

# **A PROBLEMÁTICA DA INTEGRIDADE DA GEOMEMBRANA: INFLUÊNCIA DA PRESSÃO DOS RESÍDUOS NA MIGRAÇÃO DE FLUIDOS ATRAVÉS DE ORIFÍCIOS**

## **ISSUE OF INTEGRITY OF THE GEOMEMBRANE: THE INFLUENCE OF THE WASTE PRESSURE ON FLUID MIGRATION THROUGH THE DEFECTS**

Bergamini, Gianmarco, *Politecnico di Milano, Milão, Itália, bergagia@hotmail.it*

Barroso, Madalena, *Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, mbarroso@lnec.pt*

Lopes, Graça, *Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, Portugal, glopes@dec.isel.ipl.pt*

### **RESUMO**

A influência da pressão dos resíduos na migração de fluidos através de orifícios na geomembrana (GM) foi estudada mediante a realização de ensaios laboratoriais. Simulou-se um sistema de confinamento de fundo de um aterro de resíduos, constituído por uma GM com um orifício circular, um geossintético bentonítico (GCL) e uma camada de solo argiloso compactado (CCL). Mediu-se o fluxo que migra através do orifício na GM. Com base no fluxo final, obtido em regime permanente, estimou-se a transmissividade da interface entre a GM e o GCL, através de retroanálise. Os ensaios foram conduzidos com seis pressões de confinamento: 25, 50, 75, 100, 150 e 200 kPa. Os resultados obtidos sugerem que o aumento da pressão dos resíduos sobre o sistema de confinamento tem uma influência reduzida sobre o fluxo e sobre a transmissividade da interface, para a gama de pressões utilizada.

### **ABSTRACT**

Composite liners comprising a geomembrane (GM) with a circular hole, a geosynthetic clay liner (GCL) and a compacted clay liner (CCL) were studied through laboratory tests. Flow rates at the interface between the GM and the GCL were measured and correspondent interface transmissivity was estimated. The tests conducted aimed at studying the influence of the confining stress on flow rates through composite liners due to defects in the GM. Six confining stresses were used: 25, 50, 75, 100, 150 e 200 kPa. Results indicate that the increase in confining stress has a negligible influence on flow rate and on correspondent interface transmissivity, for the range of pressures used.

### **1. INTRODUÇÃO**

Os sistemas de confinamento de fundo e taludes dos aterros de resíduos incluem barreiras múltiplas. Em Portugal estes sistemas são tipicamente constituídos por uma geomembrana (GM), geralmente de polietileno de alta densidade (PEAD), um geossintético bentonítico (GCL) e uma camada de solo argiloso compactada (CCL).

O sucesso do sistema de confinamento depende, sobretudo, do desempenho da GM com barreira à migração de fluidos, estando este directamente relacionado com manutenção da integridade física desta barreira. Estudos realizados com base em métodos de detecção de fugas sugerem que os orifícios na GM são inevitáveis, mesmo em aterros de resíduos sujeitos a um rigoroso controlo de construção.

Como a migração de poluentes através de orifícios da GM é uma questão ambientalmente relevante, na medida em que os recursos hídricos e os solos podem ficar contaminados, importa estudar o fluxo que atravessa o sistema de confinamento.

Existem vários parâmetros que influenciam o fluxo, tais como as condições de contacto entre a GM e camada subjacente (CCL ou GCL), quantitativamente expressas através da transmissividade da interface; a forma e dimensões do orifício; a permeabilidade e a espessura do material que constitui a camada subjacente à GM; a carga hidráulica sobre a GM e a pressão exercida pelos resíduos.

Embora tenham sido realizados vários estudos sobre a migração de fluidos através de orifícios GM, a questão da influência da pressão exercida pelos resíduos carece ainda de investigação, particularmente no caso dos sistemas de confinamento que incluem uma GM, um GCL e uma CCL, pelo que foi objecto de um estudo de natureza experimental.

Foram realizados ensaios laboratoriais, com diferentes pressões confinantes, nos quais se simulou um sistema de confinamento de um aterro de resíduos constituído por uma GM, com um orifício circular, um GCL e um CCL. Nos ensaios realizados, determinou-se o fluxo de água que migra através do orifício na GM. Com base no fluxo final (obtido em regime permanente) e no raio da área de infiltração, através de retroanálise estimou-se a transmissividade da interface entre a GM e o GCL.

Neste artigo, apresentam-se e discutem-se os resultados obtidos neste estudo.

## 2. MATERIAIS

### 2.1. Geossintéticos

Neste trabalho utilizaram-se uma GM lisa, de PEAD, com 2 mm de espessura, e um GCL. No Quadro 1 apresentam-se as características principais do GCL, incluindo os valores da condutividade hidráulica, determinada laboratorialmente (segundo a norma ASTM D 5887) e estimada (com base em resultados apresentados na bibliografia) tendo em conta as diferentes pressões confinantes em estudo. Os valores estimados foram utilizados para a interpretação dos resultados, na Secção 5.3.

Quadro 1 – Características do GCL utilizado

Camada bentonítica	Massa por unidade de área (g/m <sup>2</sup> )	4 670	
	Tipo de bentonite	Natural, sódica, granular	
Geotêxtil superior	Massa por unidade de área (g/m <sup>2</sup> )	220	
	Tipo	Agulhado, não tecido	
Geotêxtil inferior	Massa por unidade de área (g/m <sup>2</sup> )	110	
	Tipo	Agulhado, tecido	
GCL	Massa por unidade de área (g/m <sup>2</sup> )	5 000	
	Tipo de união dos diferentes materiais	Agulhagem	
	Espessura (mm)	6	
	Conductividade hidráulica para as pressões de confinamento indicadas (m/s)	25 kPa**	$5.00 \times 10^{-11}$
		50 kPa*	$3.70 \times 10^{-11}$
		75 kPa**	$4.28 \times 10^{-11}$
		100 kPa**	$2.98 \times 10^{-11}$
150 kPa**		$2.40 \times 10^{-11}$	
200 kPa*	$1.10 \times 10^{-11}$		

\* determinada experimentalmente (norma ASTM D 5887)

\*\* estimada com base em resultados apresentados na bibliografia

## 2.2. Solo

O solo utilizado no trabalho experimental foi colhido no Aterro de Resíduos do Oeste, durante a fase de construção desta obra. No Quadro 2 apresentam-se as características geotécnicas mais relevantes deste solo.

Quadro 2 – Principais características do solo utilizado

Ensaio						
Granulometria	Limites de consistência			Proctor modificado		Condutividade hidráulica
(% < 0,074 mm)	LL	LP	IP	$\gamma_d^{\text{máx}}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$W_{\text{opt}}$ (%)	k (m/s)
37,7	33,1	19,7	13,4	21,3	8,1	$3 \times 10^{-10}$

## 3. EQUIPAMENTO E MÉTODO DE ENSAIO

Os ensaios foram conduzidos numa célula transparente, a qual foi anteriormente utilizada por Barroso *et al.* (2005, 2006). Resumidamente, é constituída por quatro partes: (i) uma parte inferior, para apoio da camada de solo; (ii) um cilindro inferior com 0,2 m de diâmetro e 0,08 m de altura, para acomodar o solo compactado e o GCL e para recolher a água efluente que pode percolar entre a GM e o GCL; (iii) uma placa granular, para simular a camada de drenagem sobre o sistema de confinamento de um aterro de resíduos; e (iv) uma parte superior com 0,06 m de altura, para acomodar a placa granular.

A metodologia de ensaio foi descrita detalhadamente por Barroso *et al.* (2005, 2006). Em síntese, na parte inferior da célula, compactou-se uma camada de solo, com um teor em água aproximadamente 2 % superior ao teor em água ótimo ( $W_{\text{opt}}$ ) indicado no Quadro 2. Sobre esta, foi colocado um GCL e uma GM, com um orifício circular, com 3 mm de diâmetro. A célula foi depois colocada numa prensa (aplicação da pressão confinante), sendo seguidamente ligada ao abastecimento de água, o qual possibilita a aplicação de uma carga hidráulica. Na primeira fase do ensaio, enquanto o volume de água efluente foi mensurável, o abastecimento de água foi feito através de um reservatório. Quando o volume de água efluente diminuiu, o reservatório foi substituído por uma bureta de Mariotte. Em qualquer dos métodos de alimentação de água usados, a carga hidráulica foi constante durante o ensaio. Na Figura 1 apresenta-se o esquema do ensaio.

Foram realizados ensaios com seis pressões confinantes, designadamente as seguintes: 25, 50, 75, 100, 150 e 200 kPa. Estes valores pretendem representar diferentes cargas aplicadas pelos resíduos sólidos urbanos colocados sobre um sistema de confinamento, correspondendo a alturas de resíduos que variam entre 2,5 e 20 m. Os ensaios foram realizados com uma carga hidráulica de 0,3 m, a qual equivale à altura máxima de lixiviado geralmente permitida na maioria dos regulamentos sobre aterros de resíduos. A duração dos ensaios foi estabelecida com base no tempo necessário para a obtenção do regime permanente. Assim, cada ensaio decorreu durante, no mínimo, 18 dias.

O fluxo de água que migra através do orifício na geomembrana foi calculado de duas formas, de acordo com a fase do ensaio. Na primeira fase, foi determinado com base no volume de água efluente, recolhida na base da célula durante um determinado intervalo de tempo. Na segunda fase, quando o volume de água efluente deixou de ser mensurável, o fluxo foi determinado directamente a partir de leituras efectuadas na bureta de Mariotte.

A partir do fluxo final (obtido em regime permanente) e do raio da área de infiltração, estimou-se a transmissividade da interface entre a GM e o GCL, através de retroanálise.

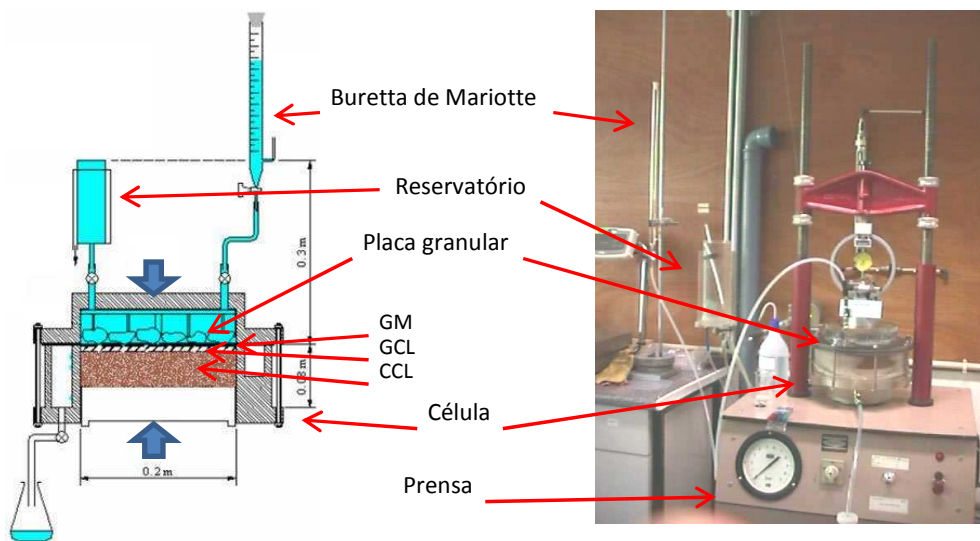


Figura 1 – Esquema do ensaio para medição do fluxo na interface entre a GM e o GCL (adaptado de Barroso 2005)

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Fluxo e transmissividade

A Figura 2 mostra a evolução do fluxo que migrou na interface entre a GM e o GCL, devido à existência do orifício circular na GM, para todos os ensaios realizados no presente estudo. As barras de erro, associadas aos valores do fluxo nos gráficos, representam as incertezas associadas às medições experimentais realizadas. Informações sobre os cálculos associados à determinação das incertezas podem ser encontrados em Barroso (2005).

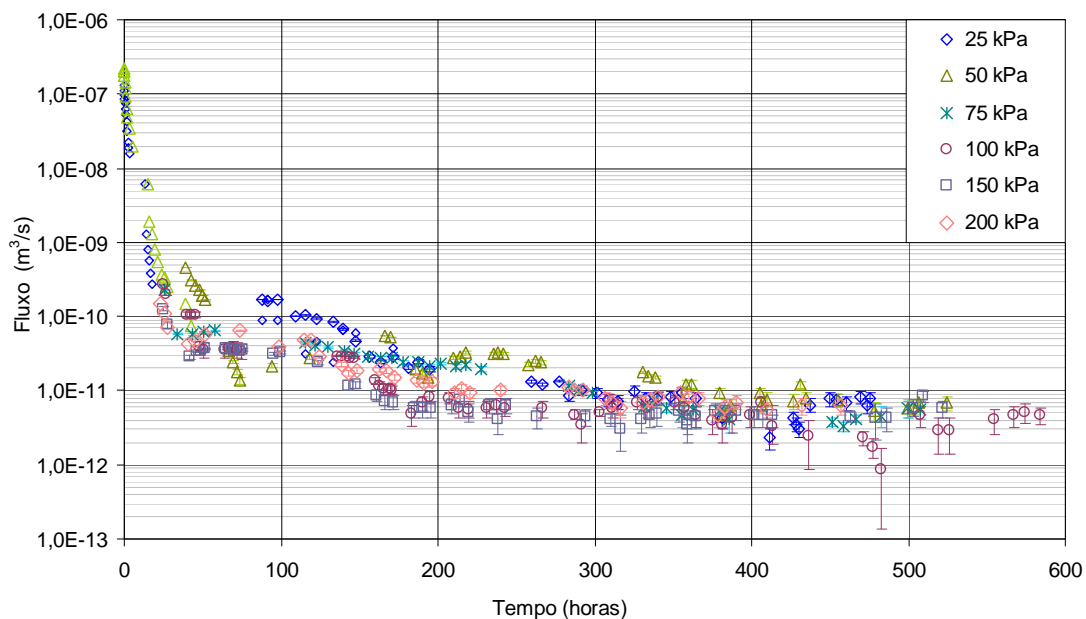


Figura 2 – Evolução do fluxo nos ensaios realizados

Tal como pode observar-se, o fluxo diminuiu ao longo do tempo em todos os ensaios, até se atingir o regime permanente. Pode igualmente observar-se que nos ensaios realizados com menores pressões confinantes o fluxo foi superior na fase inicial, mas a diferença foi-se atenuando ao longo do tempo. Os valores finais do fluxo (valores médios calculados com base no fluxo obtido nas últimas 36 horas de ensaio) estão compreendidos  $4,4 \times 10^{-12}$  e  $7,3 \times 10^{-12}$  m<sup>3</sup>/s, pelo que a diferença é inferior a meia ordem de grandeza. No Quadro 3 apresentam-se estes valores.

De acordo com o referido por Barroso *et al.* (2005), a partir de resultados experimentais, a transmissividade da interface pode ser calculada de duas formas. De uma forma sucinta, a primeira forma foi proposta por Harpur *et al.* (1993) e assume que todo o líquido que migra através do orifício da GM se escoia na interface entre a GM e o GCL e que o escoamento ocorre de modo axissimétrico. Negligencia, por isso, o fluxo que se infiltra no interior do GCL, o que significa que sobrestima o valor da transmissividade. Para além disso, pode igualmente sobrestimar a área de infiltração de líquido, pois assume que esta coincide com a área do provete. A transmissividade ( $\theta$ ) é, neste caso, uma transmissividade aparente, podendo o seu valor ser determinado com base na Equação 1 (Harpur *et al.* 1993):

$$\theta = \frac{Q_r(R_c) \times \ln\left(\frac{R_c}{r_0}\right)}{2\pi h_w} \quad (1)$$

onde  $Q_r(R_c)$  é o fluxo efluente determinado a partir do volume de água recolhido na base da célula,  $R_c$  é o raio do provete (coincidente com o raio de infiltração),  $r_0$  é o raio do orifício e  $h_w$  é a carga hidráulica sobre a GM.

Alternativamente, a transmissividade pode ser determinada através de retroanálise, com base em soluções analíticas como as propostas por Rowe (1998) ou por Touze-Foltz *et al.* (1999). Para o efeito, assume-se que o GCL, a camada de solo subjacente e a interface entre a GM e o GCL estão saturados e que o fluxo na interface se escoia de modo axissimétrico. Adoptando a terminologia proposta por Touze-Foltz *et al.* (1999), esta transmissividade é designada por efectiva, podendo ser estimada através da seguinte equação:

$$Q = \pi r_0^2 k_s i_s - 2\pi r_0 \theta \alpha [A_p I_1(\alpha r_0) - B_p K_1(\alpha r_0)] \quad (2)$$

onde  $Q$  é o fluxo (determinado quando a alimentação de água ao ensaio passa a ser feita através da bureta de Mariotte),  $A_p$ ,  $B_p$ ,  $\alpha$  e  $C$  são obtidas a partir das seguintes equações 3 a 6:

$$A_p = -\frac{h \times K_0(\alpha R_c) + C \times (K_0(\alpha R_c) - K_0(\alpha r_0))}{K_0(\alpha r_0) I_0(\alpha R_c) - K_0(\alpha R_c) I_0(\alpha r_0)} \quad (3)$$

$$B_p = \frac{h \times I_0(\alpha R_c) + C \times (I_0(\alpha R_c) - I_0(\alpha r_0))}{K_0(\alpha r_0) I_0(\alpha R_c) - K_0(\alpha R_c) I_0(\alpha r_0)} \quad (4)$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{k_s}{(H_{GCL} + H_f) \theta}} \quad (5)$$

$$C = H_{GCL} + H_f \quad (6)$$

onde  $I_0$  e  $K_0$  são funções de Bessel modificadas de ordem zero,  $k_s$  é a condutividade hidráulica equivalente (GCL+CCL),  $H_{GCL}$  é a espessura do GCL,  $H_f$  é a espessura do CCL e  $R_c$  é o raio da área de infiltração.

Contrariamente ao relatado por Barroso *et al.* (2005, 2006), no presente estudo, não foi possível recolher água na base da célula (fluxo efluente) até ao término dos ensaios. Nestas circunstâncias, o raio da área de infiltração é desconhecido.

Uma vez que o valor do raio de infiltração é necessário para determinar a transmissividade efectiva, este foi estimado por retroanálise, resolvendo alternadamente a Equação 1 para o valor da transmissividade e do raio de infiltração.

No Quadro 3 apresentam-se os valores das transmissividades aparente e efectiva (determinados com base no valor do fluxo médio final).

Quadro 3 – Fluxo e transmissividade obtidos na interface entre a GM e o GCL

Ensaio	Tensão confinante (kPa)	Fluxo final (m <sup>3</sup> /s)	Transmissividade aparente (m <sup>2</sup> /s)	Área de infiltração* (m)	Transmissividade efectiva (m <sup>2</sup> /s)
1	25	7,25×10 <sup>-12</sup>	1,35×10 <sup>-11</sup>	0,1**	1,35×10 <sup>-11</sup>
2	50	6,21×10 <sup>-12</sup>	1,16×10 <sup>-11</sup>	0,1**	1,14×10 <sup>-11</sup>
3	75	5,05×10 <sup>-12</sup>	9,20×10 <sup>-12</sup>	0,093	9,01×10 <sup>-12</sup>
4	100	4,40×10 <sup>-12</sup>	7,99×10 <sup>-12</sup>	0,092	7,79×10 <sup>-12</sup>
5	150	4,77×10 <sup>-12</sup>	8,87×10 <sup>-12</sup>	0,1**	8,96×10 <sup>-12</sup>
6	200	6,06×10 <sup>-12</sup>	1,13×10 <sup>-11</sup>	0,1**	1,22×10 <sup>-11</sup>

\* valores utilizados no cálculo da transmissividade efectiva.

\*\* assumiu-se que o raio de infiltração como igual ao raio do provete

Comparando os valores da transmissividade aparente e efectiva verifica-se que são semelhantes. No entanto, contrariamente ao esperado nos ensaios 5 e 6, a transmissividade aparente foi inferior à efectiva, o que é inconsistente com as hipóteses anteriormente apresentadas, segundo as quais a transmissividade aparente corresponde ao limite superior da transmissividade real dado que negligencia a água que se infiltra no GCL. Estes resultados decorrem do facto das hipóteses assumidas nos cálculos não se verificarem inteiramente, nomeadamente que a interface é uniforme e axissimétrica. Estas limitações foram anteriormente discutidas por Barroso *et al.* (2005).

#### 4.2. Espessura e teor em água finais dos GCLs

Para além dos ensaios atrás referidos, foram também determinados a espessura e o teor em água finais dos provetes de GCL, com vista a apoiar a interpretação dos resultados dos ensaios de transmissividade. Informações adicionais sobre todos os ensaios realizados podem ser encontradas em Bergamini (2009).

Relativamente à espessura final dos GCLs ( $H_{GCL}$ ), de salientar que foi determinada através de dois métodos diferentes (craveira e comparador digital), os quais se ilustram na Figura 3.



(a)



(b)

Figura 3 – Equipamento usado na determinação da espessura final do GCL: (a) craveira; (b) comparador digital (LVTD)

De referir que existe uma discrepância entre os valores estimados com base na espessura medida com a craveira e com o comparador digital. De facto, nenhum dos métodos se revelou suficientemente rigoroso para medição da espessura do GCL. Ambos os métodos apresentaram vantagens e inconvenientes. A craveira, ao efectuar medições pontuais, permitiu levar em consideração as irregularidades do GCL (devidas à placa granular usada durante o ensaio de transmissividade), mas a ponteira penetrava no geotêxtil superior do GCL, subestimando os valores da espessura. Relativamente às medições efectuadas com base no comparador digital, estas foram realizadas com o GCL sujeito a uma pressão confinante igual à utilizada no ensaio de transmissividade. Todavia, como as placas colocadas acima e abaixo do provete durante as medições eram lisas, as irregularidades do GCL não eram levadas em consideração, sobrestimando o valor da espessura.

Assim, julga-se que o valor efectivo da espessura do GCL corresponde a um valor intermédio entre os valores estimados com base nos métodos indicados. Pelas razões indicadas, consideram-se necessários mais estudos no sentido de melhorar a medição da espessura final dos provetes de GCL.

Independentemente do método considerado para determinar a espessura final dos provetes de GCL, os resultados obtidos sugerem que esta tende a estabilizar a partir de 100 kPa (Figura 4), deixando de ser substancialmente afectada pelo aumento da pressão de confinamento, para a gama de pressões empregues neste estudo. As pequenas variações observadas para pressões superiores a 100 kPa podem ser atribuídas a heterogeneidades dos provetes, nomeadamente a diferenças na massa por unidade (gramagem).

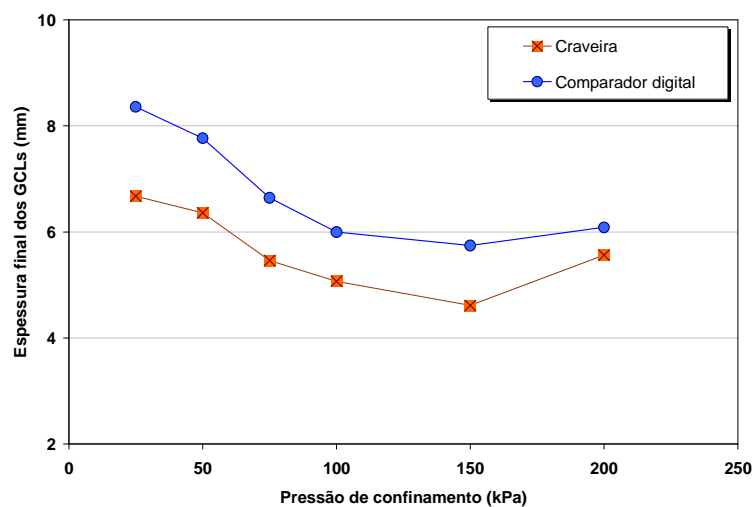


Figura 4 – Espessura final dos provetes de GCL em função das pressões confinantes

Para além da espessura, foram também determinados os teores em água dos provetes de GCL no final dos ensaios, os quais se apresentam na Figura 5.

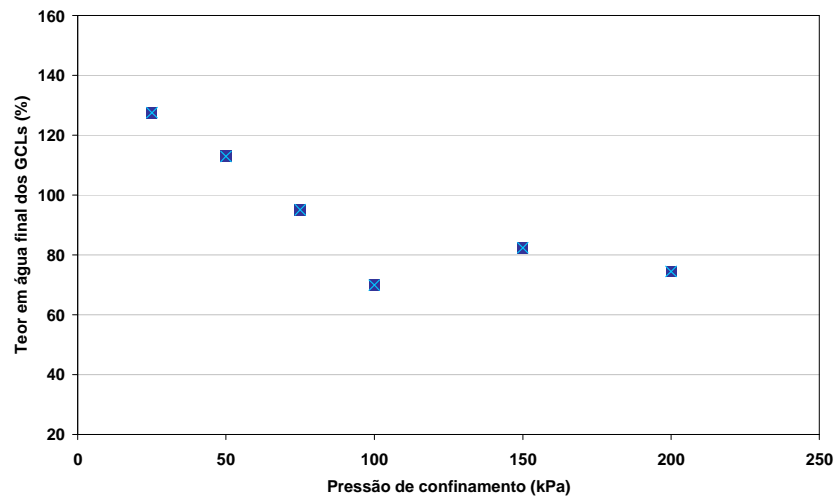


Figura 5 – Teores em água finais dos provetes de GCL em função das pressões confinantes

Tal como pode observar-se, os teores em água diminuem quando a pressão de confinamento aumenta entre 25 e 100 kPa. A partir desse valor, o teor em água permanece relativamente constante. À semelhança do que acontece no caso da espessura, as variações associadas aos valores de pressão entre 100 e 200 kPa são, sobretudo, causadas pelas heterogeneidades dos provetes de GCL. Assim, os resultados obtidos sugerem que, a partir dos 100 kPa, o teor em água dos provetes de GCL não é substancialmente afectado pelo aumento da pressão de confinamento.

## 5. DISCUSSÃO

### 5.1. Influência da pressão confinante

Tal como pode observar-se na Secção 4.1, o aumento da pressão de confinamento sobre a GM tem um impacto muito reduzido sobre o fluxo. Não parece igualmente influenciar a transmissividade da interface, tal como pode observar-se na Figura 6.

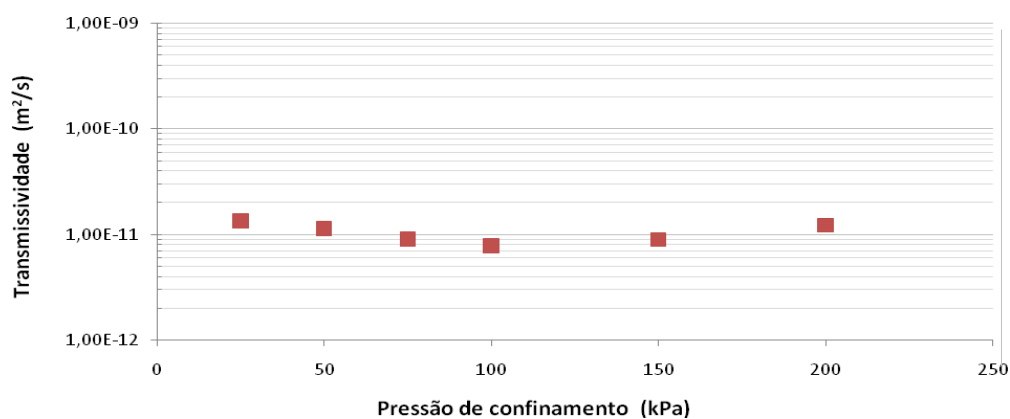


Figura 6 – Transmissividade da interface GM/GCL em função da pressão confinante



O facto da transmissividade da interface ser praticamente constante, independentemente da pressão de confinamento aplicada, parece estar relacionado com a expansibilidade da bentonite no interior do GCL, que, em todos os casos, atingiu o máximo que a pressão aplicada permitiu. Isto possibilitou aos materiais GM/GCL um contacto óptimo, ou, na aceção de Giroud & Bonaparte (1989), umas condições de contacto perfeitas, o que se traduziu por reduzidas variações da transmissividade da interface.

Embora as condições de contacto entre a GM e o GCL tenham sido aparentemente óptimas em todos os ensaios realizados, o comportamento do GCL foi diferente, consoante os valores da pressão de confinamento foram inferiores ou superiores a 100 kPa. Para compreender o fenómeno em questão, convém ter-se presente o comportamento dos minerais argilosos do grupo das esmectites (principal constituinte da bentonite).

Resumidamente, os minerais argilosos do grupo das esmectites, devido ao elevado grau de substituição isomórfica que apresentam, têm um elevado défice de carga eléctrica. Para compensar esse défice, manifestam grande capacidade para captar moléculas de água, as quais se fixam, sobretudo, no espaço entre camadas estruturais (adsorvidas ou hidratando os catiões de troca também presentes nesse espaço). Saliente-se que esta água se comporta com um sólido, começando a ser removida a temperaturas superiores a 40° C e estando, em regra, totalmente removida a temperaturas compreendidas entre 120 a 300° C (Gomes, 1986), conforme o tipo estrutural da esmectite. O número de moléculas de água que se consegue fixar no espaço entre camadas estruturais dita o grau de expansibilidade que os minerais exibem, o qual está relacionado com a carga a que os mesmos estão sujeitos. Teoricamente, de um ponto de vista estrito, na ausência de carga e de limite de água disponível, as esmectites podem expandir ilimitadamente.

As diferenças registadas no comportamento dos provetes de GCL parecem estar relacionadas com dependência existente entre a expansibilidade da bentonite e a carga a que a mesma está sujeita. Esta hipótese é confirmada pelos resultados dos ensaios de espessura e dos teores em água (i.e., quantidade de água captada pelos provetes de GCL), os quais se apresentaram nas Figuras 4 e 5, respectivamente. Efectivamente, os resultados destes ensaios mostram que para pressões de confinamento entre 25 e 100 kPa, a expansibilidade diminui significativamente com o aumento da pressão, enquanto que para pressões compreendidas entre 100 e 200 kPa permanece praticamente constante.

## **5.2. Comparação das transmissividades obtidas experimentalmente com as estimadas através de expressões empíricas**

A transmissividade da interface pode ser estimada não só através de ensaios laboratoriais, como se realizou neste estudo, mas também através de expressões empíricas, com base no valor da conductividade hidráulica da camada subjacente à GM.

Existem actualmente quatro expressões empíricas, que correspondem a diferentes tipos de condições de contacto (C.C.) entre a GM e a camada subjacente. Três destas expressões foram desenvolvidas para o caso da GM assentar sobre uma camada de solo, sendo denominadas na literatura, respectivamente, como más, boas ou excelentes, de acordo com a qualidade da instalação da GM. A quarta expressão diz respeito às condições de contacto existentes entre GMs e GCLs, sendo tipicamente designada por C.C. GM/GCL. Informações adicionais sobre as expressões correspondentes às diferentes condições de contacto podem ser encontradas em Touze Foltz & Giroud (2003) e em Touze Foltz & Barroso (2006).

Na Figura 7 representam-se as transmissividades, obtidas com trabalho experimental realizado neste estudo e as calculadas através das expressões empíricas disponíveis na literatura, em função das conductividades hidráulicas dos GCLs indicadas no Quadro 1.

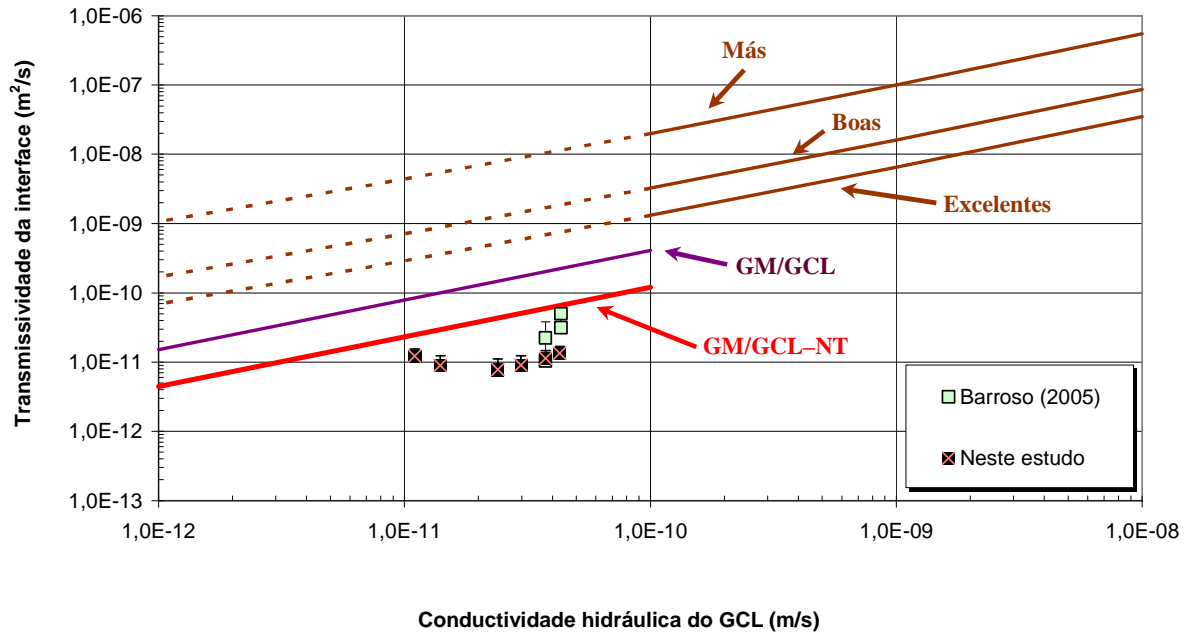


Figura 7 – Comparação entre as transmissividades obtidas experimentalmente e calculadas através de expressões empíricas para as diferentes condições de contacto

Tal como pode observar-se, os valores obtidos neste estudo localizam-se todos abaixo das linhas correspondentes às transmissividades calculadas com bases nas expressões empíricas existentes, inclusive a correspondente às C.C. GM/GCL. Estes resultados sugerem que as expressões empíricas existentes sobrestimam o valor da transmissividade, em particular no caso dos GCLs com um geotêxtil superior não-tecido (NT). Saliente-se que, no caso da transmissividade ser sobrestimada, qualquer previsão do fluxo de poluentes que atravessasse os orifícios das GM, realizada com base em soluções analíticas como as apresentadas na Secção 4.1, é igualmente sobrestimada, o que pode levar à concepção de sistemas de confinamento inadequados.

Na Figura 7 estão, também, representados os resultados obtidos por Barroso (2005). Os resultados obtidos por Harpur *et al.* (1993) não foram incluídos no gráfico porque estes autores não referem a condutividade hidráulica dos GCLs ensaiados. Os dados apresentados na figura permitem estabelecer uma nova expressão empírica para determinar a transmissividade da interface entre a GM e o GCL, no caso deste último ser constituído por um geotêxtil superior não-tecido. A linha que expressa essas condições de contacto, aqui designadas por C.C. GM/GCL-NT, está igualmente representada na Figura 7, tendo sido determinada com base na seguinte equação:

$$\log \theta = -2.7667 + 0.7155 \log k_{GCL} \quad (9)$$

De referir que a inclinação da recta correspondente às C.C. GM/GCL-NT foi deliberadamente seleccionada de modo a ser igual às das condições de contacto anteriormente definidas.

### 5.3. Comparação com os resultados relatados na bibliografia

A influência da pressão confinante sobre a transmissividade da interface entre uma GM e um GCL foi objecto de estudos experimentais por parte de Harpur *et al.* (1993) e de Barroso (2005). Os primeiros

autores utilizaram vários GCLs e duas pressões de confinamento, 20 e 70 kPa. De acordo com os mesmos autores, a transmissividade aparente no fim dos ensaios foi semelhante para as duas tensões confinantes consideradas.

Barroso (2005) realizou ensaios com dois GCLs e igualmente com duas pressões de confinamento, 50 e 200 kPa. Os resultados obtidos por esta autora mostram que a transmissividade da interface não foi significativamente afectada pelo aumento da pressão confinante.

Considera-se, assim, que os resultados obtidos no presente estudo são consistentes com os resultados apresentados na bibliografia.

## 6. CONCLUSÕES

Neste artigo apresentou-se o trabalho experimental realizado com o objectivo de estudar a influência da pressão dos resíduos sobre a migração de fluidos através de orifícios na GM. Para o efeito, simulou-se um sistema de confinamento de fundo de um aterro de resíduos como os tipicamente construídos em Portugal, constituídos por uma GM (com um orifício circular), um GCL e uma camada de solo argiloso compactado, e determinou-se o fluxo através da interface entre a GM e o GCL. Com base no fluxo final, obtido em regime permanente, estimou-se a transmissividade da interface. Os ensaios foram conduzidos com seis pressões de confinamento (25, 50, 75, 100, 150 e 200 kPa) e com carga hidráulica constante (0,3 m).

Os resultados dos ensaios realizados sugerem que o aumento da pressão dos resíduos sobre o sistema de confinamento tem uma influência reduzida sobre o fluxo e sobre a transmissividade da interface. Sugerem, também, que as expressões empíricas existentes para estimar a transmissividade, considerando diferentes condições de contacto (qualidades da instalação da GM), sobrestimam o valor desta propriedade, no caso da interface constituída por uma GM e um GCL com geotêxtil superior não tecido. No seguimento, foi proposta uma nova expressão empírica que se julga mais apropriada a este tipo de condições de contacto.

## AGRADECIMENTOS

Agradece-se à Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) o financiamento concedido no âmbito do Projecto PTDC/AAC-AMB/102846/2008. Agradece-se, igualmente, às empresas Resioeste (concessionária do aterro de resíduos do Oeste) e Naue (produtora de geossintético) a disponibilização dos materiais utilizados neste estudo.

## REFERÊNCIAS

- ASTM D 5887. “Standard Test Method for Measurement of Index Flux Through Saturated Geosynthetic Clay Liner Specimens Using a Flexible Wall Permeameter”. *American Society for Testing and Materials*, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
- Barroso, Madalena C.P. (2005). “Fluid Migration through Geomembrane Seams and Through the Interface Between Geomembrane and Geosynthetic Clay Liner”. *Tese de doutoramento apresentadas às Universidades de Grenoble e de Coimbra*, França e Portugal, 218 p.

- Barroso, Madalena C.P., Touze-Foltz, N. & Lopes, M.G.D.A (2005). “Migração de Fluidos através de Orifícios na Geomembrana”. *1º Seminário Português sobre Geossintéticos*, Porto, Portugal, 23 e 24 de Novembro de 2005, pp.67-82.
- Barroso, Madalena C.P.; Touze-Foltz, N.; Maubeuge, K. V. & Pierson, P. (2006). “Laboratory Investigation of Flow Rate Through Composite Liners Involving GCLs”. *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 24, No.3, pp. 139-155
- Bergamini, G. (2009). “Influenza della Tensione di Confinamento sulla Trasmissività dell’interfaccia GM/GCL di una Barriera di Fondo di Discarica”. *Tese de mestrado apresentada ao Politecnico di Milano, Facoltà di Ingegneria Civile, Ambientale e Territoriale*, Itália, 102 p.
- Giroud, J.P. & Bonaparte, R. (1989). “Leakage through Liners Constructed with Geomembranes - Part II. Composite Liners”. *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 8, No. 2, pp. 71-111.
- Gomes, C. F. (1986). “Argilas. O que são e para que servem”. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, Portugal, 457 p.
- Harpur, W.A., Wilson-Fahmy, R.F. & Koerner, R.M. (1993). “Evaluation of the Contact Between Geosynthetic Clay Liners and Geomembranes in Terms of Transmissivity”. *Geosynthetic Liner Systems: Innovations, Concerns and Design*, Edited by Koerner & Wilson-Fahmy. *Proceedings of a Geosynthetic Liner Systems Seminar*, Philadelphia, USA, pp. 143-154.
- Rowe, R.K. (1998). “Geosynthetics and the Minimization of Contaminant Migration through Barrier Systems Beneath Solid Waste”. Keynote paper, *Proceedings of the Sixth International Conference on Geosynthetics*, Vol. 1, Atlanta, USA, pp. 27-103.
- Touze-Foltz, N & Barroso, Madalena C.P. (2006). “Empirical Equations for Calculating the Rate of Liquid Flow Through Geosynthetic Clay Liners–Geomembrane Composite Liners”. *Geosynthetics International*, Vol. 13, No.2, pp. 73-82, 2006
- Touze-Foltz, N. & Giroud, J.P. (2003). “Empirical Equations for Calculating the Rate of Liquid Flow Through Composite Liners Due to Geomembrane Defects”. *Geosynthetics International*, Vol. 10, No. 6, pp. 215-233.
- Touze-Foltz, N., Rowe, R.K. & Duquennoi, C. (1999). “Liquid Flow Through Composite Liners due to Geomembrane Defects: Analytical Solutions for Axi-symmetric and Two-dimensional Problems”. *Geosynthetics International*, Vol. 6., No. 6, pp. 455-479 (Erratum: 2000, Vol. 7, No. 1, p. 77).