

AVALIAÇÃO DA REDUÇÃO DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DE SOLO ARENOSO POR MEIO DA ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA COM CAL E CIMENTO

EVALUATION OF A SANDY SOIL HYDRAULIC CONDUCTIVITY REDUCTION USING CHEMICAL STABILIZATION WITH LIME AND CEMENT

Loch, Felipe de Campos; Escola de Engenharia de São Carlos – USP , *São Carlos-SP, Brazil, fcl@sc.usp.br*
Pejon, Osni Jose; Escola de Engenharia de São Carlos – USP , *São Carlos-SP, Brazil, pejon@sc.usp.br*

RESUMO

Neste trabalho foram avaliados os métodos de estabilização química do solo com cal e cimento em amostras da Formação Botucatu (São Paulo, Brasil), contendo 90% de areia, 3,9% de silte e 6,1% de argila. A redução da condutividade hidráulica foi avaliada em função da quantidade de estabilizante e do teor de umidade. As quantidades de cal utilizadas foram 4, 8 e 12% e os teores de cimento foram 3, 7 e 10%. O teor de umidade também teve três níveis de variação: 6,4, 7,6 e 8,8%. A condutividade hidráulica foi medida em permeâmetros de carga constante. Os corpos de prova de solo estabilizado e padrão de referência foram compactados dentro das colunas de percolação, com o mesmo grau de compactação. A análise estatística dos resultados permitiu estabelecer modelos de regressão e superfícies de resposta que representam o comportamento hidráulico das misturas. A menor condutividade hidráulica média obtida foi de $1,4 \times 10^{-8}$ m/s.

ABSTRACT

This paper evaluates the soil chemical stabilization with lime and cement on samples from Botucatu Formation (São Paulo, Brazil), containing 90% sand, 3.9% silt and 6.1% clay. The hydraulic conductivity reduction where evaluated as a function of the stabilizer quantity and moisture content. The lime contents were 4, 8 and 12%, the cement percentages were 3, 7 and 10%. The moisture content had also three different levels: 6.4, 7.6 and 8.8%. Hydraulic conductivity was measured on constant head permeameters. The stabilized and non-stabilized samples were compacted inside the permeability columns, with the same compaction ratios. Statistical analysis allowed to establish regression models and response surfaces which represent the soil mixtures hydraulic behavior. The lowest hydraulic conductivity measured was 1.4×10^{-8} m/s.

1 - INTRODUÇÃO

O consumo e as atividades urbanas e industriais geram grandes quantidades de resíduos diariamente. Atualmente, vários países têm suas normas específicas para construção de aterros sanitários para garantir uma melhor disposição final deste material.

Um dos principais elementos dos aterros é a barreira de proteção ambiental, que se caracteriza como um dispositivo com o fim de minimizar e atenuar os efeitos do fluxo do percolado. Esta camada de baixa permeabilidade pode ser executada com materiais naturais ou artificiais, ou ainda com uma combinação de ambos. Quando aplicada na base dos aterros, impede que os percolados atinjam os solos do entorno e o lençol freático e quando empregada na impermeabilização da cobertura e fechamento do aterro tem a finalidade de impedir a infiltração de água na camada de resíduos.

O material natural comumente utilizado é o solo e, como apresenta característica muito variada, nem todos os tipos de solo cumprem os requisitos para aplicação em camadas de base de aterros. A construção de um aterro sanitário com barreira de proteção utilizando solo local pode, portanto, não ser possível.

No Brasil há a Formação Botucatu, constituída por arenitos de granulação fina a média, com cor avermelhada, grãos bem selecionados e de alta esfericidade. O material inconsolidado desta Formação foi formado pela alteração dos arenitos friáveis e apresentam espessuras que podem ultrapassar os 10,0 m de profundidade (IPT, 1981; FAGUNDES, 2010, EMBRAPA, 2011).

A Formação Botucatu apresenta grande continuidade e dimensões. Como os arenitos dessa Formação apresentam alta porosidade e permeabilidade, as regiões onde ocorrem o seu afloramento apresentam maior infiltração de água e, deste modo, compõe a região de recarga do Aquífero Guarani (FAGUNDES, 2010; EMBRAPA, 2011).

As mesmas características que permitem grande permeabilidade e a recarga do aquífero podem facilitar o transporte de contaminantes e poluir as reservas de águas subterrâneas. O material inconsolidado dessa Formação não atende aos critérios de baixa condutividade hidráulica das barreiras de proteção, porém apresenta grande disponibilidade para o seu uso.

A adição de cal e cimento pode causar modificações nas propriedades do solo por meio das reações de troca de cátions, floculação e aglomeração das partículas de argila. Ocorrem, também, as reações pozolânicas entre a sílica e alumina do solo e o hidróxido de cálcio disponibilizado por estes estabilizantes. Nas misturas solo-cimento, são observadas, ainda, as reações de hidratação do cimento (PRUSINSKI & BHATTACHARJA, 1999; THOMPSON, 2005; MEHTA & MONTEIRO, 2008).

Deste modo, com uma dosagem adequada, a alteração provocada pela mistura do solo com cal ou cimento pode reduzir o índice de vazios do solo e gerar um material com uma condutividade hidráulica menor (RIBEIRO, 2002; RIZZO & LOLLO, 2006; KNOP, 2007; SAHA, DATTA & SANYAL, 2008).

Assim, o objetivo deste trabalho foi investigar o efeito da estabilização química na condutividade hidráulica de um solo arenoso de grande disponibilidade no Brasil. Um projeto fatorial 3^2 (Montgomery, 2009) foi empregado para o planejamento das análises de condutividade hidráulica em função do teor de umidade e quantidade de cal ou cimento adicionada a amostra.

2 - MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 - Materiais

O solo utilizado neste trabalho é proveniente do material residual da Formação Botucatu (Estado de São Paulo, Brasil). A distribuição granulométrica das amostras apresentou 6,1% de argila, 3,9% de silte, 48,0% de areia fina e 42,0% de areia média. Segundo o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (ASTM D2487, 2011) este material pode ser classificado como SP-SC, areia mal graduada com argila. De acordo com Embrapa (2009) este solo é classificado como areia ou areia franca.

Foi utilizada cal hidratada, tipo CH-III (Itaú). O cimento Portland empregado foi CII-Z32 (Itaú) e a água fornecida pela concessionária local.

2.2 - Procedimentos Experimentais

O procedimento experimental adotado foi o planejamento fatorial 3^2 (Montgomery, 2009), com dois fatores: porcentagem de cal (Ca) ou cimento (Ci) e teor de umidade (w), variando em três níveis cada. Os níveis são: Ca (4, 8 e 12%), Ci (3, 7 e 10%) e w (6,4, 7,6 e 8,8%).

A escolha dos níveis de teor de umidade foi feita após a determinação das curvas de compactação do solo com energia Proctor Normal. Assim foi garantido que o teor de umidade ótima para cada tipo de mistura esteja dentro do intervalo avaliado.

As misturas de solos foram realizadas de modo manual sobre bancada metálica para evitar a perda dos materiais. O estabilizante (cal ou cimento) foi primeiramente adicionado ao solo e foi realizada a homogeneização. Em sequência foi adicionada a quantidade de água necessária para se atingir o teor de umidade da mistura e, então, foi feita uma segunda homogeneização.

Os ensaios de condutividade hidráulica foram realizados em permeômetros de carga constante. Os corpos-de-prova apresentaram 940 mm de diâmetro e aproximadamente 260 mm de altura. As amostras de solo com adição de cal (CA), cimento (CI) e sem estabilizante (PD) foram compactadas diretamente nas colunas de percolação.

No início do ensaio todas as amostras compactadas foram sujeitas a um período de saturação de 8 dias e, então, foi imposto um gradiente hidráulico de aproximadamente 6,1. Os ensaios de condutividade hidráulica foram executados durante 120 dias e entre o intervalo de 100 a 120 dias todas as leituras apresentaram variação inferior a $8,0 \times 10^{-8}$ m/s.

Como houve grande quantidade de amostras e grande variabilidade de vazão optou-se pelo uso de resultados dentro do intervalo de tempo ao invés de datas fixas. Para realização das análises estatísticas foram selecionadas três leituras aleatórias de cada mistura (K_1 , K_2 e K_3), dentro do intervalo de 100 a 120 dias. A partir dos três resultados de cada mistura, foram determinados os modelos de regressão e superfícies de resposta.

3 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para determinação dos níveis do teor de umidade foram executados ensaios de compactação Proctor em amostras de solo-cal e solo-cimento. O Quadro 1 apresenta os valores do teor de umidade ótimo (w_{ot}) e massa específica aparente seca máxima (ρ_{dmax}). O solo sem estabilizante apresentou uma w_{ot} de 6,4% e ρ_{dmax} de 1,934.

Quadro 1- Resultados do ensaio de compactação Proctor Normal.

Solo-cal			Solo-cimento		
Ca	w_{ot}	ρ_{dmax}	Ci	w_{ot}	ρ_{dmax}
4,0	8,5	1,949	3,0	6,5	1,940
8,0	8,5	1,951	7,0	7,3	1,961
12,0	8,5	1,972	10,0	8,3	1,997

O Quadro 2 apresenta os resultados da condutividade hidráulica (K) do solo sem estabilizantes que foram utilizados para comparação com os dados das misturas com cal e cimento. São apresentados, também, os seus respectivos valores médios (\bar{K}).

O Quadros 3 e 4 expõem os valores de K das misturas de solo-cal e solo-cimento, respectivamente, utilizados nas análises estatísticas e, também, os seus respectivos valores médios (\bar{K}).

Quadro 2- Composições das misturas sem estabilizante e resultados de condutividade hidráulica.

Mistura	Composição		Condutividade Hidráulica						\bar{K}
	w (%)	Ca (%)	K_1 (m/s)	t (dias)	K_2 (m/s)	t (dias)	K_3 (m/s)	t (dias)	
PD-01	6,4	0,0	3,278E-07	117	3,013E-07	111	3,215E-07	115	3,169E-07
PD-02	7,6	0,0	1,055E-06	112	1,052E-06	107	1,093E-06	105	1,067E-06
PD-03	8,8	0,0	9,383E-07	109	9,892E-07	113	9,764E-07	120	9,680E-07

Fonte: Modificado de Loch & Pejon (2013)

Comparando os resultados das misturas com adição de estabilizante com as amostras sem cal ou cimento, pode ser observado que houve redução dos valores de K para a maioria das misturas realizadas (Quadros 3 e 4).

Quadro 3- Composições das misturas solo-cal e resultados de condutividade hidráulica.

Mistura	Composição		Condutividade Hidráulica (m/s)						\bar{K}	Redução
	w (%)	Ca (%)	K_1	t (dias)	K_2	t (dias)	K_3	t (dias)		
CA-01	6,4	4,0	4,777E-07	115	4,571E-07	117	4,292E-07	120	4,546E-07	-1,378E-07
CA-02	6,4	8,0	3,992E-07	112	3,727E-07	115	3,538E-07	119	3,752E-07	-5,838E-08
CA-03	6,4	12,0	2,702E-07	111	2,641E-07	112	2,630E-07	106	2,658E-07	5,107E-08
CA-04	7,6	4,0	1,561E-07	111	1,551E-07	110	1,577E-07	118	1,563E-07	9,103E-07
CA-05	7,6	8,0	2,383E-07	112	2,561E-07	109	2,533E-07	108	2,492E-07	8,173E-07
CA-06	7,6	12,0	2,519E-07	120	2,541E-07	109	2,356E-07	118	2,472E-07	8,194E-07
CA-07	8,8	4,0	1,693E-07	120	1,705E-07	112	1,802E-07	108	1,733E-07	7,947E-07
CA-08	8,8	8,0	1,994E-07	105	1,842E-07	108	1,927E-07	100	1,921E-07	7,759E-07
CA-09	8,8	12,0	6,167E-08	120	6,080E-08	110	6,427E-08	118	6,224E-08	9,057E-07

Fonte: Modificado de Loch & Pejon (2013)

Quadro 4- Composições das misturas solo-cimento e resultados de condutividade hidráulica.

Mistura	Composição		Condutividade Hidráulica (m/s)						\bar{K}	Redução
	w (%)	Ci (%)	K_1	t (dias)	K_2	t (dias)	K_3	t (dias)		
CI-01	6,4	3	7,825E-08	112	7,715E-08	110	7,835E-08	114	7,792E-08	2,389E-07
CI-02	6,4	7	3,301E-07	103	3,305E-07	115	3,526E-07	107	3,377E-07	-2,087E-08
CI-03	6,4	10	1,997E-07	110	2,092E-07	118	2,180E-07	120	2,090E-07	1,079E-07
CI-04	7,6	3	1,437E-07	120	1,458E-07	113	1,463E-07	105	1,453E-07	9,213E-07
CI-05	7,6	7	3,255E-07	120	3,289E-07	119	3,210E-07	117	3,251E-07	7,414E-07
CI-06	7,6	10	1,802E-08	113	1,915E-08	118	1,906E-08	111	1,874E-08	1,048E-06
CI-07	8,8	3	3,280E-07	120	3,315E-07	118	3,356E-07	114	3,317E-07	6,363E-07
CI-08	8,8	7	2,321E-07	117	2,299E-07	107	2,506E-07	119	2,375E-07	7,304E-07
CI-09	8,8	10	1,356E-08	120	1,473E-08	113	1,458E-08	111	1,429E-08	9,537E-07

O Quadro 5 mostra os resultados da análise de variância dos dados experimentais da condutividade hidráulica (K) das misturas de solo-cal. Adotando um nível de significância (α) de 0,05, para o teste de hipóteses ($p \leq \alpha$ para a rejeição da hipótese nula), os fatores w linear (x_1), w quadrático (x_1^2), CA linear

(x_2), CA quadrático (x_2^2) e as interações $x_1 \cdot x_2$, $x_1 \cdot x_2^2$ e $x_1^2 \cdot x_2$ mostraram-se significantes para o modelo.

A análise de variância do K_{CA} obteve um coeficiente de determinação (R^2) de 0,9915. A equação final ajustada para o modelo pode ser representada pela equação 1, na qual x_1 representa os valores do fator w e x_2 do fator CA.

$$K_{CA} = 1,267 \cdot 10^{-5} - 3,1335 \cdot 10^{-6} \cdot x_1 + 1,9250 \cdot 10^{-7} \cdot x_1^2 - 1,3693 \cdot 10^{-6} \cdot x_2 + 8,8828 \cdot 10^{-9} \cdot x_2^2 + 3,4657 \cdot 10^{-7} \cdot x_1 \cdot x_2 - 1,5439 \cdot 10^{-9} \cdot x_1 \cdot x_2^2 - 2,0909 \cdot 10^{-8} \cdot x_1^2 \cdot x_2 \quad [1]$$

Quadro 5 – Análise de variância do K para as misturas solo-cal.

Fonte	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Média dos Quadrados	F	p
w (x_1)	2,231E-13	1	2,231E-13	1416,029	1,443E-18
w (x_1^2)	7,915E-15	1	7,915E-15	50,233	1,315E-06
CA (x_2)	2,185E-14	1	2,185E-14	138,650	6,841E-10
CA (x_2^2)	1,248E-14	1	1,248E-14	79,214	5,198E-08
$x_1 \cdot x_2$	4,538E-15	1	4,538E-15	28,797	4,231E-05
$x_1 \cdot x_2^2$	3,515E-15	1	3,515E-15	22,306	1,697E-04
$x_1^2 \cdot x_2$	5,802E-14	1	5,802E-14	368,220	1,966E-13
Falta de Ajuste	1,063E-17	1	1,063E-17	0,067	0,798019
Erro	2,836E-15	18	1,576E-16		
Total	3,343E-13	26			

Conforme a análise de variância dos dados experimentais da condutividade hidráulica das misturas de solo-cimento (Quadro 6), os fatores w quadrático (x_1^2), CI linear (x_3), CI quadrático (x_3^2) e as interações $x_1 \cdot x_3$, $x_1 \cdot x_3^2$, $x_1^2 \cdot x_3$ e $x_1^2 \cdot x_3^2$, mostraram-se significantes para o modelo. Assim como para as misturas de solo-cal foi adotado um nível de significância (α) de 0,05, para o teste de hipóteses.

Quadro 6 - Análise de variância do K para as misturas solo-cimento.

Fonte	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Média dos Quadrados	F	p
w (x_1^2)	8,411E-15	1	8,411E-15	183,275	7,077E-11
CI (x_3)	4,894E-14	1	4,894E-14	1066,443	1,787E-17
CI (x_3^2)	1,820E-13	1	1,820E-13	3966,439	1,456E-22
$x_1 \cdot x_3$	1,516E-13	1	1,516E-13	3303,567	7,494E-22
$x_1 \cdot x_3^2$	9,477E-15	1	9,477E-15	206,485	2,638E-11
$x_1^2 \cdot x_3$	1,113E-15	1	1,113E-15	24,243	1,095E-04
$x_1^2 \cdot x_3^2$	1,785E-14	1	1,785E-14	388,940	1,227E-13
Falta de Ajuste	4,095E-17	1	4,095E-17	0,892	0,357364
Erro	8,261E-16	18	4,589E-17		
Total	4,134E-13	26			

O coeficiente de determinação (R^2) do K_{CI} , que é explicado pelos fatores w e CI, é 0,9979. A equação final ajustada para o modelo pode ser representada pela equação 38, na qual x_1 representa os valores do fator w e x_3 do fator CI.

$$K_{CI} = -1,3443 \cdot 10^{-6} + 1,9364 \cdot 10^{-8} \cdot x_1^2 + 1,8342 \cdot 10^{-7} \cdot x_3 + 2,9685 \cdot 10^{-8} \cdot x_3^2 + 7,3216 \cdot 10^{-8} \cdot x_1 \cdot x_3 - 1,5527 \cdot 10^{-8} \cdot x_1 \cdot x_3^2 - 9,6291 \cdot 10^{-9} \cdot x_1^2 \cdot x_3 + 1,2561 \cdot 10^{-9} \cdot x_1^2 \cdot x_3^2 \quad [2]$$

Na Figura 1 é possível comparar todos os resultados das misturas solo-cal e misturas correspondentes sem adição de estabilizante. O mesmo é apresentado para as amostras de solo-cimento na Figura 2.

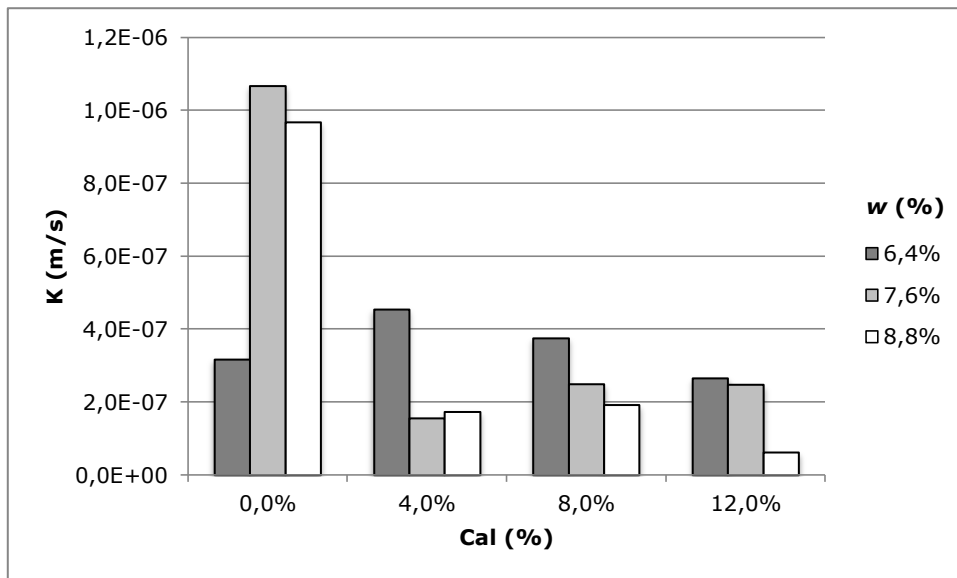


Figura 1 - Resultados médios de K das misturas solo-cal.

As misturas CA-01 e 02 com w de 6,4% e teores de cal de 4 e 8%, respectivamente, apresentaram uma dosagem inadequada, pois obtiveram um acréscimo na condutividade hidráulica (Quadro 3). O baixo teor de w e os resultados de K mostram que houve pouca água para hidratação da cal, o que não permite que todas as reações ocorram.

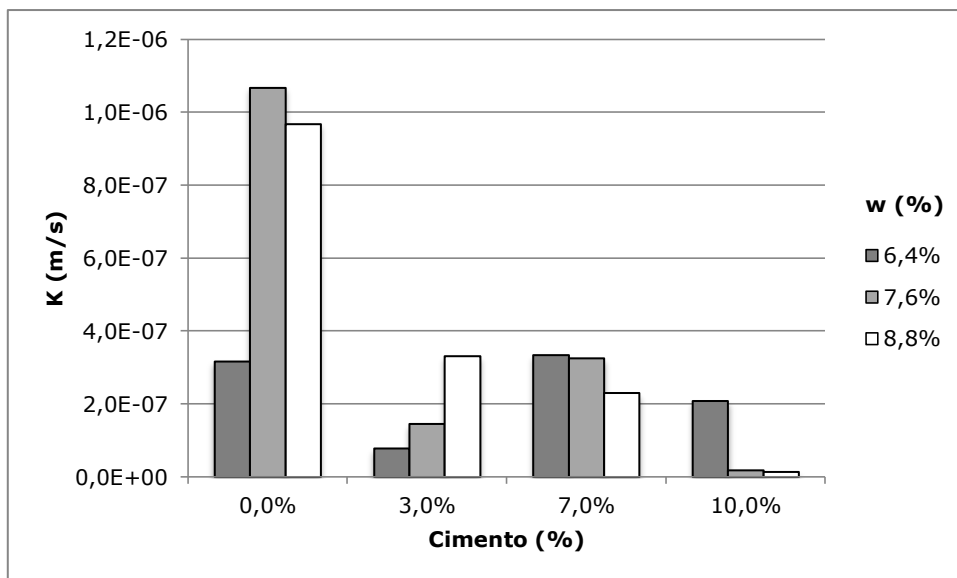


Figura 2 - Resultados médios de K das misturas solo-cimento.

Sem o preenchimento dos poros pelos produtos de hidratação a porosidade da mistura pode apresentar pouca ou nenhuma modificação. Em alguns casos, com a ocorrência das reações de flocculação e aglomeração das partículas de argila e a ausência dos compostos cimentantes, pode haver um acréscimo do índice de vazios e permeabilidade.

Conforme os resultados da mistura CA-03 (Quadro 3), houve uma pequena redução de K, isto indica que, em relação a CA-02, a maior quantidade de cal preencheu os vazios do solo, mesmo com pouca quantidade de água na mistura. Todas as outras misturas solo-cal obtiveram grande redução nos valores de K, sendo a CA-09 a mais eficaz na diminuição da condutividade hidráulica.

Assim como ocorreu para as misturas CA-01 e 02, a CI-02 (Quadro 4), composta por um w de 6,4% e CI de 7,0% apresentou um aumento do valor de K em relação ao padrão. O solo com uma adição de 7,0% de cimento possui um teor de umidade ótima de 7,3%, valor superior à quantidade de água desta mistura.

As amostras de solo-cimento com as maiores reduções de condutividade hidráulica foram a CI-06 e CI-09, ambas com teor de cimento de 10,0%. Conforme o modelo de regressão K_{CI} (Equação 2) o ponto ótimo de menor K possui o mesmo teor de cimento e um w de 8,4%.

Os valores de K da amostra CI-03 demonstram que mesmo com uma quantidade de cimento maior que a mistura CI-02, houve uma redução do K. Assim, como ocorreu para mistura CA-03, é possível que uma quantidade maior de estabilizante tenha promovido o preenchimento dos vazios da amostra de solo compactado.

A partir das leituras de condutividade hidráulica das amostras de solo-cal (Quadro 3) foi realizada a análise de regressão (Quadro 5) e determinado modelo de regressão (Equação 1), que pode ser expresso graficamente através de uma superfície de resposta. A projeção desta superfície (Figura 3) mostra o comportamento das misturas em função das variáveis independentes (w e Ca). A tendência das curvas evidencia que o teor de umidade exerceu maior influência do que o teor de estabilizante sobre a diminuição do K nas misturas com cal.

As curvas da Figura 3 mostram que entre os níveis de cal (4,0 e 7,0%) e w (6,4 a 7,2%) a alteração dos valores de K ocorre de modo praticamente vertical, com maior influência do w. Acima de 9,0% de cal as alterações do K ocorrem de modo mais espaçado, o que indica uma necessidade maior de água na mistura para promover as reações.

O ponto ótimo ou valor de menor condutividade hidráulica, corresponde a dosagem da mistura CA-09 com w de 8,8% e CA de 12,0%. O modelo (Equação 1) prevê um K de $6,1930 \times 10^{-8}$ m/s e se compararmos com a média dos valores experimentais (Quadro 3) observamos um residual de $3,1372 \times 10^{-10}$ m/s.

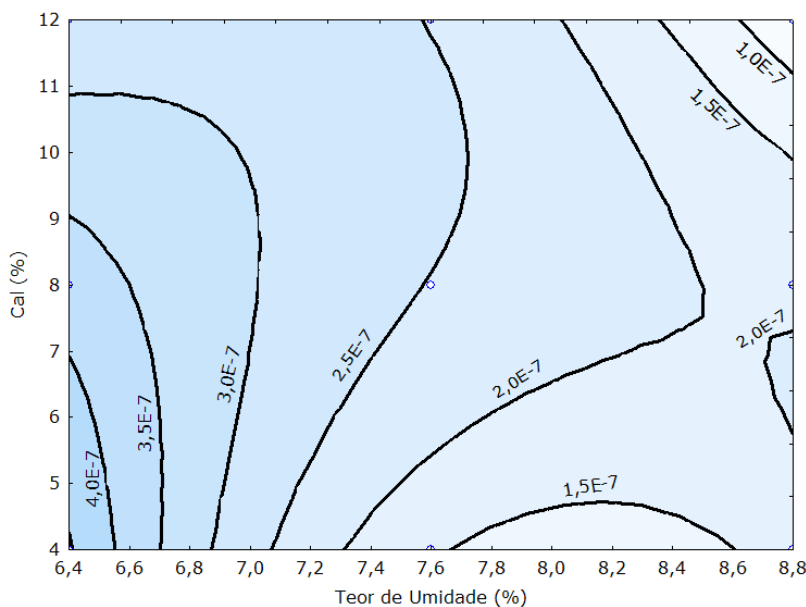


Figura 3 – Projeção da superfície de resposta dos valores de K (m/s) das misturas solo-cal.

Além das misturas para realização do planejamento fatorial, foram executados ensaios de condutividade hidráulica em uma amostra de validação (CA-V) para conferência do modelo de regressão K_{CA} (Equação 1). Esta mistura adicional possui um w = 8,6% e CA = 12,0%. A verificação foi executada por meio da diferença entre o resultado experimental e o previsto, ou seja, o valor residual. Os resultados da validação (Quadro 7) apresentaram valores próximos ao previsto, o que indica um bom ajuste do modelo de regressão.

Quadro 7 - Resultados de validação da CA-V para condutividade hidráulica (m/s).

K experimental		K_{CA} previsto	Residual
Leituras	Média		
1,089E-07			
1,096E-07	1,089E-07	1,046E-07	4,307E-09
1,081E-07			

A projeção da superfície de resposta das misturas de solo-cimento (Figura 4) mostra um comportamento diferente do encontrado para as misturas de solo-cal. Os níveis médios das variáveis independentes e também das combinações com baixo teor de cimento e maior quantidade de água apresentaram uma menor eficiência em reduzir o valor de K.

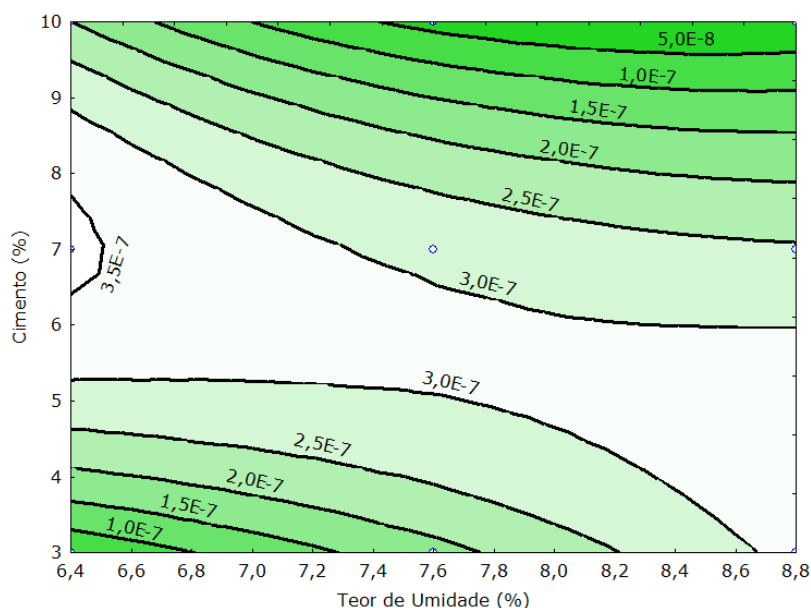


Figura 4 – Projeção da superfície de resposta dos valores de K (m/s) das misturas solo-cimento.

Na Figura 4 é possível observar que a adição de água agiu de maneira prejudicial para a redução do K para os menores teores de cimento. É possível que o acréscimo de água tenha impossibilitado as reações e ligações entre as partículas de cimento e do solo e dispersado as partículas de cimento.

A Equação 2 prevê que o ponto de menor condutividade hidráulica, para as misturas solo-cimento, corresponde a uma mistura com a dosagem de $w = 8,4\%$ e $CI = 10,0\%$, sendo o valor de K previsto igual a $5,978 \times 10^{-10}$ m/s.

A mistura de validação (CI-V) do modelo K_{CI} (Equação 2) possui um $w = 8,6\%$ e $CI = 10,0\%$. Foram efetuados ensaios de condutividade hidráulica nesta mistura e as três leituras selecionadas para análise são apresentadas no Quadro 8.

Quadro 8 - Resultados de validação da CI-V para condutividade hidráulica (m/s).

K experimental		K_{CI} previsto	Residual
Leituras	Média		
1,945E-08	1,980E-08	2,000E-09	-1,780E-08
2,012E-08			
1,984E-08			

Os resultados da verificação do modelo da condutividade hidráulica das misturas solo-cimento (Quadro 7) mostra que a previsão pode apresentar resultados inferiores aos encontrados experimentalmente e elevado valor residual. As misturas de solo-cimento apresentaram grande redução do valor de K, mas o modelo indica que podem ocorrer resultados ainda menores.

Os valores de K obtidos pelas misturas de solo-cimento apresentaram grandes diferenças entre si (Quadro 4) e este comportamento pode ser observado na projeção da superfície de resposta (Figura 4). Esta amplitude de resultados dificultou o ajuste do modelo e, deste modo, resultou em valores residuais altos para algumas misturas.

Considerando que foram alcançados resultados muito inferiores aos encontrados nas amostras de solo compactado sem cimento e conhecendo as possíveis divergências entre o previsto e o experimental, o modelo de regressão pode ser utilizado para estimar e demonstrar o comportamento das misturas.

4 - CONCLUSÕES

Os resultados obtidos nos ensaios de percolação em coluna mostraram que as misturas de solo-cal e solo-cimento promovem uma redução da condutividade hidráulica, quando comparadas as misturas de solo arenoso compactado sem estabilizante.

A adição de cimento apresentou maior eficiência na redução da condutividade hidráulica, em comparação com as amostras com cal. Nas misturas de solo-cimento o menor resultado encontrado foi de $1,4 \times 10^{-8}$ m/s, enquanto que para as amostras de solo-cal obteve-se um valor de condutividade hidráulica de $6,2 \times 10^{-8}$ m/s.

O uso do planejamento fatorial 3^2 e do método de superfície de resposta foi eficiente para o estudo da estabilização química do solo. Através dessa técnica foi possível observar a influência dos diferentes teores de estabilizante e da umidade sobre a condutividade hidráulica.

Os valores de condutividade hidráulica das misturas solo-cimento apresentaram grande diferença de resultados entre as amostras ensaiadas. A alta variabilidade de resultados dificultou o ajuste do modelo, mas, mesmo assim, foi possível indicar a tendência de alteração dos resultados em função das variáveis independentes e fazer uma previsão aproximada.

O modelo de regressão apresentado para as misturas de solo-cal foi eficiente na previsão da condutividade hidráulica, em função dos fatores teor de umidade do solo e da quantidade de cal adicionada. A análise dos resultados das misturas de solo-cal mostrou valores mais aproximados entre a previsão dos modelos e os dados experimentais. A superfície de resposta apresentou bom ajuste para todos os pontos e melhor acurácia na previsão da tendência de alteração das propriedades.

REFERÊNCIAS

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. D2487: Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011. DOI: 10.1520/D2487-11, www.astm.org.
- EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Sistema brasileiro de classificação de solos. 2ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA-SPI, 2009. 412p.
- _____. Sistema De Gestão Territorial Da ABAG/RP: Área de Estudo. Disponível em: <<http://www.abagr.pnpm.embrapa.br/areas/geologia.htm>> Acesso em: 15 nov. 2011.
- FAGUNDES, J. R. T. Estudo Integrado das Características Geológico-Geotécnicas com Vista à Avaliação de Recarga de Aquífero: Região de São Carlos-SP. Tese de Doutorado - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010, 2v.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO – IPT. Mapa Geológico do Estado de São Paulo Escala 1:500000. São Paulo, IPT, 1981.
- KNOP, A. Estudo do comportamento de liners atacado por ácido sulfúrico. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007. 230p.
- LOCH, F.C.; PEJON, O.J. 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, 2013, v. 1.
- MEHTA, P. K; MONTEIRO, P. J. M. Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais. São Paulo, IBRACON, 2008. 674p.
- MONTGOMERY, D. C. Design and Analysis of Experiments. 7 ed. Hoboken, John Wiley & Sons, 2009. 656p.
- PRUSINSKI, J. R.; BHATTACHARJA, S. Effectiveness of Portland Cement and Lime in Stabilizing Clay Soils. Journal of the Transportation Research Board, Washington, v. 1652, 1999.
- RIBEIRO, R. A. V. Avaliação do desempenho hidráulico de barreiras de proteção ambiental produzidas com solo laterítico arenoso compactado, estabilizado quimicamente. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Ilha Solteira, 2002.
- RIZZO, R. P.; LOLLO, J. A. Capacidade de retenção de barreiras de proteção produzidas com solo arenoso estabilizado quimicamente. Eng. Sanitária e Ambiental, v.11, n.3, 2006. p.250-259.
- SAHA, P.; DATTA, S.; SANYAL, S.K. Hazardous waste pollution using clay with admixtures. Clean, v.36, n.2, 2008. p.230-238.
- THOMPSON, M. R. Admixture Stabilization: Lime Treatment of Subgrades (Technical Note 14). Center of Excellence for Airport Technology, 2005.