

ESTUDOS GEOTÉCNICOS PRELIMINARES DOS MATERIAIS INCONSOLIDADOS QUE CONSTITUEM A BASE DE LAGOAS PARA DISPOSIÇÃO DE ÁGUAS DE LAVAGEM

Lázaro Valentin Zuquette *

Osni José Pejon **

Osmar Sinelli **

RESUMO

São apresentados os resultados de caracterização geotécnica geral das áreas onde estão instaladas lagoas para disposição de águas de lavagens de pequenas indústrias nas circunvizinhanças das cidades de Ribeirão Preto, Serrana e São Simão, no Estado de São Paulo. Após a caracterização geral das áreas foram retiradas amostras indeformadas para ensaios específicos de caracterização geotécnica e para a obtenção das curvas de chegada (**breakthrough curves**) para as soluções de KCl, NaCl, e $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Em relação a solução de KCl foram realizados ensaios para concentrações de 120 a 240 mg/l, gradientes hidráulicos iguais a 2 e 4, para o material em condições naturais e compactada.

INTRODUÇÃO

Nas proximidades das cidades de Ribeirão Preto, Serrana, e São Simão (Estado de São Paulo), figura 01, estão instaladas indústrias de pequeno porte que lançam as águas de lavagens em pequenas lagoas, sem nenhum sistema de proteção que vise diminuir as taxas de infiltração e consequentemente evitar a contaminação das águas subterrâneas.

A maioria das lagoas estão localizadas nas áreas de ocorrência dos materiais de alteração dos arenitos da Formação Botucatu (zonas de recarga), que se caracterizam como a principal fonte de água dos respectivos centros urbanos, assim como, das residências rurais e das agroindústrias.

Devido a importância do aquífero e as características similares das áreas, foi realizado um estudo preliminar para a avaliação dos atributos geotécnicos típicos, assim como

para obtenção de curvas de chegada (**breakthrough curves**) de três contaminantes (K^+ , Na^+ , Cu^{2+}), para os materiais inconsolidados que constituem a zona entre as fontes (lagoas) de poluição e o nível freático. Normalmente encontra-se nas águas de lavagem outros contaminantes como Pb^{2+} , Cd^{2+} , Mg^{2+} .

As lagoas recebem águas de lavagem diariamente, portanto apresentam comportamento de fontes contínuas.

CARACTERÍSTICAS DAS ÁREAS

As diversas áreas analisadas possuem características geotécnicas muito semelhantes, assim como os perfis entre a rocha sã e a superfície apresentam alto grau de homogeneidade, como pode ser observado na sondagem da figura 02.

As áreas estudadas apresentam as seguintes características geotécnicas:

- declividades menores que 2%
- profundidade do nível de água variando entre 10 e 15 metros durante o ano,
- substrato rochoso constituído pelos arenitos da Formação Botucatu, encontra-se a mais que 12 metros de profundidade,

* Faculdade de Filosofia Ciências e Letras de Ribeirão Preto - USP
Departamento de Geologia, Física e Matemática

Figura 01 - Localização das cidades de Ribeirão Preto, Serrana e São Simão

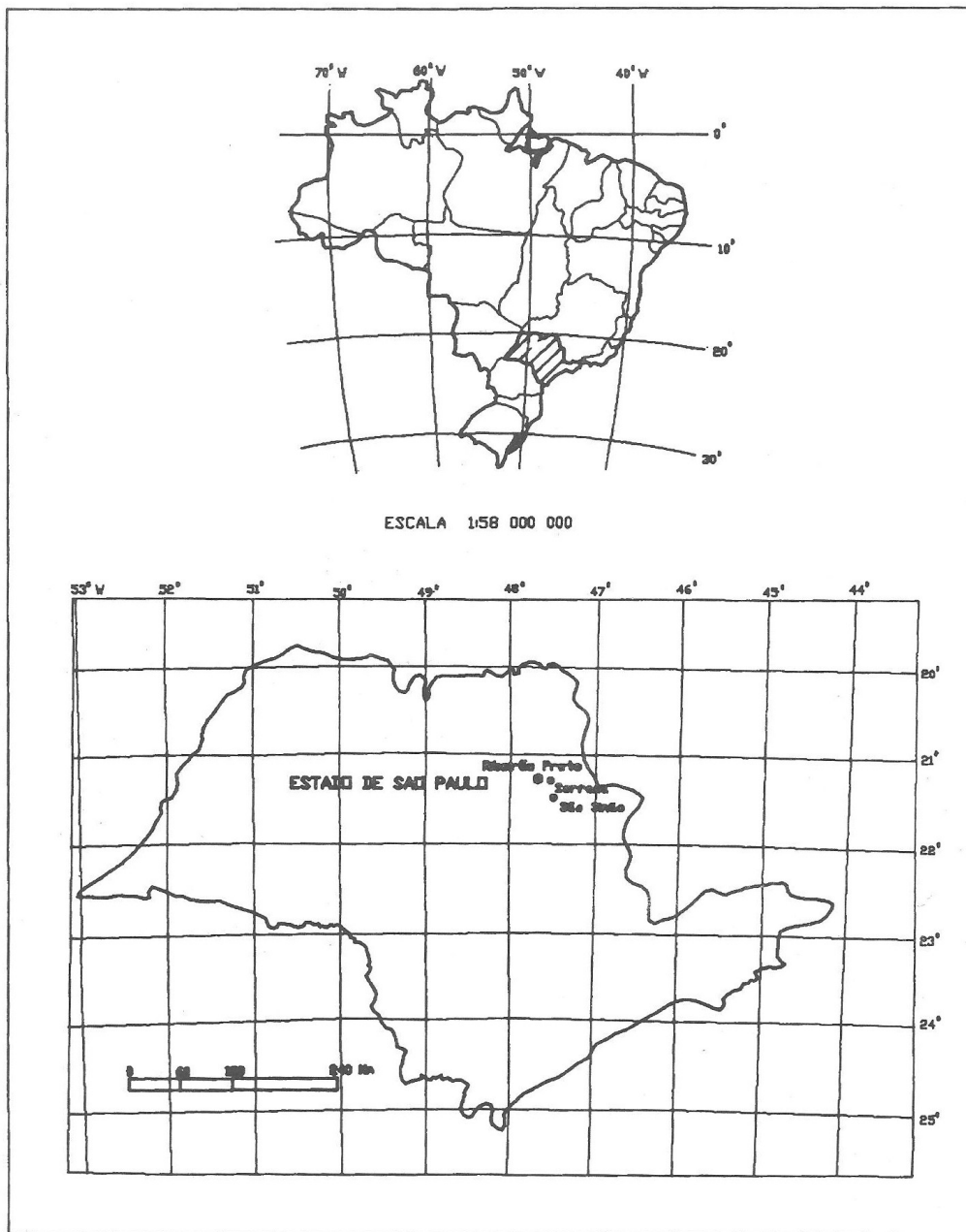


Figura 02 - Sondagem do tipo SPT, típica das áreas constituídas pelos materiais de alteração dos arenitos da Formação Botucatu.

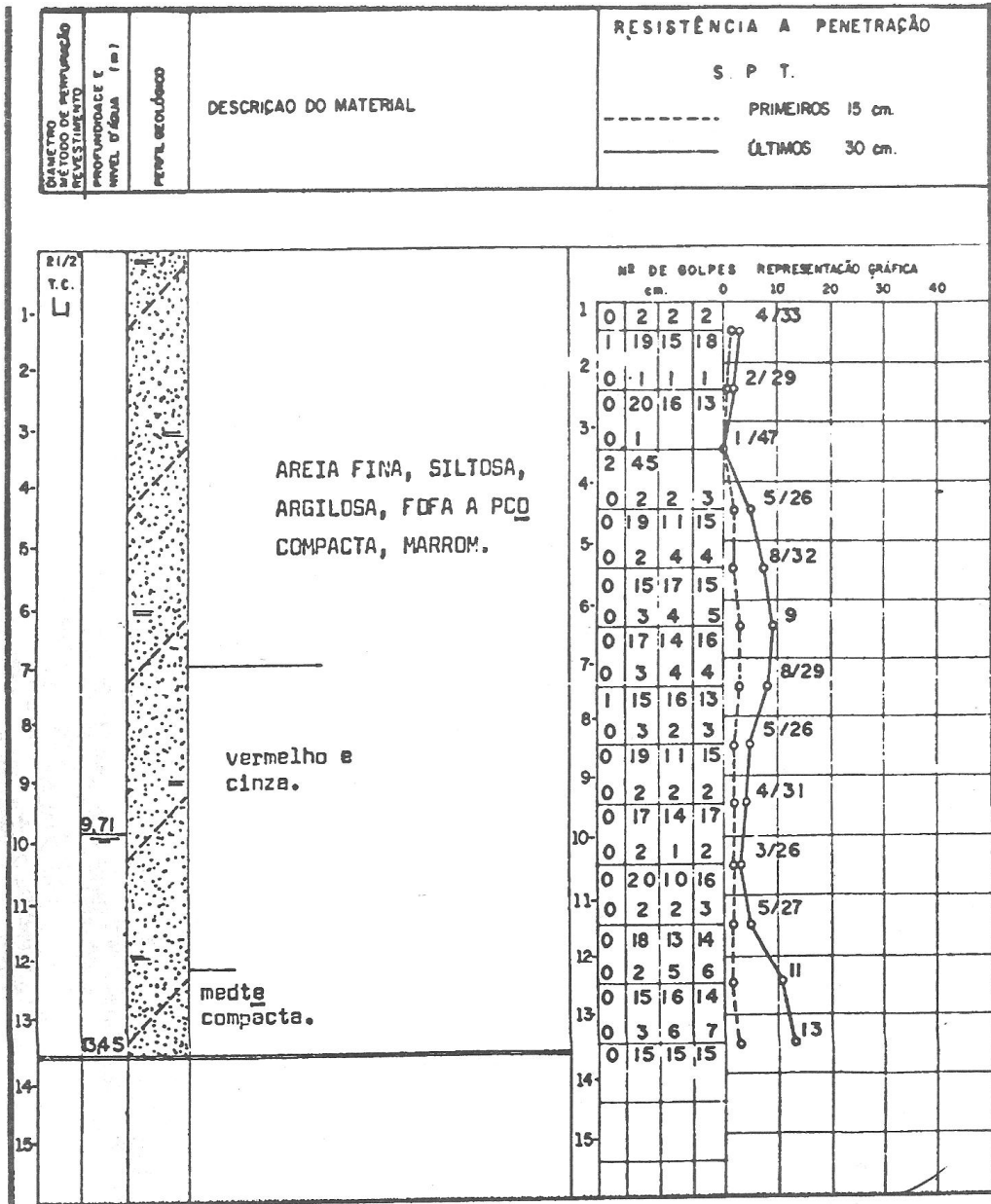


TABELA 01 - CARACTERÍSTICAS DOS CORPOS DE PROVA ENSAIADOS

CARACTERÍSTICAS NUM. VÍTIAS DO ENSAIO	SOLUÇÃO/CONCENTRAÇÃO INICIAL	GRADIENTE HIDRÁULICO	ÍNDICE DE VAZIOS	POROSIDADE %	$e_{d\text{NAT}}$ g/cm ³	$e_{d\text{MAX}}$ g/cm ³	e_s g/cm ³	K_{24} cm/s	VOLUME DE VAZIOS EM AMOSTRA cm ³	FACTOR DE RETARDAMENTO (R)
1	HCl/ 112 mg K ⁺ /l	2	0,65	3,9	1,630		2,700	$8,0 \cdot 10^{-3}$	459,40	5,6
	HCl/ 97,4 mg Cl ⁻ /l	2	0,65	3,9						1,8
2	NaCl/ 120 mg Na ⁺ /l	2	0,74	42,5	1,540		2,680	$1,0 \cdot 10^{-2}$	500,65	2,0
	NaCl/ 184 mg Cl ⁻ /l									1,5
3	CuCl ₂ 2H ₂ O/ 124,7 mg Cu/l	2	0,70	41,2	1,590		2,710	$5,0 \cdot 10^{-3}$	485,3	13,5
	CuCl ₂ 2H ₂ O/ 49,7 mg Cl ⁻ /l									1,0
4	HCl/ 120 mg K ⁺ /l	2	0,71	41,2	1,610		2,750	$4,0 \cdot 10^{-3}$	485,0	3,4
5	HCl/ 240 mg K ⁺ /l	2	0,61	41,2	1,720		2,770	$1,2 \cdot 10^{-3}$	440,0	4,2
6	HCl/ 120 mg K ⁺ /l	2	0,83	44,8	1,440		2,640	$1,1 \cdot 10^{-2}$	534,0	6,6
7	HCl/ 240 mg K ⁺ /l	2	0,80	44,8	1,580		2,700	$1,1 \cdot 10^{-2}$	523,0	2,4
8	HCl/ 117,5 mg K ⁺ /l	4	0,64	39,0	1,660		2,720	$5,0 \cdot 10^{-3}$	459,4	5,4
9	HCl/ 117,5 mg K ⁺ /l	4	0,72	41,9	1,560		2,680	$7,5 \cdot 10^{-3}$	493,1	8,2
10	HCl/ 110,0 mg K ⁺ /l	2	0,42	29,6	-	1,914	2,720	$3,2 \cdot 10^{-5}$	348,7	5,4
11	NaCl/ 110,0 mg K ⁺ /l	2	0,38	27,5	-	1,940	2,680	$1,1 \cdot 10^{-5}$	324,0	6,0

$e_{d\text{NAT}}$ - massa específica aparente seca natural

$e_{d\text{MAX}}$ - massa específica aparente seca máxima (proctor normal)

e_s - massa específica dos sólidos

K_{24} - coeficiente de permeabilidade a 24° C

- os valores de pH do material inconsolidado variam de 6,2 a 6,5,
- os valores dos índices de vazios variam de 0,61 a 0,83 e da porosidade entre 38 a 45%,
- a massa específica natural de 1,44 a 1,72 g/cm³,
- a granulometria é bastante uniforme entre a superfície e a rocha sã, apresentando as seguintes faixas de valores:

areia	74	a	79%
silte	6	a	7%
argila	14	a	20%
- o coeficiente de permeabilidade natural (K_{24}) obtido em laboratório e em campo varia de $1,0 \times 10^{-2}$ a $4,0 \times 10^{-3}$ cm/s
- o coeficiente de permeabilidade do material compactado (energia proctor normal) varia de $1,1$ a $3,2 \times 10^{-5}$ cm/s

TABELA 02 - ANÁLISES DOS MATERIAIS INCONSOLIDADOS EM CONDIÇÕES NATURAIS E APÓS OS ENSAIOS (CORPO DE PROVA NATURAIS E COMPACTADOS), VALORES MÉDIOS OBTIDOS A PARTIR DOS RESULTADOS DE CADA ENSAIO DESENVOLVIDO.

ATRIBUTOS MATERIAIS		mg/100 g de material								
		Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Al ³⁺	(Al ³⁺ + H ⁺)	S ^{XX}	CTC ^{XXX}	pH
ÁREA 1 Ensaio 2,6,7	NATURAL	0,57	0,034	zero	0,019	0,180	1,510	0,623	2,133	5,09
	APÓS O ENSAIO *	0,78	0,049	0,043	0,530	0,144	0,920	1,482	2,322	7,04
	APÓS O ENSAIO (Corpo de prova com- pactado)	0,78	0,056	0,043	0,385	0,036	0,297	1,264	1,561	6,28
ÁREA 2 Ensaio 1,3,4- 5,8,9	NATURAL	0,57	0,034	zero	0,070	0,144	1,270	0,623	1,893	5,41
	APÓS O ENSAIO *	0,78	0,049	0,067	0,640	0,100	0,700	1,356	2,336	7,11
	APÓS O ENSAIO (Corpo de prova com- pactado)	0,78	0,051	0,043	0,450	0,036	0,654	1,324	1,378	6,55

* As análises foram executadas somente quando o volume percolado igualou-se a 10 vezes o volume de vazios da amostra e a relação C/Co maior que 0,8.

XX Soma de bases (Ca²⁺+Mg²⁺+K⁺+Na⁺) XXX Capacidade de Troca de Cátions [S + (Al³⁺+H⁺)]

- a massa específica seca máxima e a umidade ótima estão próximas de 1,95 g/cm³ e 10%, respectivamente.

As onze amostras utilizadas no estudo específico foram obtidas em dois locais selecionados, com base nas características geotécnicas das áreas onde há lagoas, assim como no seguintes aspectos:

- os locais apresentam as condições naturais sem modificações antrópicas significativas,
- nunca foram ocupadas para lançamento de qualquer tipo de rejeito.

192

Devido a homogeneidade do perfil de alteração as amostras foram retiradas a profundidades próximas a 3 metros, em condição indeformada e transportadas para o laboratório protegidas com uma mistura de parafina e fios grossos de algodão.

DESENVOLVIMENTO DOS ENSAIOS

No laboratório as amostras foram moldadas em tubos de PVC com dimensões de 15 cm de altura e 10 cm de diâmetro, para a obtenção das curvas de chegada. Estes tubos

7º Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas

Figura 03 - Relação entre o coeficiente de permeabilidade (K) e o volume de solução percolada (x volume de vazios) para o material em condições naturais.

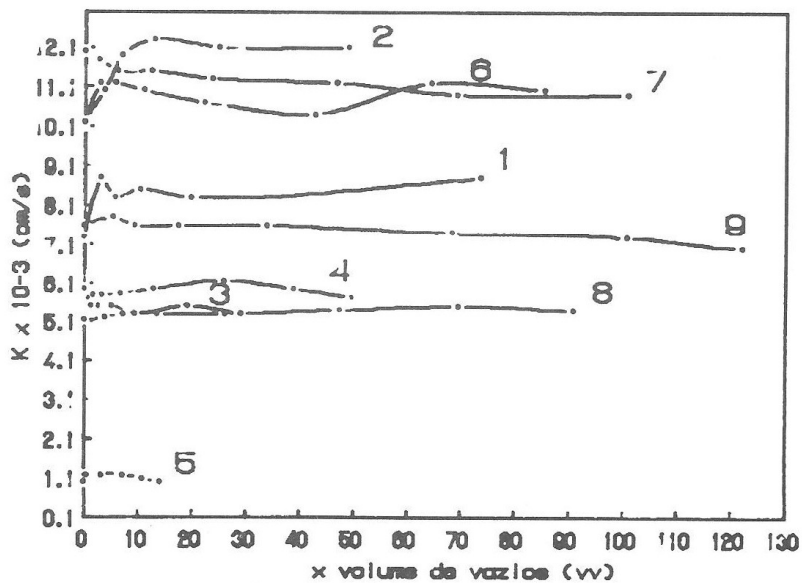


Figura 04 - Relação entre o coeficiente de permeabilidade (K) e o volume de solução percolada (x volume de vazios) para o material em condição compactada.

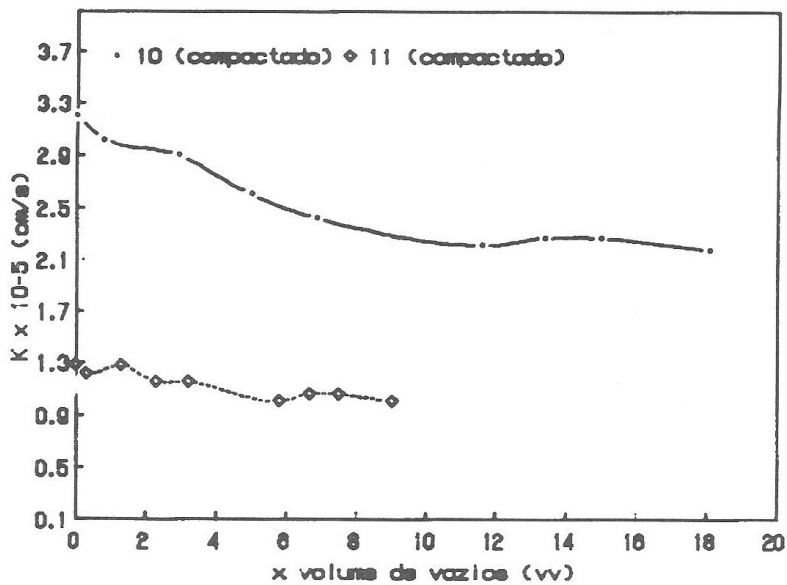


Figura 05 - Relação entre os valores de pH e o volume de solução percolada (x volume de vazios) para o material em condições naturais.

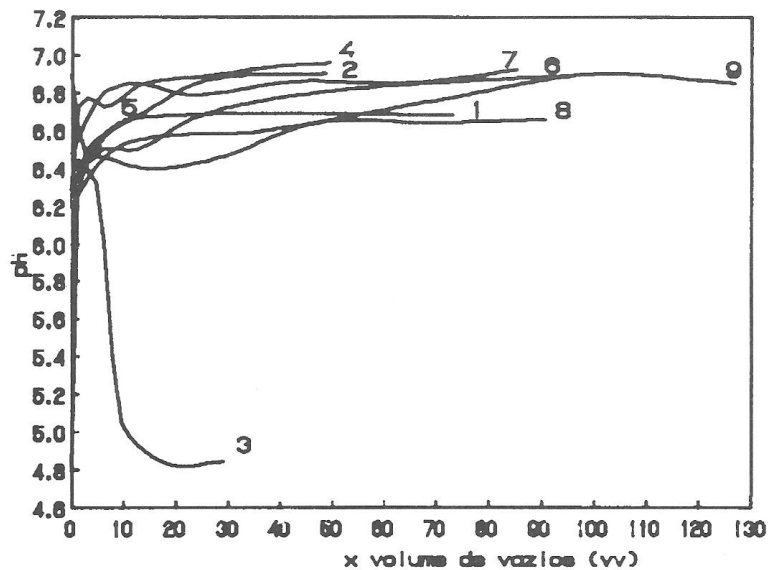


Figura 06 - Relação entre os valores de pH e o volume de solução percolada (x volume de vazios) para o material em condições compactadas.

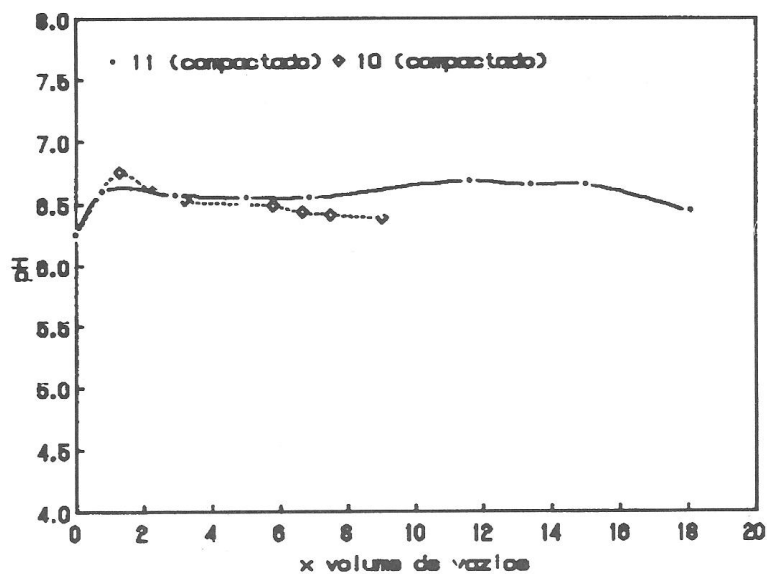


Figura 07 - Curva de chegada - transporte unidimensional - solução de KCl - ensaio número 1.

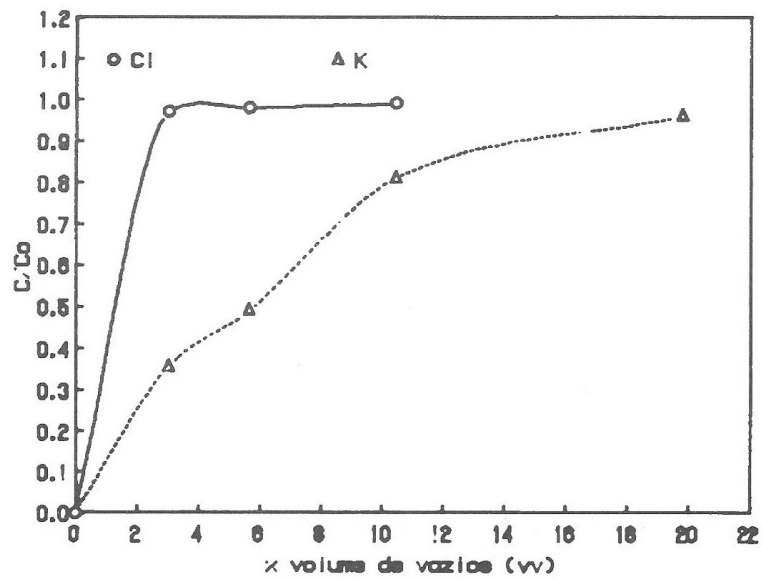


Figura 08 - Curva de chegada - transporte unidimensional - solução de NaCl - ensaio número 2.

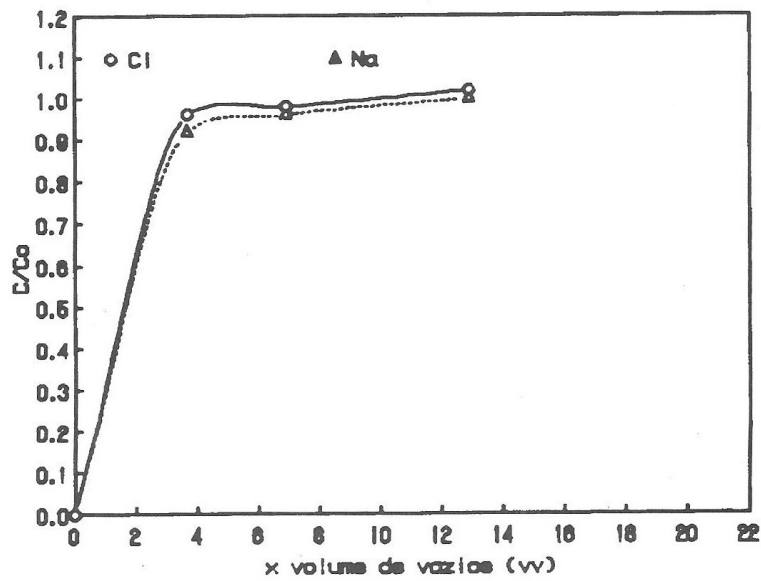


Figura 09 - Curva de chegada - transporte unidimensional - solução de $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ - ensaio numero 3.

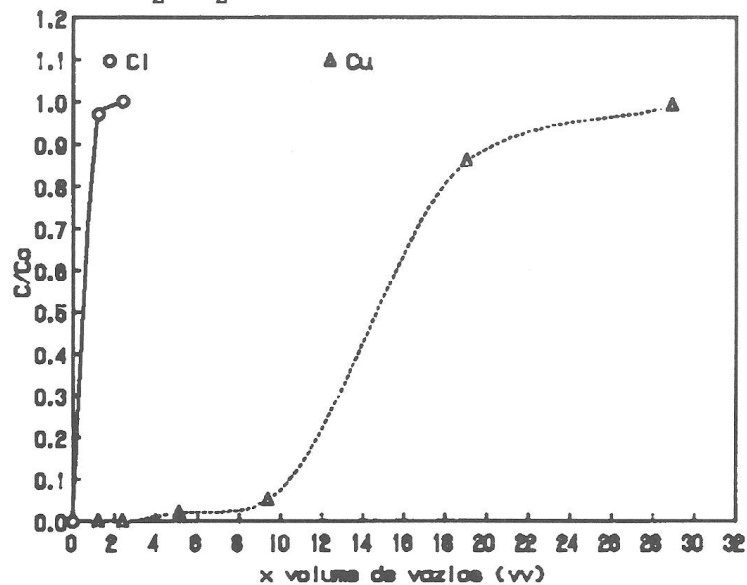


Figura 10 - Curva de chegada - transporte unidimensional - solução de KCl - ensaios número: 4,5,6,7,8 e 9

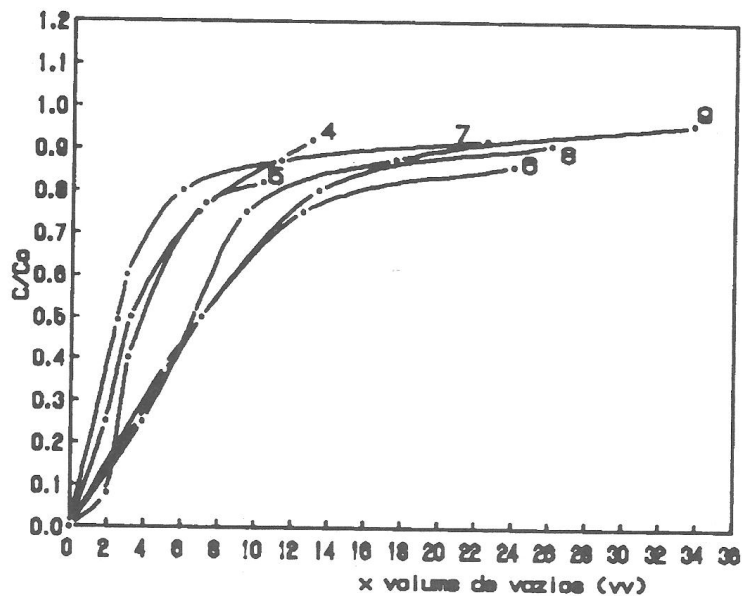
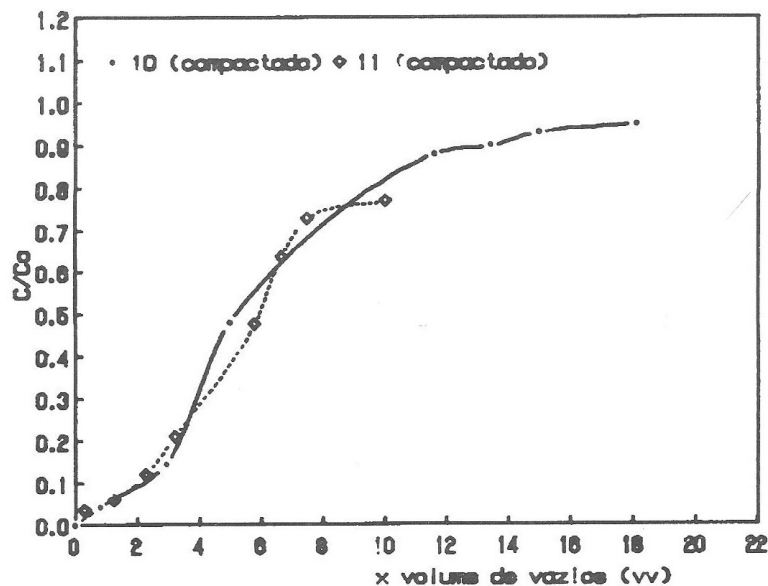


Figura 11 - Curva de chegada - transporte unidimensional - solução de KCl, material compactado - ensaios 10 e 11.



estavam acoplados a dois dispositivos, sendo: um superior para depósito da solução e um inferior para coleta da solução que percola através do corpo de prova.

Paralelamente aos ensaios para obtenção das curvas de chegada foram realizados estudos para obtenção dos parâmetros geotécnicos, como o índice de vazios (e_v), a massa específica dos sólidos, a massa específica aparente seca natural, a massa específica aparente seca máxima e o coeficiente de permeabilidade a temperatura de 24°C (K_{24}), que estão apresentados na tabela 01.

As soluções de KCl, NaCl e $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ foram percoladas pelo corpo de prova quando o coeficiente de permeabilidade estava estabilizado a mais de 48 horas e obedecendo as condições de contorno, conforme proposto por NOBRE (1987), OGATA (1970) e CLEARY (1991):

- temperatura mantida a 24°C durante todo o ensaio
- concentrações de 120 a 240 mg/l (C_0)
- gradientes hidráulicos iguais a 2 e 4
- concentração da solução percolada, após um tempo (C)

$$\begin{aligned} C(x,0) &= 0 & x > 0 \\ C(0,t) &= C_0 & t > 0 \\ C(y,t) &= 0 & t > 0 \end{aligned}$$

Os ensaios para obtenção das curvas de chegada foram conduzidos até que o volume de solução percolada fosse superior a 10 vezes o volume de vazios do corpo de prova. Somente após esta condição os ensaios foram encerrados e os materiais inconsolidados analisados em alguns aspectos químicos, como o pH, a capacidade de troca de cátions (CTC) e a soma das bases (S).

O fator de retardamento (R) foi obtido por meio da relação considerada por ROWE et al. (1985), CLEARY (1991), NOBRE (1987) e CAMPOS & ELBACHÁ (1991):

$$R = V (C = 0,5 C_0) / vv,$$

onde

$$\begin{aligned} R &= \text{fator de retardamento} \\ V &= \text{Volume de solução para relação } C/C_0 = 0,5 \\ vv &= \text{volume de vazios} \end{aligned}$$

APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A características geotécnicas e químicas dos materiais inconsolidados, obtidas por meio dos ensaios estão apresentadas nas tabelas 01 e 02, respectivamente.

Os valores obtidos para os corpos de prova estudados são compatíveis com as faixas de valores típicas das áreas com lagoas. O coeficiente de permeabilidade foi medido durante todos os estágios dos ensaios e os resultados estão apresentados nas figuras 03 e 04, para os materiais em estado natural e compactado, respectivamente. Observando-se as figuras 03 e 04, pode-se verificar que o coeficiente de permeabilidade não sofreu variações consideráveis em nenhum dos ensaios.

Os valores de pH da solução para a condição inicial e de cada estágio dos ensaios estão representados na figura 05, para os materiais em condição natural e na figura 06, para os compactados. Verifica-se somente a solução de $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ apresenta variações consideráveis entre o início e o final do ensaio.

As curvas de chegada (**breakthrough curves**) para as soluções de KCl, NaCl e $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ estão representadas nas figuras 07, 08 e 09, respectivamente. Observa-se que os valores do fator de retardamento obtidos por meio da relação proposta por ROWE et al. (1985) e NOBRE (1987) são diferentes. Com base nestas condições foram realizados ensaios com soluções de KCl em concentrações e gradientes hidráulicos diferentes (figura 10) e para o material compactado com a energia do proctor normal (figura 11).

Analisando-se as figuras 10 e 11 obtém-se valores do fator de retardamento que variam de 2,4 a 8,2.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apesar da grande homogeneidade do material, em termos das características geotécnicas, nas diferentes amostras, o valor do fator de retardamento apresentou uma pequena variação para a solução de KCl, quando os níveis de concentração, do gradiente hidráulico e do coeficiente de permeabilidade foram modificados.

As diferenças entre as curvas de chegada para as soluções, em condições semelhantes de ensaio, foram as esperadas, porém esperava-se que a curva da solução de $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ apresentasse um gradiente contínuo e menos acentuado.

Os estudos de porosimetria antes e após o ensaio podem trazer contribuições, visto que não se conhece a curva de distribuição dos vazios.

Os estudos para a obtenção do fator de retardamento por meio das isotermas de sorção estão em andamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CLEARY, R.W. - 1991 - Qualidade da água subterrânea. In: Coleção ABRH número 3. Hidrologia Ambiental. Edusp, pp 211-296, São Paulo.
- NOBRE, M.M.M. -1987- Estudo experimental sobre a migração de poluentes em solos argilosos. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, 193 p.
- OGATA, A. - 1970 - Theory of dispersion in a granular medium. U.S. Geol. Surv. Proc. Paper, 411-I.
- ROWER, R.K.; CALRS, C.J.; BRROKER, J.R.; CROOKS, V.R. - 1985 - Pollutant migration through clay soils. Proc. of the XI ICSMFE, S. Francisco, vol. 3, pp 1293-1298.