

AVALIAÇÃO DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA E DA CAPACIDADE DE TROCA CATIONICA DE MISTURAS DE SOLO ARENOSO, CIMENTO E ARGILA E SEU POTENCIAL DE USO COMO BARREIRAS AMBIENTAIS DE FUNDO EM ATERROS SANITÁRIOS

Ivinny Barros de Araujo ¹; Osni José Pejon ²

Resumo – O aumento da quantidade de resíduos sólidos urbanos gerados, aliado a maior conscientização ambiental e o rigor das legislações ambientais, tem levado ao crescente aumento da disposição desses resíduos em aterros sanitários no Brasil. Um dos principais elementos desses aterros são as barreiras de baixa permeabilidade empregadas nos sistemas de revestimento de fundo, pois são capazes de conter ou retardar o fluxo do chorume dos resíduos, evitando o espalhamento das plumas de contaminação no meio físico. Na ausência de solos de baixa permeabilidade para construção dessas barreiras, podem ser aplicadas técnicas de melhoria aos solos locais para viabilizar o uso dos mesmos. Neste sentido, este trabalho tem por objetivo avaliar o desempenho dos aspectos de condutividade hidráulica e capacidade de troca cationica (CTC) de misturas solo-cimento-bentonita e solo-cimento-caulim para viabilizar o emprego de solos arenosos como barreiras de baixa permeabilidade em aterros sanitários. A redução da condutividade hidráulica foi avaliada em ambas as misturas com a adição de 6% de cimento e de material argiloso e teor de umidade de 11%. Em ambas as misturas houve uma redução da condutividade hidráulica e aumento da CTC em relação ao solo. No entanto, somente as misturas solo-cimento-bentonita, que apresentaram menores valores de condutividade hidráulica ($6,97 \times 10^{-10}$ m/s) em relação às misturas solo-cimento-caulim ($1,97 \times 10^{-8}$ m/s), atendem aos requisitos comumente normatizados de condutividade hidráulica para aplicação como barreiras ambientais em aterros sanitários (10^{-9} m/s).

Abstract – Due to population growth and the consequent rise of municipal solid waste, together with a higher environmental awareness and rigor of environmental standards, has led to an increase in the disposal of these wastes in landfills. One of the main elements of landfills is the low permeability barrier in the bottom of this structure, since it is capable to contain or retard the leachate flow from waste, avoiding the scattering of contamination plumes in the physical environment. In absence of natural soils with low permeability for the construction of these liners, techniques for improving local soils can be applied to enable their use. In this sense, the purpose of this study is to evaluate the performance of hydraulic conductivity and Cation Exchange Capacity (CEC) aspects of soil-cement-bentonite and soil-cement-kaolin mixtures to enable the use of sandy soils as low permeability liners in municipal solid waste landfills. The reduction of hydraulic conductivity was evaluated in both mixtures with 6% of cement and clay content, of each, and 11% of moisture content. There were reduction of the hydraulic conductivity and an increase in CEC in both mixtures, compared to the soil. However, only soil-cement-bentonite mixture, which has lower mean values of hydraulic conductivity (6.97×10^{-10} m / s) in relation to soil-cement-kaolin mixtures (1.97×10^{-8} m / s), meet the commonly prescribed requirements of hydraulic conductivity for application as environmental barriers in sanitary landfills (10^{-9} m / s).

Palavras-Chave – melhoria de solos; bentonita; caulim; sorção; contaminação.

¹ Geól., Mestranda em Geotecnia. Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. Av. Trabalhador São Carlense, 400. São Carlos - SP, (16) 3373-9501, ivinny_barros@hotmail.com.

² Professor titular. Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. Av. Trabalhador São Carlense, 400. São Carlos - SP, (16) 3373-9501, pejon@sc.usp.br.

1- INTRODUÇÃO

O crescimento demográfico e o estilo de desenvolvimento dos países após a revolução industrial provocou uma série de problemas ambientais. Dentre estes, cabe destacar a contaminação de áreas devido à disposição inadequada dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU). Por conta disso, a partir dos anos 70, houve um crescente aumento em relação às preocupações ambientais, culminando na formação de agências reguladoras de meio ambiente, fazendo com que as normas ambientais de diferentes países se tornassem mais rigorosas (SHACKELFORD, 2014).

No Brasil, as questões ambientais foram fortalecidas com a instituição da Política Nacional do Meio Ambiente (lei 6.931), em 1981. Contudo, foi em 2010, a partir da Política Nacional dos Resíduos Sólidos (lei 12.305), que a destinação final dos RSU passou a ter leis específicas, em âmbito nacional, para sua disposição final ambientalmente adequada em aterros sanitários, afim de minimizar os impactos ambientais provocados pela percolação do chorume no meio físico.

Um dos principais elementos de proteção ambiental nos aterros sanitários é a barreira de baixa permeabilidade utilizada no sistema de revestimento de fundo, que tem por objetivo minimizar a migração do lixiviado. Segundo Daniel (1993), esse sistema de impermeabilização precisa atender a três principais requisitos: ter baixos valores de Condutividade Hidráulica (K), ser capaz de retardar a migração de contaminantes e possuir resistência contra a formação de trincas.

Não há normatização com relação à capacidade de retenção de contaminantes e quanto à resistência necessária, já que estas dependem da concepção do projeto. No entanto, as normas para projeto e execução das barreiras impermeabilizantes sugerem valores de K e espessura mínima, que variam de país para país. As especificações mais frequentes para essas barreiras indicam valores de K iguais ou inferiores a 10^{-9} m/s e espessura entre 0,6 e 1m (BOSCOV, 2008).

Apesar da baixa permeabilidade dessas barreiras, os contaminantes podem migrar por processos difusivos, pois em condições de velocidade muito baixas ou nulas esse mecanismo de transporte tende a ser dominante (SHACKELFORD, 2014). Desta forma, é importante que os materiais utilizados nesse sistema de revestimento sejam capazes de sorver os solutos presentes no lixiviado, retardando a migração dos mesmos no meio poroso.

Para retardar a migração dos contaminantes, as propriedades sorsivas dos materiais argilosos, devido ao predomínio de cargas elétricas negativas na superfície específica dos argilominerais, são importantes, pois conferem aos solos a capacidade de sorver íons, como os metais potencialmente tóxicos, comuns nos lixiviados dos RSU. A quantidade de cátions que pode ser trocada ou sorvida pelo solo pode ser avaliada a partir da Capacidade de Troca Catiônica (CTC), sendo um indicador importante para avaliar a eficiência da aplicação do solo como barreira.

Comumente são utilizadas como barreiras ambientais solos argilosos compactados, pois costumam atender aos requisitos especificados em norma. Contudo, não há a disponibilidade desse tipo de solo em todas as regiões, inviabilizando ou encarecendo o uso desse material para a construção dos aterros sanitários em algumas áreas. Dessa forma, no Brasil e no mundo, tem sido estudadas técnicas de melhoria de solos a fim de viabilizar seu emprego como barreiras de baixa permeabilidade, como nos trabalhos de Ribeiro (2002) e Gueddouda et al. (2015).

Dentre as técnicas de melhoria empregadas, a adição de bentonita a solos arenosos têm demonstrado bons resultados, pois a adição de pequenas porcentagens desse material reduz de forma expressiva a condutividade hidráulica devido as suas propriedades expansivas, além de ser um material com grande capacidade para a retenção de íons e moléculas (DANIEL, 1993). A adição de estabilizantes químicos, como o cimento, também é uma técnica que resulta em melhorias expressivas, pois além de reduzir os valores de condutividade hidráulica da mistura, culmina também em um acréscimo de resistência no solo, como observado nos trabalhos de Ribeiro (2002) e Loch (2013).

Considerando os bons resultados já obtidos por outros autores com a aplicação de bentonita e cimento em solos arenosos, o presente trabalho avaliará os aspectos de

condutividade hidráulica e capacidade de troca catiônica de misturas solo-cimento-argila. Pretende-se viabilizar o uso dos solos residuais da Formação Botucatu como barreiras de baixa permeabilidade para base de aterros sanitários, já que os mesmos ocorrem de forma expressiva na região sudeste do Brasil.

O desempenho das misturas Solo-Cimento-Bentonita (SCB) e Solo-Cimento-Caulim (SCC) serão analisados de forma comparativa para avaliar como as diferentes propriedades expansivas e sorsivas dos minerais que compõem os materiais argilosos podem influenciar nos parâmetros estudados. Para melhor compreensão das características dos materiais usados e das misturas, serão apresentados também os dados de caracterização física e mineralógica.

2 - MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 - Materiais

No presente trabalho foram utilizadas amostras deformadas de solo residual arenoso da Formação Botucatu, coletadas no município de São Carlos (SP). Foi utilizado como estabilizante nas misturas o cimento do tipo Portland CII-Z32, pois, segundo a NBR 11578/1991, este tipo possui maior teor de pozolana em sua composição, conferindo melhor resistência à compressão após 28 dias de cura e melhores propriedades hidráulicas, sendo, portanto, mais impermeável. Para umedecer as misturas foi utilizada água deionizada.

Quanto aos materiais argilosos, foram utilizados caulim *in natura* e bentonita sódica. Estes foram escolhidos por apresentarem comportamentos bem distintos um do outro. O caulim é um material natural composto principalmente por argilominerais com estrutura 1:1 que possuem ligações mais fortes entre suas lamelas e possuem pouca ou nenhuma carga negativa na sua superfície externa, conferindo a este material baixa capacidade de troca catiônica. Embora a bentonita seja um material industrializado, este é composto, predominantemente, pela montmorillonita, que é um argilomineral com estrutura 2:1 que possui excesso de cargas negativas na sua superfície, conferindo a este propriedades expansivas e maior capacidade de troca catiônica e sorsiva (BRIGATTI, GALAN e THENG, 2006).

2.2 - Métodos

2.2.1 - Caracterização física e mineralógica

Os ensaios de caracterização física e mineralógica realizados para o solo, nos materiais argilosos e nas misturas estão listados na Tabela 1.

Tabela 1. Ensaios de caracterização física e mineralógica realizados nos materiais estudados.

Tipo de caracterização	Ensaio	Materiais	Norma (ABNT*)
Física	Análise granulométrica conjunta	S, C, B	NBR 7181/2016
	Massa específica dos sólidos	S, C, B, SCB, SCC	NBR 6508/1984
	Limite de Liquidez (LL) e Plasticidade (LP)	C e B	NBR 6459/2016 (LL) NBR 7180/2016 (LP)
	Compactação - PROCTOR normal	S, SCB, SCC	NBR 7182/1986 (S) NBR 12023/2012 (SCB e SCC)
Mineralógica	Difração de Raios-X	S, C, B	-
	Análise Térmica Diferencial (ATD)	S, C, B, SCB, SCC	-

Onde: S- solo; C- caulim; B- bentonita; SCB- solo-cimento-bentonita; e SCC- solo-cimento-caulim. *ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.

Os ensaios de difração de raios X foram realizados com três lâminas orientadas para cada fração fina dos materiais argilosos e do solo: a primeira com o material na sua condição natural; a segunda com tratamento térmico a 550°C, para avaliar quais minerais tem sua estrutura cristalina destruída a essa temperatura; e a terceira tratada com etilenoglicol para verificar se a estrutura do argilomineral é expansiva. Foi utilizado um difratômetro Rigaku Rotaflex - modelo RU 200B, com tubo de cobre ($\lambda=1,542 \text{ \AA}$), varredura normal de 5° a 80°, passo de 0,002/s e velocidade do goniômetro de 2°/min.

A Análise Térmica Diferencial (ATD) foi feita no equipamento BP Engenharia (modelo RB 3000-20), utilizando, no ensaio, uma taxa de variação de temperatura de 12,5°C/min até alcançar a temperatura final de 1000 °C, utilizando-se como referência inerte amostras de alumina calcinada em pó. As amostras analisadas foram colocadas diretamente no aparelho, sem passar por processo de peneiramento, exceto as amostras de solo que foram passadas na peneira #400 para maior acurácia na determinação de frações finas que ocorrem em menor proporção.

2.2.2 - Avaliação da condutividade hidráulica

Nas misturas solo-cimento-argila foi adicionada a proporção de 6% de argila, 6% de cimento e 11% de água (porcentagens em relação à massa seca do solo). Essa proporção foi definida por Loch (2018, no prelo), por meio da técnica estatística de planejamento fatorial, como as porcentagens de adição de bentonita, cimento e água nos solos arenosos da Formação Botucatu que resultaram em menores valores de condutividade hidráulica da mistura solo-cimento-bentonita e que atendem aos quesitos normatizados de K para atuar como uma barreira de fundo em aterros sanitários. As mesmas proporções foram utilizadas para as misturas solo-cimento-caulim, a fim de avaliar os resultados obtidos a partir do emprego de outro tipo de material argiloso.

A preparação das misturas ocorreu de forma manual, onde, primeiramente, foi adicionado o cimento e o material argiloso (bentonita ou caulim) ao solo para, em seguida, ser feita a homogeneização entre esses materiais. Posteriormente, foi adicionada a quantidade de água necessária para se atingir o teor de umidade de 11% da mistura e realizada uma nova homogeneização do material (Figura 1a).

Os Corpos de Prova (CP) possuem formato cilíndrico e têm dimensões médias de 9,4cm de diâmetro e 2,6cm de altura e foram moldados em cilindros de acrílico. Para melhor distribuição de água nos CP foram utilizadas pedras porosas nas faces superior e inferior dos CP. Foram moldados seis CP da mistura solo-cimento-bentonita e cinco da solo-cimento-caulim. As misturas foram compactadas estaticamente com o auxílio de prensa mecânica (Figura 1b). O grau de compactação utilizado corresponde a 100% do proctor normal. A Figura 1c mostra o CP compactado já preparado para o ensaio de condutividade hidráulica.

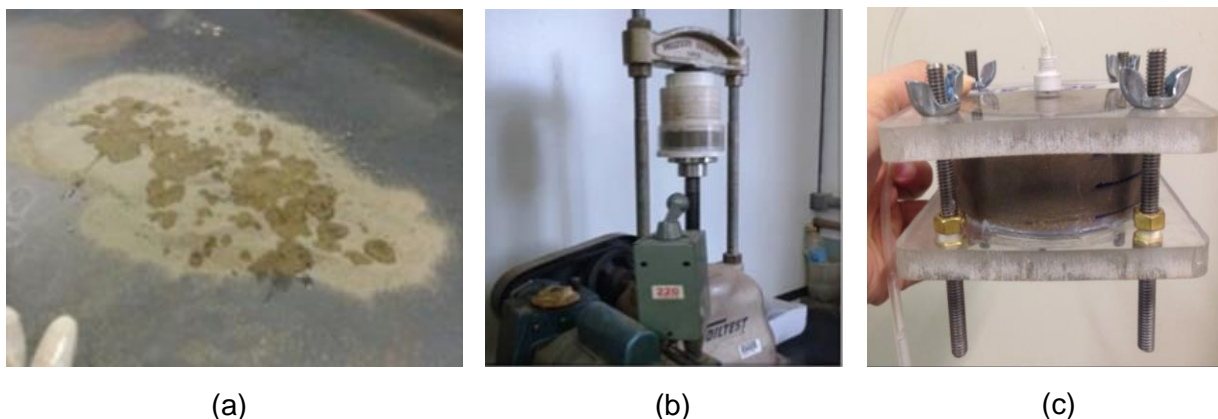


Figura 1. (a) Preparação e homogeneização manual das misturas; (b) compactação mecânica; (c) configuração final do CP.

Após a compactação, os corpos de prova passaram por um período de cura saturada de 28 dias, possibilitando a ocorrência das reações químicas do cimento, com um gradiente hidráulico (i) de aproximadamente 1,5. Após esse período, foi imposto um i maior (variando de 7 até 200, sendo os valores mais altos aplicados aos CP menos permeáveis), com um fluxo de água ascendente no CP, para que houvesse a saturação dos mesmos. O período de saturação variou de 22 a 32 dias para as misturas solo-cimento-caulim e de 30 a 42 dias para as misturas solo-cimento-bentonita. Esta etapa foi considerada encerrada quando os valores de condutividade hidráulica se mantiveram constantes, indicando que o meio poroso estava completamente saturado. Após a etapa de saturação, o fluxo de água passou a ser descendente para acompanhar as variações do valor de K com o tempo.

Os ensaios de condutividade hidráulica foram realizados em permeâmetros de carga constante, com reservatório abastecido com água deionizada para a percolação nos CP. Os resultados de K aqui apresentados foram obtidos a partir de ensaios executados durante 80 dias em um ambiente com temperatura controlada de 21°C ($\pm 3^\circ\text{C}$). O cálculo de K foi realizado a partir da aplicação da Lei de Darcy. Todos os resultados de K obtidos foram corrigidos em relação a uma temperatura de 20°C, conforme mostra Das (2011).

2.2.3 – Determinação da capacidade de troca catiônica

Foi avaliada a capacidade de troca catiônica da bentonita, do caulim, do solo e das misturas solo-caulim, solo-bentonita, solo-cimento-bentonita e solo-cimento-caulim. O valor da CTC de interesse no presente trabalho é o das misturas solo-cimento-bentonita e solo-cimento-caulim. Contudo, fez-se a determinação também para as misturas solo-bentonita e solo-caulim para avaliar os efeitos da adição do cimento neste parâmetro.

A CTC foi determinada a partir do ensaio de adsorção de Azul de Metileno, método proposto por Lan (1977) e adaptado por Pejon (1992). Para realização dos ensaios foram usados 0,5g para a bentonita e 1g para o caulim. No caso do solo e das misturas, utilizou-se uma massa suficiente para que houvesse ao menos 0,5g de fração argila presente na amostra ensaiada.

3 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 - Caracterização

Os resultados de caracterização física e mineralógica e da determinação da CTC dos materiais e das misturas estudadas estão expostos na Tabela 2.

O caulim utilizado é composto por um único tipo de argilomineral, que é a caulinita, com estrutura 1:1 que não possui propriedade expansiva e possui baixa capacidade de troca catiônica (3,36 meq/100g). Quanto à granulometria, o caulim estudado possui predominância da fração silte (82%), característica essa que contribui para sua menor plasticidade ($IP=10$).

A bentonita é composta por quartzo e montomorillonita sódica, sendo este último o argilomineral com estrutura 2:1 com maior capacidade de expansão, como mostra Ismadji, Soetaredjo e Ayucitra (2015), e valores mais elevados de CTC (134,02 meq/100g). Granulometricamente, este material é composto, predominantemente, pela fração argila (86%) e apresenta uma plasticidade muito elevada ($IP= 347$).

O solo utilizado é composto majoritariamente pelas frações de areia fina (48%) e média (42%) e por apenas 10% de fração fina. De acordo com o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS), conforme a *American Society for Testing and Material* (ASTM) D2487/2011, este solo é classificado como uma areia mal graduada com argila (SP-SC). Sua distribuição granulométrica é refletida de forma direta na mineralogia, composta principalmente pelo quartzo. Contudo, identificou-se também a presença da gibbsita e da caulinita, estando esta última em menor quantidade e na fração argila desse solo, tal que sua identificação só foi possível após a análise térmica diferencial apenas da fração que passou na peneira #400. A quantidade de

material fino neste solo e a sua mineralogia contribui para que o mesmo tenha um valor baixo de CTC (0,80 meq/100g).

Tabela 2. Mineralogia, capacidade de troca catiônica e a caracterização física do solo, das argilas e das misturas.

Caracterização Mineralógica							
Caulim	Bentonita	Solo	SCB*	SCC*			
Caulinita	Montmorillonita sódica Quartzo	Quartzo Gibbsita Caulinita	Montmorillonita Quartzo Gibbsita C-S-H* (produto do cimento)	Caulinita Quartzo Gibbsita C-S-H* (produto do cimento)			
Capacidade de Troca Catiônica (CTC) em (meq/100g)							
Caulim	Bentonita	Solo	SCB*	SB*	SCC*	SC*	
3,36	134,02	0,80	3,28	8,98	0,63	0,98	
Caracterização Física							
Parâmetro		Unidade	Caulim	Bentonita	Solo	SCB*	SCC*
Compactação (Proctor normal)	Massa específica aparente seca	g/cm ³	-	-	1,934 [#]	1,920 [§]	2,020
	Umidade ótima	%	-	-	6,4 [#]	12,5 [§]	8,3
Granulometria	Argila	%	15	86 ¹	6 [#]	-	-
	Silte		82	14 ¹	4 [#]	-	-
	Areia fina		3	0	48 [#]	-	-
	Areia média		0	0	42 [#]	-	-
Limites	LL	-	45	410 ¹	-	-	-
	LP	-	35	63 ¹	-	-	-
Índice de Plasticidade (IP)		-	10	347 ¹	-	-	-

*SCB- solo-cimento-bentonita; *SCC- solo-cimento-caulim; *C-S-H- silicato de cálcio hidratado; *SC- solo-caulim; *SB- solo-bentonita ; (-) Ensaios não realizados nas respectivas amostras; [#]Dados obtidos de Loch (2013); [§] Dados obtidos de Loch (2018, no prelo).

A mineralogia das misturas solo-cimento-bentonita e solo-cimento-caulim é condizente com os minerais que compõem o solo e os materiais argilosos utilizados. Contudo, em ambas as misturas constatou-se a presença de um novo constituinte mineralógico, que é o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), similar ao identificado por Picanço, Angélica e Barata (2014). O C-S-H corresponde a uma fase hidratada formada devido às reações químicas do cimento quando em contato com a água que, segundo Mehta e Monteiro (2008), contribui para elevar a resistência mecânica e reduzir a permeabilidade do material.

Como a bentonita e o caulim possuem valores de CTC mais elevados em relação ao solo, esperava-se que a adição de 6% desses materiais fosse contribuir para um acréscimo de CTC proporcional a porcentagem adicionada no solo. Contudo, não foi isso o observado. Como pode ser visto na Tabela 2 e na Figura 2, as misturas solo-caulim (0,98 meq/100g) e solo-bentonita (8,98% meq/100g) possuem valores de CTC mais elevados que os das misturas solo-cimento-caulim (0,63 meq/100g) e solo-cimento-bentonita (3,28 meq/100g).

A redução dos valores esperados de CTC com a adição do cimento nos solos indica que esse estabilizante químico contribui para a redução da capacidade de troca catiônica na superfície desses materiais, afetando, conseqüentemente, a capacidade de sorção dessas misturas. Esse comportamento pode estar relacionado à redução da superfície específica dos materiais finos que possuem capacidade de troca de íons. Isso pode ocorrer devido à aglutinação de partículas provocadas pelas reações químicas do cimento, além do recobrimento de parte da superfície dos minerais pelas fases mineralógicas hidratadas geradas nas reações do cimento.

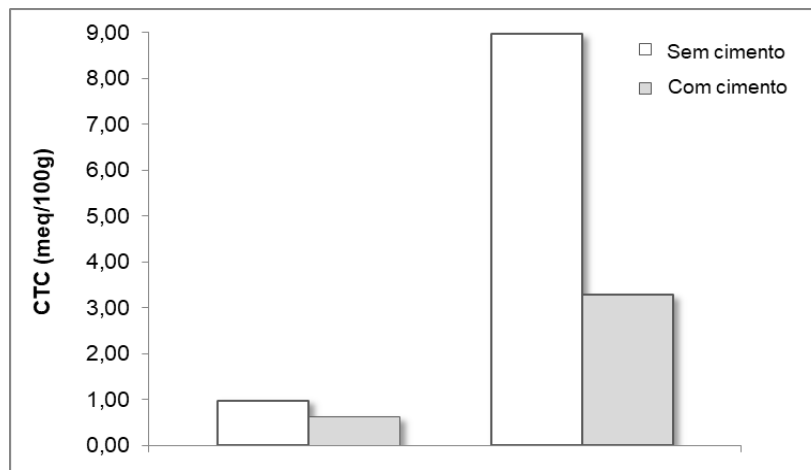


Figura 2. Capacidade de troca catiônica das misturas solo-caulim e solo-bentonita com e sem cimento.

3.2 - Condutividade hidráulica das misturas

Na Tabela 3 são apresentados os valores de condutividade hidráulica média do solo, compactado em diferentes teores de umidade, incluindo a umidade ótima do solo (6,4%), após 120 dias de ensaio. Nota-se que o menor valor de K do solo compactado ocorre com o teor de umidade ótima (CP 01). Acréscimos de teor de umidade acima disso provocaram um aumento dos valores de K (CP 02 e 03), pois o excesso de água nesse meio poroso passa a receber parte da energia de compactação aplicada, comprometendo o grau de compactação do corpo de prova.

Tabela 3. Condutividade hidráulica média do solo compacto com diferentes teores de umidade.

CP	Teor de umidade (%)	K _{médio} (m/s)
01	6,4	3,169E-07
02	7,6	1,067E-06
03	8,8	9,680E-07

Fonte: Modificado de Loch e Pejón (2013).

Nas Tabelas 4 e 5 são apresentados os valores médios de K dos corpos de prova das misturas SCB e SCC, respectivamente, durante diferentes intervalos de tempo analisados.

Tabela 4. Condutividade hidráulica média das misturas solo-cimento-caulim em diferentes intervalos de tempo.

Tempo (dias)	SCC-01	SCC-02	SCC-03	SCC-04	SCC-05	K _{médio} (m/s)
10	2,14E-08	2,39E-09	1,63E-08	1,37E-08	6,53E-09	1,76E-08
20	2,42E-08	1,58E-09	2,03E-08	1,44E-08	1,01E-08	2,06E-08
30	5,08E-08	5,44E-09	2,44E-08	4,40E-08	4,58E-08	4,09E-08
40	2,29E-08	2,44E-08	2,25E-08	4,08E-08	2,29E-08	3,35E-08
50	1,73E-08	2,87E-08	2,50E-08	3,12E-08	1,57E-08	2,70E-08
60	1,32E-08	2,07E-08	2,00E-08	2,36E-08	1,61E-08	2,03E-08
70	8,08E-09	3,19E-08	1,67E-08	1,78E-08	1,46E-08	1,92E-08
80	7,34E-09	3,90E-08	1,604E-08	1,90E-08	1,53E-08	1,97E-08

Tabela 5. Condutividade hidráulica média das misturas solo-cimento-bentonita em diferentes intervalos de tempo.

Tempo (dias)	SCB-01	SCB-02	SCB-03	SCB-04	SCB-05	SCB-06	K _{médio} (m/s)
10	-	-	-	-	1,92E-10	6,51E-11	1,28E-10
20	-	-	-	8,75E-10	2,05E-10	5,23E-11	3,77E-10
30	1,59E-09	6,66E-10	1,03E-09	1,66E-09	2,38E-09	8,31E-11	1,23E-09
40	1,42E-09	5,04E-10	1,25E-09	2,29E-09	4,29E-09	1,75E-10	1,65E-09
50	1,03E-09	3,39E-10	4,42E-10	3,62E-09	1,60E-09	1,53E-10	1,19E-09
60	2,27E-09	2,58E-10	1,09E-10	1,77E-09	1,24E-09	1,05E-10	9,62E-10
70	8,29E-10	1,61E-10	8,91E-11	1,88E-09	1,36E-09	5,84E-11	7,31E-10
80	5,96E-10	9,07E-11	8,50E-11	1,94E-09	1,41E-09	5,68E-11	6,97E-10

*(-) Não houve saída de água pelo corpo de prova.

Observa-se que as misturas solo-cimento-bentonita apresentam valores médios de K mais baixos em relação às misturas solo-cimento-caulim em todos os intervalos de tempo analisados. Apesar disso, ambas as misturas apresentaram uma redução da condutividade hidráulica em relação aos valores de K médio do solo compactado.

A menor permeabilidade das misturas SCB pode estar relacionada ao comportamento expansivo da bentonita em decorrência da expansão da montmorillonita, pois a adição de 2 a 10% desse material em misturas solo-bentonita reduz os valores de K de 10^{-7} para 10^{-9} , conforme Daniel (1993). Dessa forma, apesar dos dois tipos de argila terem sido adicionadas com a mesma porcentagem (6%), a bentonita contribuiu para as misturas SCB apresentarem valores médios de K de $6,97 \times 10^{-10}$ m/s após 80 dias de ensaio, enquanto as SCC têm valores médios de $1,97 \times 10^{-8}$ m/s no mesmo intervalo de tempo, já que a caulinita não possui propriedades expansivas.

O teor de umidade de 11% utilizado nas misturas também pode ter contribuído para a maior permeabilidade das misturas SCC, pois a umidade ótima desta é de 8,4%, enquanto da mistura SCB é de 12,5%. Dessa forma, nota-se que a mistura SCC foi compactada 2,6% acima do teor de umidade ótima. Essa umidade adicional pode ter interferido no processo de compactação dos CP, pois a água passa a receber parte da energia de compactação aplicada, impedindo que estas amostras tenham o mesmo grau de compactação das misturas SCB, o que influencia diretamente no arranjo das partículas e, conseqüentemente, nos valores de K.

O excesso de água nos CP de SCC pode ter interferido também nas reações químicas e de aglutinação de partículas do cimento, como relata Loch (2013). Isso faz com que o preenchimento dos poros pelos produtos de hidratação do cimento não ocorram de forma efetiva, afetando os valores de condutividade hidráulica da mistura.

Todos os corpos de prova de SCB e SCC foram montados nas mesmas condições. Contudo, observa-se que há diferenças nos valores de K entre os CP de uma mesma mistura. Essas diferenças podem estar associadas ao processo de estabilização dos valores de K devido à continuidade na ocorrência das reações químicas do cimento com o tempo.

Nos gráficos apresentados na Figura 3, observa-se que a estabilização dos valores médios de K nas misturas SCC ocorre a partir de 60 dias de ensaio, enquanto nas misturas SCB ocorre a partir de 70 dias. Os gráficos mostram também uma tendência de elevação dos valores de K entre 30 a 40 dias. Esse comportamento está associado à inversão do fluxo de água nos corpos de prova que passou a ser descendente após a etapa de saturação. Contudo, após isso, os valores de K tendem a se reduzir e estabilizar.

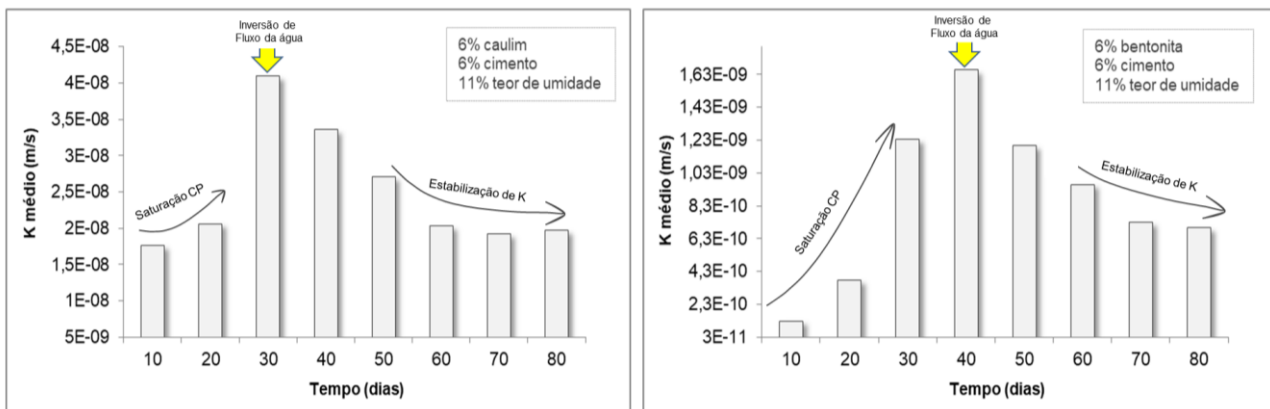


Figura 3. Variação da condutividade hidráulica média das misturas solo-cimento-caulim e solo-cimento-bentonita durante 80 dias de ensaio.

4 - CONCLUSÕES

Os resultados obtidos mostram que a adição de materiais argilosos e cimento (nas proporções de 6% para cada e 11% de teor de umidade) em solos arenosos promovem uma redução da condutividade hidráulica dos mesmos, quando comparados aos valores de K somente do solo compactado. Contudo, em todos os períodos analisados, as misturas solo-cimento-bentonita apresentaram uma redução de K maior ($K_{\text{médio}} 80 \text{ dias} = 6,97 \times 10^{-10} \text{ m/s}$) em relação às misturas solo-cimento-caulim ($K_{\text{médio}} 80 \text{ dias} = 1,97 \times 10^{-8} \text{ m/s}$).

Levando-se em consideração os valores mínimos de K, comumente normalizados para aplicação de determinado material como barreira ambiental de fundo em aterros sanitários (10^{-9} m/s), após os 28 dias de cura do cimento, as misturas SCB apresentaram valores de condutividade hidráulica que respeitam esse quesito, apesar do mesmo só apresentar uma tendência de estabilização desse parâmetro após 70 dias. No entanto, as misturas SCC, com as porcentagens aplicadas, não atenderam a este requisito, mesmo após o período de estabilização dos valores de K (após 60 dias). Contudo, como a mistura SCC apresentou melhorias nos valores de K do solo, a mesma pode ser utilizada para outras finalidades.

As misturas SCB são menos permeáveis em decorrência das propriedades expansivas das montmorillonitas, o que não ocorre nas misturas SCC pelo fato da caulinita não apresentar esta propriedade. Além do mais, as porcentagens de cada material utilizadas foram definidas para misturas com adição de bentonita e cimento. Dessa forma, nota-se que a aplicação de porcentagens pré-definidas de misturas empregando outro tipo de material argiloso, como o caulim, pode comprometer os resultados de K esperados, tendo em vista as diferenças das propriedades dos argilominerais.

Observou-se ainda a forte influência do teor de umidade utilizado em misturas com solos arenosos. A adição de água acima do teor umidade ótima do solo nas misturas SCC comprometeu o processo de compactação e o arranjo das partículas do solo, contribuindo para que estas misturas apresentassem valores de condutividade hidráulica mais elevados.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq pelo auxílio financeiro e ao Departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos (USP) pelo suporte oferecido.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM) (2011). "D2487: Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)". ASTM International, West Conshohocken, DOI: 10.1520/D2487-11.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). (2016). *NBR 6459: Solo – Determinação do Limite de Liquidez*. Rio de Janeiro.
- _____. (1984). *NBR 6508: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm: Determinação da massa específica: Método de ensaio*. Rio de Janeiro.
- _____. (2016). *NBR 7180: Solo – Determinação do limite de plasticidade*. Rio de Janeiro.
- _____. (2016). *NBR 7181: Solo – Análise Granulométrica*. Rio de Janeiro.
- _____. (1986). *NBR 7182: Solo – Ensaio de Compactação*. Rio de Janeiro.
- _____. (2012). *NBR 12023: Solo-cimento – Ensaio de Compactação*. Rio de Janeiro.
- BRIGATTI, M. F.; GALAN, E.; THENG, B. K. G (2006). “*Structures and mineralogy of clay minerals*”. In: BERGAYA, F.; THENG, B. K. G.; LAGALY, G. *Handbook of Clay Science: Developments in Clay Science Series*. Elsevier, Amsterdam, v.1, p. 19-86.
- BOSCOV, M. E. G. (2008). *Geotecnia Ambiental*. São Paulo, Oficina de textos. 248p.
- DANIEL, D. E. (1993). “*Clay Liners*”. In: DANIEL, D. E. *Geotechnical Practice for Waste Disposal*. Chapman & Hall, Londres, p.137-163.
- DAS, B. M. (2011). *Fundamentos de Engenharia Geotécnica*. 6ª Ed. São Paulo: Cengage Learning. 559 p.
- LAN, T.N. (1977). “*Un nouvel essai d'identification des sols: l'essai au bleu de methylene*”. *Bull. Liaison Labo. P. et Ch.*, v.88, p. 136-137.
- LOCH, F. C. (2013). “*Barreiras de solos estabilizados com cal e cimento para proteção ambiental*”. Dissertação de Mestrado (Geotecnia), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 242 p.
- LOCH, F. C. (2018, no prelo). “*Estudo integrado do comportamento de misturas de solo arenoso, argila e cimento para aplicação em barreiras de proteção ambiental*”. Tese de Doutorado (Geotecnia), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- LOCH, F.C.; PEJON, O.J (2013). “*Use of factorial design to model hydraulic conductivity of a sandy soil chemically stabilized with lime*”. In: Congresso de Meio Ambiente Subterrâneo, 3., 2013, São Paulo. Anais... , ABAS, v. 1.
- MEHTA, P. K; MONTEIRO, P. J. M (2008). *Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais*. São Paulo, IBRACON, 674p.
- PEJON, O. J. (1992). “*Mapeamento Geotécnico Regional da Folha de Piracicaba-SP (escala 1:100.000): Estudo de Aspectos Metodológicos, de Caracterização e de Apresentação de Atributos*”. Tese de Doutorado (Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2v.
- PICANÇO, M. S.; ANGÉLICA, R. S.; BARATA, M. S (2014). “*Cimentos Portland aditivados com arenito zeolítico com propriedades pozolânicas*”. *Revista Matéria*, p. 68-80.
- RIBEIRO, R.A.V. (2002). “*Avaliação do desempenho hidráulico de barreiras de proteção ambiental produzidas com solo laterítico arenoso compactado, estabilizado quimicamente*”. Dissertação de Mestrado (Engenharia Civil), Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP, Ilha Solteira, 88p.
- SHACKELFORD, C. D (2014). “*The SSMGE Kerry Rowe lecture: The role of diffusion in environmental geotechnics*”. *Canadian Geotechnical Journal – NRC Research Press*, v. 51, p. 1219-1242.