

MARTIM PORTUGAL V. FERREIRA  
Coordenação

# A Geologia de Engenharia e os Recursos Geológicos

VOL. 1 • GEOLOGIA DE ENGENHARIA



Coimbra • Imprensa da Universidade

## CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA AOS LIXIVIADOS CORRELACIONÁVEL COM PROPRIEDADES FÍSICAS DE SOLOS FINOS PORTUGUESES. SEU INTERESSE NA CONSTRUÇÃO DE BARREIRAS DE CONFINAMENTO

A. J. ROQUE <sup>1</sup>

**PALAVRAS CHAVE:** aterros de resíduos, barreiras de confinamento, correlação linear, condutividade hidráulica, propriedades geotécnicas, solos finos portugueses.

**KEY WORDS:** waste disposals, clay liners, correlation, hydraulic conductivity, geotechnical properties, Portuguese fine-grained soils.

### RESUMO

Neste trabalho propõe-se a utilização de equações lineares obtidas a partir da correlação entre a condutividade hidráulica  $k$  e as propriedades físicas de solos finos portugueses para seleccionar, numa fase prévia dos estudos, os solos potencialmente mais adequados para construir as barreiras de confinamento. Sugere-se a utilização destas equações lineares em alternativa aos critérios semi-quantitativos actualmente disponíveis pelas razões principais seguintes: a) os valores de  $k$  utilizados na obtenção das equações lineares foram calculados a partir de ensaios de permeabilidade efectuados sobre provetes percolados directamente com água desmineralizada, provetes percolados com lixiviado após percolação inicial com água desmineralizada e provetes percolados directamente com lixiviado; b) os ensaios de permeabilidade foram realizados com solos cobrindo uma gama alargada de propriedades geotécnicas; c) a avaliação quantitativa de  $k$ , ainda que aproximada, é preferível à sua avaliação semi-quantitativa.

<sup>1</sup> Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Avenida do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa.

**ABSTRACT: Correlation between the hydraulic conductivity of leachates and the physical properties of fine grained soils: usefulness for setting confining barriers**

In this article, linear regression expressions obtained from correlations between hydraulic conductivity and some physical properties of Portuguese fine-grained soils are proposed for selecting appropriate soil properties that are likely to result in low hydraulic conductivity. These linear regression expressions are suggested as useful alternatives to guidelines in current use for the following main reasons: a) the hydraulic conductivity values were obtained in permeability tests carried out on specimens percolated directly with deionised water, with acid leachate after percolation with deionised water, and directly with acid leachate; b) the permeability tests were performed on natural fine-grained soils covering a wide range of mineralogical, physical and chemical properties. Based on the results obtained in this study, it is supposed that the linear regression expressions may be used in a satisfactory way in a large number of cases during the preliminary phase of the landfill study.

## 1. INTRODUÇÃO

O desempenho hidráulico das barreiras de confinamento (basal, taludes e cobertura final) presentes nos aterros de resíduos joga um papel fundamental no controlo do transporte dos poluentes a partir destas infra-estruturas para o meio ambiente. A sua importância no caudal de lixiviado que se pode infiltrar através das barreiras minerais é ilustrada pelos valores que se apresentam em seguida: a) se  $k = 1 \times 10^{-8}$  m/s, o caudal de lixiviado por hectare (ha) e por dia (d) é  $10 \text{ m}^3$ ; b) se  $k = 1 \times 10^{-9}$  m/s o caudal de lixiviado é  $1 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{d}$ ; c) se  $k = 1 \times 10^{-10}$  m/s o caudal de lixiviado é  $0,1 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{d}$  (admite-se gradiente hidráulico unitário).

Os solos finos ou argilosos são os materiais naturais mais indicados para construir as barreiras de confinamento e proteger os solos e os recursos hídricos. O procedimento mais utilizado na avaliação do desempenho hidráulico e da compatibilidade dos solos aos lixiviados é a realização de ensaios de permeabilidade. No entanto, em solos pouco permeáveis estes ensaios são complexos, longos e necessitam de recursos financeiros não desprezáveis.

É desejável, por isso, que na fase preliminar dos projectos de aterros de resíduos, existam procedimentos simples, rápidos, pouco dispendiosos e suficientemente fiáveis que possibilitem a selecção de solos potencialmente adequados para a construção das barreiras minerais.

Vários autores, fruto da experiência entretanto adquirida, estimaram as gamas de variação mais indicadas para as propriedades índice dos solos (granulometria e plasticidade) tendo em vista a construção de barreiras minerais de permeabilidade

reduzida ( $k \leq 1 \times 10^{-9}$  m/s). A principal desvantagem dos critérios propostos na bibliografia resulta de não permitirem estimar um valor potencial para a condutividade hidráulica do material, mas apenas permitirem indicar semi-quantitativamente se a condutividade hidráulica é potencialmente superior ou inferior a  $1 \times 10^{-9}$  m/s (requisito exigido pelo Decreto-Lei n.º 152/2002 para os aterros de resíduos não perigosos e perigosos).

Um vasto programa experimental desenvolvido no LNEC (ROQUE, 2001) permitiu retirar importantes conclusões e pode contribuir para ultrapassar a limitação dos critérios semi-quantitativos. Face aos resultados obtidos, propõe-se que a avaliação preliminar da condutividade hidráulica dos solos finos ou argilosos se efectue a partir de equações lineares que resultaram da correlação entre a condutividade hidráulica  $k$  e a percentagem de finos dos solos estudados. As principais vantagens da sua utilização resultam: a) de os valores de  $k$  utilizados na obtenção das equações lineares serem obtidos a partir de ensaios de permeabilidade efectuados sobre provetes de solos finos naturais percolados directamente com água desmineralizada, percolados com lixiviado após percolação inicial com água desmineralizada e percolados directamente com lixiviado; b) de os ensaios de permeabilidade serem realizados com solos cobrindo uma gama alargada de propriedades geotécnicas; c) de uma avaliação quantitativa de  $k$ , ainda que aproximada, ser preferível a uma avaliação semi-quantitativa.

## 2. SELECCÃO DE SOLOS COM BASE EM CRITÉRIOS SEMI-QUANTITATIVOS

Nesta secção apresentam-se os intervalos de variação recomendados por diferentes autores para as propriedades índice dos solos potencialmente favoráveis à construção de barreiras de confinamento com  $k \leq 1 \times 10^{-9}$  m/s.

EKLUND (1985), DANIEL (1990), SHAKOOR e COOK (1990), BENSON *et al.* (1994) e DANIEL e KOERNER (1995) indicaram as percentagens mínimas ou máximas, ou ambas, mais adequadas para a composição granulométrica dos solos.

BENSON *et al.* (1994) colocaram em evidência a influência da percentagem da fracção argilosa na condutividade hidráulica dos solos. De acordo com a relação entre a fracção argilosa e  $k$  apresentada na figura 1a, a percentagem de fracção argilosa nos solos deve ser superior a 10-20% para permitir a construção de barreiras minerais com  $k \leq 1 \times 10^{-9}$  m/s. EKLUND (1985) mencionou, com base num estudo realizado em 1980 por MATRECON, que a percentagem de fracção argilosa deve ser superior a 25-28%.

A percentagem de elementos finos (fracção argilosa e silte) é igualmente um indicador da possibilidade, ou não, de se construírem barreiras de confinamento com  $k \leq 1 \times 10^{-9}$  m/s.

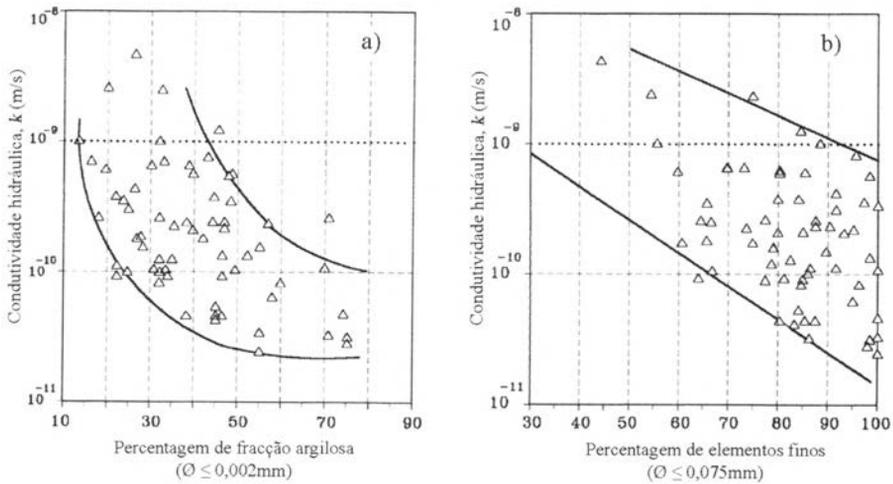


Fig. 1 – Relação entre a condutividade hidráulica e: a) a percentagem de fracção argilosa; b) a percentagem de elementos finos (BENSON *et al.* 1994).

BENSON *et al.* (1994) observaram que uma percentagem de elementos finos superior a 50% pode ser suficiente para a construção de barreiras com  $k \leq 1 \times 10^{-9}$  m/s (fig. 1b). Por outro lado, DANIEL (1990) recomendou uma percentagem de elementos finos de pelo menos 30%.

SHELLEY e DANIEL (1993) colocaram em evidência a influência da percentagem de seixo na condutividade hidráulica da caulinite e de estéreis de mina. Foi observado que  $k < 1 \times 10^{-9}$  m/s quando as misturas seixo-caulinite e seixo-estéreis de mina, compactadas para diferentes teores em água, eram constituídas por uma percentagem de seixo inferior a cerca de 60%. Com percentagens de seixo superiores a 60% a condutividade hidráulica aumentava significativamente.

SHAKOOR e COOK (1990) compactaram misturas de solo pouco plástico com seixo, variando a percentagem de seixo e os teores em água (ligeiramente inferiores ao teor em água óptimo Proctor normal). Os resultados indicaram um ligeiro aumento de  $k$  quando a percentagem de seixo era inferior a 50% e um aumento significativo para percentagens maiores.

As investigações de SHELLEY e DANIEL (1993) e SHAKOOR e COOK (1990) sugerem que para percentagens de seixo inferiores a cerca de 50%, os elementos finos preenchem os vazios entre os seixos e controlam a condutividade hidráulica da mistura.

Outros autores (MATRECON, 1980; NRA, 1989; MURRAY *et al.*, 1992; DANIEL, 1990; BENSON *et al.*, 1994; DANIEL e KOERNER, 1995) procuraram definir os intervalos de variação dos limites de Atterberg dos solos mais indicados para a construção de barreiras de confinamento com  $k \leq 1 \times 10^{-9}$  m/s.

LAMBE (1954) estudou a condutividade hidráulica de diferentes argilas e constatou a existência de uma relação directa entre  $k$  e a plasticidade. Os valores obtidos mostraram que para um índice de vazios determinado, a montmorilonite sódica tinha a condutividade hidráulica mais baixa, seguida sucessivamente da montmorilonite cálcica, da atapulgite e da caulinite. A plasticidade destas argilas diminui segundo a ordem seguinte: montmorilonite sódica > montmorilonite cálcica > atapulgite > caulinite. MESRI e OLSON (1971) determinaram a condutividade hidráulica de três argilas diferentes e obtiveram a sequência seguinte: caulinite ( $k = 1,5 \times 10^{-8}$  m/s) > ilite ( $k = 2,0 \times 10^{-11}$  m/s) > montmorilonite ( $k = 1,0 \times 10^{-13}$  m/s).

DANIEL (1990) sugeriu que os solos cujo índice de plasticidade  $I_p$  é superior ou igual a 10% permitem, em princípio, a construção de barreiras de confinamento com  $k \leq 1 \times 10^{-9}$  m/s. Este autor referiu, todavia, que alguns solos com  $I_p < 10\%$  também permitiram construir barreiras com  $k \leq 1 \times 10^{-9}$  m/s. Citou, para o efeito, ALBRECHT e CARTWRIGHT (1989) que obtiveram valores de  $k$  *in situ* iguais a  $8 \times 10^{-10}$  m/s com um solo de  $I_p = 7\%$ .

BENSON *et al.* (1994) colocaram em evidência as variações de  $k$  em função de  $w_L$  e  $I_p$ . A figura 2 mostra que  $k$  tende a diminuir quando  $w_L$  e  $I_p$  aumentam. Em particular,  $k$  diminui de uma forma significativa quando  $w_L$  aumenta de 20 para 50%, evidenciando em seguida um valor praticamente constante (fig. 2a). Também se observa que  $k$  diminui fortemente quando  $I_p$  aumenta de 10 para 30%. Para valores de  $I_p$  superiores a cerca de 30% o valor de  $k$  é praticamente constante (fig. 2b). Segundo estes autores, os solos com  $w_L \geq 20\%$  e  $I_p \geq 7\%$  são potencialmente adequados para construir barreiras de confinamento.

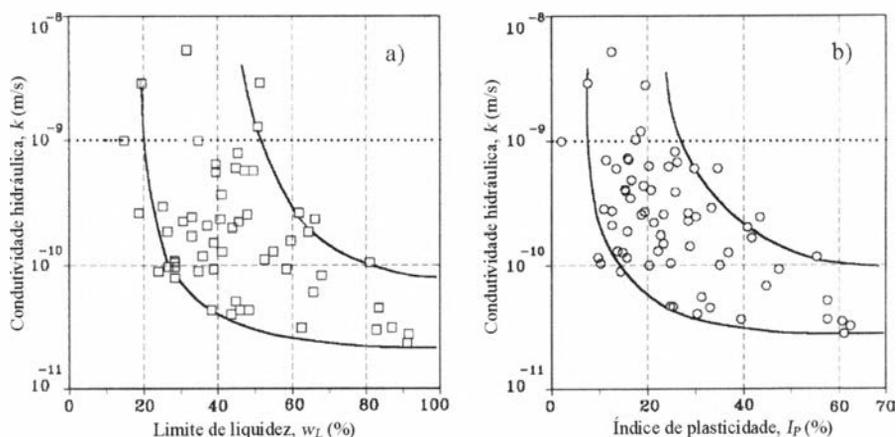


Fig. 2 – Relação entre a condutividade hidráulica e: a) o limite de liquidez; b) o índice de plasticidade (BENSON *et al.* 1994).

DANIEL e KOERNER (1995) concluíram que os solos cujo  $7-10\% > I_p > 30-40\%$  não são indicados para a construção de barreiras de confinamento. Os solos com  $I_p < 7-10\%$  contêm percentagens de fracção argilosa e de minerais argilosos pouco importantes e são pouco plásticos. A contribuição da compactação de camadas de solos desta natureza torna-se marginal para a construção de dispositivos de confinamento com  $k \leq 1 \times 10^{-9}$  m/s. Os solos com  $I_p > 30-40\%$  têm tendência para formar torrões rígidos quando estão secos e torrões moles quando estão húmidos, o que se traduz em problemas de trabalhabilidade nas operações de terraplanagem.

Segundo MATRECON (1980), os solos mais indicados para a construção de barreiras de confinamento apresentam  $35\% < w_L < 60\%$  e  $15\% < I_p < 30\%$ .

NRA (1989) publicou igualmente alguns princípios gerais relativos à pré-selecção de solos com base nos valores dos limites de Atterberg. Para este organismo,  $w_L$  deve ser inferior a 90% e  $I_p$  inferior a 65%. Neste estudo, nenhuma referência aos valores mínimos de  $w_L$  e de  $I_p$  foram feitos. Contudo, MURRAY *et al.* (1992) introduziram na classificação desenvolvida por NRA o conceito de valor mínimo para  $I_p$ , recomendando que o seu valor deve ser superior a 12%. Observa-se, por um lado, que o valor máximo de  $I_p$  indicado por NRA é substancialmente superior aos recomendados por MATRECON (1980) e DANIEL e KOERNER (1995) e que, por outro, o valor máximo de  $w_L$  indicado por NRA é substancialmente superior ao recomendado por MATRECON (1980). Ao inverso, constata-se que os intervalos de variação de  $I_p$  recomendados por MATRECON (1980) e DANIEL e KOERNER (1995) são praticamente idênticos.

O Quadro I mostra uma síntese dos requisitos recolhidos na bibliografia para as propriedades índice dos solos por forma a pré-seleccionar os solos potencialmente adequados para a construção de barreiras de confinamento.

Quadro I – Critérios semiquantitativos para a selecção preliminar de solos potencialmente adequados para a construção de barreiras de confinamento.

Parâmetro	Critérios semi-quantitativos						
	1	2	3	4	5	6	7
Argila (%)	>25	—	>25 <sup>(c)</sup>	—	—	>20	>15
Finos (%)	—	—	>30-50	>20	>30	—	>30
Seixos (%)	—	—	—	<10	<10-20	<10 <sup>(d)</sup>	—
$w_L$ (%)	>35 e <60	<90	>30	—	—	—	>20
$I_p$ (%)	>15 e <30	>12 <sup>(b)</sup> e <65	>15	>10e<30-40	>7-10e<30-40	>10e<30-40	>7
$A_c^{(a)}$	—	—	—	—	—	—	>0,3

1 - MATRECON (1980); 2 - NRA (1989); 3 - GORDON *et al.* (1990); 4 - MITCHELL e JABER (1990); 5 - DANIEL (1990), DANIEL e KOERNER (1995); 6 - MONJOIE *et al.* (1992); 7 - BENSON *et al.* (1994).

(a)-Coeficiente de actividade de Skempton; (b)-Adicionado por MURRAY *et al.* (1992); (c)- $\phi < 0,005$  mm; (d)- $\phi < 2,5$ mm.

### 3. SELECÇÃO DE SOLOS COM BASE EM CRITÉRIOS QUANTITATIVOS

#### 3.1. BASES DO ESTUDO

O estudo da correlação entre a condutividade hidráulica e as propriedades geotécnicas de solos finos portugueses que se apresenta neste trabalho foi efectuado com base nos resultados obtidos num vasto programa experimental. O principal objectivo deste programa era contribuir para um melhor conhecimento do desempenho hidro-geoquímico dos solos (transporte por advecção, transporte por difusão e capacidade de retenção dos poluentes) considerados habitualmente como potencialmente adequados para a construção das barreiras de confinamento.

Visando a obtenção de uma amostragem alargada do desempenho hidro-geoquímico dos solos, procedeu-se:

- a) à preparação de lixiviados multiespécies em laboratório, um ácido (pH = 4,6) e o outro neutro a ligeiramente alcalino (pH = 7,2), com composições e concentrações químicas (condutividade eléctrica CE  $\cong$  14 mS/cm) tanto quanto possível representativas das observadas nos lixiviados reais;
- b) à recolha de trinta amostras em diferentes formações argilosas portuguesas e ao estudo das suas características geotécnicas;
- c) à selecção de amostras representativas da população amostrada;
- d) à avaliação da integridade dos solos a longo prazo.

O estudo do desempenho hidro-geoquímico foi efectuado com sete amostras representativas da população recolhida, tendo a sua selecção sido efectuada a partir do tratamento estatístico dos resultados obtidos na caracterização geotécnica dos materiais pelo método da Análise em Componentes Principais.

No que se refere ao estudo do desempenho hidráulico e da condutividade hidráulica, em todas as amostras seleccionadas, procedeu-se à compactação de seis provetes: a) dois com teor em água 2% inferior ao teor em água óptimo Proctor normal ( $w_{opt-2\%}$ ); b) dois com teor em água óptimo Proctor normal ( $w_{opt}$ ); c) dois com teor em água 2% superior ao teor em água óptimo Proctor normal ( $w_{OPN+2\%}$ ). Os três provetes de um primeiro conjunto foram percolados sequencialmente com água desmineralizada e lixiviado ácido (ou seja, os provetes foram percolados com lixiviado ácido após percolação inicial com água desmineralizada) e os três provetes de um segundo conjunto foram percolados sequencialmente com lixiviado ácido e lixiviado neutro a ligeiramente alcalino (ou seja, os provetes foram percolados com lixiviado neutro a ligeiramente alcalino após percolação inicial com lixiviado ácido).

Foi projectado pelo autor um permeâmetro, habitualmente designado por permeâmetro de parede rígida, para avaliar o desempenho hidráulico dos materiais. Ainda que as metodologias utilizadas nos ensaios sejam idênticas às dos ensaios clássicos de permeabilidade, existem algumas diferenças importantes, nomeada-

mente a necessidade de prolongar os ensaios até ao estabelecimento do regime químico permanente.

As condutividades hidráulicas médias  $k_{Ad}$  (percolação com água desmineralizada),  $k_{La/Ad}$  (percolação com lixiviado ácido, no mesmo provete previamente percolado com água desmineralizada),  $k_{La}$  (percolação com lixiviado ácido) e  $k_{Lb/La}$  (percolação com lixiviado neutro a ligeiramente alcalino, no mesmo provete previamente percolado com lixiviado ácido) foram calculadas depois de se verificarem, na ordem indicada, as condições seguintes:

- a) volume da solução efluente proporcional ao tempo;
- b) caudal da solução efluente proporcional ao gradiente hidráulico;
- c) pH e CE da mesma ordem de grandeza no lixiviado influente e na solução efluente (na fase de percolação com água desmineralizada a condição a observar era a eluviação total dos sais solúveis no solo natural);
- d) condutividade hidráulica aproximadamente constante.

É importante assinalar que nem sempre foi possível satisfazer todas estas condições, em particular no que respeita à relação linear positiva entre o caudal e o gradiente hidráulico (ponto b); à medição do mesmo pH na solução efluente e no lixiviado influente (ponto c); à completa eluviação dos sais solúveis no solo natural (ponto c).

### 3.2 CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS DOS MATERIAIS

Na figura 3 apresenta-se a localização das trinta amostras recolhidas, tendo sido seleccionadas para o estudo do desempenho hidráulico as amostras identificadas pelas designações: Cs.3, SR.5, MP.8, MP.12, Ji.19, Js.28 e Ci.29. O Quadro II resume os principais elementos sobre a geocronologia e a distribuição geográfica das sete amostras seleccionadas.

As características mineralógicas, químicas, físicas e hidráulicas são apresentadas nos Quadros III a VI.

### 3.3. CORRELAÇÃO LINEAR ENTRE A CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA E AS CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS DOS MATERIAIS

Dado o grande número de ensaios de permeabilidade efectuados e a gama alargada das propriedades geotécnicas dos materiais seleccionados, estudou-se a correlação linear entre a condutividade hidráulica e as propriedades geotécnicas seguintes: a) teor em montmorilonite; b) percentagem de fracção argilosa, de silte e de finos; c) limites de liquidez, plasticidade e retracção; d) índice de plasticidade; e) coeficiente de actividade de Skempton; f) índice de expansibilidade livre.

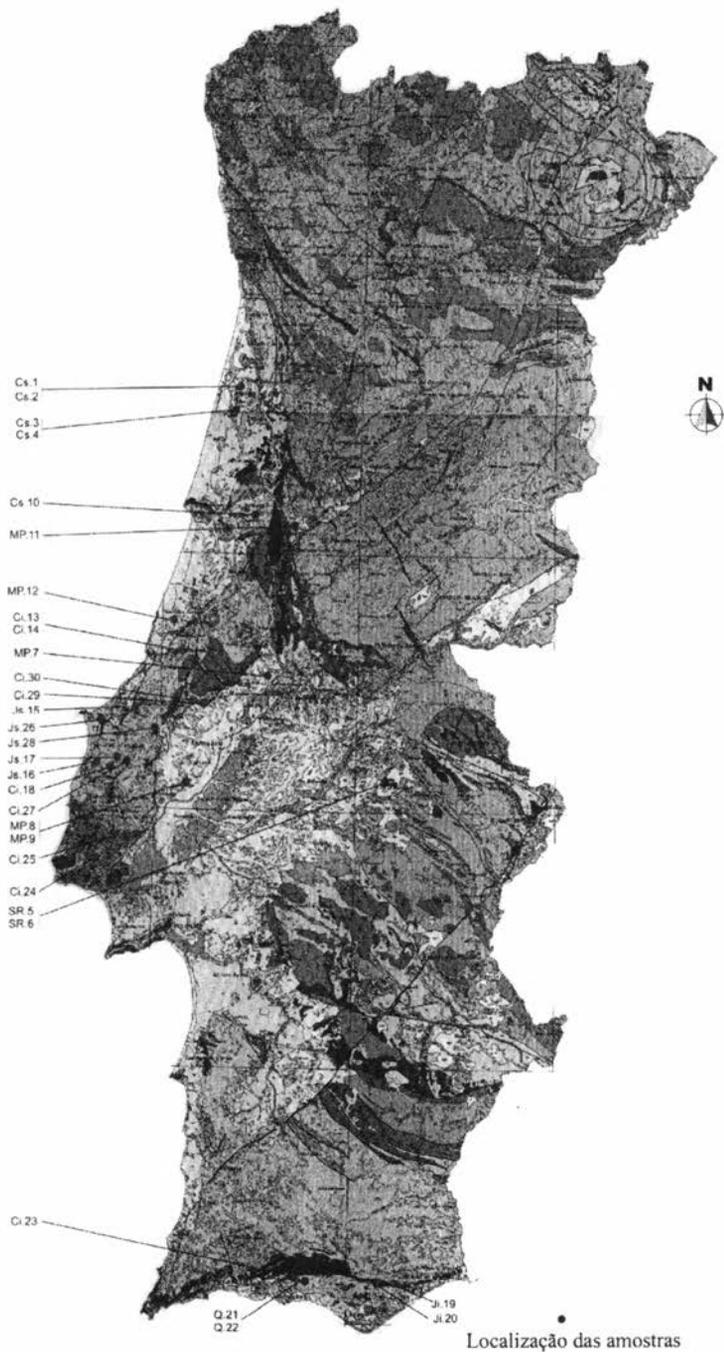


Fig. 3 – Localização das amostras estudadas (extracto da Carta Geológica à escala 1:1 000 000 do Instituto Geológico e Mineiro).

Quadro II – Elementos sobre a geocronologia e a distribuição geográfica das amostras

Amostra	Elementos sobre a geologia			Elementos sobre a geografia		
	Geocronologia		Carta geológica (1:50 000) Folha N.º	Concelho	Local	Carta topográfica (1:25 000) Folha N.º
	Era	Período				
Cs.3	Secundário	Cretácico sup.,Cs	16-C (Vagos)	O. do Bairro	Bustos	196
SR.5	Solo residual de rochas eruptivas, SR		Não publ.	Avis	Benavila	382
MP.8	Terciário	Mio-Pliocénico,MP	31-C (Coruche)	Azambuja	Quinta da Queijeira	377
MP.12	Terciário	Mio-Pliocénico,MP	22-D (M. Grande)	M. Grande	Martingança	296
Ji.19	Secundário	Jurássico inf.,Ji	Não publ.	Tavira	S. <sup>ta</sup> Cat. da Fonte do Bispo	599
Js.28	Secundário	Jurássico inf.,Ji	26-D (C. da Rainha)	C. da Rainha	Bairradas	339
Ci.29	Secundário	Cretácico inf.,Ci	27-C (T. Novas)	Santarém	Abrã	328

Quadro III – Composição mineralógica semi-quantitativa dos materiais

Amostra	Fracção global (%)					Fracção argilosa (%)				
	Quar. <sup>to</sup>	Feldsp. <sup>tos</sup>	Calcite	Filossil. <sup>tos</sup>	Montm. <sup>te</sup>	Micas Musc.	Illite	Caulinite	Quar. <sup>to</sup>	Outros
Cs.3	20	1	—	79	71	9	—	7	13	—
SR.5	40	18	2	40	100	—	—	—	—	—
MP.8	47	4	—	49	45	22	—	20	12	1
MP.12	21	2	3	74	7	60	—	20	13	—
Ji.19	28	2	—	70	—	86	—	—	7	7
Js.28	69	14	1	16	—	51	—	29	20	—
Ci.29	41	1	—	58	21	13	—	55	11	—

Quadro IV – características químicas dos materiais

Amostra	pH do solo, 25°C (escala de Sorensen)	CE da solução do solo, 25°C (µS/cm)	S <sub>t</sub> (m <sup>2</sup> /g)	CEC meq/100g
Cs.3	8,1	475	283,18	58,43
SR.5	8,6	53	179,58	42,05
MP.8	7,7	818	117,00	21,95
MP.12	8,3	277	181,46	28,80
Ji.19	8,6	282	41,65	12,30
Js.28	9,4	153	27,00	6,50
Ci.29	5,1	51	102,56	20,55

S<sub>t</sub> - Superfície específica total; CEC - Capacidade de troca catiónica.

O Quadro VII apresenta os valores do coeficiente de correlação linear R entre as condutividades hidráulicas  $k_{Ad}$ ,  $k_{La/Ad}$  e  $k_{La}$  e a percentagem de fracção argilosa (%argila), percentagem de finos (%finos), índice de plasticidade  $I_P$  e índice de expansibilidade livre  $I_e$ . A correlação entre  $k$  e a %finos foi quase sempre a mais elevada e a correlação entre  $k$  e  $I_P$  quase sempre a mais fraca. Os valores do

Quadro V – Características físicas dos materiais

Amostra	$G_s$	Limites de consistência			Granulometria			Classificação USCS	Compactação		$I_e$ (%)
		$w_L$ (%)	$w_P$ (%)	$w_S$ (%)	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)		$w_{opt}$ (%)	$\gamma_{dmax}$ (kN/m <sup>3</sup> )	
Cs.3	2,80	51,2	31,1	12,9	—	47	53	MH	25,4	15,3	150
SR.5	2,66	47,7	37,2	21,8	50	32	18	ML	20,8	15,5	45
MP.8	2,77	39,3	21,2	15,4	2	71	27	CL	17,8	16,9	85
MP.12	2,78	55,0	29,5	14,7	5	41	54	MH	23,8	15,9	150
Ji.19	2,84	24,7	18,2	12,6	46	41	13	CL-ML	14,0	19,4	50
Js.28	2,73	25,7	17,1	12,7	22	66	12	CL	9,8	19,7	40
Ci.29	2,73	59,0	26,7	14,5	1	55	44	CH	18,4	16,8	140

$G_s$  - Densidade das partículas sólidas;  $w_P$  - Limite de plasticidade;  $w_S$  - Limite de retração;

$w_{opt}$  - Teor em água ótimo Proctor normal;  $\gamma_{dmax}$  - Peso volúmico seco máximo;  $I_e$  - Índice de expansibilidade livre.

Quadro VI – Condutividade hidráulica dos materiais

Amostra	Provetes percolados directamente com água desmineralizada (Ad) e posteriormente com lixiviado ácido (La)						Provetes percolados directamente com lixiviado ácido (La) e posteriormente com lixiviado neutro a ligeiramente alcalino (Lb)					
	$w_{opt-2\%}$		$w_{opt}$		$w_{opt+2\%}$		$w_{opt-2\%}$		$w_{opt}$		$w_{opt+2\%}$	
	$k_{Ad}$ $\times 10^{-9}$	$k_{La/Ad}$	$k_{Ad}$ $\times 10^{-9}$	$k_{La/Ad}$	$k_{Ad}$ $\times 10^{-9}$	$k_{La/Ad}$	$k_{La}$ $\times 10^{-9}$	$k_{Lb/La}$	$k_{La}$ $\times 10^{-9}$	$k_{La}$ $\times 10^{-9}$	$k_{Lb/La}$ $\times 10^{-9}$	
Cs.3	0,062	0,13	0,013	0,015	0,016	0,016	4,2	0,040	0,016	0,035	ne	
SR.5	5,3	16,0	2,3	11,0	0,53	0,92	50	48	13	2,5	1,8	
MP.8	0,092	0,13	0,048	0,05	0,042	0,053	0,47	0,42	0,17	0,047	0,053	
MP.12	0,018	0,015	0,012	0,013	0,022	0,028	0,018	ne	0,017	0,052	0,018	
Ji.19	0,43	1,5	0,38	0,53	0,33	4,7	33	40	0,55	0,68	ne	
Js.28	0,087	0,13	0,058	0,072	0,055	0,058	1,2	1,5	0,37	0,14	ne	
Ci.29	0,078	0,085	0,022	0,030	0,023	0,028	0,055	0,058	0,058	0,033	ne	
	1,5	$k > 1 \times 10^{-9}$ m/s; ne - Ensaio não efectuado.										

Quadro VII – Correlação linear entre  $k_{Ad}$ ,  $k_{La/Ad}$  e  $k_{La}$  e propriedades geotécnicas dos materiais (%argila, %finos,  $I_P$  e  $I_e$ )

	$w_{opt-2\%}$			$w_{opt}$			$w_{opt+2\%}$		
	$k_{Ad}$	$k_{La/Ad}$	$k_{La}$	$k_{Ad}$	$k_{La/Ad}$	$k_{La}$	$k_{Ad}$	$k_{La/Ad}$	$k_{La}$
% Argila	0,64	0,82	0,64	0,90	0,70	0,82	0,80	0,81	0,72
% Finos	0,85	0,87	0,79	0,90	0,91	0,87	0,97	0,96	0,98
$I_P$	0,58	0,79	0,81	0,82	0,64	0,68	0,76	0,76	0,75
$I_e$	0,68	0,86	0,69	0,93	0,75	0,85	0,85	0,85	0,79

0,97 - Coeficiente de correlação linear R muito elevado ( $R \geq 0,95$ ).

0,97 - Coeficiente de correlação linear R elevado ( $0,80 \leq R < 0,95$ ).

coeficiente de correlação linear R entre  $k_{Ad}$ ,  $k_{La/Ad}$  e  $k_{La}$  e as restantes propriedades geotécnicas já referidas não se apresentam dado não serem satisfatórias.

Para os provetes compactados com  $w_{opt+2\%}$ , os valores do coeficiente de correlação linear entre  $k_{Ad}$ ,  $k_{La/Ad}$  e  $k_{La}$  e a %finos foram superiores ou iguais a 0,96. Estes resultados são ilustrados sobre as figuras 4a a 4c e estes resultados sugerem que a condutividade hidráulica dos solos finos pode ser estimada durante as fases preliminares dos estudos a partir das expressões apresentadas nas figuras 4a a 4c.

Tendo por base o funcionamento de um aterro de resíduos considera-se conveniente utilizar a expressão apresentada na:

- Fig. 4a para estimar a condutividade hidráulica da camada mineral que integra o sistema de encerramento ou cobertura final, dado que a situação mais provável é a percolação directa desta pela água de precipitação atmosférica;
- Fig. 4b para estimar a condutividade hidráulica da barreira de confinamento que integra o sistema de protecção ambiental passiva nos taludes, dado que a situação mais provável é ocorrer a percolação da água de precipitação atmosférica na fase inicial da exploração e do lixiviado na fase final da exploração;
- Fig. 4c para estimar a condutividade hidráulica da barreira de confinamento que integra o sistema de protecção ambiental passiva na base, dado que a situação mais provável é a percolação directa desta pelos lixiviados (o emprego das expressões indicadas nas figuras 4a e 4b podiam conduzir a uma sobrestimação do desempenho hidráulico dos materiais).

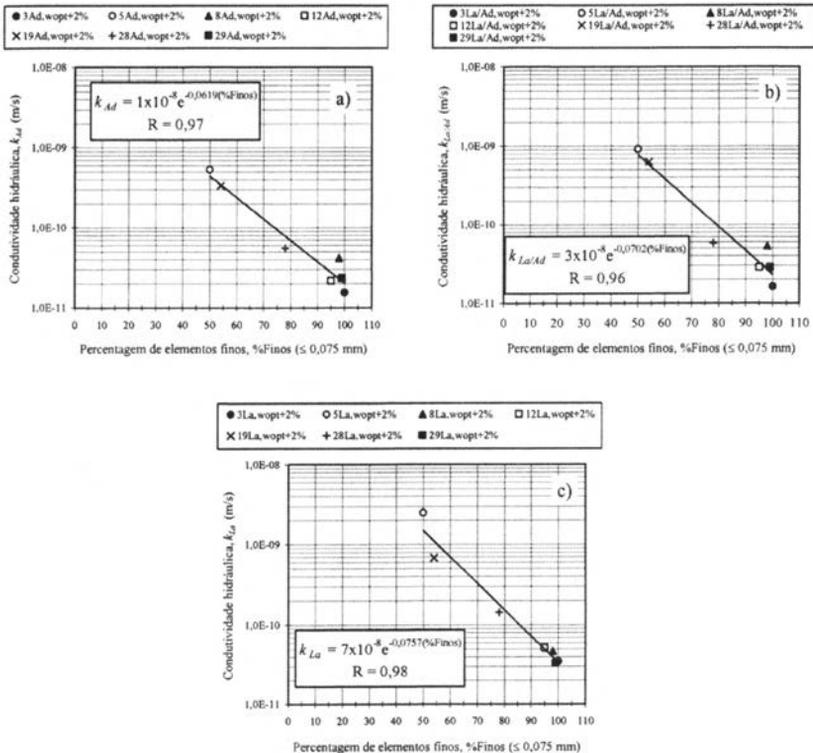


Fig. 4 – Correlação linear entre a condutividade hidráulica  $k$  obtida nos provetes compactados a  $w_{opt}+2\%$  e a percentagem de finos: a) condutividade hidráulica  $k_{Ad}$  dos provetes percolados com água desmineralizada; b) condutividade hidráulica  $k_{La/Ad}$  dos provetes percolados com lixiviado ácido, no mesmo provete percolado com água desmineralizada; c) condutividade hidráulica  $k_{La}$  dos provetes percolados com lixiviado ácido.

#### 4. APLICAÇÕES PRÁTICAS

A avaliação laboratorial do desempenho hidro-geoquímico dos solos é um processo muito longo e que necessita de importantes recursos humanos e financeiros. Torna-se, por isso, interessante e desejável dispor de ferramentas que permitam, de uma forma simples, rápida, pouco dispendiosa e suficientemente fiável, proceder rapidamente à selecção dos solos potencialmente mais favoráveis à construção de barreiras de confinamento na fase preliminar dos projectos dos aterros de resíduos. A principal vantagem desta selecção prévia traduz-se numa redução, maior ou menor, dos solos a caracterizar através dos ensaios de permeabilidade e de difusão.

Em função dos resultados apresentados na secção anterior, propõe-se a substituição dos critérios semi-quantitativos utilizados na selecção dos solos pelos critérios quantitativos materializados pelas equações lineares obtidas entre a condutividade hidráulica dos provetes compactados com  $w_{opt+2\%}$  e a %finos. Este procedimento parece mais indicado porque: a) diferentes estudos mostraram que a menor condutividade hidráulica de um solo se atinge quando este é compactado com teor em água cerca de 2% superior ao teor em água óptimo Proctor normal; b) estima-se um valor potencial de  $k$  e não uma indicação semi-quantitativa de que  $k$  é potencialmente superior ou inferior a  $1 \times 10^{-9}$  m/s; c) os parâmetros necessários à aplicação das relações são menos numerosos que para os critérios semi-quantitativos: a percentagem de elementos finos para a relação proposta e a percentagem da fracção argilosa, de finos e de seixos, o limite de liquidez, o índice de plasticidade e o coeficiente de actividade para os critérios de selecção.

O facto de as equações lineares resultarem de ensaios de permeabilidade efectuados com solos argilosos naturais com uma gama importante de propriedades geotécnicas e com soluções de percolação puras (água desmineralizada) e muito concentradas (lixiviado ácido) leva a admitir que possam ser aplicadas de maneira satisfatória num grande número de casos.

#### 5. BIBLIOGRAFIA

- ALBRECHT, K.A., CARTWRIGHT, K. (1989) – Infiltration and hydraulic conductivity of a compacted earthen liner. *Ground Water*, vol. 27, nº 1, p. 14-19.
- BENSON, C.H., ZHAI, H., WANG, X. (1994) – Estimating hydraulic conductivity of compacted clay liners. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, vol. 120, nº 2, p. 366-387.
- DANIEL, D.E. (1990) – Summary review of construction quality control for compacted soil liners. In: *Waste containment systems: construction, regulation and performance*, *Geotechnical Special Publication nº 26*. Edited by R. Bonaparte, New York: ASCE. p. 175-189.
- DANIEL, D.E., KOERNER, R.M. (1995) – *Waste containment facilities: guidance for construction, quality assurance and quality control of liner and cover system*. New York: ASCE. 354 p.

- EKLUND, A.G. (1985) – A laboratory comparison of the effects of water and waste leachate on the performance of soil liners. *In Hydraulic barriers in soil and rock, ASTM STP 874*. Edited by A.I. Johnson, R.K. Frobel, N.J. Cavalli *et al.*, Philadelphia: ASTM. p. 188-202.
- GORDON, M.E., HUEBNER, P.M., MITCHELL, G.R. (1990) – Regulation, construction and performance of clay-lined landfills in Wisconsin. *In Waste containment systems: construction, regulation, and performance, Geotechnical Special Publication n° 26*. Edited by R. Bonaparte, New York: ASCE. p. 14-27.
- LAMBE, T.W. (1954) – The permeability of compacted fine-grained soils. *In ASTM STP 163*. Philadelphia: ASTM. p. 56-67.
- MATRECON (1980) – *Lining of waste impoundment and Disposal Facilities*. Cincinnati: U.S. Environmental Protection Agency.
- MESRI, G., OLSON, R.E. (1971) – Mechanisms controlling the permeability of clays. *Clays and Clay Minerals*, vol. 19, p. 151-158.
- MITCHELL, J.K., JABER, M. (1990) – Factors controlling the long-term properties of clay liners. *In Waste containment systems: construction, regulation, and performance, Geotechnical Special Publication n° 26*. Edited by R. Bonaparte, New York: ASCE. p. 84-105.
- MONJOIE, A., RIGO, J.M., POLO-CHIAPOLINI, C.I. (1992) – *Vade-mecum pour la réalisation des systèmes d'étanchéité – drainage artificiels pour les sites d'enfouissement techniques en Wallonie*. Liège: Université de Liège. pagination multiple.
- MURRAY, E.J., RIX, D.W., HUMPHREY, R.D. (1992) – Clay linings to landfill sites. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, vol. 25, n° 4, p. 371-376.
- NRA. (1989) – *Earthworks to landfill sites*. North West Region: National Rivers Authority.
- ROQUE, A.J. (2001) – *Transfert advectif et diffusif de polluants inorganiques dans les barrières d'étanchéité minérales présentes dans les Centres de Stockage de Déchets. Application aux sols fins portugais*. Thèse Génie Civil – Sols: Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 697 pp.
- SHAKOOR, A., COOK, B. (1990) – The effect of stone content, size, and shape on the engineering properties of a compacted silty clay. *Bulletin of Association of Engineering Geologists*, vol. 27, n° 2, p. 245-253.
- SHELLEY, T.L., DANIEL, D.E. (1993) – Effect of gravel on hydraulic conductivity of compacted soil liners. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, vol. 119, n° 1, p. 54-68.