

## MIGRAÇÃO DE FLUIDOS ATRAVÉS DE ORIFÍCIOS NA GEOMEMBRANA

### *FLUID MIGRATION THROUGH GEOMEMBRANE DEFECTS*

Barroso, Madalena, *Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, mbarroso@lnec.pt*  
Touze-Foltz, N., *Unité HBAN, Cemagref, Antony, Paris, France, nathalie.touze@cemagref.fr*  
Lopes, Graça, *ISEL, Lisboa, Portugal, glopes@dec.isel.ipl.pt*

#### RESUMO

A migração de fluidos através de orifícios na geomembrana foi estudada mediante a realização de ensaios laboratoriais. Para o efeito, simulou-se um sistema de confinamento de fundo de um aterro de resíduos, constituído por uma geomembrana com um orifício, um geossintético bentonítico (GCL) e uma camada de solo argiloso compactado (CCL). Mediu-se o fluxo na interface entre a geomembrana e o GCL e calculou-se a transmissividade da interface. Neste artigo apresentam-se os resultados do estudo paramétrico realizado com o objectivo de avaliar a influência de alguns dos aspectos que governam a migração de fluidos, nomeadamente a pré-hidratação dos GCLs, a tensão confinante e a carga hidráulica. Os resultados sugerem que o aumento da carga hidráulica não influencia significativamente a transmissividade e que a influência da pré-hidratação dos GCLs depende da tensão confinante aplicada. Sugerem, também, que o aumento da tensão confinante apenas afecta a transmissividade no caso dos GCLs serem pré-hidratados.

#### ABSTRACT

Composite liners comprising a geomembrane 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 geomembrane and the GCL were measured and correspondent interface transmissivity was estimated. The tests conducted aimed at studying the influence of the prehydration of the GCLs, the influence of the confining stress, and the influence of the hydraulic head on flow rates through composite liners due to defects in the geomembrane. Results indicate that the pre-hydration of the GCLs has a different effect on transmissivity as function of the confining stress used. They also suggest that the increase in confining stress only affects the transmissivity when pre-hydrated GCLs are used. Finally, the transmissivity does not seem to be significantly affected by the increase in hydraulic head.

#### 1. INTRODUÇÃO

A concepção e construção de aterros evoluíram substancialmente nas últimas décadas, sendo actualmente obras de engenharia geotécnicas estruturalmente complexas. Diferentes materiais têm sido utilizados no confinamento de fundo e taludes dos aterros de resíduos, tais como geomembranas, geossintéticos bentoníticos (GCLs) e camadas de argila compactadas (CCLs). Embora qualquer destes materiais pudesse ser utilizado como barreira, os aterros modernos combinam dois ou mais destes materiais, formando barreiras múltiplas. Nestes sistemas a geomembrana (GM), geralmente de polietileno de alta densidade (PEAD), está sempre presente, constituindo a barreira activa à migração de poluentes.

Um aspecto que pode comprometer o desempenho das geomembranas, e, conseqüentemente, dos sistemas de confinamento, prende-se com a presença de orifícios. Estudos realizados com base em métodos eléctricos de detecção de fugas sugerem que os orifícios são inevitáveis,

mesmo em obras sujeitas a um rigoroso controlo de construção. Por exemplo, uma síntese de estudos apresentada por [1], cobrindo uma área total de 150 hectares, refere uma frequência de 17.4 orifícios/hectare. Um valor da mesma ordem de grandeza (12.9 orifícios/hectare) é relatado por [2], com base em informações recolhidas em mais de 300 obras de 16 países, cobrindo uma área total de 325 hectares. Os orifícios estão, de um modo geral, relacionados com actividades construtivas inadequadas, em particular com a colocação da camada de drenagem sobre o sistema de confinamento [2] e [3]. Para além dos orifícios associados às actividades construtivas, podem também surgir orifícios durante a fase de operação dos aterros, tal como indicado por [4]. Dados recolhidos por estes autores com base em sistemas de observação permanentes instalados em mais de 50 aterros de resíduos, abrangendo aproximadamente 102 hectares, apontam para uma frequência de 14.3 orifícios/hectare.

Quando existe um orifício na geomembrana, o líquido primeiro migra através do orifício, depois migra lateralmente na interface entre a geomembrana e camada subjacente, cobrindo uma área designada por área de infiltração e, por fim, infiltra-se na camada subjacente [5]. Assim, os orifícios representam caminhos preferenciais para a migração de poluentes.

Os efeitos da migração de poluentes podem ser minimizados mediante um dimensionamento adequado dos sistemas de confinamento. Para tal, é fundamental poder prever-se o caudal que atravessa os orifícios da geomembrana. Vários estudos têm sido desenvolvidos neste domínio. Porém, estes têm-se centrado em sistemas de confinamento constituídos por uma geomembrana e um CCL (e.g., [6], [5], [7]), ou por uma geomembrana e um GCL (e.g., [8], [9], [10]). Sistemas de confinamento formados por uma geomembrana, um GCL e um CCL não têm sido objecto de estudo, apesar da popularidade deste tipo de sistemas. Em Portugal, por exemplo, esta foi a solução adoptada para os sistemas de confinamento de fundo em todos os aterros de resíduos multimunicipais recentemente construídos.

Com o propósito de aprofundar os conhecimentos sobre a migração de fluidos através de sistemas de confinamento, realizaram-se ensaios laboratoriais nos quais se simulou um sistema de confinamento de um aterro de resíduos constituído por uma geomembrana com um orifício, um GCL e um CCL. O trabalho compreendeu um estudo paramétrico com vista a estudar a influência de alguns dos aspectos que podem condicionar a migração de fluidos, em particular a pré-hidratação dos GCLs (instalação com pré-hidratação ou com o teor em água natural), a tensão confinante (carga resultante da deposição do lixo) e a carga hidráulica (altura de lixiviados sobre o sistema de confinamento).

Neste artigo, apresentam-se e discutem-se os resultados do trabalho experimental realizado.

## **2. MATERIAIS**

### **2.1 Geossintéticos**

Neste trabalho utilizou-se uma geomembrana lisa, de PEAD, com 2 mm de espessura, e dois GCLs aqui designados por GCL-1 e GCL-2, respectivamente. No Quadro 1, apresentam-se as características principais destes produtos, assim como os valores da condutividade hidráulica, determinada neste estudo com base na Norma ASTM D 5887 [11], para duas tensões confinantes (50 e 200 kPa). Estes valores serão utilizados na interpretação dos resultados, apresentada na Secção 5.4.

Qualquer dos GCLs utilizado neste estudo foi aplicado em vários aterros de resíduos construídos em Portugal.

Quadro 1 – Características dos GCLs utilizados, de acordo com as Fichas Técnicas dos produtos

Amostras		GCL-1	GCL-2	
Camada bentonítica	Massa por unidade de área (g/m <sup>2</sup> )	4 670	5 000	
	Tipo de bentonite	Natural, sódica, granular	Sódica, granular	
Geotêxtil superior	Massa por unidade de área (g/m <sup>2</sup> )	220	200	
	Tipo	Agulhado, não tecido	Agulhado, não tecido	
Geotêxtil inferior	Massa por unidade de área (g/m <sup>2</sup> )	110	125	
	Tipo	Agulhado, tecido	Agulhado, tecido	
GCL	Massa por unidade de área (g/m <sup>2</sup> )	5 000	5 300	
	Tipo	Agulhado	Colado + agulhado	
	Espessura (mm)	6	7	
	Conductividade hidráulica (m/s)	---	$\leq 5 \times 10^{-11}$	$\leq 5 \times 10^{-11}$
		50 kPa (ASTM D 5887)	$3.7 \times 10^{-11}$	$3.6 \times 10^{-11}$
	200 kPa (ASTM D 5887)	$1.1 \times 10^{-11}$	$1.2 \times 10^{-11}$	

## 2.2 Solo

O solo utilizado no trabalho experimental foi colhido no Aterro de Resíduos do Oeste, durante a fase de construção desta obra, em dois locais diferentes, os quais correspondem a solos diferentes do ponto de vista geotécnico devido às heterogeneidades geológicas das formações ocorrentes no local. Assim, os solos foram designados por S-1 e S-2, respectivamente. No Quadro 2 apresentam-se as características geotécnicas mais relevantes dos solos em questão.

Quadro 2 – Características dos solos utilizados

Solo	Granulometria (% < 0.074 mm)	Limites			Ensaio		Conductividade hidráulica k (m/s)
		LL	LP	IP	Proctor modificado $\gamma_d^{\text{máx}}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$W_{\text{opt}}$ (%)	
S-1	73.6	54.2	23.7	30.5	19.1	13.6	$8 \times 10^{-11}$
S-2	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, constituída basicamente 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 percola entre a geomembrana 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 6 cm de altura, para acomodar a placa granular.

A primeira etapa do ensaio consistiu na compactação do solo no interior da célula. O solo foi compactado em duas camadas com aproximadamente 2 cm, com um teor em água 2 % superior ao teor em água ótimo ( $W_{opt}$ ) indicado no Quadro 2. Esta operação foi feita com o pilão do ensaio Proctor modificado. O excesso de solo foi rasado para se obter uma superfície lisa. Sobre esta superfície, colocou-se o GCL e, acima deste, uma geomembrana com um orifício de 3 mm de diâmetro, localizado ao centro. A célula foi encerrada e colocada numa prensa para aplicação da carga mecânica. Por fim, a parte superior da célula foi ligada ao abastecimento de água, que permite a aplicação da 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, ilustra-se sucintamente o procedimento descrito e, na Figura 2, apresenta-se um esquema do ensaio.

Foram realizados vários ensaios com o objectivo de estudar a importância relativa de alguns dos aspectos que podem condicionar o fluxo de fluidos através de orifícios na geomembrana, designadamente a pré-hidratação dos GCLs, a tensão confinante e a carga hidráulica. Assim, prepararam-se dois tipos de provetes de GCL, um sem pré-hidratação (teor em água natural) e outro com pré-hidratação para um teor em água de 100 %. O procedimento adoptado para pré-hidratar os provetes consistiu em mergulhar os mesmos em água durante um determinado intervalo de tempo, após o qual foram colocados sob uma determinada carga mecânica (a mesma a utilizar no ensaio propriamente dito), durante uma semana. Este procedimento visou uma melhor homogeneização do teor em água no interior dos provetes, como observado por [12] e por [13]. A realização de ensaios sem e com pré-hidratação dos GCLs representa as duas abordagens possíveis para a instalação destes geossintéticos em obra. A primeira corresponde aos casos em que os GCLs são instalados com o teor em água natural, enquanto a pré-hidratação com um teor em água de 100% corresponde a uma recomendação do [14]. De acordo com esta entidade, os GCLs têm melhor desempenho hidráulico quando pré-hidratados (sob carga) para o teor em água referido.

Para cada uma das condições de hidratação, realizaram-se ensaios com duas tensões confinantes (50 e 200 kPa) e duas cargas hidráulicas (0.3 m e 1.2 m). As tensões confinantes indicadas representam dois possíveis níveis de tensão aplicada sobre o sistema de confinamento dos aterros de resíduos, correspondendo a uma altura de resíduos sólidos urbanos de aproximadamente 5 m e 20 m, respectivamente. Relativamente à carga hidráulica, 0.3 m corresponde à altura máxima de lixiviado geralmente permitida na maioria dos regulamentos sobre aterros de resíduos, enquanto o segundo valor representa o caso em que a carga hidráulica é elevada em consequência de, por exemplo, um deficiente funcionamento do sistema de drenagem. Exemplos de deficiente funcionamento destes sistemas são citados por [15]. A duração dos ensaios foi estabelecida com base no tempo necessário para a obtenção do regime permanente. Assim, cada ensaio decorreu durante, no mínimo, 17 dias.

O fluxo de água através do orifício da 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 a partir da bureta de Mariotte.



Figura 1 – Metodologia de ensaio.

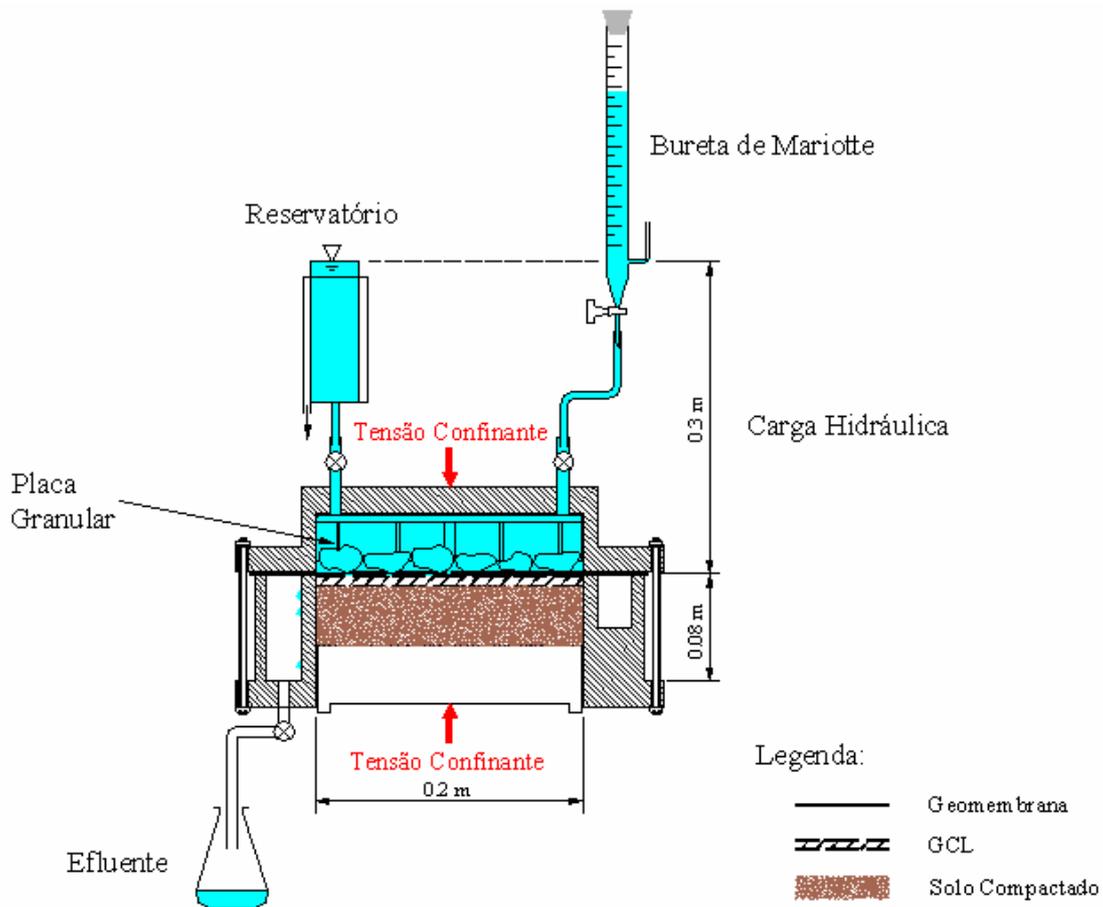


Figura 2 – Esquema do ensaio para medição do fluxo na interface entre a GM e o GCL.

## 4. RESULTADOS

### 4.1 Fluxo

As Figuras 3 e 4 apresentam a evolução do fluxo na interface entre a geomembrana e o GCL, respectivamente para o GCL-1 e o GCL-2. As barras de erro, associadas aos valores do fluxo nos gráficos, representam as incertezas associadas às medições experimentais realizadas. Detalhes sobre os cálculos envolvidos na determinação das incertezas podem ser encontrados em [16].

Tal como pode observar-se, em todos os ensaios o fluxo diminuiu ao longo do tempo, até se atingir o regime permanente. Estes resultados são consistentes com os resultados obtidos por [9].

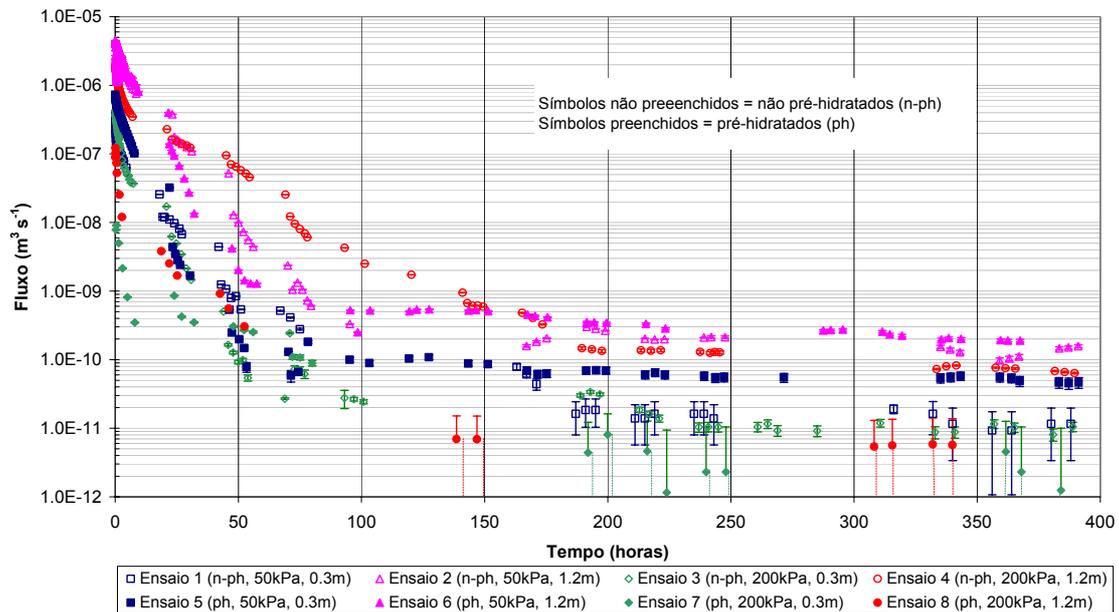


Figura 3 – Evolução do fluxo nos ensaios realizados com o GCL-1.

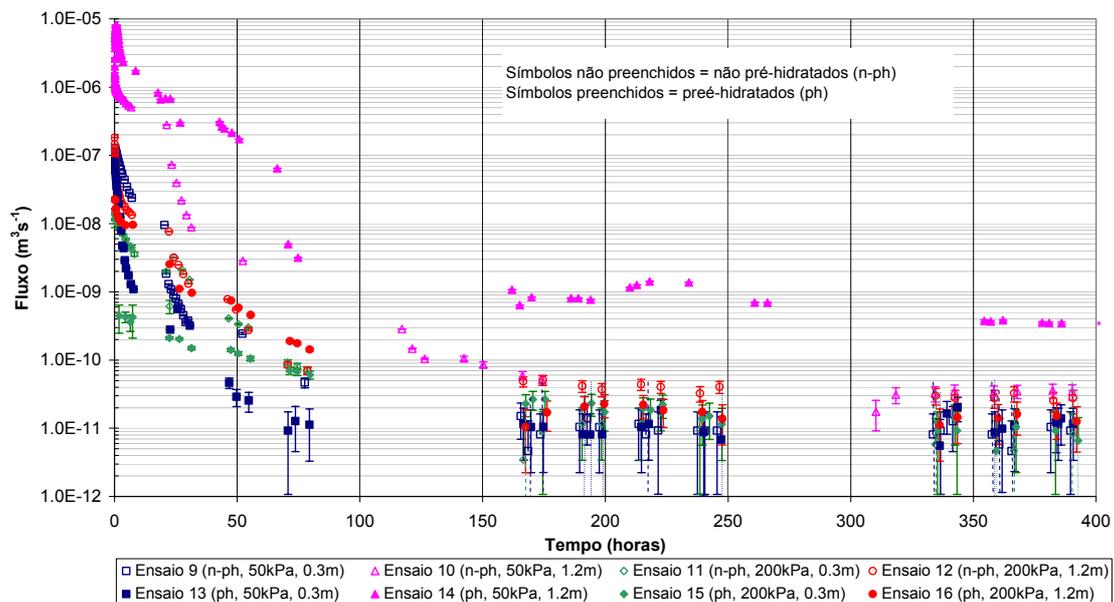


Figura 4 – Evolução do fluxo nos ensaios realizados com o GCL-2.

Os valores finais do fluxo (valores médios calculados com base no fluxo obtido nas últimas 36 horas de ensaio) são apresentados no Quadro 3, onde também se indicam as condições operatórias adoptadas em cada ensaio (pré-hidratação, tensão confinante e carga hidráulica).

#### 4.2 Transmissividade da interface

A transmissividade da interface pode ser calculada de dois modos. O primeiro, proposto por [9], assume que todo o líquido que migra através do orifício da geomembrana se escoar na interface entre a geomembrana e o GCL e que este é axissimétrico. Negligencia, pois, o fluxo no interior do GCL, pelo que sobrestima o valor da transmissividade. Para além disso, pode também

sobrestimar a área de infiltração de líquido, pois assume que a área de infiltração 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, apresentada por [9]:

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

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 geomembrana.

Um modo mais rigoroso de calcular a transmissividade foi proposto por [17], com base em soluções analíticas, assumindo que o GCL, a camada de solo sobrejacente e a interface entre a geomembrana e o GCL estão saturados. É igualmente assumido que o fluxo na interface é axissimétrico. Por oposição à transmissividade aparente, esta segunda é aqui designada por transmissividade efectiva.

As soluções analíticas propostas por [17] para o cálculo da transmissividade efectiva, no caso de se conhecer o raio correspondente à área de infiltração de líquido, são as seguintes:

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

$$Q_r(R_c) = -2\pi \theta \alpha R_c [A_p I_1(\alpha R_c) - B_p K_1(\alpha R_c)] \quad (3)$$

onde  $Q_r(R_c)$  é o fluxo efluente, determinado na fase inicial do ensaio quando o volume de água recolhido na base da célula é significativo,  $Q$  é o fluxo influente, determinado quando o volume de água efluente diminui e 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 equações 4 a 7, propostas por [15]:

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

$$B_p = \frac{h \times I_0(\alpha R_c) + C \times (I_0(\alpha R_c) - I_0(\alpha r_0))}{K_0(\alpha r_0) I_0(\alpha R_c) - K_0(\alpha R_c) I_0(\alpha r_0)} \quad (5)$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{k_s}{(H_{GCL} + H_f)\theta}} \quad (6)$$

$$C = H_{GCL} + H_f \quad (7)$$

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

Note-se que, no presente trabalho, o valor do raio correspondente à área de infiltração é conhecido porque, em todos os ensaios realizados, foi possível observar a existência de líquido na base da célula (fluxo efluente) até ao fim do ensaio, embora, em alguns casos, o seu valor

não fosse mensurável (apenas algumas gotas na parede da célula). Nestas circunstâncias, o raio de infiltração corresponde ao raio do provete.

Os valores da transmissividade aparente e efectiva, obtidos com base no valor do fluxo final, são também apresentados no Quadro 3.

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

Ensaio	Solo	GCL	Condições de hidratação	Tensão confinante (kPa)	Carga hidráulica (m)	Fluxo final (m <sup>3</sup> /s)	Transmissividade (m <sup>2</sup> /s)	
							Aparente	Efectiva
1	S-1	GCL-1	n-ph	50	0.3	1.0×10 <sup>-11</sup>	2.3×10 <sup>-11</sup>	2.2×10 <sup>-11</sup>
2	S-1	GCL-1	n-ph	50	1.2	1.3×10 <sup>-10</sup>	7.3×10 <sup>-11</sup>	7.3×10 <sup>-11</sup>
3	S-1	GCL-1	n-ph	200	0.3	1.0×10 <sup>-11</sup>	2.2×10 <sup>-11</sup>	2.1×10 <sup>-11</sup>
4	S-1	GCL-1	n-ph	200	1.2	7.0×10 <sup>-11</sup>	3.9×10 <sup>-11</sup>	3.8×10 <sup>-11</sup>
5	S-1	GCL-1	ph	50	0.3	5.0×10 <sup>-11</sup>	1.1×10 <sup>-10</sup>	1.1×10 <sup>-10</sup>
6	S-1	GCL-1	ph	50	1.2	1.7×10 <sup>-10</sup>	9.4×10 <sup>-11</sup>	9.3×10 <sup>-11</sup>
7	S-1	GCL-1	ph	200	0.3	2.9×10 <sup>-12</sup>	6.5×10 <sup>-12</sup>	5.7×10 <sup>-12</sup>
8	S-1	GCL-1	ph	200	1.2	5.3×10 <sup>-12</sup>	2.9×10 <sup>-12</sup>	2.5×10 <sup>-12</sup>
9	S-2	GCL-2	n-ph	50	0.3	8.7×10 <sup>-12</sup>	1.9×10 <sup>-11</sup>	1.7×10 <sup>-11</sup>
10	S-2	GCL-2	n-ph	50	1.2	3.5×10 <sup>-11</sup>	2.0×10 <sup>-11</sup>	1.8×10 <sup>-11</sup>
11	S-2	GCL-2	n-ph	200	0.3	8.5×10 <sup>-12</sup>	1.9×10 <sup>-11</sup>	1.8×10 <sup>-11</sup>
12	S-2	GCL-2	n-ph	200	1.2	2.9×10 <sup>-11</sup>	1.6×10 <sup>-11</sup>	1.5×10 <sup>-11</sup>
13	S-2	GCL-2	ph	50	0.3	1.2×10 <sup>-11</sup>	2.7×10 <sup>-11</sup>	2.5×10 <sup>-11</sup>
14	S-2	GCL-2	ph	50	1.2	3.6×10 <sup>-10</sup>	2.0×10 <sup>-10</sup>	2.0×10 <sup>-10</sup>
15	S-2	GCL-2	ph	200	0.3	6.6×10 <sup>-12</sup>	1.5×10 <sup>-11</sup>	1.3×10 <sup>-11</sup>
16	S-2	GCL-2	ph	200	1.2	1.4×10 <sup>-11</sup>	7.8×10 <sup>-12</sup>	7.0×10 <sup>-12</sup>

Nota: n-ph=não pré-hidratado (teor em água natural); ph=pré-hidratado (teor em água de aproximadamente 100%)

Tal como pode observar-se, o fluxo final variou entre  $9 \times 10^{-12}$  e  $1 \times 10^{-10}$  m<sup>3</sup>/s, nos ensaios realizados com GCLs sem pré-hidratação e  $3 \times 10^{-12}$  e  $2 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s, nos ensaios efectuados com provetes pré-hidratados.

Relativamente à transmissividade, verifica-se que os valores da transmissividade aparente e efectiva são semelhantes, sugerindo que, no caso dos ensaios descritos no presente artigo, a infiltração de água no GCL no final do ensaio é pouco significativa. Estes resultados indicam que, em ensaios laboratoriais, tanto a Equação 1 como a Equação 2 são adequadas para o cálculo da transmissividade da interface. Pode também verificar-se que esta propriedade foi da mesma ordem de grandeza ( $1 \times 10^{-11}$  e  $7 \times 10^{-11}$  m<sup>2</sup>/s) nos ensaios realizados com provetes sem pré-hidratação, tendo variado significativamente ( $3 \times 10^{-12}$  e  $2 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s) nos ensaios realizados com pré-hidratação.

#### 4.3 Área de infiltração

No decorrer dos ensaios observou-se que o líquido efluente não surgia uniformemente ao longo do perímetro do provete de GCL, parecendo existir caminhos preferenciais na interface entre a geomembrana e o GCL ao longo dos quais o escoamento se processava. Com o objectivo de visualizar esses caminhos, introduziu-se um corante azul na água que abastecia o ensaio (fluxo influente) após o estabelecimento do regime permanente. Na Figura 5, mostra-se, a título de exemplo, o aspecto da área de infiltração obtida no Ensaio 9.



Figura 5 – Aspecto da área de infiltração no final do Ensaio nº 9.

Tal como pode observar-se, a área de infiltração não é homogénea, sugerindo que a interface não é uniforme. A não uniformidade da interface parece ser confirmada pela observação da geomembrana em contacto com o GCL após a desmontagem do ensaio (Figura 6).



Figura 6 – Aspecto da geomembrana em contacto com o GCL no final do Ensaio nº 9.

Apesar das limitações enumeradas, um raio de infiltração igual ao raio do provete de GCL foi utilizado nos cálculos efectuados para determinar a transmissividade efectiva, a qual foi utilizada para interpretar os resultados (secção seguinte). Os resultados foram interpretados em termos de transmissividade porque esta expressa as características hidráulicas da interface, as

quais são determinantes na migração de poluentes devido a orifícios na geomembrana. De facto, qualquer que seja a ferramenta utilizada (equações empíricas ou soluções analíticas) para prever o fluxo através de orifícios na geomembrana, o conhecimento das características da interface é indispensável.

## 5. DISCUSSÃO

### 5.1 Influência das características do solo no valor da transmissividade

Dado que no presente estudo foram utilizados solos com condutividades hidráulicas diferentes, torna-se necessário avaliar a influência deste parâmetro sobre a transmissividade da interface. Para o efeito realizou-se um estudo numérico, o qual consistiu em calcular a transmissividade da interface para diferentes condutividades hidráulicas do solo, mantendo-se constante os restantes parâmetros necessário para calcular a transmissividade através da Equação 2. Os valores seleccionados para os diferentes parâmetros foram os seguintes:

- espessura do solo =  $4.5 \times 10^{-2}$  m;
- espessura do GCL =  $6 \times 10^{-3}$  m;
- condutividade hidráulica do GCL =  $5 \times 10^{-11}$  m/s (ver Quadro 1);
- raio do orifício =  $1.5 \times 10^{-3}$  m;
- carga hidráulica = 0.3 m;
- raio de infiltração = 0.1 m;
- fluxo =  $1 \times 10^{-11}$  m<sup>3</sup>/s.

De referir que, para além da condutividade hidráulica ( $8 \times 10^{-11}$  e  $3 \times 10^{-10}$ ) dos solos usados nos ensaios atrás referidos, neste estudo paramétrico consideram-se, também, os seguintes valores:  $1 \times 10^{-8}$ ,  $1 \times 10^{-9}$  e  $1 \times 10^{-10}$  m/s. O Quadro 4 apresenta os resultados dos cálculos efectuados.

Quadro 4 – Influência da condutividade hidráulica do solo sobre a transmissividade na interface entre a GM e o GCL

Condutividade hidráulica do solo (m/s)	Transmissividade (m <sup>2</sup> /s)
$8 \times 10^{-11}$	$2.1 \times 10^{-11}$
$3 \times 10^{-10}$	$1.9 \times 10^{-11}$
$1 \times 10^{-8}$	$1.7 \times 10^{-11}$
$1 \times 10^{-9}$	$1.8 \times 10^{-11}$
$1 \times 10^{-10}$	$2.1 \times 10^{-11}$

Tal como pode observar-se, a condutividade hidráulica do solo tem impacto reduzido no valor da transmissividade, pelo que variações obtidas nesta propriedade não devem ser atribuídas às características hidráulicas do solo.

### 5.2 Influência da pré-hidratação e da tensão confinante

Os resultados apresentados no Quadro 3 sugerem que a pré-hidratação dos GCLs afecta a transmissividade de modo distinto, consoante a tensão confinante utilizada. Para a menor tensão confinante, obtiveram-se transmissividades inferiores nos ensaios realizados com provetes não pré-hidratados, enquanto que, para a tensão confinante superior, a transmissividade foi substancialmente maior no caso dos ensaios realizados com GCLs não pré-hidratados. Estes resultados tendem a indicar que não é possível dissociar o efeito destes dois parâmetros. Esta

hipótese parece ser confirmada pela análise da influência da tensão confinante. De facto, observa-se que o aumento da mesma de 50 para 200 kPa só afecta a transmissividade no caso dos GCLs pré-hidratados. Neste caso, verifica-se que a transmissividade diminui significativamente com o aumento da tensão confinante.

A diminuição do valor da transmissividade com o aumento da tensão confinante nos ensaios pré-hidratados pode ser atribuída à diminuição da espessura da interface entre a geomembrana e o GCL, já que a uma menor espessura da interface corresponde uma menor transmissividade, tal como indicado por [5] e [18], entre outros. A razão pela qual este mesmo efeito não se fez sentir nos resultados dos ensaios realizados com os provetes não pré-hidratados pode estar relacionado com a expansibilidade dos provetes no interior da célula. Nos ensaios efectuados com GCLs não pré-hidratados, os provetes expandem no interior da célula, ocupando todo o espaço livre entre a geomembrana e o GCL, independentemente da tensão confinante aplicada, o que se traduz por valores de transmissividade similares. Pelo contrário, nos provetes pré-hidratados a expansão ocorreu antes destes serem colocados na célula. Recorde-se que estes permaneceram sob carga durante uma semana para homogeneização do teor em água (ver Secção 3). Para as tensões confinantes utilizadas neste estudo, ao cabo de uma semana a espessura dos GCLs está estabilizada, de acordo com os resultados dos ensaios de expansibilidade sob carga constante apresentados por [19]. Nestas circunstâncias, a espessura da interface afigura-se mais dependente da tensão confinante aplicada.

Face ao exposto, não foi possível com este estudo confirmar, ou contrariar, a recomendação do [14] de pré-hidratar os GCLs sob carga após a sua instalação em obra com um teor em água de 100%, para melhorar o seu desempenho hidráulico. A investigação aqui iniciada deve pois ser alargada, tanto no que diz respeito à gama dos parâmetros como ao número de produtos, a fim de se clarificar este aspecto.

### **5.3 Influência da carga hidráulica**

O aumento da carga hidráulica de 0.3 m para 1.2 m parece ter um efeito reduzido na transmissividade, especialmente no caso dos provetes sem pré-hidratação. Este facto pode estar relacionado com o aumento proporcional registado entre a carga hidráulica e o fluxo na interface entre a geomembrana e o GCL.

### **5.4 Comparação com transmissividades calculadas através de equações empíricas**

A transmissividade da interface pode ser quantificada de duas formas. A primeira, a partir de ensaios laboratoriais como os descritos neste artigo e, a segunda, através de expressões matemáticas de carácter empírico. As expressões existentes actualmente foram desenvolvidas para o caso da geomembrana assentar sobre uma camada de solo, sendo a transmissividade calculada com base na condutividade hidráulica do solo.

Existem presentemente três expressões matemáticas, as quais representam diferentes tipos de condições de contacto entre a geomembrana e a camada subjacente. Por outras palavras, correspondem a uma má, boa ou excelente instalação da geomembrana em obra. São, por isso, geralmente designadas por Más, Boas ou Excelentes condições de contacto.

Com o objectivo de estudar a adequabilidade das expressões actualmente existentes, para o caso dos sistemas de confinamento que incorporam GCLs, na Figura 7, representam-se as transmissividades obtidas neste estudo e as calculadas através das expressões matemáticas existentes na literatura em função das condutividades hidráulicas dos GCLs, determinadas sob tensões confinantes de 50 ou 200 kPa (ver Quadro 1).

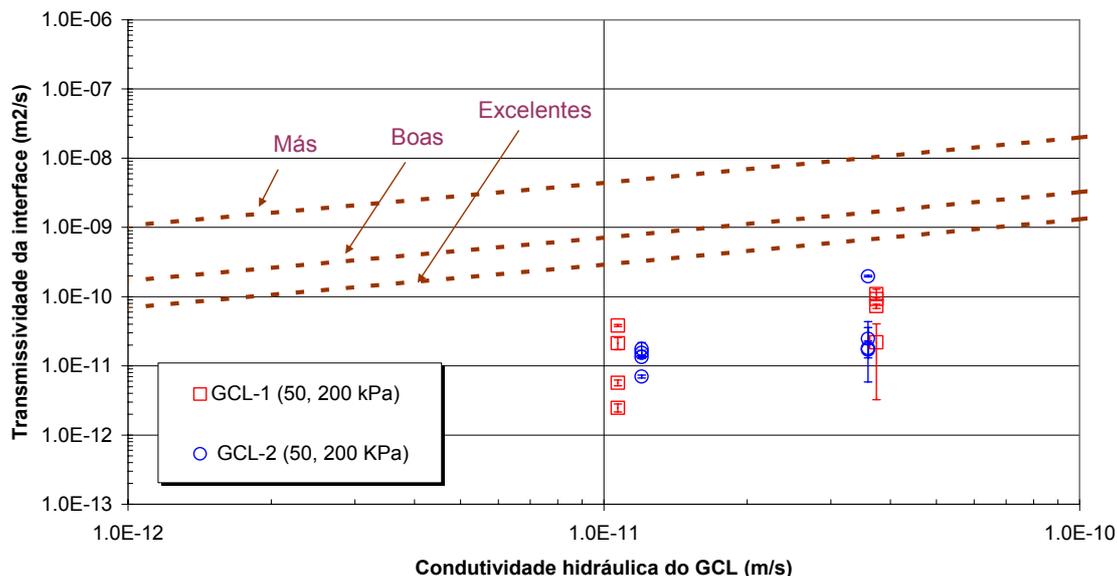


Figura 7 – Comparação entre as transmissividades obtidas experimentalmente e as calculadas através de equações empíricas para más, boas e excelentes condições de contacto.

Pode observar-se que, os valores obtidos neste estudo se localizam todos abaixo das transmissividades calculadas através de expressões matemáticas, inclusive da linha correspondente às Condições de Contacto Excelentes, as quais são as mais próximas das condições de contacto existentes entre uma geomembrana e um GCL, tal como referido por [20]. Estes resultados indicam que as expressões matemáticas existentes para calcular a transmissividade sobrestimam o seu valor no caso dos sistemas de confinamento incluírem GCLs. Em consequência, as soluções analíticas existentes para prever o fluxo de poluentes sobrestimam o valor do mesmo, pois o valor da transmissividade é um parâmetro de entrada nesses cálculos.

Com base no exposto, considera-se necessária a definição de uma nova expressão matemática que permita estimar a transmissividade da interface no caso da geomembrana assentar sobre um GCL.

### 5.5 Comparações com resultados relatados na literatura

Ensaio laboratoriais com vista à determinação do fluxo na interface entre uma geomembrana, com um orifício, e diferentes tipos de GCLs (sem pré-hidratação) foram realizados por [9]. A partir do fluxo medido, calcularam a transmissividade aparente da interface, a qual foi utilizada por estes autores para a interpretação dos resultados. Os ensaios foram realizados para duas tensões de confinamento (20 e 70 kPa) e uma carga hidráulica de 0.3 m. Os valores obtidos por estes autores variaram entre  $6 \times 10^{-12}$  e  $2 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s. Também observaram que a transmissividade aparente no fim dos ensaios era semelhante para as duas tensões confinantes consideradas. Em termos gerais, os valores obtidos [9] apresentam uma gama maior do que os obtidos no presente trabalho com provetes sem pré-hidratação, os quais variaram entre  $2 \times 10^{-11}$  e  $7 \times 10^{-11}$  m<sup>2</sup>/s. As diferenças registadas podem estar relacionadas com o facto da tensão confinante ser uniformemente aplicada sobre o provete nos ensaios realizados por [9], enquanto que, no presente caso, a tensão foi aplicada num número limitado de pontos (locais onde a placa granular estava em contacto com o provete de GCL). Por outro lado, [9] ensaiaram um maior número de GCLs, podendo as diferenças estar relacionadas com a variabilidade dos produtos.

Medições do fluxo que migra através de orifícios na geomembrana colocada sobre um GCL foram também efectuadas por [10]. Estes ensaios foram conduzidos com cargas hidráulicas diferentes (entre 2.5 cm e 60 cm), tensões confinantes de 35 kPa e para orifícios circulares com diferentes diâmetros (3.6 mm, 1 mm, e aproximadamente 0.1 mm). Os resultados obtidos por estes autores indicam que o fluxo aumenta com o aumento da carga hidráulica. Estes resultados são consistentes com os obtidos no presente estudo. Por outro lado, segundo aqueles autores, independentemente das dimensões do orifício, o fluxo foi semelhante ( $3 \times 10^{-11}$  m<sup>3</sup>/s) para a carga hidráulica de 0.3 m. Estes fluxos são da mesma ordem de magnitude dos obtidos no presente estudo para a carga hidráulica em questão.

## 6. CONCLUSÕES

Neste artigo apresentou-se o trabalho experimental realizado para estudar a migração de fluidos através de orifícios em geomembranas aplicadas em aterros de resíduos. Simulou-se um sistema de confinamento de fundo de aterros de resíduos, constituídos por uma geomembrana com um orifício, um GCL e uma camada de solo argiloso compactado, e determinou-se o fluxo através da interface entre a geomembrana e o GCL. Com base nos fluxos medidos, calculou-se a transmissividade da interface.

Os ensaios realizados visaram avaliar a influência de alguns dos aspectos que afectam a migração de fluidos, nomeadamente a pré-hidratação dos GCLs, a tensão confinante e a carga hidráulica. Para o efeito, foram utilizados provetes de GCL não pré-hidratados (teor em água natural) e pré-hidratados (teor em água de 100%). Para cada condição de hidratação, foram realizados ensaios com duas tensões confinantes (50 e 200 kPa) e duas cargas hidráulicas (0.3 e 1.2 m).

Os resultados dos ensaios realizados indicam que a pré-hidratação dos GCLs afecta a transmissividade de forma diferente, dependendo da tensão confinante aplicada. Para a tensão confinante de 50 kPa, obtiveram-se transmissividades inferiores nos ensaios realizados com provetes não pré-hidratados. Pelo contrário, para a tensão confinante de 200 kPa, a transmissividade foi substancialmente maior no caso dos ensaios realizados com GCLs não pré-hidratados. Por outro lado, verificou-se que o aumento da tensão confinante de 50 kPa para 200 kPa só afectou a transmissividade no caso dos GCLs pré-hidratados. Para esta condição de hidratação, a transmissividade obtida nos ensaios realizados a 50 kPa foi significativamente superior do que para 200 kPa, enquanto que, para os provetes não pré-hidratadas, a variação desta propriedade foi pouco significativa. Relativamente ao aumento da carga hidráulica de 0.3 m para 1.2 m, observou-se que este tem um efeito reduzido no valor da transmissividade.

## AGRADECIMENTOS

Agradece-se às empresas ResiOeste (concessionária do aterro de resíduos do Oeste), Naue e Linteco (produtoras de geossintéticos) a disponibilização dos materiais utilizados neste estudo. Agradece-se, igualmente, aos técnicos Luís Pinto e Augusto Lopes de Carvalho (LNEC) e à estagiária Lara Martins o apoio dado na realização do trabalho experimental. Agradece-se, ainda, à Fundação Calouste Gulbenkian a concessão de uma bolsa de estudo.

**REFERÊNCIAS**

- [1] Rollin, A.L., Marcotte, M. & Chaput, L. (2002). Lessons Learned from Geo-electrical Leaks Surveys. *Proceedings of the Seventh International Conference on Geosynthetics*, Vol. 2, Nice, France, pp. 527-530.
- [2] Nosko, V. & Touze-Foltz, N. (2000). Geomembrane Liner Failure: Modelling of its Influence on Contaminant Transfer. *Proceedings of the EuroGeo 2*, Vol. 2, Bologna, Italy, pp. 557-560.
- [3] Colucci, P. & Lavagnolo, M. C. (1995). Three Years Field Experience in Electrical Control of Synthetic Landfill Liners. *Proceedings of the Fifth International Landfill Symposium: Sardinia '95*, Vol. 2, Cagliari, Sardinia, Italy, pp. 437-452.
- [4] Needham, A. D., Gallagher, E.M.G. & Smith, J.W.N. (2004). Prediction of the Long Term Generation of Defects in HDPE Liners. *Proceedings of the EuroGeo 3*, Vol. 2, Munich, Germany, pp. 507-514.
- [5] Brown, K.W., Thomas, J.C., Lytton, R.L., Jayawickrama, P. & Bhart, S. (1987). *Quantification of Leakage Rates through Holes in Landfill Liners*. United States Environmental Protection Agency Report CR810940, Cincinnati, OH, 147 p.
- [6] Fukuoka, M. (1986). Large Scale Permeability Test for Geomembrane Subgrade System. *Proceedings of the Third International Conference on Geotextiles*, Vienna, Austria, pp. 917-922.
- [7] Touze-Foltz, N. (2001). *Modélisation des Transferts Advectifs dans les Etanchéités Composites de Centres de Stockage de Déchets*. Thèse de Doctorat, Spécialité Géologie de l'Ingénieur, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, France, 288 p.
- [8] Estornell, P. & Daniel, D. (1992). Hydraulic Conductivity of Three Geosynthetic Clay Liners. *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 18, No. 10, pp. 1592-1606.
- [9] 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 held in Philadelphia, USA*, pp. 143-154.
- [10] Koerner, G.R. & Koerner, R.M. (2002). Geomembrane Leakage Arising from Broken Needles with GCLs. *Proceedings of the International Symposium IS Nuremberg 2002*, Nuremberg, Germany, pp. 209-217.
- [11] 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.
- [12] Touze-Foltz, N., Darlot, O. & Barroso, M. (2002). Experimental Investigation of the Influence of the Pre-hydration of GCLs on the Leakage Rates through Composite Liners. *Proceedings of the International Symposium IS Nuremberg 2002*, Nuremberg, Germany, pp. 265-274.

- [13] Bouazza, A., Vangpaisal, T. & Rahman, F. (2002). Gas Migration through Needle Punched Geosynthetic Clay Liners. *Proceedings of the International Symposium IS Nuremberg 2002*, Nuremberg, Germany, pp. 165-176.
- [14] Comité Français des Géosynthétiques (1998). *Recommandation Générales pour la Réalisation d'Étanchéité par Géosynthétiques Bentonitiques*. Fascicule n°12, 56 p.
- [15] 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.
- [16] Barroso, M.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.
- [17] 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).
- [18] 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.
- [19] Lake, C.B. & Rowe, R.K. (2000). Diffusion of Sodium and Chlorite through Geosynthetic Clay Liners. *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 18, No. 2-4, pp. 103-131.
- [20] 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.