

ENSINAMENTOS RECENTES SOBRE O DESEMPENHO DOS GEOSSINTÉTICOS EM SISTEMAS DE CONFINAMENTO

Recent advances on the geosynthetic performance in liner systems

Barroso, Madalena

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

Lopes, M.G.

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

Resumo: Este artigo descreve, em primeiro lugar, os tipos de sistemas de confinamento basal e de cobertura dos aterros de resíduos. Seguidamente, apresenta e comenta os principais aspectos que podem comprometer o desempenho das barreiras geossintéticas (geomembranas e geossintéticos bentoníticos) nos sistemas de confinamento. Entre os aspectos em análise incluem-se a migração de contaminantes através das barreiras geossintéticas (por difusão e por advecção), a durabilidade das geomembranas e dos geossintéticos bentoníticos, a protecção da geomembrana e as dobras na geomembrana.

Abstract: This paper describes, in first place, the types of liner systems used in landfills. It then presents and discusses the main issues that can affect the performance of the geosynthetic barriers (geomembranes and geosynthetic clay liners) in the composite liner systems. Issues under discussion include the migration of contaminants through the composite liners both by diffusion and by advection, the service life of the geosynthetic barriers, the geomembrane protection and the geomembrane wrinkles.

1 INTRODUÇÃO

Os aterros de resíduos são presentemente obras de engenharia estruturalmente complexas, concebidas para minimizar o efeito poluente dos resíduos no meio ambiente. Para o efeito, incluem sistemas de confinamento basal (fundo e taludes) e de cobertura.

O sistema de confinamento basal destina-se a prevenir ou reduzir a migração de contaminantes para o solo e águas subterrâneas adjacentes, enquanto o sistema de cobertura tem por objectivos principais controlar a infiltração das águas superficiais no aterro e a emissão do gás para o ambiente. Para além disso, o sistema de cobertura serve também para evitar o arrastamento de poeiras e resíduos pelo vento, minimizar os odores, fornecer condições para o crescimento da vegetação, manter afastados dos resíduos os animais e assegurar uma adequada integração paisagística do aterro.

Destes sistemas de confinamento, o basal é o mais exigente de um ponto de vista técnico. É constituído por uma barreira activa e por uma barreira passiva. A primeira, engloba o sistema de drenagem (camada drenante e correspondente filtro) e o confinamento activo do aterro (geralmente assegurado por uma geomembrana de polietileno de alta densidade), enquanto a segunda inclui o confinamento passivo (assegurado por um geossintético

bentonítico e/ou uma camada argilosa compactada) e a camada de atenuação dos contaminantes (formação geológica natural).

Nos sistemas referidos, os geossintéticos têm um papel preponderante, tanto pela diversidade de produtos potencialmente aplicáveis, como pela diversidade de funções que os mesmos podem desempenhar. Os geossintéticos mais usados são os seguintes:

- geomembrana (também denominada tecnicamente por barreira geossintética polimérica): usada como barreira (impermeabilização), tanto no sistema de confinamento basal, como no sistema de cobertura;
- geossintético bentonítico (também denominado tecnicamente por barreira geossintética argilosa e aqui designado por GCL): utilizado como barreira, tanto no sistema de confinamento basal, como no sistema de cobertura (no sistema de confinamento basal, é aplicado como barreira passiva à migração de fluidos, enquanto no sistema de cobertura, pode ser usado em alternativa, ou em associação com a geomembrana);
- geotêxteis: podem ser usados nos sistemas de confinamento basal e de cobertura com várias funções, nomeadamente drenagem, filtração, separação, protecção (da geomembrana contra o punçoamento) e controlo de erosão;
- georrede e geocompósito drenante: são utilizados nas camadas de drenagem nos taludes (sistema de confinamento basal e de cobertura) e no sistema secundário de captação de lixiviado, também designado por sistema de detecção de fugas;
- geogrelha: empregue com a função de reforço, tanto no sistema de confinamento basal como no sistema de cobertura.

Na primeira parte deste artigo descrevem-se os tipos de sistemas de confinamento existentes, com especial ênfase para os sistemas de cobertura alternativos, uma vez que a estes tem sido dispensada menos atenção na literatura portuguesa. Na segunda parte, apresentam-se e discutem-se os desenvolvimentos recentes sobre os principais aspectos que podem comprometer o desempenho das barreiras geossintéticas (geomembranas e GCLs) nos sistemas de confinamento dos aterros de resíduos.

2 PARTE I: SISTEMAS DE CONFINAMENTO

2.1 Dimensionamento: regulamentações *versus* critérios de desempenho

O dimensionamento dos sistemas de confinamento dos aterros de resíduos pode ser efectuado com base em regulamentações ou em critérios de desempenho. No primeiro caso, os requisitos relativos ao perfil do sistema de confinamento, aos materiais, às dimensões das camadas, etc. que o projecto deve respeitar são regulamentados através de normas, assumindo-se desta forma que o comportamento do aterro será satisfatório. No dimensionamento com base em critérios de desempenho são levados em consideração

diversos factores, entre os quais o transporte de contaminantes (advectivo e difusivo) através das barreiras, as concentrações admissíveis nas águas subterrâneas, as condições previstas para as várias camadas e materiais constituintes do sistema de confinamento em condições de serviço, as características dos resíduos, etc. Este tipo de dimensionamento remete, assim, para o projecto a constituição do sistema de confinamento, embora impondo que o comportamento do aterro satisfaça uma série de requisitos.

Ambas as abordagens apresentam vantagens e desvantagens. O dimensionamento com base em regulamentações facilita a elaboração do projecto e a sua aprovação por parte da entidade competente e garante uma protecção mínima ao meio ambiente, ainda que esta, nalguns casos, possa ser insuficiente a longo prazo e, noutros casos, possa conduzir a um sobredimensionamento do sistema de confinamento (Estrin & Rowe, 1995).

O dimensionamento com base em critérios de desempenho tem as vantagens de permitir ajustar o projecto às condições geológicas locais e às características dos resíduos, de obrigar os projectistas a uma actualização técnica e científica, a qual fomenta a investigação científica e o desenvolvimento tecnológico e, ainda, de obrigar as partes a realizar uma análise detalhada do sistema proposto antes da sua aprovação (Estrin & Rowe, 1995). Apresenta como desvantagens a necessidade de validação do perfil proposto pelo projectista, a dificuldade em caracterizar correctamente o elevado número de parâmetros necessários para modelar o comportamento do sistema de confinamento a longo prazo e à escala real, bem como a análise do projecto por parte da entidade licenciadora poder ser mais complexa (Manassero *et al.*, 1998).

O dimensionamento com base em critérios de desempenho tem apenas sido adoptado em alguns países como o Canadá ou os Estados Unidos da América (EUA), embora de forma não sistemática. Na maior parte dos países europeus, incluindo Portugal, o dimensionamento tem sido realizado com base em regulamentações, nomeadamente a Directiva Europeia 1999/31/CE.

Esta Directiva estabelece que a protecção do solo e das águas (subterrâneas e superficiais) deve efectuar-se através da combinação de uma barreira geológica e um confinamento artificial (geralmente assumido como uma geomembrana). Para além destes elementos, a Directiva exige a adição de um sistema de captação de lixiviados (camada de drenagem com espessura mínima de 0,5 m).

A barreira geológica deve apresentar uma condutividade hidráulica (k) igual ou inferior a 10^{-9} m/s e espessura igual ou superior a 1 m. De acordo com a referida Directiva, se a barreira geológica não cumprir de forma natural as condições indicadas, poderá complementar-se de forma artificial com outros materiais que proporcionem uma protecção equivalente. Em qualquer caso, a espessura da barreira artificial não deverá ser inferior a 0,5 m. Não é, contudo, indicado como alcança a protecção equivalente de um ponto de vista técnico, pelo que diferentes soluções podem ser consideradas, como pode depreender-se da discussão efectuada na secção seguinte.

2.2 Sistemas de confinamento basal

Os sistemas de confinamento basal (fundo e taludes) têm por objectivo minimizar a migração de contaminantes para o exterior do aterro. Tipicamente, envolvem a combinação de materiais naturais (argila, areia, seixos) e artificiais (geossintéticos).

Do ponto de vista da impermeabilização, os aterros de resíduos incluem actualmente barreiras múltiplas, tipicamente constituídas ou por uma geomembrana e uma camada de solo argiloso compactado (CCL), ou por uma geomembrana, um GCL e uma CCL.

O perfil dos sistemas de confinamento basal pode apresentar várias configurações, dependendo do tipo de dimensionamento adoptado, das condições geotécnicas, do tipo de resíduos, da regulamentação vigente no país, etc. De um modo geral, estes sistemas podem porém classificar-se em simples ou duplos (Figura 1). Os primeiros são formados por um só nível de confinamento, enquanto os segundos incorporam dois níveis de confinamento, primário e secundário, separados por uma camada de drenagem, geralmente designada na literatura por sistema secundário de captação de lixiviado ou por sistema de detecção de fugas, destinada ao controlo dos lixiviados que atravessem o nível de confinamento primário do aterro. De referir que os sistemas de confinamento simples são geralmente utilizados nos aterros de resíduos sólidos urbanos (RSU) e os sistemas de confinamento duplos nos aterros de resíduos perigosos.

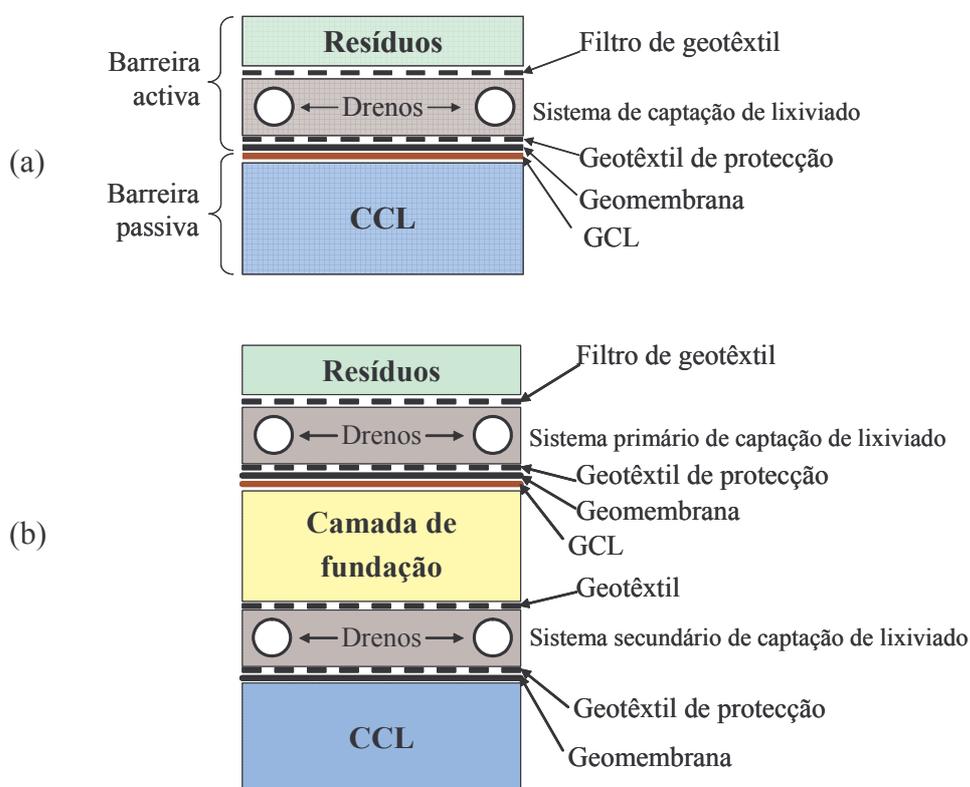


Figura 1 – Exemplos de sistemas de confinamento basal: (a) simples; (b) duplo (adaptado de Rowe, 2005)

Na concepção de um sistema de confinamento basal devem ter-se em consideração vários aspectos, tais como a migração de fluidos através das barreiras geossintéticas, a resistência mecânica dos materiais, a durabilidade das barreiras geossintéticas, a sua compatibilidade química com os lixiviados, o seu comportamento tensão-deformação, as características dos resíduos, o impacto ambiental, etc. (Lopes, 2000). Os principais desenvolvimentos no domínio das barreiras geossintéticas são apresentados na segunda parte deste artigo.

2.3 Sistemas de confinamento de cobertura convencionais

Os sistemas de confinamento de cobertura convencionais têm três objectivos principais: (1) minimizar a infiltração das águas superficiais e, consequentemente, a produção de lixiviado no aterro; (2) isolar os resíduos do meio envolvente; e (3) evitar a migração não controlada de gás do aterro.

De um modo geral, estes sistemas são constituídos por várias camadas de materiais e integram sempre barreiras, as quais podem ser constituídas por uma camada de solo argiloso compactado e/ou barreiras geossintéticas, sendo muitas vezes designados como impermeáveis. Na Figura 2 apresenta-se um exemplo de sistema de cobertura convencional e no Quadro 1 indicam-se as principais funções de cada um dos componentes que integram estes sistemas.

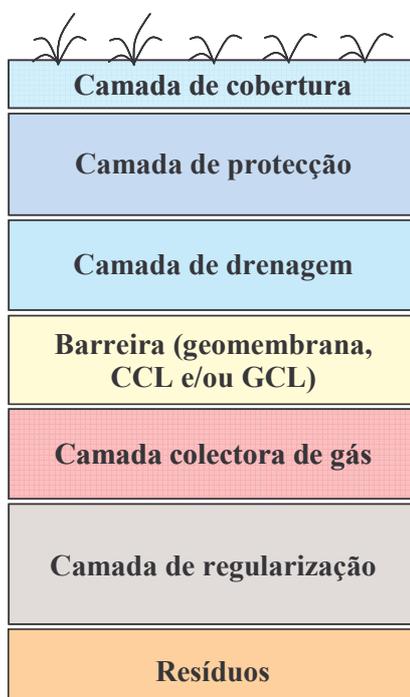


Figura 2 – Exemplo de sistema de cobertura convencional (adaptado de Hauser & Gimón, 2004)

Quadro 1 – Principais funções dos componentes do sistema de cobertura convencional

Componente	Função
Camada de cobertura	<ul style="list-style-type: none"> • resistir à erosão causada pela água e pelo vento • fornecer condições para o crescimento da vegetação • assegurar o enquadramento paisagístico e a utilização futura do local • facilitar a manutenção
Camada de protecção	<ul style="list-style-type: none"> • proteger as camadas subjacentes da erosão e da exposição às condições ambientais • servir como biobarreira • armazenar água para a vegetação
Camada de drenagem	<ul style="list-style-type: none"> • minimizar a carga hidráulica sobre a barreira e, conseqüentemente, a infiltração • escoar a água infiltrada das camadas subjacentes • reduzir e controlar a pressão da água nos poros na interface com a barreira, de modo a evitar problemas de estabilidade dos taludes
Barreira (geomembrana, CCL e/ou GCL)	<ul style="list-style-type: none"> • controlar a infiltração de água nos resíduos • restringir as emissões de gás
Camada colectora de gás	<ul style="list-style-type: none"> • colectar e conduzir o gás para os pontos de recolha e remoção • limitar a pressão sobre a barreira
Camada de regularização	<ul style="list-style-type: none"> • servir de fundação para as camadas subjacentes • proteger do impacto dos assentamentos diferenciais dos resíduos • redistribuir as cargas e as deformações • providenciar adequada capacidade de carga

Na concepção de um sistema de confinamento de cobertura, devem ter-se em conta vários factores, os quais se apresentam sumariamente no Quadro 2.

Em termos financeiros, os custos inerentes à construção das camadas de drenagem, de colecta de gás e de barreira (incluindo os geossintéticos) representam aproximadamente metade do custo total do sistema de cobertura, tal como pode observar-se no Quadro 3. Para além de serem dispendiosos, os sistemas de cobertura convencionais tem apresentado elevado número de problemas, especialmente em climas áridos e semi-áridos. A experiência mostra que, neste tipo de clima, o solo argiloso compactado pode fissurar em resultado da dessecação, aumentando a condutividade hidráulica da camada concebida para funcionar como barreira. Deteriorações provocadas por ciclos de gelo/degelo e por biointrusão têm também sido relatados na literatura.

Assim sendo, não é pois de estranhar que, com o intuito de, por um lado, reduzir os custos e, por outro, melhorar o desempenho dos sistemas de cobertura, tenham surgido outros tipos de sistemas, os quais têm sido genericamente designados por sistemas de cobertura alternativos.

Quadro 2 – Principais factores a ter em consideração na concepção de um sistema de cobertura convencional (adaptado de Gross, 2003)

Componente	Factor
Camada de cobertura	<ul style="list-style-type: none"> erosão pela acção da água e/ou do ar evapotranspiração vegetação autóctone <i>versus</i> vegetação alóctone utilização futura do local
Camada de protecção	<ul style="list-style-type: none"> erosão pela acção da água evapotranspiração instabilidade dos taludes devido ao aumento da pressão da água nos poros biointrusão penetração das raízes
Camada de drenagem	<ul style="list-style-type: none"> colmatação excessiva insuficiente capacidade de escoamento insuficiente capacidade ou número de pontos para remoção dos fluidos
Barreira (geomembrana, CCL e/ou GCL)	<ul style="list-style-type: none"> fissuração devido à dessecação deformações devidas ao assentamento dos resíduos ou a acções sísmicas penetração das raízes insuficiente resistência ao fluxo de gás estabilidade dos taludes fluência dos materiais
Camada colectora de gás	<ul style="list-style-type: none"> insuficiente cobertura sobre os resíduos insuficiente escoamento
Camada de regularização	<ul style="list-style-type: none"> insuficiente resistência mecânica inclinação dos taludes (inadequado declive ou assentamentos pós encerramento)

Quadro 3 – Custos estimados dos sistemas de cobertura convencionais (adaptado de Koerner, 2001)

Item	Descrição	Custo/hectare (€)
Exploração	Operação/monitorização	31 000
Dimensionamento	Projecto/especificações/licenças	62 000
Construção	Camadas de drenagem, de barreira e de colecta do gás/geossintéticos	172 000
Inspecção	Controlo e garantia de qualidade de construção	25 000
Garantias	Seguros/contratos	50 000
Manutenção	Vegetação/vedação/ sinalética	25 000
Total		365 000

Notas: (1) os custos indicados são apenas aproximados; dependendo do local, os mesmos podem ter variações até 50% dos valores apresentados; (2) considerou-se que 1€ ≈ 1\$ (EUA).

2.4 Sistemas de confinamento de cobertura alternativos

2.4.1 Coberturas por evapotranspiração

Os sistemas de cobertura alternativos, como os de evapotranspiração (EVT), também designados por barreiras de monocamada, são crescentemente usados em aterros de resíduos sólidos urbanos (RSU) e mesmo em aterros de resíduos perigosos (EPA, 2003).

As coberturas por evapotranspiração consistem numa camada espessa de solo fino coberta por vegetação autóctone (Figura 3). Enquanto os sistemas convencionais incorporam materiais de baixa condutividade hidráulica (barreiras) para controlar a infiltração da água para o interior do aterro, as coberturas por evapotranspiração tiram partido do balanço hidrológico da cobertura para realizar essa função.

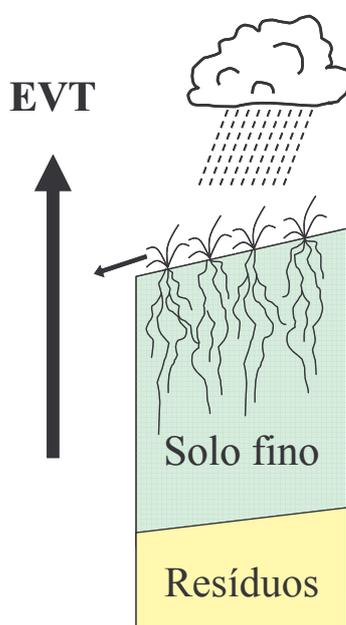


Figura 3 – Esquema de uma cobertura por evapotranspiração (adaptado de Hauser & Gimon, 2004)

O balanço hidrológico relaciona as entradas e saídas de água, ocorridas num determinado espaço e durante um certo período de tempo, com a variação do volume de água no interior desse espaço, durante o intervalo de tempo em consideração. Para o caso dos sistemas de cobertura (Figura 4), pode ser matematicamente apresentado da seguinte forma (Qian *et al.*, 2002):

$$PR = P - R - \Delta S - EVT - Q \quad (1)$$

Onde PR é a infiltração nos resíduos; P é a precipitação; R é o escoamento superficial; ΔS é a variação de armazenamento; EVT é a evapotranspiração; e Q é a drenagem lateral na camada de cobertura.

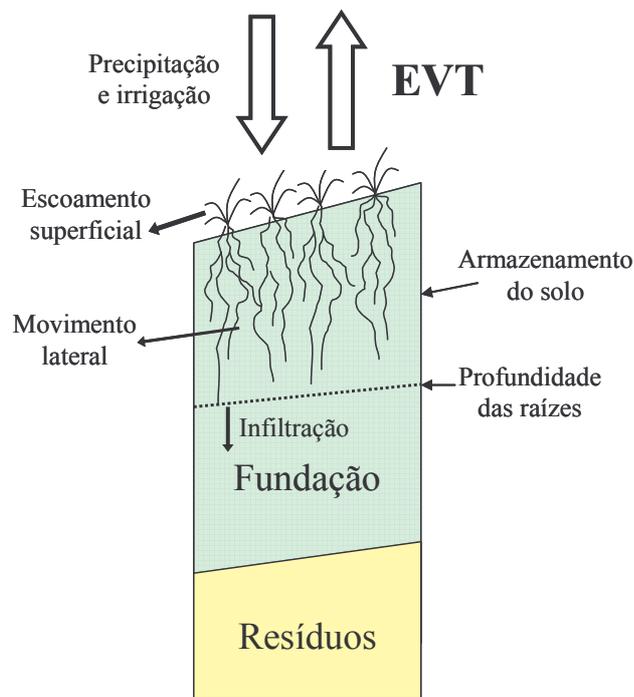


Figura 4 – Balanço hidrológico de um sistema de cobertura por evapotranspiração (adaptado de Hauser & Gimon, 2004)

De uma forma simplificada, o solo, geralmente não compactado, actua como um reservatório, retendo a água infiltrada até que esta seja removida através de evapotranspiração (evaporação a partir do solo + transpiração das plantas).

As coberturas por evapotranspiração beneficiam de duas características dos solos finos, nomeadamente a baixa condutividade hidráulica saturada, comparativamente com os solos granulares, e a elevada capacidade de armazenamento em condições não saturadas. A primeira destas, limita a infiltração durante os períodos de chuva, enquanto a segunda torna possível a retenção da água infiltrada até à sua posterior remoção. De referir que, a camada de solo deve ser suficientemente espessa para que as alterações do teor em água não ocorram junto à base, pois, nesse caso, a água infiltra-se nos resíduos subjacentes (Koerner, 2002).

A definição da espessura mínima para assegurar o desempenho da cobertura depende do tipo de precipitação, das propriedades hidráulicas do solo em condições de não saturadas e da rapidez com que a água é removida por evapotranspiração. Os solos geralmente usados na construção destas coberturas variam entre areias siltosas, siltes e argilas siltosas (Qian *et al.*, 2002).

Para além da elevada espessura, outros aspectos a ter em consideração no dimensionamento deste tipo de coberturas incluem a apetência do solo para o rápido desenvolvimento da vegetação e a elevada capacidade de retenção de água por parte do solo. A estes aspectos específicos juntam-se o controlo da infiltração, o isolamento dos resíduos, o controlo do gás, o controlo da erosão e a capacidade de permanecerem operacionais a longo prazo (Hauser & Gimon, 2004).

Um estudo levado a cabo no aterro de Southern, na Califórnia, para avaliar o desempenho de uma cobertura de evapotranspiração, constituída por uma argila siltosa, com 2 m de espessura, mostrou que a infiltração de água interessou apenas o topo da cobertura ($< 0,6$ m), não se observando variações do teor em água do solo na base da cobertura (Geologic Associates, 1993). Resultados semelhantes foram obtidos no aterro de Lopez Canyon, em Los Angeles, onde, em 1999, foi colocada uma cobertura de evapotranspiração, constituída por areia siltosa/areia argilosa, com aproximadamente 0,9 m de espessura. Os resultados de três anos de monitorização mostram que a variação do teor em água volumétrico foi da ordem dos 5% na base da cobertura e aproximadamente 90% no topo da mesma. Estes dados indicam que a maior parte da água infiltrada foi removida por evapotranspiração, não tendo atingido a base da cobertura (EPA, 2003).

À semelhança dos sistemas convencionais, as coberturas por evapotranspiração são também vulneráveis à dessecação e, conseqüente, à fissuração. Outras desvantagens deste tipo de coberturas são o crescimento excessivo das raízes da vegetação e a biointrusão. Por último, de referir que estas carecem ainda de investigação, nomeadamente de estudos *in situ*, antes que se possam tecer considerações gerais sobre o seu desempenho, no entanto, em climas áridos e semi-áridos as coberturas de evapotranspiração afiguram-se promissoras.

2.4.2 Coberturas por barreira capilar

As coberturas por barreira capilar são constituídas por uma camada de solo fino (e.g., solo siltoso) sobre uma camada de solo grosseiro (e.g., areia grosseira), tal como ilustrado na Figura 5. O funcionamento destas camadas de solo como barreiras capilares baseia-se nas propriedades hidráulicas não saturadas dos solos.

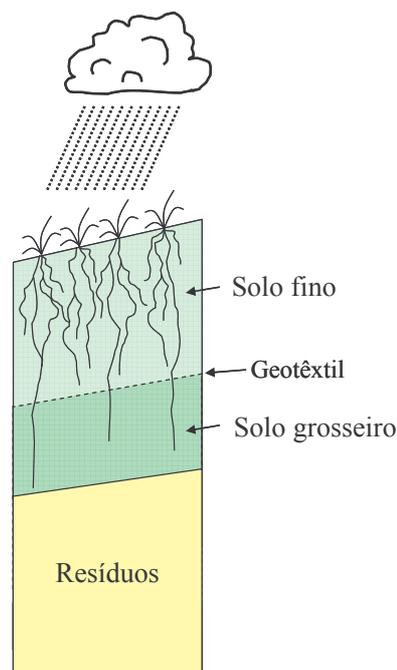


Figura 5 – Esquema de uma cobertura por barreira capilar (adaptado de Hauser & Gimón, 2004)

Em condições não saturadas, a camada de solo fino apresenta uma sucção superior à da camada de solo grosseiro. De acordo com o princípio da continuidade, para que a água migre da camada de solo fino para a camada de solo grosseiro, a sucção na interface entre as duas camadas de solo tem que ser igual. Nestas condições, para desencadear o movimento da água da camada superior para a camada inferior é necessário que a camada superior fique próximo da saturação. Assim, se a camada subjacente permanecer não saturada, o solo fino sobrejacente tenderá a actuar como um reservatório, retendo quase na totalidade a humidade do solo. Por sua vez, a camada de solo grosseiro, pelo facto de estar seca, comporta-se como uma barreira à percolação (Benson, 2000; Qian *et al.*, 2002; EPA, 2003).

No dimensionamento destes sistemas de cobertura um factor fundamental é o clima, nomeadamente a precipitação expectável. De referir porém que, a espessura da camada de solo fino deve levar em consideração não só a capacidade de armazenamento do solo (considerando as condições mais desfavoráveis em termos de pluviosidade), como também o limite admissível para a infiltração (Benson, 2000).

Os principais aspectos que podem comprometer o desempenho das coberturas por barreira capilar são a potencial migração de partículas da camada de solo fino para a camada de solo grosseiro e a elevada precipitação em períodos de tempo muito curtos (Koerner, 2002). No que se refere ao primeiro aspecto, a solução do problema pode passar pela utilização de um geotêxtil entre as duas camadas de solo, com a função de separação e filtro. Os valores mínimos, ou máximos, requeridos para as propriedades do geotêxtil, consideradas relevantes para esta função, devem ser fixadas com base nas características dos solos. Para os casos em que o tempo de serviço previsto seja extenso, deve também atender-se à durabilidade do geotêxtil.

Relativamente à questão da elevada precipitação, o conceito de barreira capilar deixa de ser aplicável, pelo menos temporariamente, uma vez que o teor em água do solo grosseiro aumenta.

Estudos realizados *in situ* mostraram que as barreiras capilares têm um desempenho satisfatório em regiões de clima árido e semi-árido. Barreiras com perfis mais complexos, constituídas por mais do que duas camadas de solo, têm também um desempenho satisfatório em climas húmidos (Benson & Khire, 1995).

De acordo com Qian *et al.* (2002), este tipo de coberturas tem melhor desempenho no caso da camada superficial de solo apresentar baixa condutividade hidráulica. De referir no entanto, que esta não deve apresentar fissuras em resultado da dessecação. Os solos mais apropriados para utilização nesta camada são os siltes argilosos e as areias siltosas. Os solos ricos em argila devem ser evitados, pois são muito vulneráveis à dessecação. Segundo o mesmo autor, os sistemas de coberturas constituídos por barreiras capilares são mais eficientes se o material grosseiro da camada inferior for uniforme.

Um estudo recente conduzido por Park & Fleming (2006) relata a utilização de um novo tipo de geossintético como barreira capilar. Este novo produto, designado pelos autores por barreira capilar geossintética, é formado por uma sanduiche de material fino (e.g., rocha

moída) entre dois geotêxteis agulhados. De acordo com os autores, a combinação destes materiais conduz ao desenvolvimento de uma barreira capilar, a qual pode ser utilizada em sistemas de cobertura.

Embora os sistemas de cobertura alternativos se afigurem atractivos, não só de um ponto de vista financeiro, como também de um de ponto de vista técnico, particularmente em regiões onde o valor anual da precipitação é inferior ao valor anual da evapotranspiração (em regiões de clima seco) e se deva fomentar a investigação sobre a aplicabilidade dos mesmos em Portugal, nomeadamente em aterros de resíduos localizados no Sul do país onde a pluviosidade é menor, os sistemas de cobertura convencionais continuam a ser os mais utilizados.

Nos sistemas de cobertura convencionais, tal como nos sistemas de confinamento basal, as barreiras geossintéticas desempenham um papel preponderante. A experiência adquirida com os aterros já construídos, bem como a investigação realizada neste domínio, mostram que existem vários aspectos que podem comprometer o desempenho das mesmas, pelo que este assunto vai seguidamente ser abordado.

3 PARTE II: ASPECTOS QUE PODEM COMPROMETER O DESEMPENHO DAS BARREIRAS GEOSSINTÉTICAS

3.1 Difusão através das barreiras geossintéticas

3.1.1 O mecanismo da difusão

Os poluentes presentes nos resíduos podem atravessar as barreiras sintéticas intactas (sem orifícios) do sistema de confinamento por difusão. Este mecanismo consiste na migração de moléculas, ou iões, em consequência dos seus próprios movimentos aleatórios, a partir de uma zona de elevada concentração para uma zona de baixa concentração. O transporte de poluentes ocorre, pois, em resposta a um gradiente de concentração.

O transporte de poluentes por difusão é governado pela lei de Fick, sendo o fluxo difusivo, f , obtido a partir da seguinte expressão (Rowe, 2005):

$$f = -D i_c \quad (2)$$

Onde D é o coeficiente de difusão e i_c é o gradiente de concentração.

Para além deste mecanismo de transporte, os poluentes podem atravessar as barreiras do sistema de confinamento por advecção, em resposta a um gradiente hidráulico. Este mecanismo será abordado na Secção 3.5, no âmbito da migração de poluentes através de orifícios na geomembrana.

3.1.2 Difusão através da geomembrana

Os principais factores que afectam o transporte de poluentes através da geomembrana são a solubilidade do poluente, a temperatura, a concentração, a dimensão e forma das moléculas do poluente, as propriedades do polímero e a espessura da geomembrana.

A relação entre as características de solubilidade da espécie química em consideração e a geomembrana tem um papel fundamental na migração. De um modo geral, quanto mais solúvel for a espécie química maior a probabilidade de atravessar a geomembrana por difusão (Matrecon, 1988). A similaridade entre o poluente e o polímero parece também desempenhar um papel importante. De acordo com Rowe (1998), as moléculas polares podem atravessar polímeros de natureza polar, enquanto as moléculas não-polares podem atravessar polímeros de natureza não-polar. Moléculas fortemente polares, como é o caso das moléculas de água, têm grande dificuldade em atravessar geomembranas de polietileno de alta densidade (PEAD), já que as mesmas são constituídas por moléculas não-polares (Sangan & Rowe, 2001a, b). Opinião semelhante é expressa por August & Tatzky (1984). Estes autores observaram que as geomembranas de polietileno apresentavam reduzidos coeficientes de permeação (*permeation coefficient*) com moléculas fortemente polares. Um estudo posterior realizado por Mueller *et al.* (1998) mostrou que as geomembranas de PEAD são facilmente atravessadas por moléculas de hidrocarbonetos não-polares ou fracamente polares. Durin *et al.* (1999) estudaram a difusão de compostos orgânicos através das geomembranas, tendo concluído que o coeficiente de difusão depende da polaridade do composto. Rowe (2005) examinou a migração de cloretos e de diclorometano (DCM) através de uma geomembrana de PEAD (2 mm de espessura), mediante a realização de ensaios de difusão em laboratório. Os resultados obtidos ao longo de 12 anos indicam que migração de cloretos através deste tipo de geomembrana é reduzida (coeficiente de permeação igual a $3 \times 10^{-17} \text{ m}^2/\text{s}$). De acordo com o mesmo autor, resultados semelhantes foram obtidos para outros iões. Em contraste, a difusão de DCM foi significativa e processou-se num curto período de tempo (coeficiente de permeação igual a $3 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$).

No que se refere à temperatura, o aumento da mesma tem como consequência o aumento da mobilidade dos constituintes do polímero a nível micro-estrutural (Rogers, 1985). A este aumento está associado um aumento da taxa de difusão através da geomembrana. O efeito da temperatura sobre a difusão de hidrocarbonetos aromáticos (benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos, vulgarmente designados por BTEX), através de uma geomembrana PEAD fluoretada (f-PEAD), foi estudado por Mukunoki & Rowe (2006). Os resultados obtidos mostram que o coeficiente de difusão aumenta com o aumento da temperatura, podendo ser modelada pela lei de Arrhenius.

Relativamente à concentração, estudos realizados por Parque *et al.* (1995) e por Mueller *et al.* (1998), com o objectivo de estimar os coeficientes de solubilidade e de difusão de poluentes orgânicos em geomembranas de PEAD, mostram que os coeficientes de difusão são menores para soluções aquosas pouco concentradas do que para elementos puros. Estes resultados sugerem que a difusão depende da concentração. Segundo Chul Joo *et*

al. (2001), no caso das soluções aquosas de compostos orgânicos, o coeficiente de difusão aumenta exponencialmente com o aumento da concentração.

No que diz respeito à dimensão e forma das moléculas, verifica-se que o coeficiente de difusão diminui com o aumento da dimensão, do peso molecular e da área da espécie química em consideração. Por outro lado, as espécies químicas com formas lineares, flexíveis e simétricas têm maior mobilidade do que as constituídas por moléculas rígidas (Rogers, 1985). A migração de espécies químicas através da geomembrana depende ainda das características do polímero, nomeadamente do grau de cristalinidade, da densidade, da percentagem e tipo de aditivos, etc..

Quanto à espessura da geomembrana, os resultados dos estudos conduzidos por Haxo *et al.* (1984) e por Haxo (1990) mostraram que o fluxo de metano através da geomembrana de PEAD diminuía com o aumento da espessura. Porém, essa diminuição não era inversamente proporcional à espessura, contrariamente ao expresso pela lei de Fick. Resultados idênticos foram relatados por August & Tatzky (1984). Num estudo realizado por Chul Joo (2001) no domínio da difusão de compostos orgânicos através de geomembranas de PEAD, verificou-se que o coeficiente de difusão diminuiu quando a espessura da geomembrana aumentou de 1,5 mm para 2,5 mm.

Do exposto importa salientar que, para as geomembranas de PEAD (as mais frequentes em aterros de resíduos), a difusão de compostos orgânicos constituídos por moléculas não-polares processa-se de uma forma relativamente rápida em comparação com a difusão de compostos constituídos por moléculas polares. Por outro lado, a difusão de iões através deste tipo de geomembranas é reduzida. Em todo caso, as geomembranas intactas não podem ser consideradas impermeáveis. A migração de poluentes por difusão deve, pois, ser contabilizada no dimensionamento dos sistemas de confinamento. O dimensionamento com base em critérios de desempenho afigura-se, por isso, recomendável.

3.1.3 Difusão através do geossintético bentonítico

Lake & Rowe (2000a) estudaram a difusão de cloreto de sódio (NaCl) através de GCLs e verificaram que o coeficiente de difusão diminuía linearmente com a diminuição do índice de vazios do GCL. Estudaram igualmente a influência do processo de fabrico dos GCLs (agulhados, cosidos, ou colados) na difusão, tendo concluído que, para um dado valor do índice de vazios dos GCLs, o processo de fabrico não afectava significativamente o coeficiente de difusão. De referir, porém, que o processo de fabrico tem influência nas características de expansibilidade dos GCLs, tal como evidenciado por Lake & Rowe (2000b) e, portanto, indirectamente no coeficiente de difusão, especialmente para produtos hidratados com tensões confinantes baixas. Para GCLs agulhados, Lake & Rowe (2000a) obtiveram coeficientes de difusão de cloreto da ordem dos 10^{-10} m²/s. Estes valores são da mesma ordem de grandeza dos valores obtidos com CCLs, ainda que ligeiramente inferiores.

A difusão de diclorometano (DCM), dicloetano (DCA), tricloroetileno (TCE), benzeno e tolueno foi também investigada por Lake & Rowe (2004), mediante ensaios laboratoriais realizados a temperatura condicionada e sujeitando os provetes a tensões de confinamento

inferiores a 10 kPa. De acordo com os resultados obtidos, os autores ordenaram as diferentes substâncias segundo a taxa de difusão: DCM \approx 1,2 DCA > benzeno > TCE. Os correspondentes coeficientes de difusão variaram entre 2×10^{-12} m²/s e 3×10^{-12} m²/s. Posteriormente, Rowe *et al.* (2005) avaliaram a influência da temperatura sobre os coeficientes de difusão e de adsorção, tendo, para o efeito, realizado os ensaios com temperaturas de 22°C e de 5°C, utilizando hidrocarbonetos aromáticos (BTEX). Os resultados obtidos mostram, por um lado, que os geossintéticos (i.e., os geotêxteis incorporados nos GCLs) têm um papel determinante na adsorção dos hidrocarbonetos aromáticos, e, por outro lado, que a diminuição da temperatura de 22° C para 5° C acarreta uma redução nos coeficientes de difusão e de adsorção. Os coeficientes de difusão obtidos para os BTEX, por ordem decrescente, foram os seguintes (temperaturas de 22°C e de 5°C, respectivamente): benzeno ($3,7 \times 10^{-10}$; $2,2 \times 10^{-10}$) > tolueno ($3,1 \times 10^{-10}$; $1,8 \times 10^{-10}$) > etilbenzeno ($2,9 \times 10^{-10}$; $1,7 \times 10^{-10}$) > m-xileno e p-xileno ($2,5 \times 10^{-10}$; $1,5 \times 10^{-10}$) \approx o-xileno ($2,6 \times 10^{-10}$; $1,5 \times 10^{-10}$).

O mais recente campo de estudo no âmbito da migração de poluentes através dos GCLs consiste na utilização de bentonites modificadas com o objectivo de melhorar as características destes produtos em termos de resistência à migração de contaminantes. Vários estudos têm sido realizados neste domínio. Por exemplo, Lorenzetti *et al.* (2005) levaram a cabo um trabalho experimental sobre o transporte de benzeno através de duas bentonites orgânicas. Segundo os mesmos, o fluxo de benzeno através das bentonites orgânicas foi inferior ao fluxo registado no caso da bentonite sódica natural tipicamente usada nos GCLs.

Lake & Rowe (2005) examinaram a potencial melhoria nas características de adsorção dos GCLs aos compostos orgânicos voláteis (VOCs), mediante a utilização de bentonites modificadas (quatro bentonites orgânicas e uma mistura de bentonite sódica com 2% de carbono activado). Os coeficientes de adsorção obtidos para os DCM, DCA, TCE, benzeno e tolueno foram duas a três ordens de magnitude superiores para as bentonites orgânicas do que para a bentonite sódica natural. Por outro lado, no caso dos TCE, benzeno e tolueno, a bentonite sódica modificada pela adição de 2 % de carbono activado (em pó) apresentou uma adsorção mais elevada do que as bentonites orgânicas, mas, em contraste, apresentou uma adsorção inferior à das bentonites orgânicas no caso do DCM. Para o DCA, tanto as bentonites orgânicas como a bentonite modificada pela adição de carbono activado apresentaram adsorções semelhantes. Este estudo laboratorial foi complementado com modelações numéricas, com o objectivo de avaliar a relevância dos resultados obtidos para aplicações práticas. As simulações numéricas efectuadas sugerem que, não obstante o potencial dos produtos modificados para melhorar as características de adsorção dos GCLs, a substituição da bentonite sódica natural por bentonites modificadas tem um reduzido efeito na migração, o que é explicável pela reduzida espessura dos GCLs.

Tendo em conta estes resultados e considerando que, por um lado, os GCLs apresentam uma espessura 50 a 100 vezes menor do que uma camada de solo argiloso compactado (CCL) e, por outro, os coeficientes de difusão e a capacidade de adsorção dos GCLs não são significativamente maiores do que os apresentados por uma CCL, Rowe (2005)

concluiu que o GCL tem que ser complementado por uma camada de solo por forma a que a espessura total (GCL+solo) seja similar à espessura de uma CCL, para o conjunto apresentar um desempenho equivalente ao da CCL, em termos de barreira à difusão.

Os estudos relatados mostram que, os contaminantes que eventualmente atravessarem a geomembrana (tanto por difusão, como através de orifícios) e alcancem o GCL, podem migrar através do mesmo, comprometendo o desempenho deste material enquanto barreira passiva. À semelhança do que acontece com a geomembrana, este aspecto deve ser levado em consideração no dimensionamento do sistema de confinamento basal. Também do ponto de vista da barreira passiva, se afigura vantajoso que o dimensionamento seja efectuado com base em critérios de desempenho.

3.2 Durabilidade das barreiras geossintéticas

3.2.1 Durabilidade da geomembrana

Tendo em conta que a aplicação de geomembranas em aterros de resíduos remonta à década de 80 do século XX, o conhecimento sobre a durabilidade destes materiais é ainda limitado.

Segundo Tarnowski *et al.* (2005), os principais factores que afectam a degradação das geomembranas de PEAD são: (i) a termo-oxidação (envelhecimento térmico); (ii) a foto-oxidação (envelhecimento devido aos raios ultravioletas); e (iii) as fissuras de tracção (*stress cracking*).

Relativamente aos dois primeiros, de referir que a oxidação afecta as propriedades mecânicas das geomembranas do seguinte modo (Tarnowski *et al.*, 2005):

- diminuição da extensão na rotura
- diminuição da resistência ao impacto
- aumento do módulo de deformabilidade à tracção
- aumento da tensão no início da rotura frágil seguido por uma queda de tensão
- aumento da susceptibilidade ao *stress cracking*
- diminuição da flexibilidade

No que se refere às fissuras de tracção (*stress cracking*), estas ocorrem quando a geomembrana está sujeita a uma força de tracção inferior à correspondente tensão de cedência durante longos períodos de tempo, devendo-se a alterações na micro-estrutura do PEAD. Estas fissuras comprometem o desempenho das geomembranas, pelo que o valor da resistência ao *stress cracking* é um critério importante a considerar na selecção de uma geomembrana.

Do ponto de vista da degradação, as propriedades mais importantes a ter em consideração na selecção de uma geomembrana são a resistência ao *stress cracking* e a resistência à oxidação. A primeira depende da resina usada no fabrico da geomembrana, sendo avaliada com base no ensaio de resistência ao *stress cracking*. A segunda depende das

características e da quantidade de anti-oxidantes adicionados ao polímero para evitar a degradação da geomembrana, sendo avaliada com base no ensaio de OIT (*oxidation induction time*).

Embora a degradação das geomembranas se processe tanto fisicamente (fissuração) como quimicamente (oxidação), no caso dos aterros de resíduos a segunda é determinante no desempenho destes materiais a longo prazo (Rowe, 2005).

A degradação de natureza química inclui três fases (Rowe, 2005; Tarnowski *et al.*, 2005):

- (i) delapidação dos anti-oxidantes: fase em que os anti-oxidantes existentes na geomembrana são consumidos;
- (ii) tempo de indução: fase correspondente ao intervalo entre a delapidação dos anti-oxidantes e o início da degradação das propriedades da geomembrana;
- (iii) degradação do polímero: fase correspondente à modificação da estrutura do polímero, acompanhada pela deterioração das propriedades mecânicas da geomembrana (redução para um valor arbitrário, por exemplo, 50% do valor original da propriedade).

As reacções de oxidação do polietileno podem ser agravadas na presença de metais de transição, tais como o Co, Mn, Cu, Pd e Fe, tipicamente presentes nos lixiviados, pelo que as geomembranas podem envelhecer mais rapidamente em lixiviado do que em água (Rowe, 2005).

Outro aspecto de suma importância no desempenho das geomembranas a longo prazo é a temperatura (Rowe, 2005 e Bouazza *et al.*, 2002). Para geomembranas, não expostas aos raios ultravioletas (UV), em contacto com lixiviado, Rowe (2005) estimou tempos de vida útil da ordem dos 200 anos, com temperatura de 20°C, e da ordem dos 15 anos, com temperatura de 60°C. Rowe estimou também a duração das três fases de envelhecimento da geomembrana, bem como o correspondente tempo de vida útil. As estimativas efectuadas, considerando a temperatura constante, constam do Quadro 4.

Quadro 4 – Tempos de vida útil estimados para as três fases de degradação das geomembranas de PEAD (baseado em Rowe, 2005)

Temperatura (°C)	Fase (i) * (anos)	Fase (ii) ** (anos)	Fase (iii) ** (anos)	Tempo de vida útil (anos)
10	280	30	1380	1690
20	115	10	440	565
30	50	4	150	205
35	35	2	90	130
40	25	1	55	80
50	10	0,6	20	35
60	6	0,3	9	15

* estimativa baseada em ensaios laboratoriais

** estimativa efectuada ajustando o efeito do lixiviado a dados obtidos com água

Nos aterros de resíduos, as temperaturas variam de acordo com o tempo de exploração já decorrido. Koerner & Koerner (2006) registaram a temperatura num aterro de resíduos sólidos urbanos durante dez anos e meio, tendo verificado que nos primeiros cinco anos e meio a temperatura média foi de 20°C. Após esse período de tempo, a temperatura aumentou para um valor médio da ordem dos 35°C. Temperaturas substancialmente superiores a estas têm sido relatadas na literatura. Por exemplo, na base de um aterro de RSUs em Tóquio, Yoshida & Rowe (2003) registaram temperaturas superiores a 50°C, após sete anos de exploração e temperaturas entre 37 e 41°C, após vinte anos de exploração.

Considerando valores médios para a temperatura da ordem de grandeza dos referidos, Rowe (2005) estimou que o tempo de vida útil para uma geomembrana de PEAD aplicada no nível de confinamento primário (temperatura média de 35°C) de um aterro de resíduos com sistema de confinamento duplo, é de aproximadamente 160 anos, e superior a 600 anos no caso de uma geomembrana aplicada no nível de confinamento secundário, desde que a temperatura seja inferior a 20°C (este valor será alcançado apenas se existir uma camada de solo de espessura adequada entre o confinamento primário e o secundário que actue como barreira térmica). Para uma temperatura de 60°C, o tempo de vida útil da geomembrana reduz-se drasticamente para aproximadamente 20 anos.

Em resumo, a durabilidade das geomembranas de PEAD depende fundamentalmente da temperatura e da qualidade da resina. Os valores da resistência à oxidação e da resistência ao *stress cracking* devem ser devidamente especificados no projecto, de forma a assegurar um desempenho adequado da geomembrana a longo prazo. A realização de ensaios de controlo em fábrica e de verificação em laboratórios independentes é indispensável para garantir que a geomembrana cumpre os requisitos de projecto.

3.2.2 Durabilidade do geossintético bentonítico

A durabilidade dos geossintéticos bentoníticos tem sido recentemente objecto de intensa investigação. Kavazanjian *et al.* (2006) efectuaram uma extensa revisão dos trabalhos levados a cabo neste domínio, considerando quer a degradação química, quer a degradação física.

De uma forma genérica, a durabilidade de um GCL, integrado num sistema de confinamento basal (como barreira passiva), ascende às centenas de anos desde que sejam acautelados os seguintes aspectos (Rowe, 2005): (i) não ocorram perdas de bentonite durante a colocação do GCL; (ii) a distribuição de bentonite no interior do GCL seja regular durante e após a hidratação (não ocorra transferência de bentonite de um local para outro do GCL); (iii) a selecção e o dimensionamento do GCL levem em consideração a potencial erosão interna da bentonite, resultante de elevados gradientes hidráulicos eventualmente existentes no interior do aterro devido ao inadequado funcionamento do sistema de drenagem, quer durante a operação, quer após o encerramento do aterro; (iv) a durabilidade dos geossintéticos (geotêxteis e/ou geomembrana incorporados no GCL) seja compatível com o tempo de vida da obra; (v) as uniões entre painéis adjacentes sejam efectuadas com sobreposições adequadas e de modo a garantir um contacto íntimo com a

camada subjacente; (vi) o GCL não sofra dessecação; e (vii) as propriedades hidráulicas sejam especificadas considerando a compatibilidade bentonite-lixiviado, bem como a influência das condições de hidratação, da geoquímica das águas subterrâneas, da pressão confinante prevista sobre o sistema de confinamento, das características do lixiviado e do próprio GCL.

Dos aspectos mencionados, a dessecação dos GCLs e as uniões entre painéis adjacentes merecem alguns comentários adicionais, à luz dos recentes desenvolvimentos nestas áreas. Relativamente ao primeiro aspecto, estudos realizados por Southen (2005), com barreiras constituídas por uma geomembrana e um GCL, mostram que a temperatura é o factor que mais influencia a dessecação. Outros factores com impacto na dessecação dos GCLs incluem: (i) o teor em água inicial da camada subjacente, sendo que quanto mais elevado for este valor (acima do teor em água óptimo) menor é a probabilidade de ocorrer dessecação; (ii) o teor em água inicial do GCL antes da aplicação da pressão confinante, sendo que quanto mais elevada for a pressão confinante aquando da hidratação do GCL menor é o risco de dessecação (de um ponto de vista prático, é vantajoso colocar os resíduos no aterro logo após a construção do sistema de confinamento); (iii) a distância entre o GCL e o nível freático, sendo que, de um modo geral, o risco de dessecação aumenta com o aumento dessa distância. Estes resultados são consistentes com os resultados obtidos por Sporer & Gartung (2002) num estudo experimental realizado com o objectivo de determinar os principais factores que afectam a dessecação. Segundo estes autores, os factores com maior influência na dessecação são a temperatura, o gradiente de temperatura e as propriedades do solo.

No que se refere às uniões, um problema recentemente relatado, e que levanta enormes dúvidas acerca do desempenho dos GCLs subjacentes às geomembranas, consiste no afastamento dos painéis adjacentes (na zona de sobreposição) devido à retracção dos mesmos. Este problema foi referido em primeiro lugar por Thiel & Richarddson (2005). Posteriormente, Koerner & Koerner (2005 a, b) apresentaram cinco casos de separação de painéis de GCL nas zonas de união. A Figura 6 apresenta um exemplo dessa separação observada no aterro de resíduos de Southern na Califórnia.

Em todos os casos relatados, o GCL encontrava-se coberto com uma geomembrana, sendo que esta tinha permanecido exposta, durante períodos variáveis entre dois meses a cinco anos, antes de se proceder à sua cobertura com solo. As uniões em que se registaram separações entre os painéis adjacentes (Quadro 5) tinham sido inicialmente realizadas com sobreposição de 150 mm.

Com base nos casos observados, pode verificar-se que a retracção dos GCLs ocorre tanto em taludes como em áreas planas e que esta varia de produto para produto. Igualmente, o risco dos GCLs sofrerem retracção pode ser minimizado se a geomembrana sobrejacente for rapidamente coberta. Outra medida que pode ser tomada para garantir o desempenho adequado dos GCLs é aumentar a largura da faixa de sobreposição entre painéis adjacentes. Tipicamente, a largura desta faixa varia entre 150 e 300 mm, porém se tivermos em consideração que nos casos apresentados no Quadro 5 a separação entre

painéis foi, em alguns casos, bastante superior a 300 mm, julga-se prudente aumentar a sobreposição para um valor da ordem dos 500 mm.



Figura 6 – Painéis adjacentes afastados devido à retracção do GCL no aterro de Southern (Koerner & Koerner, 2005)

Quadro 5 – Síntese dos casos observados (Thiel *et al.*, 2006)

Tipo de GCL (geotêxtil superior/geotêxtil inferior)	Inclinação do talude	Separação (mm)	Tempo de exposição (meses)
Não reforçado (tecido/tecido)	22°	300	60
Reforçado (não tecido/tecido)	18°	200	15
Reforçado (não tecido/tecido)	4°	300	2
Reforçado (não tecido/não tecido)	34°	1200	36
Reforçado (não tecido/não tecido)	18°	300	5
Reforçado (não tecido/não tecido)	4°	450	2

3.3 Tipo de protecção da geomembrana

A protecção da geomembrana é tipicamente assegurada por um geotêxtil, o qual é dimensionado considerando o potencial punçoamento causado pelos materiais das camadas subjacentes. À excepção da abordagem adoptada na Alemanha, as extensões induzidas

na geomembrana a longo prazo não são geralmente levadas em conta. Porém, são cada vez mais os investigadores que opinam que a protecção da geomembrana contra o punçoamento a curto prazo, embora necessária, não é suficiente para garantir o desempenho das mesmas a longo prazo. Refira-se que na Alemanha a extensão máxima admissível é de 0,25%. Um valor de 6% é, todavia, sugerido por Peggs *et al.* (2005).

Num estudo experimental realizado por Tognon *et al.* (2000) foram utilizados vários tipos materiais para protecção da geomembrana, nomeadamente um geossintético preenchido com areia (*geocushion*), dois geotêxteis (massas por unidade de área de 435 g/m² e 1200 g/m²) e dois geocolchões (*geomat*) de borracha (um simples e outro reforçado com fibras de poliéster). A camada sobrejacente era constituída por cascalho (40 a 50 mm) e os ensaios foram realizados com várias tensões confinantes para simular diferentes cargas correspondentes à deposição de resíduos. No Quadro 6 apresentam-se os resultados obtidos por estes autores.

Quadro 6 – Tipos de protecção e correspondentes extensões máximas observadas na geomembrana (baseado em Tognon *et al.*, 2000)

Tipos de protecção	Massa por unidade de área (g/m²)	Tensão aplicada (kPa)	Deformações/m²	Extensão máxima (%)
Geotêxtil I	435	250	340	8
Geotêxtil II	1200	900	338	13
Geocolchão	6000	600	156	7,5
Geocolchão reforçado com fibras de poliéster	6000	600	38	1,2
Geossintético preenchido com areia	2130	650	69	0,8
	2130	900	74	0,9

Como pode observar-se, o geossintético preenchido com areia providenciou a melhor protecção, seguido pelo geocolchão de borracha reforçado com fibras de poliéster. No extremo oposto encontra-se o geotêxtil de 435 g/m², embora a protecção conferida por este geotêxtil tenha sido suficiente para evitar o punçoamento da geomembrana a curto prazo. Verifica-se, também, que o reforço conferido pelas fibras de poliéster ao geocolchão melhorou significativamente o desempenho do produto, sugerindo que a resistência à tracção pode ser uma propriedade fundamental para minimizar a extensão na geomembrana.

Estes resultados vêm dar voz aos autores que questionam a adequação dos geotêxteis na protecção da geomembrana a longo prazo. É recomendável a realização de mais investigação nesta área, a fim de determinar-se qual o melhor material para proteger a geomembrana, tanto a curto prazo, como durante o tempo em que vai permanecer em serviço.

3.4 Dobras na geomembrana

As dobras, ou pregas, resultam de práticas construtivas inadequadas e da expansão térmica dos painéis de geomembrana aquando do seu aquecimento devido à exposição solar. Estas dobras não desaparecem quando a geomembrana arrefece ou quando é carregada em resultado da deposição de resíduos, tal como demonstrado por Gudina & Brachman (2006). Em ensaios laboratoriais de grande escala realizados por estes autores, as dobras foram sujeitas a pressões confinantes até 1200 kPa, tendo-se mantido, embora diminuído de tamanho.

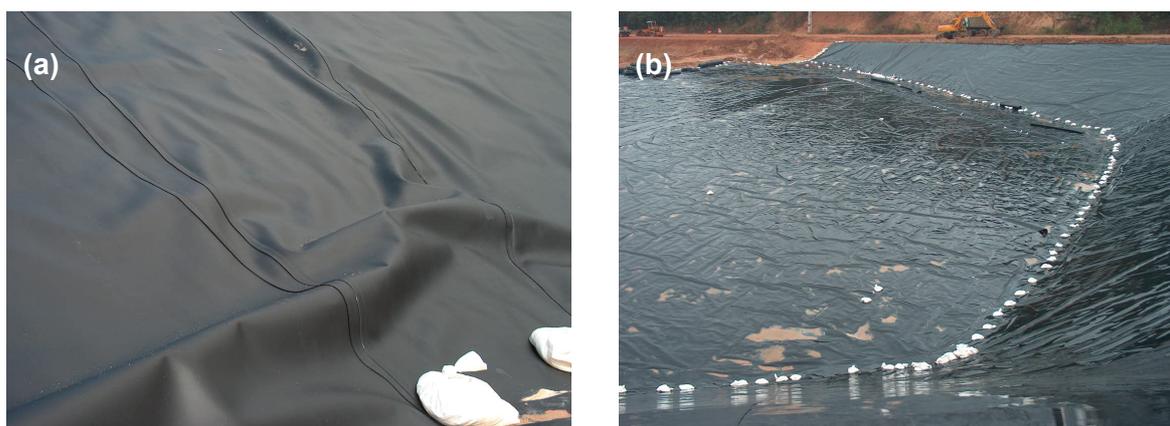


Figura 7 – Exemplos de uma dobra na geomembrana: (a) devido a instalação inapropriada; (b) devido à exposição solar

As dobras apresentam dimensões variáveis. Medições efectuadas por Touze-Foltz *et al.* (2001) indicam que estas exibem larguras de 0,1–0,8 m, alturas de 0,05–0,1 m e espaçamentos de 4–5 m. Relativamente ao número de dobras, Rowe *et al.* (2004) referiram um valor da ordem das 1200 dobras/hectare.

A existência de dobras na geomembrana é preocupante por dois motivos. Primeiro, o potencial aumento do fluxo advectivo através do sistema de confinamento (caso os orifícios se localizem nas dobras) e, segundo, potenciam o desenvolvimento de fissuras de tracção (*stress cracking*). As fissuras de tracção resultam de tensões de tracção induzidas na dobra e acarretam o desenvolvimento de orifícios na geomembrana a partir dos quais os contaminantes migram por advecção para as camadas subjacentes, comprometendo o desempenho da geomembrana.

3.5 Advecção através das barreiras geossintéticas

3.5.1 O mecanismo da advecção

A advecção é um processo físico mediante o qual os poluentes introduzidos no fluxo de água subterrânea migram em solução (como solutos) ou em suspensão, junto com o movimento do lixiviado ou da água. O fluxo ocorre em resposta a um gradiente hidráulico entre o interior do aterro, nomeadamente entre a camada de drenagem dos lixiviados, e o

terreno subjacente à barreira passiva de confinamento. Por outras palavras, a advecção corresponde à migração de poluentes através de orifícios na geomembrana em resposta a um gradiente hidráulico.

O transporte de poluentes por advecção é governado pela lei de Darcy, sendo o fluxo, v , obtido a partir da seguinte expressão (Rowe, 2005):

$$v = k i \quad (3)$$

Onde k é a condutividade hidráulica (coeficiente de permeabilidade) e i é o gradiente hidráulico.

3.5.2 Orifícios na geomembrana

Estudos realizados com base em métodos eléctricos de detecção de fugas sugerem que os orifícios são inevitáveis. Por exemplo, uma síntese de estudos apresentada por Rollin *et al.* (2002), 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 Nosko & Touze-Foltz (2000), com base em informações recolhidas em mais de 300 obras de 16 países, cobrindo uma área total de 325 hectares. Uma compilação de dados mais recente, efectuada por Forget *et al.* (2005), com base em resultados recolhidos durante 10 anos, indica uma frequência de 0,5 orifícios/hectare, em aterros sujeitos a rigorosos planos de controlo/garantia de qualidade de construção, e uma frequência de 16 orifícios/hectare em aterros onde não foram implementados planos de controlo/garantia de qualidade. Estes resultados são muito expressivos na medida em que ilustram bem a importância das actividades de controlo/garantia de qualidade nos aterros de resíduos.

A maior parte dos orifícios está relacionada com actividades construtivas inadequadas, em particular com a colocação da camada de drenagem sobre o sistema de confinamento (Nosko & Touze-Foltz, 2000 e Colucci & Lavagnolo, 1995). Para além dos orifícios associados às actividades construtivas, podem também surgir orifícios durante a fase de operação dos aterros, tal como indicado por Needham *et al.* (2004). 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.

Assim, importa salientar, por um lado, que o fluxo de poluentes através de orifícios na geomembrana deve ser contabilizado no dimensionamento dos sistemas de confinamento dos aterros e, por outro, a mais valia associada à implementação de planos de controlo/garantia de qualidade de construção. Do ponto de vista do transporte de poluentes através de orifícios na geomembrana, é também recomendável que o dimensionamento seja efectuado com base em critérios de desempenho. Valores médios variando entre 2,5 e 10 orifícios/hectare têm sido considerados para efeitos de cálculo (ver secção seguinte), assumindo que a qualidade de instalação da geomembrana será boa e que no aterro será implementado um rigoroso plano de controlo/garantia de qualidade.

3.5.3 Métodos para determinação do fluxo através de barreiras múltiplas

O fluxo advectivo de poluentes através do sistema de confinamento pode ser estimado com base em métodos directos, mediante ensaios laboratoriais, ou indirectos, através de equações analíticas, equações empíricas ou simulações numéricas. Estes métodos são apresentados e detalhadamente comentados por Barroso *et al.* (2007), remetendo-se os interessados para a leitura do trabalho em questão.

Refira-se, todavia, os métodos indirectos são mais utilizados para efeitos de cálculo, nomeadamente as equações empíricas, pela sua simplicidade. Existem, presentemente, equações empíricas para os seguintes tipos de orifícios: (i) circulares, localizados em painéis de geomembrana sem dobras; (ii) orifícios de qualquer forma, localizados sobre dobras na geomembrana; e (iii) longos cortes na geomembrana.

4 CONCLUSÕES

Neste artigo descreveram-se os tipos de sistemas de confinamento dos aterros de resíduos e apresentaram-se os ensinamentos recentes sobre os principais aspectos que podem comprometer o desempenho das geomembranas de PEAD e dos geossintéticos bentoníticos nos referidos sistemas. Os aspectos abordados foram os seguintes: difusão através das barreiras geossintéticas, durabilidade das barreiras geossintéticas, tipos de protecção da geomembrana, dobras na geomembrana e advecção através das barreiras geossintéticas.

Relativamente à migração de contaminantes por difusão, verificou-se que os compostos orgânicos formados por moléculas polares podem atravessar as geomembranas intactas (sem orifícios) com relativa facilidade e num período de tempo relativamente curto, contrariamente ao que acontece com os iões, cujo transporte se pode considerar negligenciável. Verificou-se, também, que a migração de hidrocarbonetos através do GCL depende fundamentalmente das características de adsorção dos geossintéticos (geotêxteis e/ou geomembranas incorporados nos GCLs).

No que se refere à durabilidade, observou-se que, no caso da geomembrana, esta depende fundamentalmente da temperatura na base do aterro e da qualidade da resina. As propriedades da geomembrana mais importantes para garantir o seu desempenho a longo prazo são a resistência à oxidação e a resistência ao *stress cracking*, as quais devem ser devidamente consideradas no dimensionamento. A durabilidade dos geossintéticos bentoníticos pode ascender às centenas de anos desde que sejam assegurados um conjunto de aspectos, que vão desde um dimensionamento que leve em consideração as solicitações previstas, em especial a compatibilidade bentonite-lixiviado, até à adequada instalação. Relativamente a este último aspecto, de referir que as faixas de sobreposição tipicamente adoptadas para realizar as uniões entre painéis adjacentes devem ser aumentadas, à luz da potencial retracção dos geossintéticos bentoníticos.

Quanto aos tipos de protecção da geomembrana, constatou-se que os geotêxteis tradicionalmente utilizados para realizar esta função, embora suficientes para evitar o

punçoamento a curto prazo, podem ser insuficientes para garantir o desempenho da geomembrana a longo prazo.

No que se refere às dobras na geomembrana, verificou-se que, por um lado, conduzem a um aumento do fluxo advectivo de contaminantes através do sistema de confinamento (caso existam orifícios sobre as dobras) e, por outro lado, potenciam o desenvolvimento de fissuras de tracção, dando lugar a orifícios na geomembrana e, conseqüentemente, a um aumento do fluxo advectivo.

Por fim, observou-se que os orifícios na geomembrana parecem inevitáveis e que o fluxo advectivo de contaminantes através dos mesmos deve ser contabilizado no dimensionamento dos sistemas de confinamento.

À luz dos desenvolvimentos referidos sobre o desempenho dos geossintéticos, o dimensionamento dos sistemas de confinamento deve realizar-se com base em critérios de desempenho e não com base em regulamentações.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- August, H. & Tatzky, R. (1984). “Permeabilities of commercially available polymeric liners for hazardous landfill leachate”, Proceedings of International Conference on Geomembranes, Denver, USA, pp. 163-168.
- Barroso, Madalena, Touze-Foltz, N. & Lopes, M^a. da Graça (2007). “Quantificação do fluxo através de orifícios na geomembrana: desenvolvimentos recentes”, artigo a apresentar no 2º Seminário Português sobre Geossintéticos a realizar em 19 e 20 de Junho, Lisboa, LNEC, Portugal.
- Benson, C. H. & Khire, M.V. (1995). “Earthen covers for semiarid and arid climates”, Landfill Closures – Environmental Protection and Land Recovery, ASCE, *Geotechnical Special Publication*, No. 53, pp. 201-217.
- Benson, C. H. (2000). “Liners and covers for waste containment”, Proceedings of 4th Kansai International Geotechnical Forum, Creation of a New Geo-Environmental, Kyoto, Japan, pp. 1-40.
- Bouazza, A. Zornberg, J.G. & Adam, D. (2002). “Geosynthetics in waste containment facilities: recent advances”, Keynote Paper, Proceedings of 7th International Conference on Geosynthetics, Vol. 2, Nice, France, pp. 445-511.
- Chul Joo, J., Kim, J.Y. & Nam, K. (2001). “Mathematical modelling of organic chemical permeation through flexible membrane liners”, Proceedings of 8th International Waste Management and Landfill Symposium, Vol. 3, Cagliari, Sardinia, Italy, pp. 237-244.
- Colucci, P. & Lavagnolo, M. C. (1995). “Three years field experience in electrical control of synthetic landfill liners”, Proceedings of 5th International Landfill Symposium: Sardinia '95, Vol. 2, Cagliari, Sardinia, Italy, pp. 437-452.

- Durin, L., Touze, N. & Duquennoi, C. (1998). "Water and organic solvents transport parameters in geomembranes", Proceedings of 6th International Conference on Geosynthetics, Vol. 1, Atlanta, USA, pp. 249-256.
- EPA (2003). "Evapotranspiration landfill cover systems fact sheet", EPA 542-F-03-015 (www.epa.gov)
- Estrin, D. & Rowe, R.K. (1995) "Landfill design and the regulatory system", Proceedings of 5th International landfill Symposium: Sardinia'95, Vol 3, Cagliari, Sardinia, Italy, pp. 15- 26.
- Forget, B., Rollin, A.L. & Jacqueline, T. (2005). "Lessons learned from 10 years of leak detection surveys on geomembranes", Proceedings of 10th International Waste Management and Landfill Symposium, Cagliari, Sardinia, Italy (CD-ROM).
- Geologic Associates (1993). "Evaluation of unsaturated fluid flow", Costal Sage Scrub habitat area, Coyote Canyon Final Cover System, Orange County, Report prepared for Orange Integrated Waste Management Department.
- Gross, B.A. (2003). "Landfill cover design and operation", Workshop on bioreactor landfills, Crystal City, Virginia, USA (www.epa.gov/epaoswer/non-hw/muncpl/landfill/bio-work/gross.pdf).
- Gudina, S. & Brachman, R.W.I. (2006). "Effect of boundary conditions on deflection of GM wrinkles in a GM/GCL composite liner", Proceedings of 8th International Conference on Geosynthetics, Yokohama, Japan, pp. 255-258.
- Hauser, V.L. & Gimon, D.M. (2004). "Evaluating evapotranspiration (ET) landfill cover performance using hydrologic models", Air Force Center for Environmental Excellence, San Antonio, Texas; USA, 52 p.
- Haxo, H.E. (1990). "Determining the transport through geomembranes of various permeants in different applications", Proceedings of ASTM Symposium on Geosynthetic Testing for Waste Containment Applications, Las Vegas, USA.
- Haxo, H.E., Miedema, J.A. & Nelson, N.A. (1984). "Permeability of polymeric membrane lining materials", Proceedings of International Conference on Geomembranes, Vol. I, IFAI, Denver, St. Paul, USA, pp. 151-156.
- Kavazanjian, E., Jr.; Dixon, N.; Katsumi, T.; Kortegast, A.; Leg, P. & Zanzinger, H. (2006). "Geosynthetics barriers for environmental protection at landfills", Keynote Lecture, Proceedings of 8th International Conference on Geosynthetics, Yokohama, Japan, pp. 121-152.
- Koerner, G.R. & Koerner, R.M. (2006). "Long-term temperature monitoring of geomembranes at dry and wet landfills", *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 24, pp. 72-77.
- Koerner, R.M. & Koerner, G.R. (2005a). "A GRI white paper # 5 - In situ separation of GCL panels beneath exposed geomembranes", Geosynthetic Research Institute, Folsom, USA, 21 p.

- Koerner, R.M. & Koerner, G.R. (2005b). "In situ separation of GCL panels beneath exposed geomembranes", *GFR*, June-July, pp. 34-39.
- Koerner, R.M. (2001). Presentation to Department of Waste Management, Commonwealth of Virginia, USA.
- Koerner, R.M. (2002). "A GRI white paper on the questionable strategy of soil-only landfill covers", GRI Report #28, Geosynthetic Research Institute, Folsom, USA, 12 p.
- Lake, C.B. & Rowe, R.K. (2000a). "Diffusion of sodium and chlorite through geosynthetic clay liners", *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 18, No. 2-4, pp. 103-131.
- Lake, C.B. & Rowe, R.K. (2000b). "Swelling characteristics of needlepunched, thermally treated GCLs", *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 18, No. 2-4, pp. 77-102.
- Lake, C.B. & Rowe, R.K. (2004). "Volatile organic compound (VOC) diffusion and sorption coefficients for a needlepunched GCL", *Geosynthetics International*, Vol. 11, No. 4, pp. 257-272.
- Lake, C.B. & Rowe, R.K. (2005). "A comparative assessment of volatile organic compound (VOC) sorption to various types of potential GCL bentonites", *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 23, No. 4, pp. 323-347.
- Lopes, M.G. (2000). "A utilização de geossintéticos nos sistemas de confinamento de aterros de resíduos", Seminário sobre Aspectos Geotécnicos do Projecto e Construção de Aterros de Resíduos, LNEC, Lisboa, Portugal.
- Lorenzetti, R.J., Bartelt-Hunt, S.L., Burns, S.E. & Smith, J.A. (2005). "Hydraulic conductivities and effective diffusion coefficients of geosynthetic clay liners with organobentonite amendments", *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 23, pp. 385-400.
- Manassero, M., Parker, R., Pasqualini, E., Szabò, I.; Almeida, M.S.S., Bouazza, A., Daniel, D.E. & Rowe, R. K. (1998). "Controlled Landfill Design (Geotechnical Aspects)", Proceedings of Environmental Geotechnics, Vol. 3, LNEC, Lisbon, Portugal, pp. 1001-1035.
- Matrecon (1988). "Lining of Waste Containment and other Impoundment Facilities", United States Environmental Protection Agency Report EPA/600/2-88/052, Cincinnati, OH, USA.
- Mueller, W.; Jakob, I., Tatzky-Gerth, R. & August, H. (1998). "Solubilities, diffusion and partition coefficients of organic pollutants in HDPE geomembranes: experimental results and calculations", Proceedings of 6th International Conference on Geosynthetics, Vol. 1, Atlanta, USA, pp. 239-248.
- Mukunoki, T. & Rowe, K. (2006). "Effectiveness of a geocomposite liner to diffusion of aromatic hydrocarbons at low temperature", Proceedings of 8th International Conference on Geosynthetics, Yokohama, Japan, pp. 163-166.

- 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 EuroGeo 3, Vol. 2, Munich, Germany, pp. 507-514.
- Nosko, V. & Touze-Foltz, N. (2000). "Geomembrane liner failure: modelling of its influence on contaminant transfer", Proceedings of EuroGeo 2, Vol. 2, Bologna, Italy, pp. 557-560.
- Park, J.K., Sakti, J.P. & Hoopes, J.A. (1995). "Effectiveness of geomembranes as barriers for organic compounds", Proceedings of Geosynthetics'95, Vol. 3, Nashville, Tennessee, USA, pp. 879-891.
- Park, K.D. & Fleming, I.R. (2006). "Evaluation of a geosynthetic capillary barrier", *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 24, pp. 64-71.
- Qian, X.; Koerner, R. M. & Gray, D. H. (2002). *Geotechnical aspects of landfill design and construction*, Upper Saddle River: Prentice Hall.
- Rogers, C.E. (1985). *Permeation of Gases and Vapours in Polymers*, Polymer Permeability, Comyn, J. (Ed.), Elsevier Applied Science Publishers, London, U.K., Chapter 2, pp. 1-77.
- Rollin, A.L., Marcotte, M. & Chaput, L. (2002). "Lessons learned from Geo-electrical Leaks Surveys", Proceedings of 7th International Conference on Geosynthetics, Vol. 2, Nice, France, pp. 527-530.
- Rowe, R.K. (1998). "Geosynthetics and the minimization of contaminant migration through barrier systems beneath solid waste", Keynote Lecture, Proceedings of 6th International Conference on Geosynthetics, Atlanta, USA, Vol. 1, pp. 27-103.
- Rowe, R.K. (2005). "Long-term performance of contaminant barrier systems", *Géotechnique*, Vol. 55, No. 9, pp. 631-638.
- Rowe, R.K., Mukunoki, T. & Sangam, H.P. (2005). "BTEX diffusion and sorption for a geosynthetic clay liner at two temperatures", ASCE, *Journal Geotechnical Geoenvironmental Engineering*, Vol. 131, No.1, pp. 1211-1221.
- Rowe, R.K., Quigley, R. M., Brachman, R.W.I & Booker, J.R. (2004). *Barrier systems for waste disposal facilities*, London: Taylor & Francis (E & FN spon).
- Sangam, H.P. & Rowe, R.K. (2001a). "The role of HDPE geomembranes in retarding the diffusive migration of organic contaminants through composite liners systems", Proceedings of 8th International Waste Management and Landfill Symposium, Vol. 3, Cagliari, Sardinia, Italy, pp. 245-254.
- Sangam, H.P. & Rowe, R.K. (2001b). "Migration of dilute aqueous organic pollutants through HDPE geomembranes", *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 19, pp. 329-357.
- Southen, J.M. (2005). *Thermally driven moisture movement within and beneath geosynthetic clay liner*, PhD thesis, University of Western, Ontario, Canada.

- Sporer, H. & Gartung, E. (2002). "Laboratory tests on desiccation of geosynthetic clay liners", in *Clay Geosynthetic Barriers*, A.A. Balkema Publishers, Lisse, The Netherlands, pp. 229-343.
- Tarnowski, C., Baldauf, S. & Sost, E. (2005). "Assessment of the durability of HDPE-geomembranes in landfills practical approach under consideration of material examination performed during service life", Proceedings of 10th International Waste Management and Landfill Symposium, Cagliari, Sardinia, Italy (CD-ROM).
- Thiel, R. & Richardson, G. (2005). "Concern for GCL shrinkage when installed on slopes", Proceedings of GRI – 18 at GeoFrontiers, paper 2.31, GII Publ. PA, 7 p.
- Thiel, R., Giroud, J.P., Erickson, R. Criley, K. & Bryk, J. (2006). "Laboratory measurements of GCL shrinkage under cyclic changes in temperature and hydration conditions", Proceedings of 8th International Conference on Geosynthetics, Yokohama, Japan, pp. 157-161.
- Tognon, A.R., Rowe, R.K. & Moore, I.D. (2000). "Geomembrane strain observed in large-scale testing of protection layers", ASCE, *Journal Geotechnical Geoenvironmental Engineering*, Vol. 126, No.12, pp. 1194-1208.
- Touze-Foltz, N.Schmittbuhl, J. & Memier, M. (2001). "Geometric and spacial parameters of geomembrane wrinkles on large scale model tests", Proceedings of Geosynthetics 2001, Portland, pp. 715-728.
- Yoshida, H. & Rowe, R. K. (2003). "Consideration of landfill liner temperature", Proceedings of 8th International Waste Management and Landfill Symposium, Cagliari, Sardinia, Italy (CD-ROM).