

Modelagem da Condutividade Hidráulica em Misturas de Solos Tropicais e Bentonita

Thiago Luiz Coelho Morandini

CEFET-MG, Belo Horizonte, Brasil. E-mail: thiagomorandini@des.cefetmg.br

Adilson do Lago Leite

UFOP, Ouro Preto, Brasil. E-mail: alleite@em.ufop.br

RESUMO: A condutividade hidráulica é parâmetro fundamental em obras geotécnicas de barreiras de fluxo, tais como liners e cover systems de aterros sanitários, cutoffs de fundações de barragens e cut off walls de áreas contaminadas. Nestas obras é comum a utilização de misturas de solos locais e bentonita para o atendimento da condutividade hidráulica máxima aceitável. Os solos tropicais são reconhecidos pela sua elevada resistência mecânica e baixa compressibilidade, porém muitas vezes não é observada a condutividade hidráulica mínima aceitável nestes solos. Assim, a adição de bentonita a estes solos pode ser uma alternativa para reduzir a sua condutividade hidráulica. Por outro lado, a condutividade hidráulica é estimada por formulações empíricas, por conhecimento adquirido ou por testes de baixa precisão tanto em campo quanto em laboratório. Neste contexto, este artigo apresenta a modelagem matemática de resultados de condutividade hidráulica em misturas contendo três classes de solos tropicais (laterítico, transicional e não laterítico, segundo classificação MCT-M) e bentonita nos teores de 0 a 12%. Os ensaios foram executados em câmara triaxial sob tensões confinantes de 20, 40 e 80 kPa e gradiente hidráulico de 50 kPa. Foi proposto um índice denominado ponto mesoplástico (representativo da plasticidade dos solos) para utilização nas modelagens matemáticas. Em suma, os valores de R^2 demonstraram que o modelo que considera a condutividade hidráulica versus inverso do ponto mesoplástico obteve o melhor ajuste na previsibilidade da condutividade hidráulica em misturas de solos tropicais e bentonita. Por fim, conclui-se que a previsibilidade da condutividade hidráulica em solos argilosos tropicais pode ser realizada através de correlações empíricas que utilizam parâmetros de plasticidade.

PALAVRAS-CHAVE: condutividade hidráulica, modelagem matemática, solos tropicais, bentonita.

1 INTRODUÇÃO

Barreiras de solos compactados podem ser uma opção em diversas obras geotécnicas destinadas a contenção de fluxo, tais como sistemas de coberturas (cover systems) e sistemas basais de selagem (base liners) de aterros sanitários e barreiras verticais (cutoff walls). Os solos compactados nestas obras podem estar ou não associados à geossintéticos.

Para a utilização de solos compactados em obras de barreiras de fluxo diversos parâmetros devem ser observados, tais como baixa condutividade hidráulica, elevada resistência mecânica, baixa compressibilidade e

compatibilidade entre o fluido e a barreira. Destes parâmetros, a condutividade hidráulica possui critérios mínimos para a aceitação de uso do solo na barreira, enquanto outros parâmetros são exigidos de forma a garantir a integridade da barreira durante a vida útil do projeto.

No Brasil, os solos tropicais podem ser uma alternativa para obras de barreiras de fluxo uma vez que possuem reconhecida resistência mecânica e baixa compressibilidade. Entretanto, muitas vezes estes solos tropicais não atendem aos critérios mínimos de condutividade hidráulica, sendo necessário algum tipo de tratamento para sua utilização. Neste contexto, misturá-lo à bentonita pode ser uma forma de

reduzir a condutividade hidráulica, além de aumentar a plasticidade e a capacidade de sorção.

A literatura apresenta diversos estudos que avaliam a condutividade hidráulica em solos argilosos compactados ou misturas bentoníticas para fins de barreiras de fluxo (e.g. Daniel e Benson, 1990, Benson e Trast, 1995, Akbulut e Saglamer, 2002, Ebina et al., 2004). Estes estudos indicam uma condutividade hidráulica entre 10^{-7} cm/s e 5×10^{-8} cm/s como máxima aceitável.

Outros estudos avaliam a modificação de propriedades geotécnicas e/ou da condutividade hidráulica de barreiras de fluxo submetidas a diferentes contaminantes (e.g. Shackelford et al., 2000, Bouazza, 2002, Bouazza et al., 2007, Katsumi et al., 2008, Cuisinier et al., 2009)

Ainda se destacam os trabalhos de Benson et al. (1994), Chapuis e Aubertin (2003) e Roque e Didier (2005), que abordam a modelagem da condutividade hidráulica em função de parâmetros geotécnicos (plasticidade, granulometria), ou em função de parâmetros presentes na equação de Kozeny Carman (índice de vazios, superfície específica).

Porém, conforme sustentado por Nogami e Villibor (1985), os solos tropicais apresentam microformações esponjosas e agregadas contendo macroporos que lhe conferem comportamento hidráulico frequentemente atípico. Deste sentido, a previsibilidade do comportamento mecânico e hidráulico em solos tropicais deve possuir métodos e formulações próprios.

Este artigo apresenta modelagens matemáticas dos resultados de condutividade hidráulica em misturas contendo diferentes solos tropicais e bentonita. Os solos tropicais estudados são dos solos laterítico, transicional e não laterítico (classificação MCT-M – Vertamatti, 1998). Os ensaios de condutividade hidráulica foram realizados em câmara triaxial sob tensões confinantes de 20, 40 e 80 kPa e gradiente hidráulico de 50 kPa.

As modelagens apresentadas neste artigo referem-se à tensão confinante e ao ponto mesoplástico (parâmetro definido representativo da plasticidade).

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Este artigo tem como foco apresentar as modelagens matemáticas de resultados de condutividade hidráulica em misturas de solos tropicais e bentonita e diferentes teores. Os métodos utilizados para a caracterização e avaliação das propriedades geotécnicas dos solos tropicais e misturas são apresentados em Morandini e Leite (2015). Os métodos empregados na avaliação da condutividade hidráulica e métodos empregados na modelagem são descritos nos itens subsequentes.

2.1 Materiais

Os solos empregados na pesquisa foram coletados em perfis pedológicos tipicamente tropicais no estado de Minas Gerais, nas redondezas dos municípios de Antônio Pereira (solo laterítico), Cachoeira do Brumado (solo transicional) e Brumadinho (solo não laterítico).

Para a realização dos ensaios, os solos tropicais foram preparados segundo a NBR 6457 (1986), seguindo os processos de destorroamento, secagem à sombra, homogeneização e quarteamento, peneiramento (malha 4,8 mm) e estocagem em recipientes adequados.

Aos solos tropicais foi adicionado a bentonita Brasgel® nos teores de 0 a 12%, cuja designações são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Denominação das amostras.

Solos Tropicais*	Teor de Benotnia (%)**				
	0	3	6	9	12
Solo Laterítico	SL	SL03	SL06	SL09	SL12
Solo Transicional	ST	ST03	ST06	ST09	ST12
Solo Não Laterítico SL	SN	SN03	SN06	SN09	SN12

*Classificação MCT-M de Vertamatti (1998)

** Percentual em peso seco

2.2 Determinação da Condutividade Hidráulica

A condutividade hidráulica (k) foi determinada através de ensaio em câmara triaxial com

controle de poropressão (base e topo) e tensão confinante. Este ensaio foi escolhido por ser apresentar melhor controle e precisão de percolação em solos argilosos pouco permeáveis, conforme explicita Head (1986). Foi empregada a câmara triaxial do Laboratório de Geotecnia da UFOP (Figura 1).

Os corpos de prova empregados foram moldados na dimensão padrão do molde de compactação na energia Proctor Normal (NBR 7182, 1986), em teores de umidade aproximadamente 2% acima da umidade ótima. Posteriormente os corpos de prova foram reduzidos por desbastamento para dimensões 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura (compatíveis com a célula triaxial).



(a)



(b)

Figura 1 - Equipamento triaxial empregado nos ensaios de condutividade hidráulica (a) e detalhe do medidor de volume (b).

No ensaio foram empregadas tensões confinantes de 20, 40 e 80 kPa (tensões geralmente encontradas em barreiras de fluxo) e uma diferença de pressões entre a base e o topo do corpo de prova de 50 kPa.

Os procedimentos laboratoriais compreenderam as fases de saturação,

adensamento e percolação em câmara triaxial, conforme descrito em Hed (1986).

A saturação foi realizada por contrapressão, ou seja, mantendo-se a drenagem no topo da amostra fechada e aplicando-se pequenos acréscimos de pressão na base e na tensão confinante (tensão confinante sempre superior a pressão na base). Considerou-se saturada a amostra após a obtenção do parâmetro B de Skempton superior a 0,90.

O adensamento foi efetuado nas tensões de 20, 40 e 80 kPa (mantido constante durante a fase de percolação). Para a constatação do adensamento, verificou-se a variação do volume da amostra em função da raiz do tempo.

Na percolação, foi aplicada uma diferença de pressões entre a base e topo do corpo de prova de 50 kPa (gradiente hidráulico equivalente a 50,97 m/m). A condutividade hidráulica foi aferida graficamente por meio da variação do volume de água percolada (ΔV) no intervalo de tempo (t), conforme a equação 1.

$$k = \frac{\Delta V}{t A i} \quad (1)$$

Sendo A a área da seção transversal ao fluxo e i o gradiente hidráulico imposto.

2.3 Modelagem da Condutividade Hidráulica

A condutividade hidráulica foi modelada em função da tensão confinante e de um parâmetro definido como ponto meso plástico. O ponto meso plástico (MP) pode ser definido como o teor de umidade médio entre o limite de liquidez e limite de plasticidade, ou seja, pode ser definido como média aritmética entre o limite de plasticidade (ω_p) e o limite de liquidez (ω_L). Este parâmetro tem por função substituir de forma representativa o índice de plasticidade (IP) em correlações, uma vez que o IP trata-se de uma faixa de umidade e não de um teor de umidade específico.

O ponto mesoplástico foi criado com o objetivo de se adequar a equação de Kozeny-Carman para a aplicação em solos argilosos, conforme apresentado em Morandini e Leite (2015). Além disso, trabalhos como Chapuis e Aubertin (2003) demonstraram que em solos

argilosos, o limite de liquidez possui uma melhor relação com a condutividade hidráulica do que outros parâmetros tradicionalmente empregados, tais como granulometria, índice de vazios e superfície específica.

Assim, as modelagens não foram testadas diretamente em função do teor de bentonita, mas sim em função do acréscimo de plasticidade promovida pela adição de bentonita. Para tal, a condutividade hidráulica foi linearizada graficamente em função da tensão confinante e do ponto mesoplástico. Também foi testado o inverso do ponto mesoplástico, uma vez que foi observado por Chapuis e Aubertin (2003) que o inverso da plasticidade (especificamente o limite de liquidez) parece possuir melhor ajuste aos dados experimentais.

Ao final da linearização, verificou-se que a curva de melhor ajuste foi a exponencial para todas os modelos. Desta forma, obteve-se formulações para a condutividade hidráulica (equações 2, 3 e 4) em função dos parâmetros testados.

$$k = ae^{b\sigma_3} \quad (2)$$

$$k = ae^{bMP} \quad (3)$$

$$k = ae^{b(1/MP)} \quad (4)$$

Onde e é a exponencial neperiana, a e b são valores obtidos nos ajuste, σ_3 é a tensão confinante e MP é o ponto mesoplástico.

A aderência das equações obtidas em relação aos resultados de laboratório foram testados com o coeficiente de determinação de ajuste estatístico linear (R^2), e coeficiente de variação (C_v) dado pela equação 5.

$$C_v = \frac{|k_{eq} - k_{lab}|}{k_{lab}} \quad (5)$$

Onde k_{eq} é a condutividade hidráulica obtida através da equação do ajuste e k_{lab} é a condutividade hidráulica obtida em laboratório.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Sumário das Propriedades Geotécnicas

A Tabela 2 apresenta os principais resultados para as propriedades geotécnicas (limites de Atterberg e granulometria) dos solos tropicais e misturas bentoníticas estudadas. Para maiores detalhes das propriedades avaliadas ver Morandini e Leite (2015).

Tabela 2 – Resumo das propriedades geotécnicas (Morandini e Leite, 2015).

Propriedades	Amostras														
	Solo Laterítico					Solo Transicional					Solo Não Laterítico				
	SL	SL03	SL06	SL09	SL12	ST	ST03	ST06	ST09	ST12	SN	SN03	SN06	SN09	SN12
Limites de Atterberg ^{1,2}															
ω_L (%)	23	42	57	72	87	52	78	96	117	156	56	76	96	117	136
ω_p (%)	12	21	23	26	27	30	28	29	27	28	31	34	37	40	44
IP (%)	11	21	33	47	60	22	50	67	90	128	25	42	59	76	92
MP (%)	17	32	40	49	57	41	53	62	72	92	44	55	67	79	90
Análise granulométrica conjunta ³															
Argila (%)	29	29	30	30	31	41	39	41	41	42	36	38	42	44	46
Silte (%)	16	18	17	20	17	9	10	9	9	8	10	11	11	11	12
Areia Fina (%)	35	34	34	29	28	36	17	17	18	19	23	20	20	19	20
Areia Média (%)	16	15	15	15	17	8	27	26	25	24	18	19	19	17	14
Areia Grossa (%)	3	3	4	5	7	5	6	6	6	6	10	9	6	6	6
Pedregulho (%)	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	3	3	2	3	2

¹ NBR 6459 (1984); ² NBR 7180 (1984); ³ NBR 7181 (1984)

Como pode ser observado na Tabela 2, o solo laterítico (amostras SL) apresenta uma plasticidade maior em relação ao solo transicional e não laterítico (amostras ST e SN respectivamente). Além disso, observa-se que a adição de bentonita aumentou proporcionalmente o limite de liquidez (ω_L), o índice de plasticidade (IP) e o ponto mesoplástico (MP) em todas as amostras.

A granulometria apresentada na Tabela 2 mostra que todos os solos tropicais são areias argilosas, sendo que o teor de argila ligeiramente maior no solo transicional, seguido pelo solo não laterítico e solo laterítico. É possível observar que o teor de argila das amostras não aumentou na mesma proporção da bentonita adicionada. Para 12% de bentonita adicionada aos solos tropicais, houve um acréscimo de 10% de argila no solo transicional, 2% no solo laterítico e 1% no solo transicional.

Este efeito já havia sido constatado por Nogami e Villibor (1985), em que os solos tipicamente lateríticos possuem uma elevada capacidade de juntar suas partículas finas e sesquióxidos, agregando-os.

3.2 Modelagem da Condutividade Hidráulica

A condutividade hidráulica em função da tensão confinante é mostrada na Figura 2. Já a Tabela 3 apresenta a equação obtida nos ajustes lineares para cada amostra, o coeficiente de determinação (R^2), e o coeficiente de variação (C_V).

Na Figura 2 observa-se que existe uma tendência praticamente linear de variação da condutividade hidráulica em função da tensão confinante. Essa tendência é confirmada pelo elevado valor médio de R^2 (0,97) apresentado na Tabela 3. A Figura 2 ainda mostra que o aumento do teor de bentonita nas amostras revela duas características: o aumento da inclinação da reta e a diminuição do afastamento entre as retas. A primeira característica sugere maior susceptibilidade da bentonita à tensão confinante, enquanto à segunda característica pode revelar uma

diminuição da eficiência da bentonita com o aumento do seu teor nas amostras.

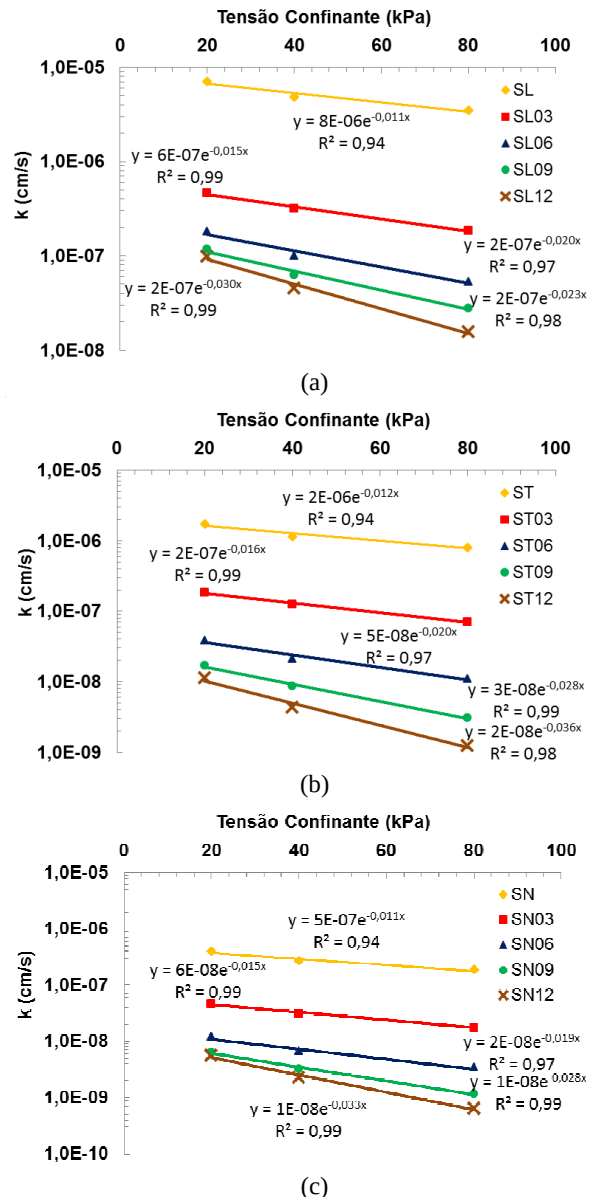


Figura 2 – Variação da condutividade hidráulica em função da tensão confinante para amostras de solo laterítico (a), transicional (b) e não laterítico (c).

Em relação às equações da Tabela 3, observa-se que as constantes obtidas nos ajustes (a e b da equação 2) possuem uma variação relativamente pequena, com $1 \times 10^{-8} < a < 8 \times 10^{-6}$ e $-0,011 < b < -0,033$. Além disso, observa-se que o C_V médio foi de 12,5% em relação aos valores obtidos em laboratório. Este valor de C_V representa que, em média, a condutividade

hidráulica obtida pelo ajuste proposto possui um erro relativo de 12,5% em relação à condutividade hidráulica obtida em laboratório.

Tabela 3 – Equação, R^2 e C_V dos resultados da condutividade hidráulica em função da tensão confinante.

Amostra	Equação	R^2	C_V
SL	$8 \times 10^{-06} e^{-0,011\sigma_3}$	0,94	7,1%
SL03	$6 \times 10^{-07} e^{-0,015\sigma_3}$	0,99	3,4%
SL06	$2 \times 10^{-07} e^{-0,020\sigma_3}$	0,97	20,4%
SL09	$2 \times 10^{-07} e^{-0,023\sigma_3}$	0,98	16,2%
SL12	$2 \times 10^{-07} e^{-0,030\sigma_3}$	0,99	20,4%
ST	$2 \times 10^{-06} e^{-0,012\sigma_3}$	0,94	7,4%
ST03	$2 \times 10^{-07} e^{-0,016\sigma_3}$	0,99	19,2%
ST06	$5 \times 10^{-08} e^{-0,020\sigma_3}$	0,97	9,2%
ST09	$3 \times 10^{-08} e^{-0,028\sigma_3}$	0,99	6,7%
ST12	$2 \times 10^{-08} e^{-0,036\sigma_3}$	0,98	10,5%
SN	$5 \times 10^{-07} e^{-0,011\sigma_3}$	0,94	12,8%
SN03	$6 \times 10^{-08} e^{-0,015\sigma_3}$	0,99	3,9%
SN06	$2 \times 10^{-08} e^{-0,019\sigma_3}$	0,97	31,6%
SN09	$1 \times 10^{-08} e^{-0,028\sigma_3}$	0,99	6,1%
SN12	$1 \times 10^{-08} e^{-0,033\sigma_3}$	0,99	12,8%
Média		0,97	12,5%

As Figuras 3 e 4 mostram os ajustes da condutividade hidráulica em relação ao ponto mesoplástico (Figura 3) e ao inverso do ponto mesoplástico (Figura 4). Já as Tabelas 4 e 5 apresentam o resumo das equações obtidas, o coeficiente de determinação (R^2), e o coeficiente de variação (C_V) obtidos para os ajustes em relação ao ponto mesoplástico e ao seu inverso.

Observa-se na Figura 3 que as amostras dos solos transicionais obtiveram ajustes piores em relação aos ajustes dos solos laterítico e não lateríticos. Esse fato pode ser constatado nos valores de R^2 e C_V da Tabela 4, onde as equações relativas aos solos ST apresentaram menores R^2 e maiores C_V em relação aos solos SL e SN.

De forma geral, os ajustes correlacionando a condutividade hidráulica ao ponto mesoplástico se mostrou apenas razoável em comparação com os ajustes obtidos com o inverso do ponto mesoplástico (Tabela 5). O C_V médio para os ajustes da equação 3 foi de 53,6%, demonstrando que os valores calculados se desviaram dos valores obtidos em laboratório em aproximadamente 50%. Já o C_V médio para os ajustes da equação 4 foi de 22,9%.

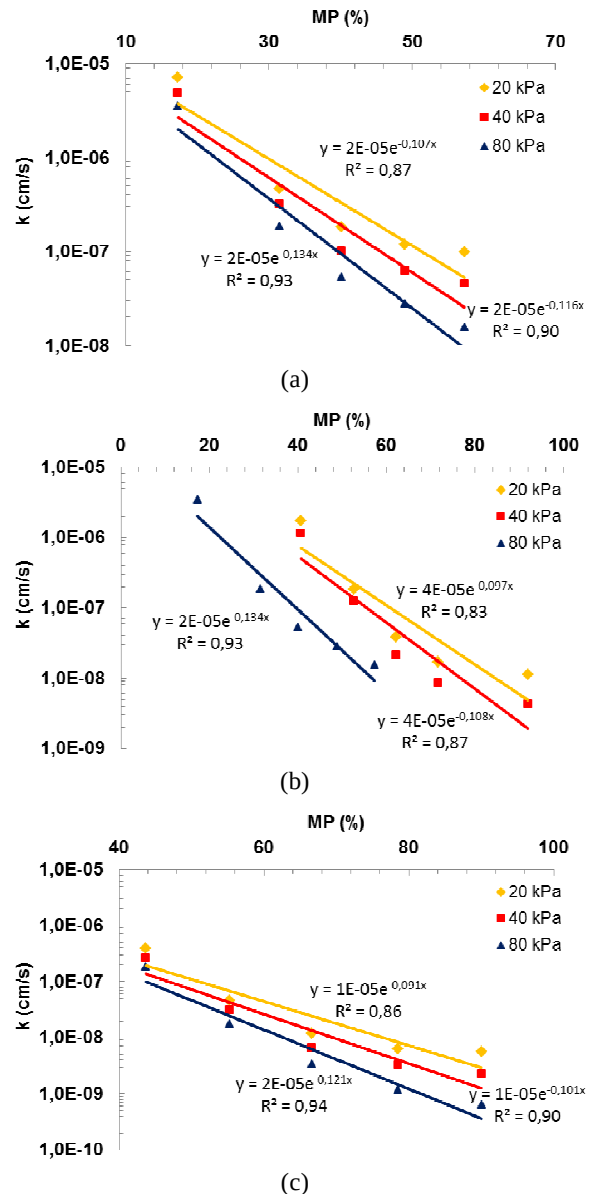


Figura 3 – Variação da condutividade hidráulica em função do ponto mesoplástico para amostras de solo laterítico (a), transicional (b) e não laterítico (c).

Tabela 4 – Equação, R^2 e C_V dos resultados da condutividade hidráulica em função do ponto mesoplástico.

σ_3 (kPa)	Solos	Equação	R^2	C_V
20	SL	$2 \times 10^{-05} e^{-0,107MP}$	0,87	44,3%
40		$2 \times 10^{-05} e^{-0,116MP}$	0,90	40,0%
80		$2 \times 10^{-05} e^{-0,134MP}$	0,93	43,8%
20	ST	$4 \times 10^{-05} e^{-0,097MP}$	0,83	82,0%
40		$4 \times 10^{-05} e^{-0,108MP}$	0,87	56,7%
80		$2 \times 10^{-05} e^{-0,134MP}$	0,93	74,1%

Tabela 4 – Equação, R^2 e C_v dos resultados da condutividade hidráulica em função do ponto mesoplástico (continuação).

20		$1 \times 10^{-05} e^{-0,091 \text{MP}}$	0,86	53,0%
40	SN	$1 \times 10^{-05} e^{-0,101 \text{MP}}$	0,90	39,3%
80		$2 \times 10^{-05} e^{-0,121 \text{MP}}$	0,94	49,2%
Média			0,89	53,6%

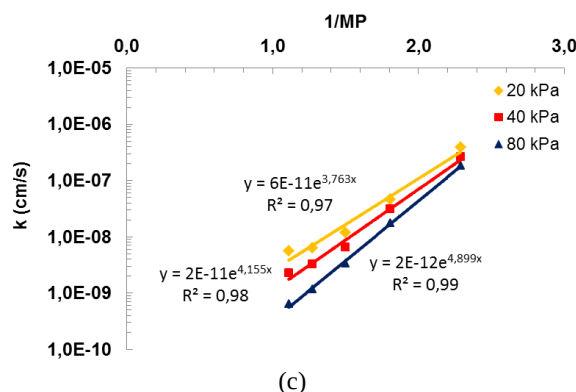
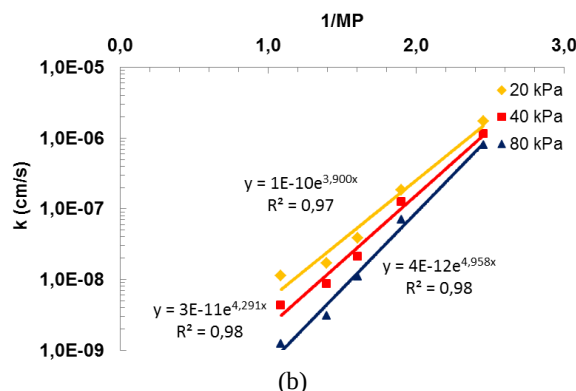
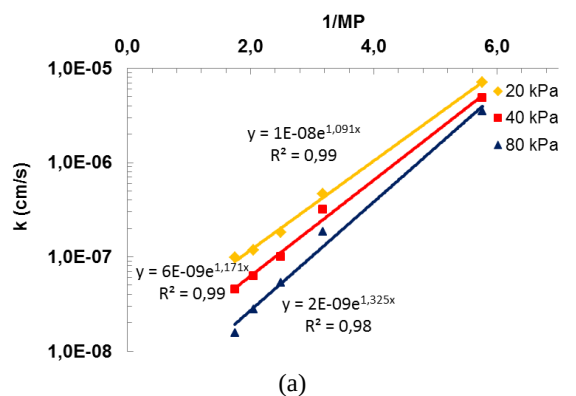


Figura 4 – Variação da condutividade hidráulica em função do inverso do ponto mesoplástico para amostras de solo laterítico (a), transicional (b) e não laterítico (c) (continuação).

Na Tabela 5 também é possível verificar que as constantes dos ajustes (a e b da equação 3) possuem uma pequena variação relativa, com $1 \times 10^{-5} < a < 4 \times 10^{-5}$ e $-0,107 < b < -0,134$. Este

resultado demonstra que as equações deste ajuste podem ser consideradas de maior abrangência em relação aos solos testados.

Tabela 5 – Equação, R^2 e C_v dos resultados da condutividade hidráulica em função do inverso do ponto mesoplástico.

σ_3 (kPa)	Solo	Equação	R^2	C_v
20		$1 \times 10^{-08} e^{1,091(1/\text{MP})}$	0,99	24,7%
40	SL	$6 \times 10^{-09} e^{1,171(1/\text{MP})}$	0,99	19,7%
80		$2 \times 10^{-09} e^{1,325(1/\text{MP})}$	0,98	17,3%
20		$1 \times 10^{-10} e^{3,900(1/\text{MP})}$	0,97	27,6%
40	ST	$3 \times 10^{-11} e^{4,291(1/\text{MP})}$	0,98	31,7%
80		$4 \times 10^{-12} e^{4,958(1/\text{MP})}$	0,98	19,9%
20		$6 \times 10^{-11} e^{3,763(1/\text{MP})}$	0,97	24,2%
40	SN	$2 \times 10^{-11} e^{4,155(1/\text{MP})}$	0,98	24,1%
80		$2 \times 10^{-12} e^{4,899(1/\text{MP})}$	0,99	16,7%
Média			0,98	22,9%

Especificamente em relação aos ajustes com o inverso do ponto mesoplástico (equação 4), é possível observar um bom ajuste linear mostrados na Figura 4, onde os valores de R^2 variaram entre 0,97 e 0,99. Entretanto, que as constantes dos ajustes (a e b da equação 4) possuem uma grande variação relativa, com $2 \times 10^{-12} < a < 1 \times 10^{-08}$ e $1,091 < b < 4,899$, sugerindo que, apesar do bom ajuste, as equações resultantes seriam muito diferentes dependendo da classe de solo tropical estudado.

Por fim, os resultados dos ajustes da equação 4 demonstram uma coerência com os resultados obtidos por Chapuis e Aubertin (2003) (testados para o inverso do limite de liquidez), demonstrando que a condutividade hidráulica seria mais dependente das características inerentes à dupla camada iônica (superfície específica e plasticidade) do que suas características de granulometria e vazios, como rege a geotecnia tradicional.

4 CONCLUSÕES

Pela observação dos ajustes analisados, conclui-se que a previsão da condutividade hidráulica em solos tropicais argilosos como função de parâmetros de plasticidade é plausível, desde que observe-se particularidades dos solos

analisados. Ressalta-se os seguintes pontos principais observados na pesquisa:

- A tensão confinante possui forte influência sobre a condutividade hidráulica, porém de baixa variação em relação nos ajustes, por conseguinte de alta aderência ao modelo proposto;
- Dos ajustes apresentados, o modelo que correlaciona a condutividade hidráulica e o ponto mesoplástico obteve baixos valores de R^2 e altos coeficientes de variação, porém obteve equações com coeficientes mais uniformes, indicando uma maior representatividade independente do solo testado;
- A condutividade hidráulica em função do inverso do ponto mesoplástico obteve ajustes satisfatórios com altos valores de R^2 e baixos coeficientes de variação, porém equações muito distintas, indicando que este modelo deve ser ajustado de forma individual ao solo tropical a ser testado;
- De maneira geral, os resultados dos ajustes aos modelos testados estão em coerência com trabalhos anteriores que correlacionam a condutividade hidráulica e parâmetros de plasticidade.

Por fim, espera-se que os resultados apresentados auxiliem na previsibilidade da condutividade hidráulica em dimensionamentos de barreiras de fluxo compostas por solos tropicais argilosos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais - FAPEMIG, e à bentonit União Nordeste S/A, representada pelo engenheiro Pedro Paulo Furtado Gouveia, que gentilmente doou as amostras de bentonita utilizadas nesta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6457 (1986): *amostras de solo – preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização*.
- NBR 6459 (1984): *determinação do limite de liquidez*. NBR 7180 (1984): *determinação do limite de plasticidade*. NBR 7181 (1984): *análise granulométrica*. NBR 7182 (1986): *ensaio de compactação*. Rio de Janeiro.
- Akbulut, S. e Saglamer, A. (2002). Modification of hydraulic conductivity in granular soils using waste materials. *Waste Management*, 24, 491–499.
- Benson, C. H., Zhai, H., Wang, X. (1994). Estimating hydraulic conductivity of compacted clay liners. *J. Geotechnical engineering*, 120 (2), 373–385.
- Benson, C. H. e Trast, J. M. (1995). Hydraulic conductivity of thirteen compacted clays. *Clays and Clay Minerals*, 43 (6), 669–681.
- Bouazza, A., 2002. Geosynthetic clay liners. *Geotextiles and Geomembranes*, 20, 3–17.
- Bouazza, A.; Stephan, J.; Thaveesak, V. (2007). Investigation of the effects and degree of calcium exchange on the Atterberg limits and swelling of geosynthetic clay liners when subjected to wet-dry cycles. *Geotextiles and Geomembranes*, 25, 170–185.
- Chapuis, R. P. e Aubertin, M. (2003). On the use of the Kozeny-Carman equation to predict the hydraulic conductivity of soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 40, 616–628.
- Cuisinier, O.; Deneele, D.; Masrouri, F. (2009). Shear strength behavior of compacted clayey soils percolated with an alkaline solution. *Engineering Geology*, 108, 177–188.
- Ebina, T.; Minja, R. J. A.; Nagase T.; Onodera, Y.; Chatterjee, A. (2004). Correlation of hydraulic conductivity of clay-sand compacted specimens with clay properties. *Applied Clay Science*, 26, 3–12.
- Head, K. H. (1986). *Manual Of Soil Laboratory Testing: Effective Stress Tests*. John Wiley e Sons, London, v.3.
- Katsumi, T.; Ishimori, H.; Onikata, M.; Fukagawa, R. (2008). Long-term barrier performance of modified bentonite materials against sodium and calcium permeant solutions. *Geotextiles and Geomembranes*, 26, p. 14–30.
- Morandini, T. L. C. and Leite, A. L. (2015). Characterization and Hydraulic Conductivity of some Tropical Soils Samples and Bentonite Mixtures for CCL Purposes. *Engineering Geology*, 196, 251–267.
- Nogami, J. S. e Villibor, D. F. (1985). Uma nova classificação de solos para finalidades rodoviárias. In: *Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais em Engenharia*, Rio de Janeiro, 30–41.
- Roque, A. J. e Didier G. (2006). Calculating hydraulic conductivity of fine-grained soils to leachates using linear expressions. *Engineering Geology*, 85, 147–157.
- Shackelford, C. D.; Benson, C. H.; Katsumi, T.; Edil, T. B.; Lin, L. (2000). Evaluating the hydraulic conductivity of GCLs permeated with non-standard liquids. *Geotextiles and Geomembranes*, 18, 133–161.
- Vertamatti, E. (1998). Novas considerações para classificações de solos tropicais amazônicos de textura fina. In: *Congresso Anual de Pavimentação*, CAP, 23, Florianópolis, 533–564.