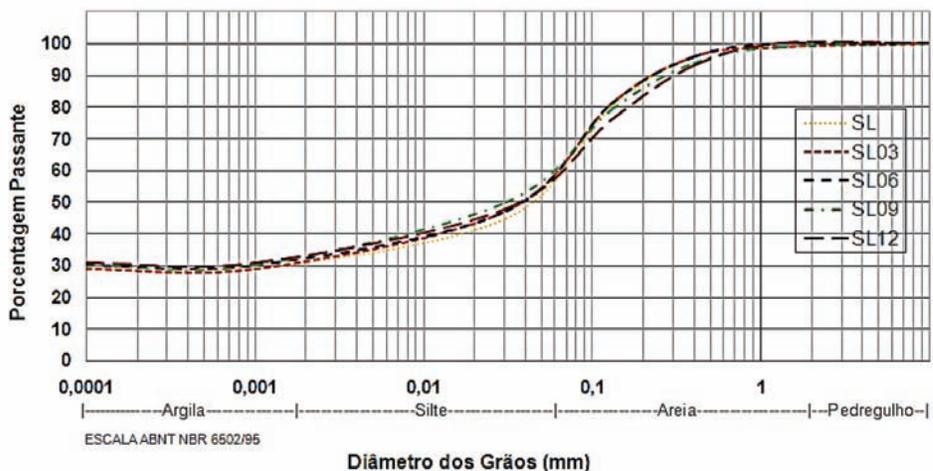


Fig. 9 – Resultado das análises granulométricas.

4.2 – Condutividade hidráulica

Como esperado, a condutividade hidráulica diminuiu com o aumento do teor de bentonita nas amostras (Fig. 10). No entanto, o decréscimo de k não foi linear com o acréscimo de bentonita, verificando-se que há uma curvatura característica para todas as tensões confinantes (σ_3) empregadas. Chapuis e Aubertin (2003) verificaram que para solos finos existe uma convergência entre o inverso do limite de liquidez e o inverso da superfície específica dos solos (S_0) que, por sua vez, aparece ao quadrado na equação de Kozeny–Carman.

Chapuis e Aubertin (2003) verificaram ainda que quanto maior o limite de liquidez e superfície específica, melhor o ajuste linear entre $1/\omega_L$ e $1/S_0$, resultando em uma convergência da equação de Kozeny–Carman com a utilização de ω_L em substituição de S_0 , resultando em um satisfatório ajuste da equação de Kozeny–Carman para solos argilosos.

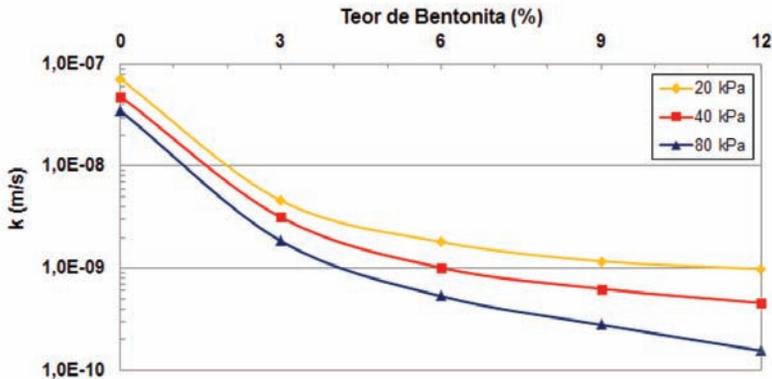


Fig. 10 – Variação da condutividade hidráulica em função do teor de bentonita.

Seguindo o mesmo conceito proposto por Chapuis e Aubertin (2003), dividindo-se o teor de bentonita por uma tendência crescente (limite de liquidez proporcionado pela adição de bentonita), as curvas de k versus o cociente bentonita/limite de liquidez tenderam a uma linearização, como mostra a Fig. 11. Neste sentido, pôde-se prever que um ajuste exponencial na base neperiana se adequa aos dados experimentais, resultando em equações características de k como função do teor de bentonita (equações 1, 2 e 3).

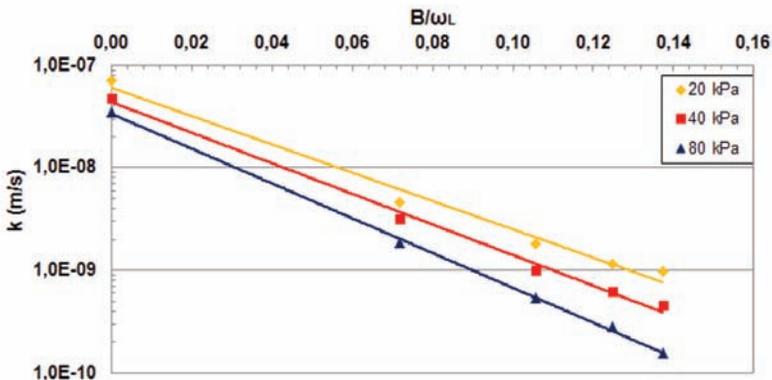


Fig. 11 – Variação da condutividade hidráulica em função do teor de bentonita e limite de liquidez.

$$k(B, \omega_L) = 6 \times 10^{-08} e^{-32(B/\omega_L)} \quad (R^2 = 0,98; \sigma_3 = 20kPa) \quad (1)$$

$$k(B, \omega_L) = 4 \times 10^{-08} e^{-34(B/\omega_L)} \quad (R^2 = 0,99; \sigma_3 = 40kPa) \quad (2)$$

$$k(B, \omega_L) = 3 \times 10^{-08} e^{-39(B/\omega_L)} \quad (R^2 = 0,99; \sigma_3 = 80kPa) \quad (3)$$

onde:

$k(B, \omega_L)$ – condutividade hidráulica em função do teor de bentonita e limite de liquidez (m/s);

B – teor de bentonita (%);

ω_L – limite de liquidez (%).

Os altos valores de R^2 obtidos com a linearização comprovam os excelentes ajustes das curvas características das equações 1, 2 e 3, as quais têm em comum produtos do tipo $a10^{-8}e^{b(B/\omega_L)}$. Pode-se supor desta forma que os valores de $a10^{-8}$ têm a ordem de grandeza do k do solo laterítico, enquanto os valores B/ω_L representam o efeito da adição da bentonita sobre a plasticidade do solo. Já o fator b pode ser entendido como efeito da tensão confinante.

Ao se considerar um valor de k de 10^{-9} m/s como o patamar mínimo para a aplicação de misturas bentoníticas em selos basais de aterros sanitários, tanto pela Fig. 10 quanto pelas equações 1 a 3, é possível se determinar o teor de bentonita entre 4 e 12% (proporção em peso seco) para alcançar este valor, dependendo da tensão confinante considerada.

Entretanto, considerações específicas devem ser respeitadas na determinação do teor ótimo de bentonita: em aterros sanitários reais deseja-se uma coluna mínima de chorume controlada pelo sistema de drenagem, resultando em menor gradiente hidráulico; os maiores valores de k são observados em tensões confinantes baixas, ou seja, no início de operação do aterro sanitário. Assim, o teor ótimo de bentonita deve levar em consideração características específicas de cada projeto, sobretudo em termos de tensão confinante mínima e gradiente hidráulico máximo esperado na vida do aterro sanitário.

Adicionalmente, a variação do índice de vazios foi controlada durante a fase de adensamento e percolação (Fig. 12). Os valores sobre o eixo das ordenadas da Fig. 12 indicam o índice de vazios após a moldagem do corpo de prova, permanecendo o mesmo após a saturação.

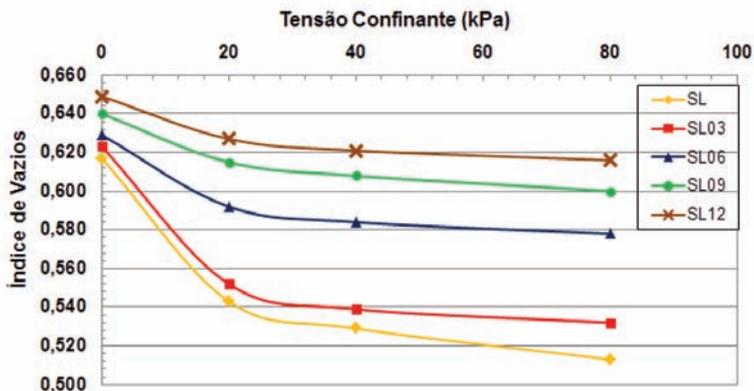


Fig. 12 – Variação do índice de vazios com a tensão confinante para as diferentes amostras.

Como mostra a Fig. 12, inicialmente a amostra SL apresentou menor índice de vazios em relação às amostras contendo bentonita. Já a tendência com a aplicação da tensão confinante foi contrária à esperada, mostrando uma queda mais acentuada do índice de vazios para as amostras SL e SL03 em relação às amostras SL06, SL09 e SL12. Possíveis explicações para esta tendência podem estar na ocupação dos vazios do solo laterítico pelas partículas de bentonita e nas baixas tensões confinantes empregadas. De qualquer modo, os valores de k obtidos indicam que o maior índice de vazios com o acréscimo de bentonita estaria com água adsorvida, ou seja, a água destes vazios não estaria disponível para a percolação.

4.3 – Resistência ao cisalhamento

O Quadro 2 apresenta os parâmetros de resistência totais e efetivos obtidos nos ensaios de cisalhamento triaxial para as amostras, enquanto a Fig. 13 apresenta a variação das envoltórias de Mohr-Coulomb totais e efetivas em função do teor de bentonita.

Quadro 2 – Parâmetros de resistência totais e efetivos para as amostras.

Propriedades	Amostras				
	Bentonita	SL	SL03	SL09	SL12
Ângulo de atrito total (°)	21	20	19	17	16
Ângulo de atrito efetivo (°)	34	33	32	30	29
Coesão total (kPa)	9	10	11	14	15
Coesão efetiva (kPa)	10	11	12	15	16

Tanto no Quadro 2 quanto na Fig. 13 é possível constatar que há uma tendência geral de diminuição do ângulo de atrito (φ e φ') e aumento de coesão (c e c') com o acréscimo de bentonita. Os resultados mostram que o limite desta tendência foi um $\Delta\varphi = \Delta\varphi'$ de -5° e um $\Delta c = \Delta c'$ de $+6$ kPa da amostra SL12 em relação a amostra SL.

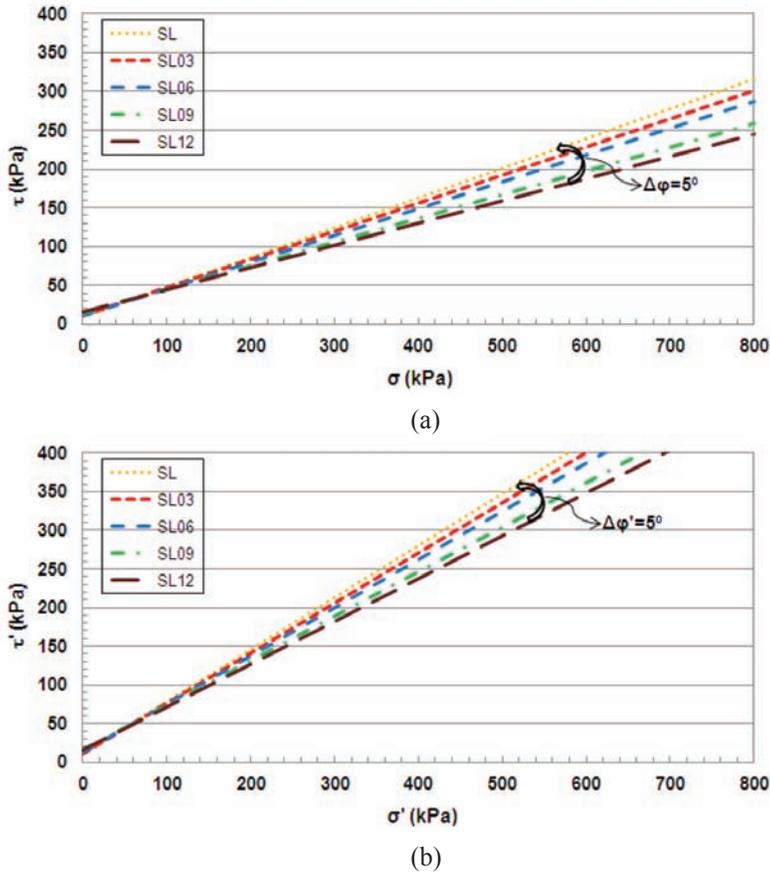


Fig. 13 – Envoltórias de ruptura de Mohr-Coulomb totais (a) e efetivas (b) das amostras.

Considerando-se a variação máxima dos parâmetros de resistência efetivos mostrados na Fig. 13, a redução da resistência ao cisalhamento (τ) decorrente da adição de bentonita é governada pela redução de 5° tanto no ângulo de atrito total quanto no ângulo de atrito efetivo. Desprezando-se a parcela de coesão na envoltória de Mohr-Coulomb, a resistência ao cisalhamento pode ser descrita como $\tau = \sigma' \tan \varphi'$. Deste modo, a redução da resistência ao cisalhamento devido à adição de bentonita pode ser aproximada pela equação $1 - (\tan \varphi'_{SN12} / \tan \varphi'_{SN})$, ou seja, cerca de 25% para resistência ao cisalhamento efetivo e 18% para resistência ao cisalhamento efetivo. Ressalta-se que estes percentuais são os limites para elevadas tensões confinantes. Para baixas tensões confinantes, a parcela de aumento da coesão devido à adição de bentonita deve ser considerado, reduzindo o percentual de perda de resistência.

A Fig. 14 mostra as curvas tensão *versus* deformação obtidas no ensaio triaxial para cada tensão confinante empregada, enquanto a Fig. 15 mostra a variação do módulo de elasticidade de pico em função do teor de bentonita.

A Fig. 14 mostra uma redução da tensão desviadora de pico para as amostras contendo maiores teores de bentonita, fato esperado considerando-se a diminuição do ângulo de atrito efetivo dado pelo acréscimo de bentonita. Em relação à amostra SL observou-se que a redução da tensão desviadora de pico é mais acentuada quanto maior a tensão confinante: para $\sigma_3 = 100$ kPa, a variação de σ_d foi da ordem de 30 kPa; para $\sigma_3 = 200$ kPa, foi da ordem de 50 kPa e para $\sigma_3 = 400$ kPa, foi da ordem de 150 kPa.

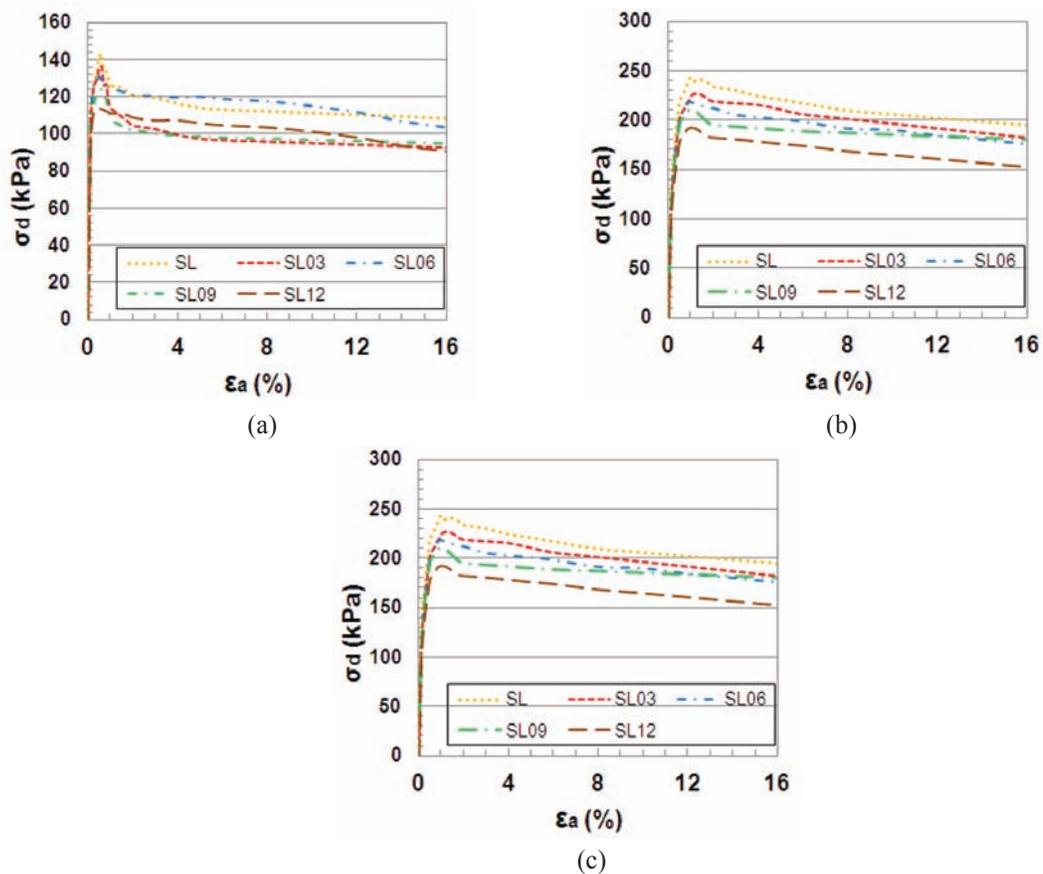


Fig. 14 – Curvas tensão *versus* deformação axial sob tensões confinantes de 100 kPa (a), 200 kPa (b) e 400 kPa (c).

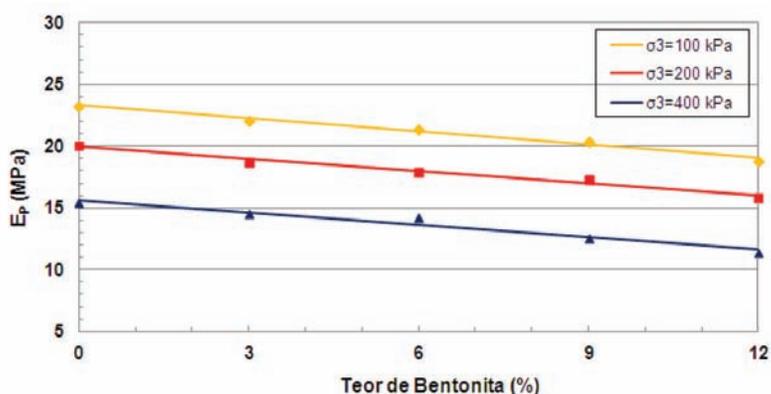


Fig. 15 – Variação do módulo de elasticidade de pico em função do teor de bentonita.

Já a Fig. 15 mostra que houve uma diminuição do módulo de elasticidade de pico de aproximadamente 4 MPa entre as amostras SL e SL12 para todas as tensões confinantes empregadas. Mais uma vez esta tendência já era esperada pois a bentonita é altamente deformável. Em termos de aplicação das misturas em selos basais, o aumento da deformação em função da adição de bentonita mostrou-se relevante e deve ser analisada de forma específica em cada projeto.

5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em resumo, os resultados experimentais demonstraram as mudanças nas propriedades geotécnicas do solo laterítico decorrentes da adição de bentonita: aumento linear do limite de liquidez e do índice de plasticidade (maior dispersão do limite de plasticidade); manutenção dos teores de argila na análise granulométrica creditado à possível aglutinação dos grãos siltosos e arenosos do solo laterítico.

Em termos de condutividade hidráulica, verificou-se uma diminuição não linear de k com o aumento do teor de bentonita. Uma característica comum para todas as curvas de k versus teor de bentonita foi a constatação de que ao se dividir o teor de bentonita pelo limite de liquidez, houve uma tendência de linearização, que resultou na obtenção de equações características exponenciais de k como função desse fator B/ω_L . A este fator, por eliminação, foi creditado o efeito real da bentonita na condutividade hidráulica do solo laterítico.

Como esperado, a adição da bentonita reduziu a resistência ao cisalhamento do solo laterítico devido à redução do ângulo de atrito. Além disso, a adição da bentonita aumentou significativamente a compressibilidade do solo laterítico. Neste sentido, os resultados indicaram que é obrigatória uma análise específica destes parâmetros para cada projeto de aterro sanitário.

De um modo geral, o estudo demonstrou que a mistura de solos lateríticos com bentonita é uma alternativa viável para construção de barreiras de fluxo (sobretudo em *liners* e *cover systems* de aterros sanitários), desde que sejam ponderados todos os fatores de interação entre a bentonita e o solo laterítico, assim como os fatores de redução de resistência ao cisalhamento devido à adição da bentonita. Neste sentido, em aspecto mais amplo, as barreiras argilosas compactadas podem ser uma alternativa para que os municípios brasileiros adequem seus sítios de disposição de rejeitos de resíduos sólidos e atendam a Política Nacional de Resíduos Sólidos.

6 – AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais - FAPEMIG, pelo apoio financeiro ao projeto (processo APQ 01284-10). Os autores também agradecem à Bentonit União Nordeste S/A, representada pelo engenheiro Pedro Paulo Furtado Gouveia, que gentilmente doou as amostras de bentonita utilizadas nesta pesquisa.

7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6459 (1984): *determinação do limite de liquidez*. NBR 6508 (1984): *grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – determinação da massa específica*. NBR 7180 (1984): *determinação do limite de plasticidade*. NBR 7181 (1984): *análise granulométrica*. NBR 6457 (1986): *amostras de solo – preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização*. NBR 7182 (1986): *ensaio de compactação*. Rio de Janeiro.

- ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (2013). *Panorama dos resíduos sólidos no Brasil*. 11ª edição, ABRELPE, São Paulo.
- Anderson, S.A.; Hee, B.H. (1995). *Hydraulic conductivity of compacted lateritic soil with bentonite admixture*. Environmental and Engineering Geoscience, v. 1, n. 3, pp. 299-312.
- ASTM - American Society for Testing and Materials. D 4767 (1995): *Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils*. West Conshohocken.
- Chapuis, R.P. (1990). *Sand-bentonite liners: predicting permeability from laboratory tests*. Canadian Geotechnical Journal, v. 27, pp. 47-57.
- Chapuis, R.P.; Aubertin, M. (2003). *On the use of the Kozeny-Carman equation to predict the hydraulic conductivity of soils*. Canadian Geotechnical Journal, v. 40, pp. 616-628.
- Cuisinier, O.; Deneele, D.; Masrouri, F. (2009). *Shear strength behavior of compacted clayey soils percolated with an alkaline solution*. Engineering Geology, v. 108, pp. 177-188.
- Daniel, D.E.; Koerner, R.M. (1995). *Waste containment facilities: guidance for construction, quality assurance and quality control of liner and cover system*. ASCE, New York, 354 p.
- DER – Departamento de Estradas de Rodagem de São Paulo. DER-M196-89 (1989): *Classificação de solos tropicais segundo metodologia MCT*. São Paulo.
- DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. DNER-ME 256-94 (1994): *Solos compactados com equipamento miniatura – Determinação de perda de massa por imersão*. Rio de Janeiro.
- Farnezi, M.K.; Leite, A.L.L. (2007). *Lateritic soil and bentonite mixtures assessment for liner usage purpose*. Soils and Rocks, São Paulo, v. 30, n 2, pp. 103-112.
- Gleason, M.H.; Daniel, D.E.; Eykholt, G.R. (1997). *Calcium and sodium bentonite for hydraulic containment applications*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, v. 123, n. 5, pp. 438-445.
- Head, K.H. (1986). *Manual of Soil Laboratory Testing: Effective Stress Tests*. John Wiley & Sons, London, v.3.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2011). *Contas regionais do Brasil - PIB e participação das grandes regiões e unidades da federação*. Disponível em: ftp://ftp.ibge.gov.br/Contas_Regionais/2011/pdf/tab01.pdf.
- Koch, D. (2002). *Bentonites as a basic material for technical base liners and site encapsulation cut-off walls*. Applied Clay Science, v. 21, pp. 1-11.
- Madsen, F.T.; Müller-Vonmoos, M. (1989). *The swelling behavior of clays*. Applied Clay Science, v. 4, pp. 143-156.
- Mesri, G.; Olson, R.E. (1970). *Shear strength of montmorillonite*. Geotechnique, v. 20, n. 3, pp. 261-270.
- Nogami, J.S.; Villibor, D.F. (1985). *Uma nova classificação de solos para finalidades rodoviárias*. In: Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais em Engenharia, Rio de Janeiro. Anais, v. 1, pp. 30-41.

- Osinubi, K.J. ; Nwaiwu, C.M.O. (2002). *Compacted lateritic soils as hydraulic barriers in waste containment systems*. In: International Congress on Environmental Geotechnics, 4, Rio de Janeiro. Anais, pp. 225-230.
- Rowe, R.K. (2001). *Barrier systems*. Geotechnical and Geoenvironmental Engineering Handbook, New York. Kluwer Academic, New York, pp. 739-788.
- Santamarina, J.C. (2003). *Soil behavior at the microscale: particle forces*. Soil Behavior and Soft Ground Construction, ASCE Geotechnical Publication, n. 119, Reston, VA, pp. 25-56.
- Shackelford, C.D. (1994). *Waste-soil interactions that alter hydraulic conductivity*. Hydraulic Conductivity and Waste Contaminant Transport in Soil. ASTM STP1142, Philadelphia, pp. 111-166.
- Sivapullaiah, P.V.; Sridharan, A.; Stalin, V.K. (1998). *Evaluation of bentonite and sand mixtures as liners*. International Congress on Environmental Geotechnics, 3, Lisboa. Anais, pp. 17-21.
- Stewart, D.I.; Studds, P.G.; Cousens, T.W. (2003). *The factors controlling the engineering properties of bentonite-enhanced sand*. Applied Clay Science, v. 23, pp. 97-110.
- Sunil, B.M.; Nayak, S.; Shrihari, S. (2009). *Shear strength characteristics and chemical characteristics of leachate-contaminated lateritic soil*. Engineering Geology, n. 106, pp. 20-25.
- Vertamatti, E. (1998). *Novas considerações para classificações de solos tropicais amazônicos de textura fina*. Congresso Anual de Pavimentação, 23, Florianópolis. Anais, pp. 533-564.