

Condutividade hidráulica e outras propriedades geotécnicas de mistura areia-bentonita visando aplicação como barreira mineral

Hydraulic conductivity and other geotechnical properties of sand-bentonite mixture for mineral barriers applications

Karina R. Camargo¹, Christopher F. da Silva², Cezar A. B. Bastos²

¹*Escola de Engenharia de São Carlos - USP, São Carlos, SP*

²*Escola de Engenharia – FURG, Rio Grande, RS*

e-mail: karinaretzlaff@gmail.com, christopherfonsec@gmail.com, cezarbastos@furg.br

RESUMO

Neste trabalho, têm-se os resultados da avaliação da condutividade hidráulica de misturas compostas pelo solo local arenoso do novo aterro sanitário do município do Rio Grande/RS e bentonita. Além desses, também são apresentados resultados da caracterização geotécnica e química do solo na condição natural, da bentonita e da mistura tecnicamente viável quanto à utilização como barreira mineral. Para esta última, também foi feita a caracterização e determinação de propriedades pela Metodologia MCT. Através dos ensaios de condutividade hidráulica das misturas estudadas, constatou-se uma contínua diminuição do valor da condutividade hidráulica com o teor de bentonita. Contudo, somente a mistura com 14% de bentonita habilita este solo para a construção de barreiras minerais em obras geotécnicas, tais como aterros sanitários e bacias para contenção de resíduos industriais.

ABSTRACT

In this work, there are some results of the hydraulic conductivity evaluation of mixtures compounds with bentonite and the local soil of the new sanitary landfill located in Rio Grande/RS. In addition, it is also showed the results of geotechnical and chemical characterization tests with the soil in the natural condition, bentonite and the practicable environmental mixture. For the last one mentioned, the MCT Methodology characterization was realized. By doing some hydraulic conductivity experiments it was observed that the hydraulic conductivity decreases as the bentonite content increases. However, only the mixture with 14% bentonite content satisfied the design criteria dictated by the environmental legislation for mineral barriers applications.

1. INTRODUÇÃO

Bosco [8] destacou haver uma tendência mundial em desenvolver legislações e normas para o projeto e construção de locais para disposição de resíduos, que se pautem, tanto por critérios técnicos como por quesitos ambientais. No Brasil, a preocupação com a proteção ambiental sofreu grande impulso a partir da publicação, em 1998, da Lei de Crimes Ambientais [10], a qual dispõe de

sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente. Além disso, o decreto N° 7.404, de 23 de dezembro de 2010, que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) [9], ratifica a necessidade da disposição final dos resíduos sólidos de forma ambientalmente adequada.

Têm-se, portanto, incentivado cada vez mais a pesquisa por novos recursos tecnológicos que contribuam para a proteção do meio ambiente,

como é o caso das barreiras minerais. Estas barreiras constituídas por solos compactados têm como principal função proteger os mananciais da percolação de contaminantes.

Segundo Mitchel *et al.* [18], um solo é considerado praticamente impermeável e, portanto, adequado para ser aplicado como barreira mineral, quando sua condutividade hidráulica for inferior a 10^{-9} m/s.

De acordo com Potter e Yong [20], o valor limite do coeficiente de condutividade hidráulica de 10^{-9} m/s, característico de materiais hábeis à construção de barreiras de fluxo, provém da aplicação da Lei de Darcy para percolação sob gradiente hidráulico unitário através de uma camada impermeabilizante de 1 m de espessura. Tais hipóteses garantem que o percolado demore no mínimo 30 anos para atravessar a camada, tempo após o qual o percolado não mais seria poluente, dada sua degradação.

O cenário de estudo escolhido é o local do novo aterro sanitário do município do Rio Grande/RS, município este com cerca de 200 mil habitantes e localizado na Planície Costeira Sul do Estado do Rio Grande do Sul, conforme ilustrado na fig. 1. Seu território compreende, portanto, uma faixa de terrenos arenosos baixos e de relevo plano. Segundo Camargo [11], a economia do município é caracterizada pela influência das instalações portuárias e por um distrito industrial significativo, trazendo como consequência a predominância de população operária, embora a renda per capita do município seja relativa elevada na região do Estado em que se encontra.



Fig. 1 - Localização do município do Rio Grande/RS.

Visando equacionar o problema com a disposição de resíduos sólidos de Rio Grande, até então realizada na forma de um lixão, há cerca de seis anos atrás foi formalizado um consórcio para

a administração dos serviços de limpeza pública, construção e manutenção de um novo aterro sanitário. De acordo com Souza [21], a área selecionada para a construção deste aterro localiza-se junto ao km 32 da rodovia BR392 no lado esquerdo do eixo, sentido Rio Grande – Pelotas, onde ocorre o cruzamento desta com a ferrovia e apresenta área total de 49,6 ha, distando 15 km do centro da cidade. A fig. 2 mostra a localização do novo aterro sanitário do município do Rio Grande.



Fig. 2 - Localização do novo aterro sanitário do município do Rio Grande/RS.

A Planície Costeira do Rio Grande do Sul ocupa uma estreita e diversificada faixa ambiental. Formam a planície costeira os ambientes planiciários de emersão, os ambientes lagunarlacustres, os aluviões e os colúvios à borda das demais unidades morfo-estruturais do relevo rio-grandense. As duas grandes unidades mórfoicas da planície ao longo do litoral sul são as restingas de São José do Norte e de Rio Grande, separadas pela zona estuarina da Laguna dos Patos.

De acordo com Almeida *et al.* [6], características peculiares da região tornam a preservação das águas ainda mais importante no município. Rio Grande tem uma rede hidrográfica formada por lagoas e arroios, com muitos banhados permanentes e temporários resultantes da dificuldade de escoamento superficial, em virtude da baixa declividade. Em terrenos emersos, o lençol freático se mostra próximo a superfície e o solo arenoso favorece a infiltração de contaminantes, tornando os recursos subterrâneos altamente vulneráveis. Além disso, este ambiente apresenta uma grande diversidade biológica devido à sua feição estuarial e costeira.

O objetivo principal deste artigo é apresentar os resultados obtidos na determinação da condutividade hidráulica de misturas do solo superficial dos cordões litorâneos da Planície

Costeira Sul do Rio Grande do Sul com bentonita. O estudo visa determinar o teor ótimo de bentonita e a adequabilidade da mistura para que possa ser utilizada como barreira mineral. São também apresentados resultados de outras propriedades geotécnicas das misturas estudadas, assim como abordados os efeitos da energia de compactação no comportamento da mistura compactada. Busca-se, com isso, propor uma alternativa tecnicamente viável para a construção de barreiras minerais em aterros sanitários ou em outras estruturas para a distribuição de resíduos, providas de solos locais de semelhante constituição geológica.

2. METODOLOGIA

Inicialmente, realizou-se a caracterização geotécnica e química da areia superficial que cobre os cordões litorâneos holocênicos, presente na área do aterro sanitário estudado. A amostra foi coletada em um pequeno talude na área de instalação do novo aterro sanitário do município do Rio Grande/RS, sendo representativa dos terrenos daquela área, como mostra a fig. 3.



Fig. 3 - Perfil de solo da área de estudo.

Após, foram obtidas as curvas de compactação para as misturas do solo local e bentonita sódica comercial em diferentes teores sob o peso seco (2%, 4%, 6%, 8%, 10%, 12% e 14%), na energia de compactação equivalente ao Proctor Normal. Conhecidos os parâmetros de compactação, a condutividade hidráulica foi determinada em

permeâmetro de parede flexível a carga constante. Por fim, realizou-se a caracterização geotécnica convencional, química e pela Metodologia MCT da mistura ótima quanto à condutividade hidráulica máxima admissível para utilização como barreira mineral. Pela Metodologia MCT foram, também, estudadas propriedades tecnológicas da mistura compactada.

Posteriormente, para a energia equivalente ao Proctor Intermediário, determinaram-se novamente os parâmetros de compactação e, em seguida, a condutividade hidráulica para os teores de 12% e 14% de bentonita sob o peso seco, assim como, foram reavaliadas as propriedades tecnológicas pela Metodologia MCT. Logo, foi possível realizar um estudo comparativo enfocando a possibilidade de intervenções nos valores da condutividade hidráulica e das propriedades tecnológicas devido ao incremento da energia de compactação.

Nos itens que seguem são detalhados os procedimentos experimentais que nortearam a pesquisa.

2.1 Caracterização geotécnica e química

Na caracterização geotécnica do solo e mistura, foi realizada a análise granulométrica através dos ensaios de peneiramento e sedimentação, orientada pela Norma Técnica ABNT NBR 7181/84 [5]. Os resultados são expressos em função da escala granulométrica da ABNT dada pela NBR 6502/95 [2]. Foram, também, determinados os limites de Atterberg (limite de liquidez e limite de plasticidade) seguindo as especificações das Normas Técnicas ABNT NBR 6459/84 [1] e ABNT NBR 7180/84 [4], respectivamente. Por fim, foi determinado o peso específico real dos grãos pelo método do picnômetro, conforme descrito na Norma Técnica ABNT NBR 6508/84 [3]. Dados sobre a bentonita foram obtidos junto ao fabricante. A fig. 4 ilustra os referidos ensaios.

Os ensaios de caracterização química, feitos para o solo estudado, bentonita e mistura, foram conduzidos no Laboratório de Química do Solo da Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel (FAEM) da Universidade Federal de Pelotas (UFPel).

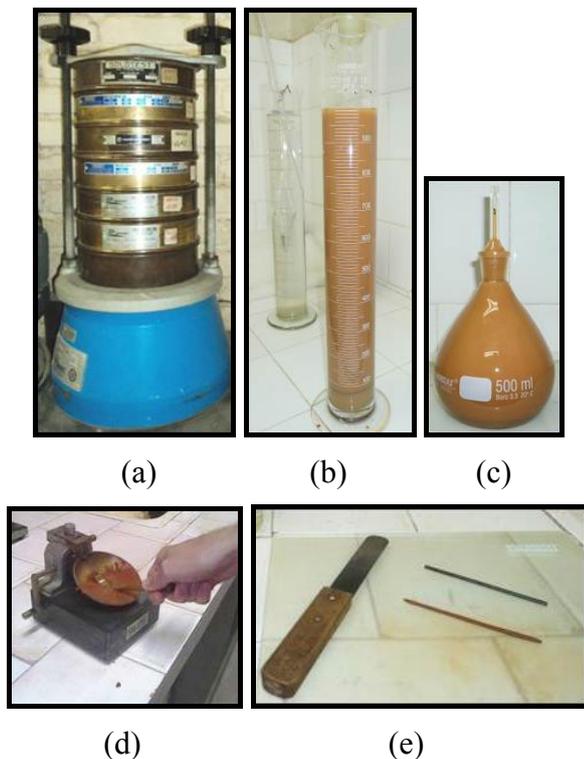


Fig. 4 – Ensaios de caracterização geotécnica: (a) peneiramento; (b) sedimentação; (c) picnômetro; (d) limite de liquidez; (e) limite de plasticidade.

2.2 Determinação dos parâmetros de compactação

Foram correlacionados o teor de umidade e o peso específico aparente seco para as diferentes misturas, através de curvas de compactação obtidas em equipamento miniatura (fig. 5), seguindo as orientações da Norma Rodoviária DNER-ME 228/94 [14] (ensaio Mini-Proctor). Portanto, foi utilizado o procedimento de compactação dinâmica para solos passantes na peneira de abertura 2 mm (#10), sob a forma de corpos de prova miniatura, cilíndricos, com 50 mm de diâmetro e aproximadamente 50 mm de altura, nas energias equivalentes ao Proctor Normal e Intermediário. Foram com isso obtido valores de peso específico aparente seco máximo e teor de umidade ótima de compactação para cada uma das misturas estudadas.

Vale destacar que, antecedendo os ensaios em questão, as misturas eram mantidas embaladas, repousando em câmara úmida durante 24 horas, para absorção homogênea da umidade pela fração fina incorporada (bentonita).



Fig. 5 – Equipamento de compactação miniatura.

2.3 Determinação da condutividade hidráulica

De acordo com a norma ASTM D5084-03 [7], o permeâmetro de parede flexível é um equipamento adequado para a determinação da condutividade hidráulica de materiais porosos cujo valor desta seja inferior ou igual a 10^{-6} m/s. Este equipamento pode ser montado a partir de uma câmara para ensaios triaxiais, como foi realizado para a pesquisa em foco. Segundo Daniel [13], com este tipo de permeâmetro o fluxo preferencial pela superfície externa do corpo de prova (CP), chamado de fluxo parasita, é diminuído. Com este permeâmetro, também o tempo de saturação do CP é reduzido, pois com o emprego de contrapressão (pressão de água interna ao CP através de sua base), é possível saturar o solo compactado pela dissolução das bolhas de ar intersticiais.

Os CPs ensaiados foram moldados no mesmo compactador miniatura empregado nos ensaios de compactação Mini-Proctor (fig. 5), com teor de umidade 1,5% acima da umidade ótima de compactação, seguindo recomendação geralmente presente em especificações de projeto para barreiras de solo compactado. Antes da compactação, todas as misturas repousaram em câmara úmida, durante 24 horas, para fins de homogeneização da umidade. O peso e a altura dos espécimes foram controlados de forma a atingir os parâmetros de compactação.

Após a moldagem do CP, providenciou-se instalação do mesmo na câmara triaxial através das

seguintes etapas: a) Eliminação de ar do sistema; b) Posicionamento do CP no pedestal da câmara, com disposição de pedra porosa e papel filtro na base e no topo do mesmo; c) Colocação da membrana e vedação com anéis “o’rings” no topo e base; d) Fechamento da câmara e enchimento com água; e) Eliminação de possíveis bolhas de ar retidas no interior da câmara por meio de um suspiro localizado junto à tampa da mesma.

Finalizada a etapa de instalação do CP, aplicou-se a tensão confinante ao CP. A pressão de confinamento favorece a aderência da membrana flexível ao espécime, corroborando na restrição do fluxo parasita. Concomitantemente a aplicação da tensão confinante, aplicou-se a pressão de água interna no CP (contrapressão), sendo que a diferença entre a tensão confinante e a contrapressão constitui a tensão efetiva durante o ensaio. Este valor foi mantido constante em 10 kPa. O procedimento descrito, onde há um aumento simultâneo da pressão de confinamento e da contrapressão em estágios, objetivando a saturação do CP, é conhecido como saturação por contrapressão. Assim, o ar ocluído nos poros do espécime dissolve-se na fase líquida em um processo que pode durar de poucas horas até vários dias, dependendo do tipo de solo, das dimensões do CP e do grau de saturação inicial.

O procedimento de saturação apresentado acima se deu em três estágios de iguais incrementos de tensão confinante e contrapressão na base do CP. No primeiro estágio aplicava-se, por cerca de 24 horas, uma tensão confinante de 100 kPa e uma contrapressão na base do CP de 90 kPa. Para os estágios posteriores repetiam-se os procedimentos, porém incrementando as tensões confinantes e contrapressões para 200 / 190 kPa e 300 / 290 kPa, respectivamente. Após cada estágio verificava-se a saturação do CP através da determinação do parâmetro B de Skempton, através do qual se avalia o ganho em pressão intersticial dado um acréscimo em tensão confinante na câmara. O solo era considerado saturado quando o parâmetro B acusasse um valor superior a 95%.

Com o CP já saturado, era iniciada a percolação, dada por um gradiente hidráulico de 20, oferecido pela diferença de 10 kPa nas pressões entre a base (290 kPa) e o topo (280 kPa) ao longo dos aproximados 50 mm de altura do CP. O volume percolado era cronometrado e medido através de uma bureta de interface água e

querosene com corante, obtendo-se assim a vazão. Através da aplicação da Lei de Darcy, eq. (1), o coeficiente de condutividade hidráulica é calculado.

$$k = Q / (i \cdot A) \quad (1)$$

onde:

Q = vazão percolada;

k = coeficiente de condutividade hidráulica;

i = gradiente hidráulico;

A = área da seção transversal à direção do fluxo.

A fig. 6 ilustra o arranjo experimental onde se desenvolveu o ensaio descrito.

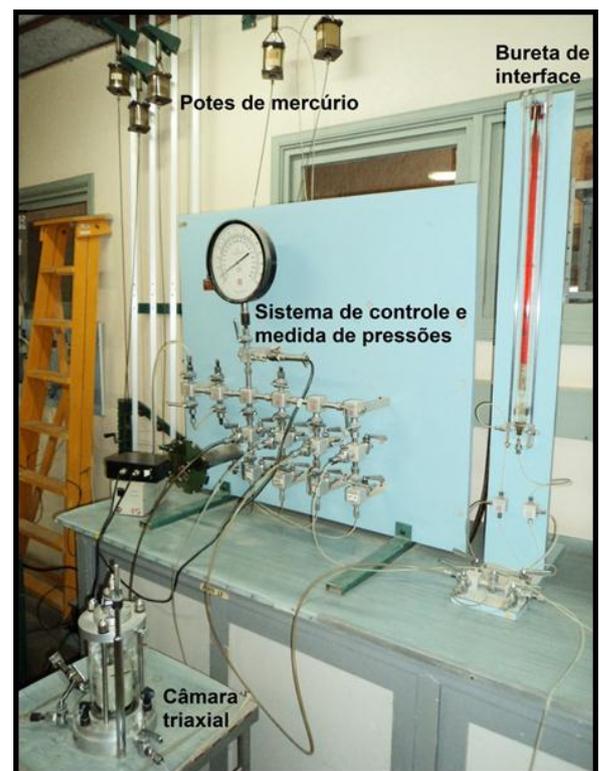


Fig. 6 - Arranjo experimental – Permeâmetro de parede flexível.

Seguindo recomendações normativas, o coeficiente de condutividade hidráulica foi normalizado por meio da viscosidade à temperatura da água de 20°C.

2.4 Ensaios pela Metodologia MCT

Para caracterizar e determinar as propriedades tecnológicas da mistura solo-bentonita, foram executados os seguintes ensaios pela Metodologia MCT: Mini-MCV, perda de massa por imersão, Mini-CBR, expansão e contração.

O ensaio Mini-MCV, segundo a Norma Rodoviária DNER-ME 258/94 [17], trata-se de um ensaio de compactação a energia variável realizado em equipamento de compactação miniatura (fig. 5). Do ensaio obtêm-se os índices classificatórios d' e c' , a partir da família de curvas de compactação e da curva de compressibilidade, respectivamente. No ensaio de perda de massa por imersão (fig. 7), segundo DNER-ME 256/94 [16], avalia-se a desagregação do solo compactado quando imerso em água. Através deste ensaio é obtido o índice P_i . Estes índices classificatórios levam a classificação MCT do solo.



Fig. 7 – Ensaio de perda de massa por imersão.

No ensaio Mini-CBR, avalia-se a capacidade de suporte da mistura compactada, de acordo com a Norma Rodoviária DNER-ME 254/97 [15], através do puncionamento de um CP miniatura compactado. Este puncionamento foi realizado em uma prensa elétrica, com medida de carregamento por meio de célula de carga e aquisição automática dos dados por microcomputador. Ensaios dessa natureza foram realizados utilizando CPs na condição natural e inundada. Na condição inundada, foi também avaliada a expansão anteriormente ao puncionamento. A fig. 8 ilustra os referidos ensaios.



(a) (b)

Fig. 8 – Ensaio Mini-CBR: (a) medida da capacidade de suporte (puncionamento); (b) medida da expansão.

Por fim, foi realizado o ensaio de contração por secagem (fig. 9). Segundo Nogami e Villibor [19], o ensaio consiste na medição das dimensões dos CPs antes e após secagem ao ar por 72 horas, possibilitando, assim, quantificar a variação porcentual do comprimento axial dos CPs.



Fig. 9 – Ensaio de contração por secagem.

3. RESULTADOS

3.1 Caracterização geotécnica e química

A tab. 1 apresenta os resultados da caracterização geotécnica do solo, do aditivo e da mistura no teor de 14% de bentonita. A fig. 10 apresenta as curvas granulométricas dos materiais pesquisados.

Tab. 1 - Caracterização geotécnica dos materiais

Propriedades	Materiais		
	Areia	Bentonita*	Mistura
Peso específico real dos grãos (kN/m ³)	26,3	28 – 30	26,2
Areia média (%)	40	-	36
Areia fina (%)	57	-	45
Silte (%)	0	20	3
Argila (%)	3	80	16
Limite de liquidez (%)	-	450 – 490	48
Limite de plasticidade (%)	NP	40 – 65	22
Classificação SUCS	SP	-	SC
Classificação HRB-AASHTO	A3(0)	-	A2-7(1)

* informação de catálogo da bentonita Permagel (Bentonit União Nordeste S.A.).

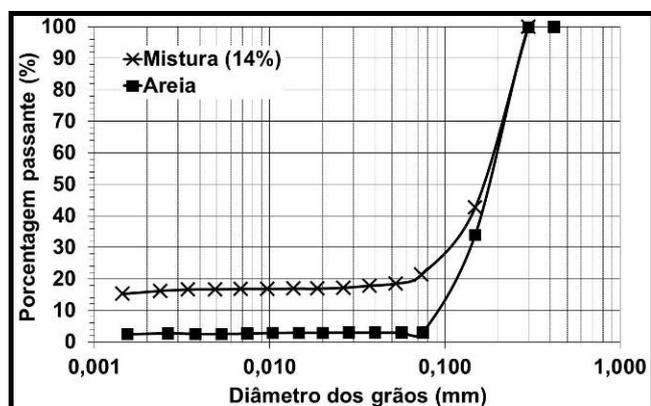


Fig. 10 – Curvas granulométricas do solo e da mistura solo + 14% de bentonita.

Os resultados das análises químicas realizadas para o solo, para o aditivo e para a mistura no teor de 14% de bentonita são apresentados na tab. 2. Percebe-se, nesta, que o solo natural é pobre em elementos químicos e moderadamente ácido. Além disso, os resultados confirmam o caráter sódico da bentonita. Com a adição deste aditivo ao solo, verifica-se que a mistura passa a ser fortemente alcalina (pH = 10).

Tab. 2 – Análise química dos materiais

Elementos químicos	Materiais		
	Areia	Bentonita	Mistura
Ca (cmol _c /kg)	0,25	6,03	2,69
Mg (cmol _c /kg)	0	5,67	0,96
K (cmol _c /kg)	0,01	0,25	0,10
Na (cmol _c /kg)	0	57,71	9,62
Al (cmol _c /kg)	0,10	0,30	0
P (mg/kg)	7,04	21,75	16,84
pH	5,4	10,0	10,0

3.2 Parâmetros de compactação

A tab. 3 e as figs. 11 e 12 apresentam, respectivamente, os parâmetros e as curvas de compactação das misturas solo-bentonita, obtidos em ensaios Mini-Proctor.

Tab. 3 – Parâmetros de compactação das misturas

Energia de compactação	Teor de bentonita (%)	W _{ótima} (%)	γ _d máx (kN/m ³)
Proctor Normal	2	14,20	17,90
	4	14,45	17,75
	6	15,20	17,40
	8	16,50	17,05
	10	17,20	16,95
	12	17,40	17,14
Proctor Intermediário	14	15,40	17,35
	14	14,10	17,85
14	13,65	17,94	

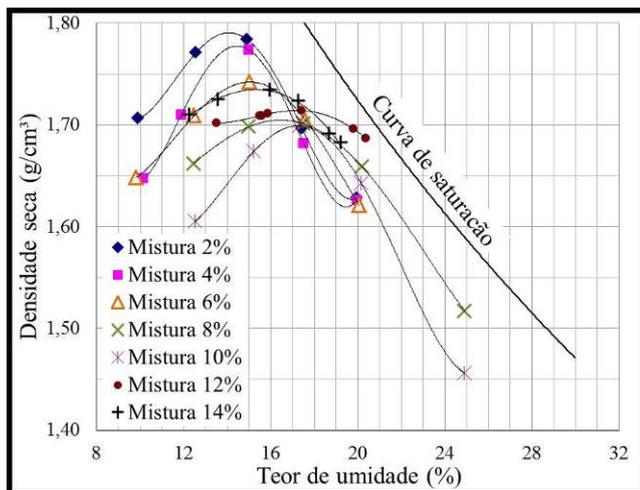


Fig. 11 – Curvas de compactação das misturas referentes à energia do Proctor Normal.

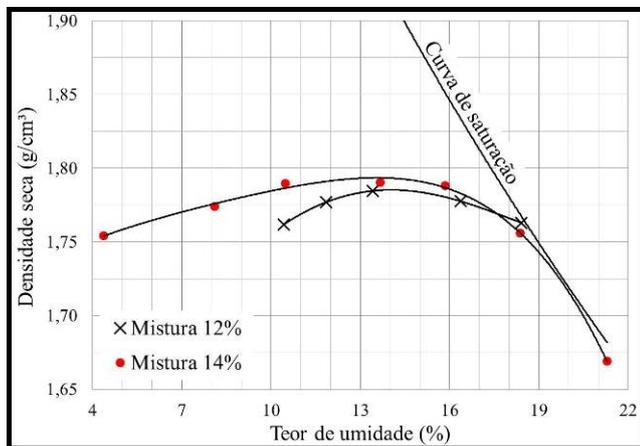


Fig. 12 – Curvas de compactação das misturas referentes à energia do Proctor Intermediário.

3.3 Condutividade hidráulica

Para cada mistura foram realizados três ensaios, exceto para os teores de 2 e 4%, os quais demandaram a realização de apenas um ensaio, com o objetivo de confirmar os valores anteriormente obtidos por Souza [21]. Segundo o mesmo autor, a condutividade hidráulica do solo local, na condição natural, é de $4,2 \cdot 10^{-6}$ m/s e do aditivo é de $1,1 \cdot 10^{-14}$ m/s. Os valores médios de condutividade hidráulica, referidos à água na temperatura de 20°C, são apresentados na tab. 4 e na fig. 13.

Tab. 4 – Valores médios do coeficiente de condutividade hidráulica das misturas.

Teor de bentonita (%)	k_{20} (m/s)	
	Proctor Normal	Proctor Intermediário
2	$7,96 \cdot 10^{-6}$	-
4	$3,74 \cdot 10^{-7}$	-
6	$3,92 \cdot 10^{-7}$	-
8	$6,07 \cdot 10^{-8}$	-
10	$3,78 \cdot 10^{-8}$	-
12	$1,03 \cdot 10^{-9}$	$4,60 \cdot 10^{-9}$
14	$8,02 \cdot 10^{-10}$	$7,72 \cdot 10^{-10}$

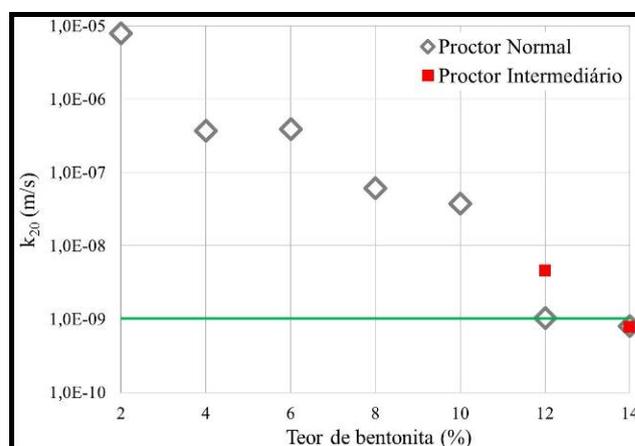


Fig. 13 – Valores de k_{20} (escala log) x teor de bentonita.

3.4 Resultados pela Metodologia MCT

A tab. 5 resume os índices classificatórios e a classificação MCT da mistura solo + 14% de bentonita. A fig. 14 apresenta a localização do ponto da mistura junto ao gráfico de classificação MCT.

Tab. 5 – Classificação MCT da mistura solo + 14% de bentonita.

d'	c'	Pi	e'	Classificação MCT
4,3	0,76	100%	1,78	NS'

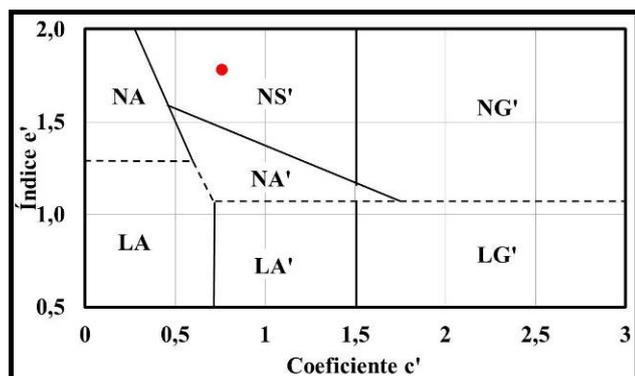


Fig. 14 – Mistura solo + 14% de bentonita no gráfico de classificação MCT.

A tab. 6 apresenta os parâmetros médios, referentes às propriedades tecnológicas da mistura solo + 14% de bentonita, obtidos nos ensaios propostos pela Metodologia MCT para as duas energias de compactação estudadas.

Tab. 6 – Propriedades tecnológicas da mistura solo + 14% de bentonita para as energias de compactação estudadas.

Propriedades tecnológicas	Energia de compactação		
	Proctor Normal	Proctor Intermediário	
Mini-CBR (%)	Sem imersão	23	46
	Com imersão	11	22
Expansão (%)	2,78	0,25	
Contração (%)	0,33	0,49	

4. CONCLUSÕES

Com a realização desta pesquisa pode-se concluir que o solo local trata-se de um solo essencialmente arenoso e, conseqüentemente, não-plástico (NP). Com o acréscimo no teor de aditivo ao solo, observa-se uma tendência de aumento no teor de umidade ótimo até 12% de bentonita. Já a tendência de redução no peso específico aparente seco máximo com o teor de bentonita é observada até 10% do aditivo. Tal comportamento era esperado, visto a textura da mistura vir se tornando

gradualmente mais fina com o aumento na adição. Entretanto, para ambos os parâmetros e energias de compactação, houve uma inversão na tendência para os maiores teores de bentonita estudados.

Através dos ensaios de condutividade hidráulica, constatou-se que, com a crescente adição de bentonita, houve uma redução significativa na ordem de grandeza do coeficiente de permeabilidade obtido em até 10.000 vezes (de 10^{-6} a 10^{-10} m/s). No teor de 14% de bentonita conseguiu-se atingir um valor inferior a 10^{-9} m/s, indicando a aptidão do material para a construção de barreiras minerais em obras como aterros sanitários e bacias para contenção de resíduos industriais. Pode-se verificar, também, que não ocorreu variação significativa na condutividade hidráulica quando empregada maior energia de compactação.

Com a realização da caracterização química dos materiais, constatou-se que o material original (solo local) é considerado pobre em elementos químicos trocáveis e moderadamente ácido. Entretanto, com o acréscimo de bentonita, a situação se modifica e a mistura torna-se altamente alcalina, satisfazendo um dos requisitos estabelecidos pela CETESB [12] para materiais empregados como barreira mineral, e rica em sódio, visto a caracterização sódica do aditivo.

A classificação MCT da mistura com 14% de aditivo resultou em solo NS' (solo de comportamento não-laterítico siltoso). Logo, prevê-se um comportamento equivalente àquele dos solos saprolíticos silto-arenosos. Entretanto, segundo Nogami e Villibor [19], se ricos em areia quartzosa (como é o caso em questão), as características mecânicas aproximam-se mais àquelas dos solos NA' (solos arenosos não-lateríticos).

De acordo com os critérios propostos por Nogami e Villibor [19], as misturas de solo local com 14% de bentonita, compactadas na energia equivalente ao Proctor Normal, apresentam índices Mini-CBR que indicam elevada a mediana capacidade de suporte, sem e com imersão, respectivamente. A expansão é de média a elevada, decorrente do comportamento expansivo da bentonita. Entretanto, a contração é considerada baixa. Esta última propriedade é muito importante no que se refere ao uso da mistura como barreira mineral, pois a abertura de fissuras por contração resulta em falhas na estanqueidade da barreira.

Segundo Mitchell *et al.* [18], assegura-se o bom desempenho de barreiras de fluxo quando o coeficiente de condutividade hidráulica do material encontra-se na ordem de 10^{-9} m/s e sua contração e expansão são as mínimas possíveis, caso contrário, ocorrem aberturas de gretas de contração e trincas de expansão, nas quais formam caminhos preferenciais de fluxo, aumentando significativamente a condutividade hidráulica da camada de solo compactado.

Para a mistura com 14% de bentonita, compactada na energia equivalente ao Proctor Intermediário, constatou-se elevação nos índices Mini-CBR, indicando elevada a muito elevada capacidade de suporte, com e sem imersão, respectivamente. Quanto à expansão e à contração, ambas mostram-se baixas. Logo, apesar de não mostrar influência na condutividade hidráulica, o aumento na energia melhora importantes propriedades geotécnicas da mistura, habilitando ainda mais seu emprego na construção de barreiras minerais em obras como aterros sanitários e bacias para contenção de resíduos industriais.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao suporte oferecido pelo Laboratório de Geotecnia e Concreto da Universidade Federal do Rio Grande – FURG, às análises químicas realizadas junto ao Laboratório de Química do Solo da Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel (FAEM) da Universidade Federal de Pelotas (UFPEL), às empresas Rio Grande Ambiental e Bentonit União Nordeste S.A. e à FAPERGS e ao CNPq pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

1. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 6.459*: Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1984.
2. _____. *NBR 6.502*: Rochas e solos. Rio de Janeiro, 1995.
3. _____. *NBR 6.508*: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984.
4. _____. *NBR 7.180*: Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1984.
5. _____. *NBR 7.181*: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984.
6. Almeida, M. T. A.; Baumgarten, M. G. Z.; Rodrigues, R. M. S. *Identificação de possíveis fontes de contaminação das águas que margeiam a cidade de Rio Grande-RS*. Documentos Técnicos: Oceanografia, Universidade Federal do Rio Grande - FURG, 1993.
7. ASTM – American Society for Testing and Materials. *D5084-03*: Standard test methods for measurement of hydraulic conductivity of saturated porous materials using a flexible wall permeameter. West Conshohocken, 2003.
8. Boscov, M. E. G. *Contribuição ao projeto de sistemas de contenção de resíduos perigosos utilizando solos lateríticos*. Tese de Doutorado - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.
9. Brasil. Decreto n.º 7.404, de 23 de dezembro de 2010, Regulamenta a Lei n.º 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, cria o Comitê Interministerial da Política Nacional de Resíduos Sólidos e o Comitê Orientador para a Implantação dos Sistemas de Logística Reversa, e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF.
10. Brasil. Lei n.º 9.605, de 12 de fevereiro de 1998. *Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências*. Diário Oficial da União. Brasília, DF.
11. Camargo, K. R.; Bastos, J. T.; Vieira, H. Análise de características do transporte cicloviário em município de médio porte. XXII Congresso de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia. *Anais...* Universidade de Passo Fundo - UPF, Passo Fundo/RS, CD-ROM, 2007.
12. CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental de São Paulo. *Resíduos sólidos industriais*. 2. ed., São Paulo, 1993.
13. Daniel, D. E. Hydraulic conductivity tests for clay liners. In: *Geotechnical and Geohydrological Aspects of Waste Management*, pp. 15-34, 1987.
14. DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. *DNER-ME 228*: Solos – Compactação em equipamento miniatura. Rio de Janeiro, 1994.
15. _____. *DNER-ME 254*: Solos compactados em equipamento miniatura – Mini-CBR e expansão. Rio de Janeiro, 1997.
16. _____. *DNER-ME 256*: Solos compactados em equipamento miniatura – Determinação da perda de massa por imersão. Rio de Janeiro, 1994.

- 17.____. *DNER-ME 258: Solos compactados em equipamento miniatura – Mini-MCV*. Rio de Janeiro, 1994.
- 18.Mitchell, J. K.; Hooper, D. R.; Campanella, R. G. Permeability of compacted clay. *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, v. 92, n. SM4, pp. 41-66, 1965.
- 19.Nogami, J. S.; Villibor, D. F. *Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos*. São Paulo: Editora Vilibor, 1995.
- 20.Potter, H. A. B.; Yong, R. N. Waste disposal by landfill in Britain: problems, solutions and the way forward. In: *Green'93 – International Symposium on Geotechnics Related to the Environment. Anais...* v. 1, pp. 41-48, Bolton, Reino Unido, 1993.
- 21.Souza, E. W. *Estudo do emprego de misturas solo-bentonita na construção de liners para impermeabilização de aterros sanitários - estudo de caso: aterro sanitário de Rio Grande*. 161 p. Trabalho de Graduação (Engenharia Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Rio Grande, 2007.