

GEOSSINTÉTICOS EM ENGENHARIA AMBIENTAL: DESENVOLVIMENTOS RECENTES EM MATERIAIS E APLICAÇÕES

Barroso, Madalena, *Laboratório Nacional de Engenharia Civil, mbarroso@lnec.pt*
Lopes, Maria da Graça, *Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, glopes@dec.isel.ipl.pt*

RESUMO

Nesta palestra, abordam-se os principais desenvolvimentos dos geossintéticos e as suas aplicações em engenharia ambiental, com especial preponderância para as aplicações em aterros de resíduos, em lagoas e reservatórios e em minas. O objectivo deste trabalho é proporcionar uma visão do estado actual da prática do uso dos geossintéticos nas aplicações referidas, envolvendo as fases de projecto, de construção e de inspecção. São igualmente identificados os principais desafios geoambientais que se colocam em cada aplicação, bem como os aspectos mais relevantes do dimensionamento e da instalação.

ABSTRACT

This paper presents some recent advances in geosynthetic products and their application to environmental engineering, especially as regards landfills, ponds and reservoirs and mines. The aim of this paper is to provide an overview of the current state of practice and knowledge on the use of geosynthetics in these applications, involving the phases of design, construction and inspection. The paper identifies the main geoenvironmental challenges for geosynthetics in each application, as well as the most relevant issues related with the design and the installation of these materials.

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos cinquenta anos, a utilização de geossintéticos em obras de engenharia tem vindo a aumentar, não só no número e diversidade de campos de aplicação, mas também na relevância que têm vindo a desempenhar, beneficiando o projecto e a construção de inúmeras obras, facto inigualável por qualquer outro material geotécnico.

Os geossintéticos têm revolucionado muitos aspectos da prática construtiva substituindo, em muitos casos, integralmente os materiais de construção tradicionais. Em algumas aplicações, o seu emprego permite melhorar o desempenho, reduzir os custos e aumentar significativamente o factor de segurança da obra.

Esta palestra visa proporcionar uma visão do estado actual da prática do uso dos geossintéticos em engenharia ambiental, com especial preponderância para as aplicações em aterros de resíduos, em lagoas e reservatórios e em minas.

Neste trabalho são apresentados alguns desenvolvimentos recentes sobre estes materiais, com relevância para as fases de projecto, de construção e de inspecção. A seguir à primeira secção de introdução, a secção 2 descreve os principais geossintéticos utilizados em engenharia ambiental, bem como as funções que podem desempenhar. As secções 3 a 5 são dedicadas aos geossintéticos, respectivamente, em aterros de resíduos, em lagoas e reservatórios e em minas. Aí se identificam os principais desafios geoambientais que se colocam aos mesmos e se

destacam os aspectos mais relevantes associados ao dimensionamento, à construção e à inspecção nas referidas aplicações, tendo presente os principais avanços no conhecimento nestes domínios. Por fim, a secção 6 sumariza os principais aspectos abordados e as correspondentes conclusões.

2. A ENGENHARIA AMBIENTAL E OS GEOSSINTÉTICOS

Os geossintéticos são constituídos por polímeros sintéticos derivados do petróleo e por aditivos, tais como plastificantes, antioxidantes, fungicidas, estabilizadores, pigmentos, etc.. Os aditivos, presentes em pequenas quantidades, têm por objectivo introduzir melhoramentos no comportamento do polímero base, ou no processo de fabrico, por forma a torná-lo vantajoso do ponto de vista da engenharia. Podem também ser fabricados com fibras naturais (*e.g.*, juta, sisal, coco), sendo, nesse caso, designados por biogeotêxteis, ou biomateriais. Estes últimos materiais são principalmente utilizados no controlo de erosão, pelo que não serão abordados neste trabalho.

Em engenharia ambiental, os geossintéticos são sobretudo aplicados em aterros de resíduos, tanto nos sistemas de contenção basal (fundo e taludes), como nos sistemas de cobertura (temporária e/ou final), em lagoas e reservatórios (lagoas de lixiviados, lagoas de águas residuais, reservatórios para armazenamento de água, lagoas ou reservatórios para aquicultura, lagoas para actividades de lazer, etc.) e em minas.

Embora possam ser utilizados diversos tipos de geossintéticos, consoante a função que se pretende que desempenhem, os materiais mais utilizados nestas aplicações são os seguintes:

- *Geomembranas* (GM): materiais de reduzida permeabilidade, produzidos à base de materiais poliméricos, podendo ser usados como barreiras aos líquidos, gases e/ou vapores;
- *Geotêxteis* (GTX): materiais poliméricos permeáveis que podem ser utilizados para filtragem, drenagem, protecção, separação e, também, para controlo de erosão;
- *Geogrelhas* (GGR): consistem numa grelha aberta e regular de elementos resistentes à tracção, ligados entre si por extrusão, colagem ou entrelaçamento, cujas aberturas têm dimensões superiores às da superfície sólida da grelha formada pelos elementos constituintes, usadas para reforço;
- *Georredes* (GNT): consistem em duas séries de elementos paralelos que se cruzam segundo vários ângulos, formando uma estrutura plana aberta, sendo usadas para drenagem ao longo do plano;
- *Geotubos* (GP): são utilizados para captação e drenagem de líquidos.

Os geossintéticos, anteriormente referidos, podem também associar-se, formando *geocompósitos* (GCO), sendo de destacar, no contexto da presente palestra, as *barreiras geossintéticas argilosas* (GCLs), geralmente denominadas por geocompósitos bentoníticos. Estes materiais, constituídos por bentonite e por GTXs e/ou GM, são usados com a função de barreiras à migração de fluidos (líquidos ou gasosos). Outros geocompósitos frequentemente utilizados, sobretudo em aterros de resíduos, são os *geocompósitos de reforço*, formados por um ou mais GTXs e por uma GGR, e os *geocompósitos de drenagem*, constituídos por GTX(s) e por GNT, que, como os nomes indicam, são utilizados para reforço e para drenagem, respectivamente.

No Quadro 1 apresentam-se, de forma sumária, os geossintéticos mais utilizados em engenharia ambiental, bem como os principais polímeros utilizados no seu fabrico.

Quadro 1 – Geossintéticos mais utilizados em engenharia ambiental

Tipo de geossintético	Tipo de polímero/material	Função	Aplicação
Geomembranas (GM)	PEAD, PEBD, PVC, PP, CSPE, EDPM	Barreira aos líquidos, gases e/ou vapores	Confinamento em aterros de resíduos, em lagoas e reservatórios e em minas (pilhas de lixiviação ou barreiras aos líquidos, gases e/ou vapores)
Barreiras geossintéticas argilosas (GCL)	Bentonite+ GTX e/ou GM	Barreira conjuntamente com GM barreira sem utilização de GM	Confinamento em aterros de resíduos e em minas
Georredes (GRT)	PEAD	Drenagem	Drenagem em aterros de resíduos em lagoas e reservatórios
Geogrelhas (GGR)	PEAD, PET, PP	Reforço	Reforço de taludes sob os resíduos, estabilização de solos moles e fundação em aterros de resíduos, lagoas e reservatórios
Geotubos (GP)	PEAD, PEBD, PVC	Drenagem	Colecta e transporte de líquidos, drenagem, detecção de fugas e monitorização em aterros de resíduos e em minas
Geotêxteis (GTX)	PP, PET, PEAD, PA	Filtro, protecção, separação, controlo da erosão	Sistemas de protecção da base e de cobertura de aterros de resíduos, sob as barreiras em lagoas e reservatórios

Nota: PEAD – Polietileno de alta densidade; PEBD – Polietileno de baixa densidade; PVC – Cloreto de Polivinilo; PET – Poliéster; PA – Poliamida; PP – Polipropileno; CSPE – Polietileno clorosulfanado; EPDM – Copolímero de etileno-propileno-monomero.

Nas secções seguintes apresentam-se os principais desafios geoambientais associados à utilização de geossintéticos, nas referidas aplicações, bem como os aspectos mais relevantes do seu dimensionamento e instalação.

3. GEOSSINTÉTICOS EM ATERROS DE RESÍDUOS

3.1 Âmbito de Utilização e Desafios Geoambientais

A utilização de geossintéticos, em aterros de resíduos, tem sido um tema amplamente abordado na literatura, salientando-se aqui os trabalhos apresentados por Qian *et al.* (2001); Daniel & Koerner (1995, 2007), Bouazza *et al.* (2002), Kavazanjian *et al.* (2006), Rowe (1998, 2005, 2007), Touze-Foltz *et al.* (2008) e Touze-Foltz (2009). Ao interesse revelado por este tema, não é certamente alheio o facto dos aterros de resíduos incluírem, como em nenhum outro tipo de obra, vários tipos de geossintéticos simultaneamente. Efectivamente, os sistemas de protecção ambiental do fundo e taludes e de cobertura dos aterros de resíduos, concebidos para minimizar o efeito poluente dos resíduos no meio ambiente, integram diversas camadas, cada uma delas com uma função específica, na sua maioria constituídas por geossintéticos, tal como pode observar-se, na Figura 1.

O sistema de protecção ambiental do fundo e taludes, apresentado na Figura 1, é um sistema duplo. Este tipo de sistema é geralmente utilizado nos aterros para resíduos perigosos, embora possa ser utilizado em aterros para resíduos sólidos urbanos (RSUs), caso se justifique. A principal diferença entre os sistemas simples e duplo reside no número de níveis de

confinamento. O primeiro inclui apenas um nível de confinamento (confinamento primário), enquanto o segundo incorpora dois níveis de confinamento, primário e secundário, separados por uma camada de drenagem, geralmente designada, na literatura, por sistema de detecção de fugas ou por sistema secundário de captação de lixiviado, a qual é destinada ao controlo dos lixividos que atravessassem o nível de confinamento primário do aterro.

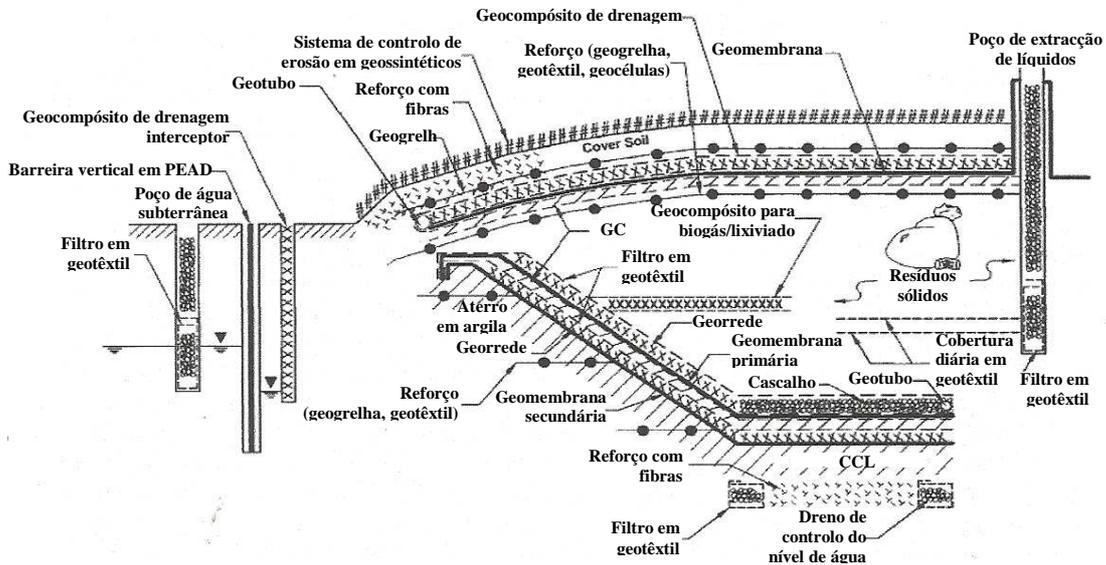


Figura 1 – Exemplos de aplicações de geossintéticos em aterros de resíduos (Zornberg & Christopher, 2007)

Na Figura 1, o confinamento primário da base e taludes é assegurado por uma barreira composta, constituída por GM/GCL, e o confinamento secundário é realizado também por uma barreira composta, formada por GM/CCL (camada de solo argiloso compactado). O sistema de detecção de fugas é constituído por um geocompósito de drenagem (GTX/GNT). Para além das barreiras, que cumprem a importante função de evitar que os líquidos gerados pela degradação dos resíduos possam atingir o subsolo e as águas subterrâneas, a figura inclui ainda GNTs, para drenagem dos líquidos que percolam através do aterro; GTXs, cumprindo diversas funções, nomeadamente, de protecção da GM primária contra o punçoamento provocado pela camada drenante de natureza granular, de separação entre os resíduos e a camada drenante (GNT ou material granular), ou de filtragem, quer sobre os resíduos, para prevenir a colmatção do sistema de captação e drenagem dos lixiviados, quer no revestimento dos drenos localizados nos terrenos de fundação, para controlo do nível de água. A figura inclui ainda geotubos perfurados, para captação e drenagem de líquidos, e materiais de reforços, designadamente, GGRs e GTXs nos taludes e *fibras* na base (distribuídas de forma aleatória).

Os geossintéticos fazem, também, parte do sistema de cobertura, com funções semelhantes às que desempenham na base. Destacam-se as barreiras, a GM e o GCL, destinadas a controlar a infiltração das águas superficiais no aterro, bem como a emissão do gás para o ambiente. Igualmente relevantes, os materiais de reforço, podendo ser utilizados sob as barreiras (GGRs, GTXs ou *geocélulas*), para minimizar as potenciais deformações resultantes de assentamentos diferenciais causados pelos resíduos ou pelo alteamento do aterro, ou sobre a camada de drenagem, a fim de melhorar as condições de estabilidade.

Saliente-se que nem todos os geossintéticos incluídos, Figura 1 são necessariamente utilizados num aterro de resíduos. Evidentemente, os sistemas de protecção ambiental podem apresentar várias configurações, dependendo do tipo de dimensionamento adoptado (com base em

regulamentações, ou com base em critérios de desempenho), das condições geotécnicas, do tipo de resíduos, da regulamentação vigente no país, etc.. Além disso, algumas camadas podem combinar-se, como é o caso da camada superficial e da camada de protecção, desde que se seleccionem solos que apresentem boa resistência mecânica e que propiciem um meio de crescimento da vegetação. Por outro lado, as camadas de controlo e de captação do biogás não serão necessárias, no caso dos aterros destinados a resíduos que não gerem gases (Vertematti, 2004). Deve, porém, salientar-se a importância das barreiras destinadas ao confinamento, designadamente, a GM, cuja presença é uma constante nos aterros de resíduos.

Evidentemente que uma obra que emprega esta diversidade de geossintéticos, com funções distintas, enfrenta alguns desafios de natureza geotécnica e ambiental, entre os quais se salientam os seguintes:

Sistema de protecção da base e taludes

- Barreiras: devem ser concebidas de modo a evitar a migração de lixiviados, por advecção e por difusão, para as águas subterrâneas e terrenos subjacentes; devem também resistir às agressões químicas, biológicas, mecânicas e por atrito (Lopes, 2006b).
- Drenagem dos lixiviados: devem ser concebidos de modo a evitar cargas hidráulicas excessivas sobre as barreiras, com vista a minimizar o risco de infiltração, principalmente no caso de ocorrerem fugas através das camadas de confinamento, nomeadamente, na presença de orifícios na barreira; deve levar-se em consideração que a capacidade de escoamento depende das tensões confinantes de compressão a que vão estar sujeitos na obra;
- Presença de nascentes: deve ser verificada a necessidade de proceder à captação e drenagem de nascentes situadas à cota onde será instalado o aterro; este problema pode ser solucionado mediante a construção de drenos, utilizando geotubos e GTXs (com a função de filtro);
- Estabilidade dos taludes: devem ser levados em consideração os ângulos de atrito entre materiais adjacentes;
- Ancoragens: devem ser concebidas valas de ancoragem na crista dos taludes e/ou nas banquetas intermédias, para evitar o deslizamento dos geossintéticos ao longo do talude.

Sistema de cobertura

- Barreiras: devem ser concebidas de modo a evitar a migração não controlada do biogás e impedir a entrada das águas superficiais, por forma a minimizar a produção de lixiviado;
- Drenagem das águas superficiais: devem ser concebidos sistemas de drenagem que levem em consideração a velocidade e o sentido do escoamento;
- Drenagem do biogás: devem ser concebidos de modo a assegurar a captação e condução do biogás para pontos de recolha;
- Assentamentos: devem ser levados em consideração os elevados assentamentos que terão lugar após o encerramento do aterro; deve evitar-se a utilização de geossintéticos pouco flexíveis;
- Ancoragens: devem ser previstas valas de ancoragem para amarrar os geossintéticos durante e após o encerramento do aterro;
- Estabilidade de taludes: devem ser levados em consideração os ângulos de atrito entre materiais adjacentes; por exemplo, o ângulo de atrito na interface solo/GTX ou GTX/GTX pode variar entre o 5° e 33°, pelo que há que acautelar os potenciais deslizamentos;
- Riscos de erosão: os geossintéticos seleccionados para desempenhar a função de controlo de erosão devem ser capazes de reter os finos provenientes dos solos subjacentes, ou dos

materiais erodíveis transportados, e/ou resistir às velocidades de escoamento e aos esforços tangenciais provocados pelo fluxo de águas superficiais (Vertemati, 2004).

Outros aspectos, transversais aos sistemas de protecção ambiental basais (base e taludes) e de cobertura, prendem-se com a caracterização das propriedades físicas, mecânicas, hidráulicas e de durabilidade dos geossintéticos, necessárias com vista à selecção do produto mais adequado.

3.2 Aspectos Relevantes do Dimensionamento

3.2.1 Generalidades

Quando surgiram os primeiros geossintéticos, estes eram seleccionados com base no tipo ou na marca. O dimensionamento era realizado por “tentativa e erro”. Actualmente, com a diversidade de produtos disponíveis e com o desenvolvimento de métodos de dimensionamento, essa abordagem é totalmente inaceitável. Existem, presentemente, vários métodos para proceder ao dimensionamento dos geossintéticos, nomeadamente, os seguintes (Sarsby, 2007):

- método empírico;
- método analítico;
- método probabilístico (*probability of failure in geosynthetic design*);
- método baseado em coeficientes de ponderação e redução (*load and reduction factor design*);
- métodos híbridos (*interrelationships of probability and load and reduction factor design*).

Os três últimos métodos encontram-se ainda numa fase embrionária, pelo que não serão aqui abordados. Assim, na prática, o dimensionamento dos geossintéticos faz-se, sobretudo, com base no método empírico, ou no método analítico.

O método empírico assenta na comparação entre os valores recomendados em tabelas de especificações de projecto e os valores das propriedades dos produtos, apresentados pelos produtores através de fichas técnicas. As tabelas de especificações de projecto listam os valores requeridos para as propriedades relevantes (físicas, mecânicas, hidráulicas e/ou durabilidade). Estas tabelas de especificações têm sido elaboradas por vários organismos, especialmente nos EUA, destacando-se, no caso dos aterros de resíduos, o *Geosynthetic Research Institute* (GRI).

A utilização do método empírico deve ser cautelosa. Em primeiro lugar, os valores indicados nas especificações de projecto são geralmente valores mínimos (ou máximos) das propriedades, enquanto os valores indicados, nas fichas técnicas dos produtores, são geralmente valores médios, os quais podem ser bastante diferentes dos anteriores. De referir que, nas fichas técnicas dos produtos comercializados na Europa, é indicado o valor da tolerância, o qual foi calculado para um nível de confiança de 95%. Na prática, para efeitos de comparação com as especificações de projecto, ao valor médio de uma dada propriedade indicado, na ficha técnica, deve ser subtraído, ou adicionado, consoante o valor requerido seja um valor mínimo ou um valor máximo, o valor da tolerância. Em segundo lugar, a comparação só é válida se normas de ensaio indicados nas tabelas de especificações e nas fichas técnicas forem as mesmas. Por fim, mas não menos importante, os valores indicados nas especificações de projecto foram calculados considerando a situação mais desfavorável a que o geossintético vai estar sujeito, pelo que os valores mínimos exigidos podem ser sobrestimados e, conseqüentemente, a solução final pode não ser a mais económica.

O método analítico, que se recomenda, consiste em calcular os valores requeridos, para as propriedades relevantes, de acordo com as solicitações previstas. Koerner (1998, 2005) preconiza que o dimensionamento se realize por passos, tal como é seguidamente sumariado:

- i. Analisar a aplicação onde o geossintético será integrado, considerando não só o geossintético mas também os materiais adjacentes;
- ii. Estipular um valor mínimo para o factor de segurança (FS), de acordo com a importância que o geossintético apresenta para a obra, por ex., se o geossintético colapsar, quais são as consequências (o FS pode ser regulamentado);
- iii. Definir a função principal que o geossintético vai desempenhar: separação, reforço, filtração, drenagem, protecção ou barreira;
- iv. Calcular o valor requerido para a propriedade relevante em análise, com base na função principal que o geossintético vai desempenhar (Quadro 2) e nas solicitações previstas; o valor requerido é geralmente majorado por um factor de segurança global, o qual é definido pelo quociente entre o valor requerido e o valor admissível (item seguinte);
- v. Determinar a partir de ensaios, ou a partir da ficha técnica do produto, o valor admissível da propriedade em consideração, devidamente ajustado por um coeficiente de redução, o qual corresponde ao produto de vários coeficientes parciais (na literatura anglo-saxónica *reduction factors*), cada um deles respeitante a um tipo de incerteza (por ex., fluência, degradação por acção de agentes químicos e biológicos, danificação durante a instalação, etc.);
- vi. Calcular o FS com base no quociente entre o valor admissível e o valor requerido da propriedade em questão;
- vii. Verificar se o FS calculado satisfaz o FS estipulado (ou seja, comparar os valores dos itens 6 e 2);
- viii. Se o valor não for aceitável, repetir o processo considerando outro produto com propriedades mais adequadas;
- ix. Se o valor for aceitável, verificar se nenhuma outra função é mais crítica;
- x. Repetir o procedimento para outros produtos e optar pelo produto que apresentar menor preço, após verificar se nenhuma outra função é mais crítica.

Quadro 2 – Propriedades relevantes de acordo com as funções dos geossintéticos (adaptado de Holtz *et al.*, 1997)

Propriedades	Geotêxteis e produtos afins					GMs e GCLs
	Filtro	Separação	Reforço	Dreno	Protecção	Barreira
Espessura	*			**	**	**
Resistência à tracção	**	**	**	**	**	**
Extensão	*	**	**		**	**
Resistência ao punçoamento estático (CBR)		**	**		**	**
Resistência ao punçoamento dinâmico (<i>cone drop test</i>)		*	**		**	
Atrito			**		*	**
Resistência rasgamento		*	*		*	**
Porometria	**	*		**		na
Permeabilidade normal ao plano	**			*		na
Permeabilidade no plano	*			**		na
Permeabilidade à água (estanqueidade aos líquidos)	na	na	na	na	na	**
Permeabilidade ao gás (estanqueidade ao gás)	na	na	na	na	na	**
Durabilidade	**	**	**	**	**	**

Grau de importância: ** muito importante, * importante, na = não aplicável

Para além das exigências funcionais anteriormente referidas, os geossintéticos devem ser capazes de sobreviver à instalação e apresentar durabilidade compatível com o tempo que permanecerão em serviço.

3.2.2 Desenvolvimentos Recentes sobre os Aspectos Relevantes do Dimensionamento

Em conformidade com os desafios geoambientais indicados, na secção 3.1, os principais aspectos a levar em consideração no dimensionamento dos geossintéticos em aterros de resíduos são os seguintes:

- Estanqueidade das barreiras à migração de fluidos (líquidos e gasosos), incluindo as zonas de soldadura;
- Compatibilidade química dos geossintéticos com os lixiviados, no sistema de protecção ambiental da base e taludes, e com o biogás, no sistema de cobertura;
- Resistência mecânica dos geossintéticos, tanto durante a fase de construção (tráfego de obra, colocação de camadas sobrejacentes), como durante a fase de exploração (peso dos resíduos, assentamentos da cobertura ou fundação);
- Características de atrito dos geossintéticos, particularmente no caso dos cálculos de estabilidade dos taludes (deve levar-se em consideração utilização de vários geossintéticos na constituição do sistema de confinamento e atender aos baixos valores de resistência ao corte entre eles – ver Quadro 3);
- Capacidade de escoamento sob carga (geossintéticos de drenagem);
- Flexibilidade dos geossintéticos, sobretudo, nos materiais do sistema de cobertura, face aos assentamentos expectáveis;
- Durabilidade dos geossintéticos, incluindo a capacidade de resistir a agressões químicas e biológicas por parte dos resíduos, lixiviados e biogás, bem como ao efeito da exposição aos raios ultravioleta (raios UV), entre outros.

Quadro 3 – Valores típicos dos ângulos de atrito entre geossintéticos (Bouazza *et al.*, 2002; Sharma & Lewis, 1994)

Ângulo de atrito entre geossintéticos	GM PEAD (lisa)	GM PEAD (rugosa)	Georrede
Geotêxtil tecido	7°-11°	9°-17°	9°-18°
Geotêxtil não tecido agulhado	8°-12°	15°-33°	10°-27°
Geotêxtil não tecido termoligado	9°-11°	15°-16°	17°-21°
Georrede	5°-19°	7°-25°	-
Barreira geossintética argilosa	8°-16°	15°-25°	-

Na impossibilidade de explorar estes aspectos para todos os geossintéticos envolvidos nos aterros de resíduos, pela extensão e complexidade que apresentam, nesta palestra abordam-se apenas as barreiras, uma vez que é sobre estas que recai a mais importante função dos geossintéticos nos aterros de resíduos. Neste âmbito, apresentam-se seguidamente os principais desenvolvimentos relatados na bibliografia sobre as GCLs e as GMs.

Barreiras geossintéticas argilosas

No que se refere às GCLs, de acordo com um estudo apresentado por Bouazza & Gates (2010), os aspectos que têm merecido maior atenção recentemente e que devem ser levados em consideração no dimensionamento, por poderem condicionar o desempenho deste tipo de barreiras, são os indicados no Quadro 4.

Conforme se pode verificar, a questão da compatibilidade química das GCLs assume um papel de destaque. Efectivamente, estes materiais devem ser quimicamente compatíveis com os lixiviados produzidos no aterro de resíduos. Esta questão foi recentemente objecto de um estudo

laboratorial realizado por Rosin-Paumier *et al.* (2011). Estes autores investigaram a adequabilidade do ensaio em filtro prensa (*filter press test*) para avaliar, de uma forma expedita (em poucas horas), a interacção entre várias bentonites, provenientes de diferentes GCLs, e soluções químicas agressivas, entre elas lixiviados sintéticos. O ensaio em filtro prensa é semelhante ao ensaio de perda de fluidos (ASTM D 5891), excepto que o efluente é recolhido durante todo o ensaio, a fim de se traçar uma curva de filtragem, a partir da qual se calcula a permissividade da bentonite. A bentonite é extraída das GCLs (40 g) e é dispersa no líquido em estudo. Os resultados obtidos por aqueles autores são promissores, sugerindo que o ensaio em filtro prensa pode ser usado para seleccionar a GCL mais apropriado à contenção de um determinado líquido, ou seja, melhor adaptado às condições de serviço.

Quadro 4 – Aspectos relevantes no dimensionamento das GCLs em aterros de resíduos (modificado de Bouazza & Gates, 2010)

Aspectos relevantes	Potencial impacto
Compatibilidade química	Aumento do fluxo de contaminantes devido ao aumento de k causado pela incompatibilidade química entre GCLs e soluções químicas orgânicas ou inorgânicas
Compatibilidade química após pré-hidratação das GCLs	Impacto da pré-hidratação das GCLs sobre a k dos mesmos a longo prazo, após contacto (permeação) com soluções químicas orgânicas ou inorgânicas
Troca catiónica	Dessecação associada a trocas catiónicas (“dessecação química”), comprometendo o desempenho destas barreiras à migração de líquidos e gases (sistemas de cobertura)
Migração de gás	Migração de gás através das GCLs aplicadas no sistema de cobertura
Migração de contaminantes	Difusão e adsorção/ desadsorção de contaminantes através das GCLs aplicadas nos sistemas de protecção ambiental
pH alcalino	Potencial desenvolvimento de reacções químicas de dissolução e/ou precipitação da bentonite, bem como potencial degradação dos GTXs
pH ácido	Potencial desenvolvimento de reacções químicas de dissolução da bentonite, conduzindo a um aumento da k das GCLs
Erosão interna da bentonite	Erosão 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, conduz a um aumento da migração de fluidos através das GCLs
Retração das GCLs	Potencial afastamento entre os painéis adjacentes, sobretudo nos taludes, comprometendo o desempenho das GCLs

k = condutividade hidráulica

Outro aspecto que importa comentar, prende-se com a influência da pré-hidratação das GCLs sobre a sua condutividade hidráulica. Parece ser consensual que a pré-hidratação é benéfica para o desempenho hidráulico das GCLs, sendo, porém, recomendável que a hidratação seja realizada sob carga. Como é de prever, existem diversas situações em que é operacionalmente impossível satisfazer esta recomendação, pelo que as GCLs são hidratadas sem estarem sujeitas a uma tensão confinante de compressão. Nestas circunstâncias a questão que se levanta é qual o método de hidratação mais adequado.

Esta questão foi investigada por Touze-Foltz *et al.* (2009), mediante a realização de ensaios laboratoriais em edopermeâmetros (*oedopermeameter tests*). Estes autores hidrataram, sem carga, 5 GCL constituídas por bentonite sódica (3 produtos agulhados e 2 cosidos), usando três

metodologias diferentes: (1) imersão durante 5 dias com os provetes de GCL na posição horizontal (potencial aplicação em lagoas, aterros de resíduos, ou em obras de protecção ambiental, onde estes materiais podem ser imersos em água antes de ficarem sob efeito de carga); (2) chuva durante 5 dias (6 horas/dia) com as GCLs na posição horizontal (potencial aplicação de GCLs no extradorso de um túnel); e (3) chuva durante 5 dias (6 horas/dia) com as GCLs na posição vertical (potencial aplicação de GCLs no intradorso de um túnel). Os resultados foram interpretados em termos de caudal, comparando os valores obtidos para as GCLs hidratadas segundo as metodologias descritas com os valores obtidos após hidratação das GCLs sob uma carga de 20 kPa. No caso das GCLs agulhadas, observaram que o desempenho hidráulico daqueles produtos foi pouco afectado pelo método de hidratação (sem carga). Para as GCLs cosidas, os resultados foram bastantes dependentes do produto, ou seja, do método de fabrico, podendo a imersão ser bastante prejudicial. Concluíram que os produtos cosidos devem ser cobertos imediatamente após a sua instalação, o que não será necessariamente requerido para as GCLs agulhadas. Salientaram que os resultados obtidos não devem ser generalizados, pois circunscrevem-se às condições de ensaio e aos produtos estudados.

A hidratação pode também ocorrer por via do contacto das GCLs com os terrenos subjacentes. Este assunto foi recentemente investigado por Rayhani *et al.* (2011). No estudo realizado por estes autores, foram usadas 3 GCLs agulhadas, provenientes de 2 produtores diferentes, as quais foram hidratadas mediante a colocação sobre 2 solos diferentes (um silte arenoso e uma areia), durante, no máximo, 70 semanas. Os resultados obtidos mostraram que as GCLs colocadas sobre solos com teores correspondentes à capacidade de campo do solo (*field capacity*) atingiam teores em água semelhantes aos que atingiam se imersos em água. Pelo contrário, as GCLs colocadas sobre solos com teores em água próximos do teor em água residual do solo (5% para o silte argiloso e 2% para a areia em estudo) não ultrapassavam os 30 - 35%, o que representava apenas ¼ do valor alcançado através da imersão. Verificaram também que o método de fabrico das GCLs influenciava significativamente a hidratação, o que atribuíram ao modo de confinamento da bentonite no interior da GCL. Observaram ainda que a colocação de uma carga 2 kPa sobre os provetes (colocada com vista a melhorar o contacto entre a GCL e o solo subjacente) afectava a taxa de hidratação, mas não o valor do teor em água final. Por fim, relataram que a hidratação da GCL não foi significativamente afectada pelo tipo de geotêxtil (tecido ou não tecido) em contacto com o solo subjacente.

A questão da selecção das GCLs, com base no seu desempenho, mereceu também atenção recentemente. Guyonnet *et al.* (2009) realizaram um estudo com vista ao desenvolvimento de indicadores de desempenho, para selecção das GCLs a aplicar no confinamento basal dos aterros de resíduos. Para o efeito, realizaram ensaios em edopermeâmetros sobre as GCLs tipicamente usadas no confinamento basal dos aterros de resíduos em França. As GCLs foram ensaiadas antes e após contacto prolongado com três fluidos diferentes: solução de cloreto de sódio com baixa concentração, lixiviado natural e lixiviado sintético. Neste trabalho, foram utilizados oito GCLs, contendo diferentes bentonites, nomeadamente, sódica natural, cálcica activada e cálcica natural. Com base nos resultados obtidos, especificam valores (mínimos ou máximos) que as GCLs, com bentonite sódica, devem satisfazer para aplicação no confinamento basal dos aterros de resíduos. No Quadro 5, apresentam-se os indicadores de desempenho propostos por estes autores.

Em resumo, apesar das GCLs serem objecto de intensa investigação, existem ainda muitas questões por esclarecer no que diz respeito à compatibilidade química destas barreiras com os lixiviados, bem como sobre o melhor método de pré-hidratação em obra e sob que valor de tensão confinante. Encorajadores são os desenvolvimentos recentes sobre a selecção das GCLs com base em indicadores de desempenho, definidos com base em ensaios expeditos.

Quadro 5 – Indicadores de desempenho propostos para as GCLs com bentonite sódica para aplicação no confinamento basal dos aterros de resíduos (Guyonnet *et al.*, 2009)

Indicador	Valor requerido	Observações
Índice de expansibilidade XP P 84-703	$\geq 24 \text{ cm}^3/2 \text{ g}$	Valor geralmente incluído na ficha técnica do produto
Capacidade de Troca Catiónica (CEC) NF X31.130	$\geq 70 \text{ meq/ 100g}$	Relacionada com o teor em esmectite
Teor em CaCO_3 NF P 94-048	$\leq 5\%$	Relativamente à massa seca de bentonite (0% de água)
Análise dos isótopos de Carbono e Oxigénio	-	Caso se pretenda conhecer a origem da bentonite

Geomembranas

No que diz respeito às GMs, no caso dos aterros de resíduos, é recomendável que sejam de polietileno de alta densidade (PEAD), no confinamento da base e dos taludes, devido à sua resistência química, mecânica, durabilidade e também por permitirem soldaduras resistentes do ponto de vista mecânico e hidráulico. Estas GMs, embora rígidas, apresentam boas propriedades físicas e conseguem suportar tensões elevadas muitas vezes impostas durante a construção do aterro. No sistema de cobertura, é preferível a utilização de GMs de polietileno de baixa densidade (PEBD), por serem mais flexíveis e, conseqüentemente, poderem acomodar mais facilmente os assentamentos dos resíduos, com menor risco de punçõamento (Lopes, 2006a).

Os aspectos mais relevantes no dimensionamento das GMs nos aterros de resíduos são os indicados no Quadro 6.

Quadro 6 – Aspectos mais relevantes no dimensionamento das GMs em aterros de resíduos

Aspectos relevantes	Potencial impacto
Resistência e deformabilidade	Inaptidão para resistir às exigências funcionais e de instalação, assim como para acomodar assentamentos, no caso de inadequada resistência à tracção, rasgamento, punçõamento e deformabilidade/flexibilidade
Potenciais fugas de lixiviado através de (inevitáveis) orifícios	Contaminação dos terrenos subjacentes e das águas subterrâneas
Qualidade das soldaduras	Falta de estanqueidade e de resistência mecânica
Durabilidade	Degradação devido à acção dos lixiviados, da temperatura, dos raios UV, de microorganismos

De entre os aspectos indicados, no Quadro 6, destacam-se, na presente palestra, os relacionados com a durabilidade, por ser um dos que tem apresentado maiores desenvolvimentos.

Os principais factores que afectam a durabilidade das GMs de PEAD são (Tarnowski *et al.*, 2005): (i) fissuras por tracção (*stress cracking*); (ii) termo-oxidação (envelhecimento térmico); (iii) foto-oxidação (envelhecimento devido aos raios UV).

No que se refere às fissuras por tracção (*stress cracking*), estas ocorrem quando a GM está sujeita durante longos períodos de tempo a uma força de tracção inferior à tensão de cedência e devem-se a alterações na microestrutura do PEAD.

Relativamente à oxidação (termo-oxidação e foto-oxidação), de referir que afecta as propriedades mecânicas das GMs, provocando, nomeadamente: 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 à fissuração; diminuição da flexibilidade (Tarnowski *et al.*, 2005).

Embora tanto a fissuração, como a oxidação, conduzam à degradação das GMs, no caso dos aterros de resíduos, a segunda é a que mais afecta o desempenho destes materiais a longo prazo (Rowe, 2005). A degradação processa-se em três fases (Hsuan & Koerner 1998):

- Fase I – Delapidação dos anti-oxidantes: fase em que os anti-oxidantes existentes na GM são consumidos;
- Fase II – Tempo de indução: fase correspondente ao intervalo entre a delapidação dos anti-oxidantes e o início da alteração das propriedades da GM;
- Fase III – Degradação do polímero: fase correspondente à modificação da estrutura do polímero, acompanhada pela alteração das propriedades mecânicas da GM (redução para um valor arbitrário, por exemplo, 50% do valor original da propriedade).

Um factor de suma importância para estimar o tempo de vida útil duma GM é temperatura. Temperaturas entre 30 e 40°C foram observadas na base dos aterros de RSUs com sistemas de recolha dos lixiviados operacionais (Koerner *et al.*, 2008). Valores superiores de temperatura foram relatados para aterros em que o sistema de recolha de lixiviados não funcionava adequadamente e em aterros funcionando como bioreactores (Rowe & Hoor, 2009).

A temperatura varia com o tempo de exploração do aterro. Koerner & Koerner (2006) registaram a temperatura num aterro de RSUs, durante dez anos e meio, tendo verificado que, nos primeiros cinco anos e meio, a temperatura média foi de 20°C. Após esse período, a temperatura aumentou valores médios da ordem dos 35°C. Temperaturas substancialmente superiores às referidas têm sido relatadas na literatura. Neste âmbito, por exemplo, na base de um aterro de RSUs em Tóquio, Yoshida & Rowe (2003) registaram-se temperaturas superiores a 50°C, após sete anos de exploração, e temperaturas entre 37 e 41°C, após vinte anos de exploração.

Para aterros constituídos por sistemas de confinamento simples, Rowe (2005) estimou que os tempos de vida útil das GMs de PEAD seriam da ordem dos 205 anos, 80 anos e 35 anos, considerando temperaturas de 30°C, 40°C e 50°C, respectivamente.

Rowe & Hoor (2009) alargaram o âmbito do estudo, estimando, também, o tempo de vida útil das GMs em aterros com sistemas de protecção ambiental duplos. Os resultados obtidos, por estes autores, mostram que a temperatura da GM ao nível do confinamento secundário é fortemente afectada pela temperatura da GM primária e pelo tipo e espessura das camadas constituintes do sistema de protecção ambiental. Estimaram que o tempo de vida útil da GM secundária é da ordem dos 310 anos, se a temperatura na GM primária permanecer inferior a 30°C. Este valor pode reduzir-se drasticamente para 50 anos, se temperatura da GM primária for de 50°C. No entanto, estes tempos de vida útil podem aumentar, respectivamente, para 390 anos (temperaturas de 30°C) e para 75 anos (temperaturas de 50°C), através da utilização de barreiras compostas, envolvendo uma GM e um GCL ou uma GM e uma CCL (com 1 metro de espessura).

Salienta-se que estas previsões assumem que a temperatura da GM primária permanece constante, o que pode não ser necessariamente o caso, pelo que, para efeitos de dimensionamento, estas temperaturas devem ser encaradas como limites inferiores. Neste âmbito, se os tempos de vida úteis indicados forem inferiores aos tempos de serviço previstos para um aterro, de acordo com Rowe & Hoor (2009), pode optar-se por: (i) alterar o método de

operação do aterro de resíduos, por forma a reduzir a geração de calor; (ii) revisão do projecto, por exemplo, aumentar a espessura do sistema de confinamento primário; (iii) arrefecimento do sistema de confinamento primário; ou (iv) arrefecimento do sistema de confinamento secundário.

Paralelamente, Rimal & Rowe (2009) realizaram estudos que conduziram à previsão dos tempos de delapidação dos anti-oxidantes. Segundo estes autores, para uma temperatura de 35°C, o tempo de delapidação dos anti-oxidantes é da ordem dos 130 anos, caso a GM se encontre sob uma camada de areia com 1,5 cm de espessura, e dos 230 anos, se a espessura da camada de areia for 30 cm. Estes resultados corroboram que a espessura da camada sobre a GM é aspecto essencial, não só para protecção da GM contra o punçoamento, como também do ponto de vista da durabilidade.

O efeito da foto-oxidação sobre a durabilidade das GMs tem, igualmente, sido objecto de vários estudos, sobretudo, através da realização de ensaios laboratoriais sobre GMs expostas, natural ou artificialmente, aos raios UV. Por exemplo, em Portugal, Carneiro (2009) realizou um trabalho com vista à avaliação da resistência das GMs de PEAD expostas aos agentes climáticos. Nesse trabalho, foram utilizadas 2 GMs, uma lisa (2 mm de espessura) e outra rugosa (1,5 mm de espessura). Os danos sofridos pelas GMs foram avaliados com base nos ensaios de resistência à tracção/extensão e ao rasgamento, mediante comparação entre os resultados obtidos para as amostras expostas e não expostas. As amostras foram expostas sob condições naturais (até 12 meses) e artificiais: colocação numa estufa a 100°C, durante 28 dias, e colocação num simulador laboratorial QUV, durante aproximadamente 15 dias. Os resultados obtidos sugerem que as propriedades mecânicas das GMs estudadas, de um modo geral, não foram significativamente afectadas pela exposição (para qualquer dos métodos de exposição considerados). No entanto, segundo o autor, poderá ser relevante expor as GMs a condições mais severas.

A destacar, também, o estudo realizado por Rowe *et al.* (2009), com vista a estimar a duração das diferentes fases de degradação de GMs de PEAD (2 mm), após exposição ao ar, à água e ao lixiviado, durante 8 a 10 anos. Realizaram vários ensaios, entre eles o ensaio de OIT (tempo de indução à oxidação), cujos resultados serviram de base para estimar o tempo de duração das fases de degradação, considerando várias temperaturas. Para as amostras expostas ao ar e a uma temperatura de 35°C, estimaram que a Fase I de delapidação dos anti-oxidantes demoraria 65 anos. Durante esta fase, caracterizada por diminuição nos valores de OIT, a alteração das propriedades mecânicas das GMs pode não ser mesurável.

Os resultados obtidos por Yako *et al.* (2010) e por Barroso & Lopes (2010), a partir de ensaios realizados sobre amostras expostas às condições climáticas, parecem consistentes com a estimativa apresentada por Rowe *et al.* (2009). Os primeiros autores, estudaram uma GM de PEAD exposta numa obra, localizada em Massachusetts (EUA), durante 20 anos. Para o efeito, retiraram três amostras, uma na crista do talude e duas no talude, uma exposta e outra coberta (Figura 2). Determinaram o OIT e a resistência ao desenvolvimento de fissuras por tracção (resistência ao *stress cracking*) e compararam os valores obtidos com os valores originais da GM e com os preconizados no GRI-GM13. Yako *et al.* (2010) verificaram que as amostras apresentaram uma diminuição nos valores de OIT e de resistência ao desenvolvimento de fissuras por tracção. De referir que a amostra exposta no talude foi a que apresentou o maior decréscimo nos valores destas propriedades. Para além dos ensaios referidos, realizaram ensaios de espessura, massa volúmica, resistência à tracção e extensão na cedência e na rotura, resistência ao punçoamento, resistência ao rasgamento, teor em negro de carbono e dispersão em negro de carbono. Observaram que estas propriedades, de um modo geral, não sofreram alterações significativas, indicando que a GM continuava a apresentar um desempenho adequado.



Figura 2 – Identificação dos locais de amostragem (Yako *et al.*, 2010)

Barroso & Lopes (2010) realizaram, igualmente, um estudo sobre a evolução das propriedades das GMs de PEAD expostas aos agentes atmosféricos, incluindo as soldaduras realizadas pelo método de termofusão. O estudo foi efectuado com o apoio das empresas concessionárias dos aterros multimunicipais de RSUs portuguesas, que, para o efeito, providenciaram locais para a exposição das amostras (Figura 3). As mesmas foram preparadas durante a construção dos aterros de resíduos, distribuídos de norte a sul do país. Passados 10 anos, procedeu-se à recolha de provetes, para avaliar as propriedades físicas, mecânicas e de “endurance” das GMs (ensaios massa volúmica, índice de fluidez, resistência à tracção e extensão na cedência, teor em negro de carbono e OIT), bem como a evolução das propriedades mecânicas da soldadura (ensaios de arranque e de corte). Os resultados obtidos indicaram que, tanto as propriedades das GMs, como as propriedades mecânicas das soldaduras, não foram significativamente afectadas pela exposição aos agentes atmosféricos durante os 10 anos de exposição.

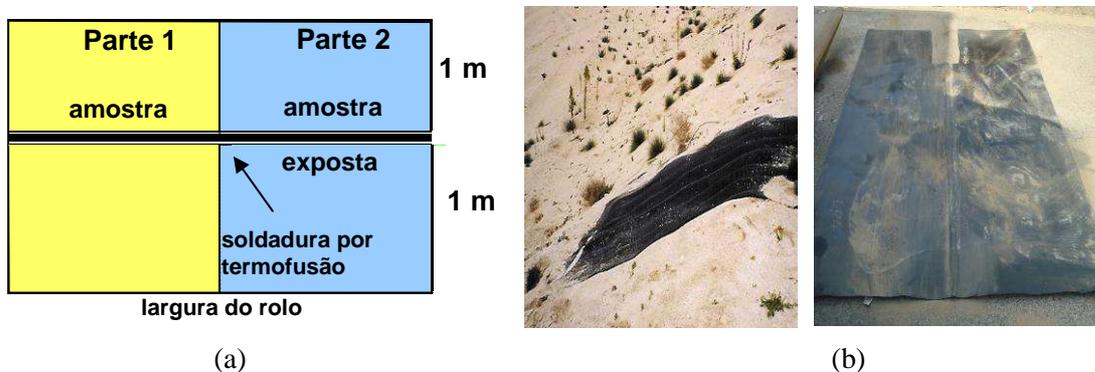


Figura 3 – Amostras expostas nos aterros portugueses: (a) esquema de preparação e (b) exemplos de exposição (Barroso & Lopes, 2010)

Em suma, no que se refere à durabilidade das GMs em aterros de resíduos, o estado actual do conhecimento parece confirmar que as propriedades das GMs podem alterar-se devido à temperatura e ao efeito dos agentes atmosféricos, nomeadamente, dos raios UV presentes na radiação solar. Estimativas apresentadas por Rowe & Hoor (2009), para GMs não expostas aos raios UV, apontam para tempos de vida útil da ordem dos 270 anos, calculados para uma temperatura de 30°C. Contudo, o tempo de vida útil diminui drasticamente com o aumento da temperatura, pelo que aqueles autores sugerem alterações aos métodos de operação tradicionais, caso o tempo de serviço seja superior ao tempo de vida útil previsto. Para as GMs expostas aos raios UV, Rowe *et al.* (2009) estimaram que a duração da fase de delapidação dos anti-oxidantes é de, aproximadamente, 65 anos, considerando uma temperatura de 35°C.

3.3 Aspectos Relevantes da Construção

As operações de construção e instalação dos geossintéticos são cruciais para o sucesso da obra. Devem seguir uma sequência específica, preferencialmente definida no projecto, por forma a evitar falhas durante a construção.

Em primeiro lugar, o equipamento para transporte em obra deve ser o adequado, para que não se verifiquem quaisquer danos nos rolos de geossintéticos. O transporte deve ser efectuado de forma a preservar a embalagem original, sem a rasgar (Figura 4).



Figura 4 – Exemplo de transporte de geossintéticos: (a) adequado e (b) inadequado

O manuseamento, pelos funcionários do instalador, deve ser adequado (Figura 5), nomeadamente, não deve ser permitido arrastar, deslizar ou empurrar os rolos.



Figura 5 – Exemplos de manuseamento adequado

De igual forma, o armazenamento deve ser apropriado, para evitar, por exemplo sujidade, danos mecânicos, vandalismo, passagem de veículos ou outros factores, como a chuva e raios UV, sobretudo se o tempo de armazenamento for significativo (mais de 6 meses). A superfície sobre a qual podem ser colocados os rolos dos geossintéticos deve ser minimamente preparada, para que pedras ou objectos contundentes não danifiquem os mesmos e, também, para esta não permanecer permanentemente molhada. Para o efeito, podem colocar-se os rolos sobre paletes de madeira (Figura 6). A embalagem original, deve, necessariamente, manter-se intacta até à data e local da sua utilização. O empilhamento de rolos deve seguir as recomendações do fabricante que, geralmente, acompanham o produto. Na ausência destas recomendações, sugere-se que o empilhamento não exceda os cinco níveis de rolos. No caso de os geossintéticos serem

armazenados de forma inadequada, devem sacrificar-se as primeiras espiras, aproveitando apenas o material intacto.



Figura 6 – Exemplos de armazenamento: (a) adequado e (b) inadequado

Outro aspecto, que importa realçar, prende-se com a expansão/contractão das GMs, devidas a variações de temperatura. Estas podem induzir tensões de tracção, pelo que é importante adoptarem-se folgas de instalação capazes de compensar as deformações geradas. Para minimizar a formação de dobras deve, por exemplo, proceder-se apenas à colocação de rolos que possam ser soldados de imediato, ou trabalhar nas partes do dia em que as temperaturas são mais amenas.

Antes de se proceder à instalação dos geossintéticos, é necessário que a camada de fundação esteja devidamente preparada. Se o geossintético for colocado directamente sobre uma camada de solo argiloso compactado, segundo Lopes (2006b), a sua superfície deve estar nivelada (Figura 7), isenta de materiais contudentes, elevações ou depressões (devidas, por exemplo, a fragmentos rochosos, raízes ou resíduos), mudanças bruscas de inclinação, zonas “moles” e fissuras por secagem excessiva (Figura 8). Deve definir-se a profundidade máxima admissível para as rodeiras (normalmente inferior a 2,5 mm), bem como as dimensões máximas admissíveis dos fragmentos rochosos. Bouazza *et al.* (2002) recomenda que estes não excedam os 12 mm, no caso de as GCLs serem colocadas sobre uma camada de solo. Para evitar que a superfície de apoio se deteriore, em consequência de chuvas, ventos, perda de humidade do solo, trânsito local, etc., recomenda-se que colocação dos geossintéticos se realize imediatamente após os trabalhos de preparação da referida superfície.



Figura 7 – Superfície de apoio no talude: (a) adequado e (b) inadequado

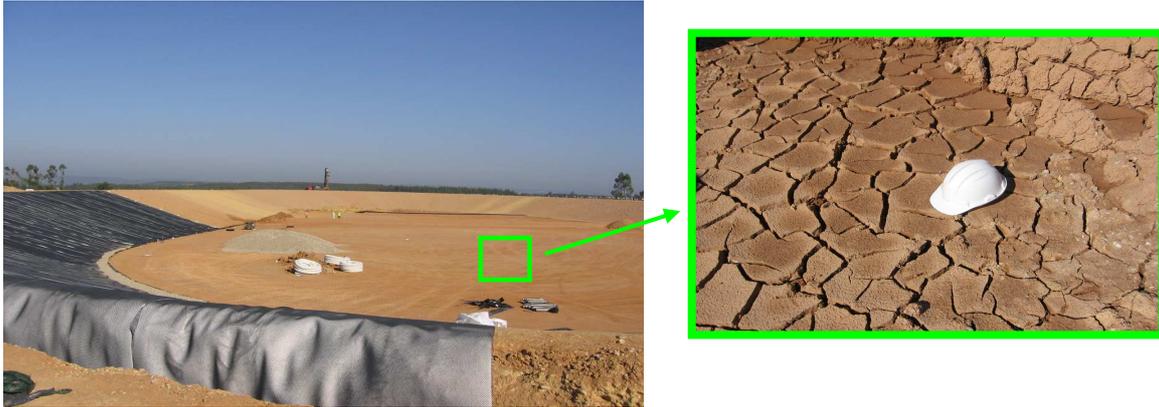


Figura 8 – Exemplo de fissuras por secagem excessiva na base

Igualmente importantes são as condições das valas de ancoragem. Estas devem ser construídas antes da colocação dos geossintéticos (Figura 9), de acordo com as dimensões e localização indicadas no projecto. Devem ser arredondadas nos cantos, para evitar danos, não podendo haver material solto entre a vala e os geossintéticos. Por outro lado, o material de enchimento deve ter formas e dimensões que não danifiquem os geossintéticos. No interior da vala, deve ser providenciado o carregamento provisório adequado (*e.g.*, solo, sacos de areia), por forma a evitar o escorregamento dos geossintéticos ao longo do talude, particularmente gravoso no caso das GMs, com a formação de dobras no pé do talude. Deve ainda conciliar-se a geometria das valas com as características dos geossintéticos, visto que os materiais mais rígidos dificilmente poderão ser dobrados ou soldados (GM) numa vala com uma configuração rectangular. Pode optar-se por valas com diferentes geometrias, por exemplo, para “V”, desde que estas respondam satisfatoriamente às solicitações previstas. Sobre este assunto recomenda-se a consulta do trabalho apresentado por Thiel (2010).



Figura 9 – Vala de ancoragem: (a) abertura; (b) geossintéticos carregados

Os atravessamentos das tubagens no sistema de confinamento são locais críticos. Devem ser realizados de acordo com os desenhos de projecto. Na Figura 10, apresenta-se um exemplo de uma ligação entre a tubagem e a GM no talude.

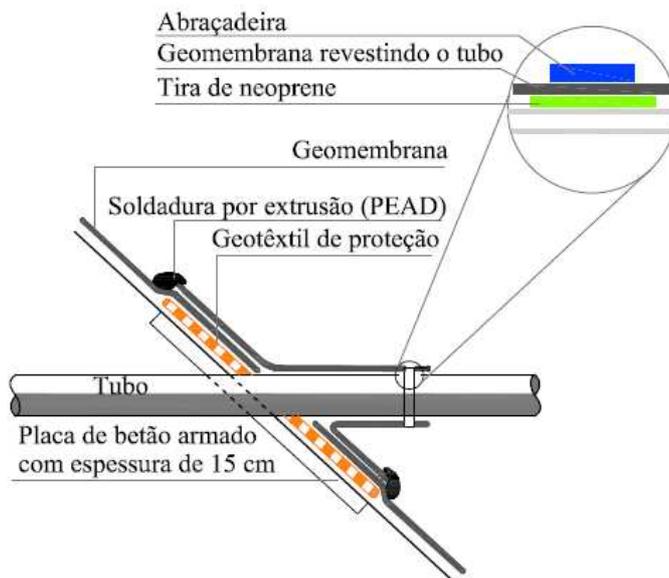


Figura 10 – Exemplo de ligação tubo/GM no talude (Vertematti, 2004)

Importante, também, providenciar as medidas adequadas para evitar o levantamento e deslocação dos geossintéticos, por acção do vento, o que pode causar acidentes pessoais, bem como rasgar os materiais. É necessário promover o carregamento provisório dos rolos recentemente colocados, até que se proceda à sua união e a ancoragem definitiva na vala. Qualquer tipo de carregamento provisório é aceitável, desde que não danifique os geossintéticos. Geralmente, utilizam-se sacos de areia (Figura 11), ou pneus, espaçados convenientemente e com peso tal que possam resistir ao esforço de levantamento provocado pelo vento.



Figura 11 – Exemplo carregamento provisório com sacos de areia

De extrema importância são também a colocação da camada de drenagem (Figura 12) e das primeiras camadas de resíduos. Deve providenciar-se para que os equipamentos necessários ao espalhamento apresentem peso e características compatíveis com a protecção, por forma a evitar danos desnecessários nos geossintéticos. Neste âmbito, a circulação de equipamentos sobre a GM desprotegida deve ser proibida. Salienta-se que diversos estudos realizados, no domínio dos danos em GMs, mostram que a maioria dos orifícios ocorre durante a colocação da camada de drenagem. Refira-se, a título de exemplo, os resultados do estudo relatado por Nosko & Touze-Foltz (2000), com base em sistemas de detecção de fugas instalados em mais de 300 obras, em 16 países, correspondendo a uma área total de GM instalada de 325 hectares.

Segundo este estudo, os materiais da camada de drenagem foram responsáveis por 71% dos orifícios (punção por pedras angulosas, inaceitáveis dimensões das partículas constituintes da camada drenante, ou deficiente dimensionamento do GTX de protecção).



Figura 12 – Colocação da camada de drenagem na base de um aterro

Por último, mas não menos importante, destacam-se as uniões entre rolos adjacentes do mesmo tipo de geossintéticos.

Uniões entre painéis de GM (soldaduras ou juntas)

No caso das GMs de polietileno (alta e baixa densidade), as soldaduras realizam-se geralmente por termofusão (dupla) ou por extrusão. A primeira consiste na união das GMs superior e inferior por aquecimento, através de uma cunha metálica quente ou por insuflação de ar quente, com auxílio de uma pressão mecânica de rolos compressores sobre as GMs aquecidas (Figura 13). A soldadura por extrusão (Figura 14) consiste na deposição de material (obtido por extrusão de um cordão do mesmo polímero da GM), a temperatura elevada, na borda do painel da GM superior.

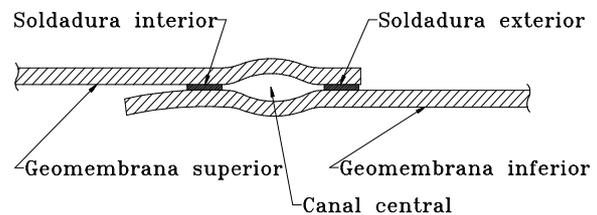


Figura 13 – Soldadura dupla por termofusão

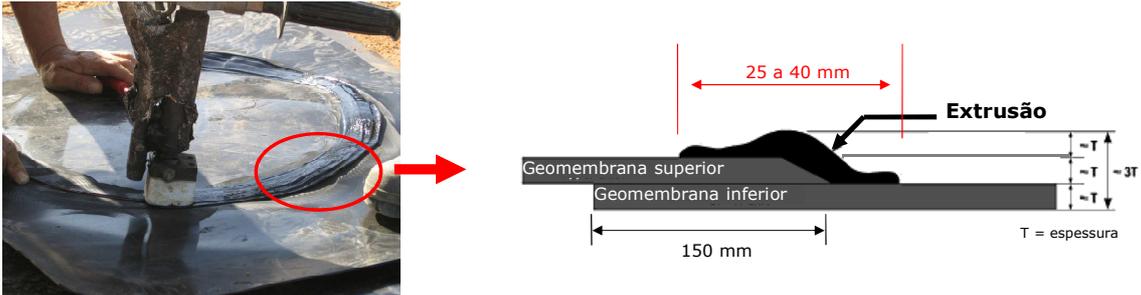


Figura 14 – Soldadura por extrusão

Qualquer que seja o método de união, as soldaduras devem ser estanques e apresentar resistência mecânica da mesma ordem de grandeza da GM propriamente dita. A qualidade das soldaduras deve, por isso, ser verificada em termos de continuidade (estanqueidade) e de resistência mecânica e os critérios de aceitação/rejeição das soldaduras devem ser incluídos no projecto.

Estanqueidade das soldaduras: ensaios não-destrutivos

No que se refere à estanqueidade das soldaduras, embora haja vários métodos para verificação da mesma e este seja ainda um assunto sob investigação, de um modo geral, realiza-se com base em ensaios não-destrutivos, nomeadamente, ensaios de pressão de ar, no caso das soldaduras duplas por termofusão, e ensaios de fio eléctrico, para as soldaduras por extrusão.

O ensaio de pressão de ar (Figura 15) consiste em injectar ar, com uma agulha, a uma determinada pressão, no canal central existente na soldadura dupla, após selagem das duas extremidades da junta, e verificar se o valor da pressão permanece estável, durante um determinado período de tempo. Se a pressão permanecer estável, faz-se um pequeno orifício na GM superior, no extremo oposto àquele em que se inseriu a agulha na soldadura, e verifica-se se o ar sai livremente por esse orifício ao mesmo tempo que a pressão desce no manómetro. Neste caso a junta é considerada estanque. Se ocorrer uma queda de pressão superior ao valor máximo admissível (Quadro 7), a soldadura não é estanque e deve ser reparada. Estes ensaios podem realizar-se com base na norma ASTM D 5820 (ou equivalente).



Figura 15 – Ensaio de pressão de ar

Quadro 7 – Gama de pressões para geomembranas de PEAD lisas e texturadas (baseado em Recomendações IGS-Brasil: IGSR GM 01, 2003)

Espessura da GM (mm)	Pressão mínima (kPa)	Pressão máxima (kPa)	Queda máxima de pressão admissível (5 minutos) (kPa)
1,0	165	205	28
1,5	185	240	21
2,0	205	240	14
2,5	205	240	14

No caso do ensaio do fio de cobre (Figura 16), é necessário introduzir um fio de cobre na zona de sobreposição das GMs superior e inferior durante a realização da soldadura. As duas extremidades do fio de cobre são depois retiradas da área de soldadura para serem sujeitas a uma corrente eléctrica (15 a 30 kV). Seguidamente, faz-se mover uma sonda (ligada a um voltímetro), ao longo de todo o comprimento da soldadura. Se houver a emissão de um som agudo e/ou de uma faísca ou se mostrador do voltímetro registar um aumento brusco do sinal, significa que a soldadura pode estar defeituosa e necessita ser reparada. Deve ter-se em atenção que os resultados podem ser afectados pela existência de humidade na superfície inferior da GM.



Figura 16 – Ensaio do fio de cobre

Resistência das soldaduras: ensaios destrutivos

Relativamente à verificação da resistência mecânica das soldaduras, realizam-se ensaios destrutivos, designadamente, ensaios de arranque (*peel test*) e corte (*shear test*). No primeiro, procura-se avaliar a resistência da soldadura (Peggs & Little, 1985), enquanto, no segundo, se pretende avaliar de que forma o processo de soldadura afecta a resistência da GM adjacente à soldadura (Peggs, 1990).

Os ensaios de arranque e corte são geralmente realizados de acordo com a norma ASTM D 6392, actualmente recomendada pelo *Geosynthetic Research Institute* (GRI), uma vez que a inclui a análise dos tipos de rotura para ambos os ensaios, quer para as soldaduras por termofusão dupla, quer para as soldaduras por extrusão.

O princípio de ensaio consiste em traccionar os provetes, a uma determinada velocidade (dependente do tipo de GM), da forma indicada na Figura 17 (a) e (b), respectivamente para o ensaio de arranque e de corte.

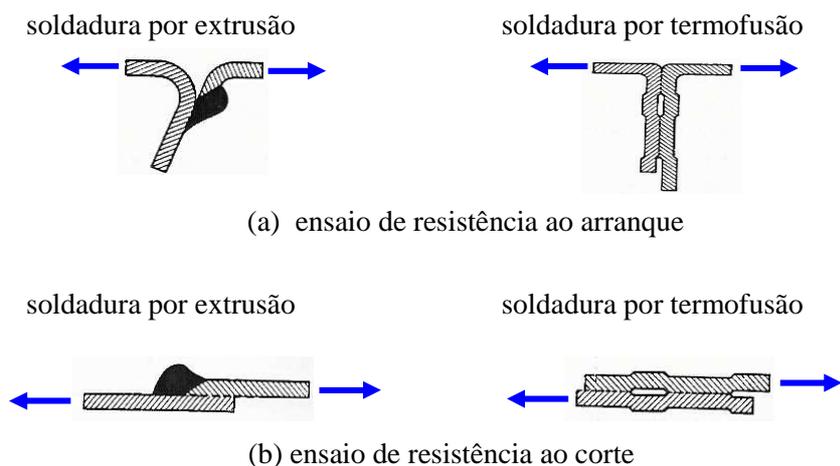


Figura 17 – Ensaios de resistência ao arranque e ao corte de soldaduras (Lopes, 2006a)

Para as GMs de PEAD, os ensaios são realizados com uma velocidade de 50 mm/minuto e com uma distância inicial entre garras de 50 mm (25 mm para cada um dos lados medidos a partir da soldadura). O ensaio de arranque termina quando ocorre a ruptura do provete, enquanto o ensaio de corte termina quando o provete atinge uma extensão de 50%.

O registo dos resultados dos ensaios inclui os seguintes aspectos:

(i) Ensaio de arranque

- resistência ao arranque (força na ruptura por unidade de largura) de cada provete de uma série de cinco e o correspondente valor médio;
- separação (proporção da área da soldadura separada relativamente à área original da soldadura);
- tipo de ruptura de cada provete de acordo com o indicado no Quadro 8.

(i) Ensaio de corte

- resistência ao corte (força máxima por unidade de largura) de cada provete de uma série de cinco e o correspondente valor médio;
- extensão;
- tipo de ruptura de cada provete de acordo com o indicado no Quadro 8.

Quadro 8 – Tipo de ruptura das soldaduras por termofusão e por extrusão (baseado na norma ASTM D 6392)

Tipo de soldadura	Tipo de ruptura						
termofusão							
extrusão							

* Aplicável apenas no ensaio de corte; ** Aplicável apenas no ensaio de arranque.

Critérios de aceitação/rejeição das soldaduras

Têm sido desenvolvidos vários critérios de aceitação/rejeição para as soldaduras de GM. Neste trabalho apresentam-se os critérios desenvolvidos pelo GRI-GM19 (2002), os quais se baseiam na análise dos resultados dos ensaios de resistência ao corte e ao arranque realizados segundo norma ASTM D 6392, propondo, nomeadamente, nos seguintes valores:

(i) Ensaio de arranque

- resistência ao arranque: 4 de 5 provetes devem apresentar valores iguais ou superiores aos valores correspondentes a 72 % e a 62% da tensão de cedência da GM, respectivamente, para as soldaduras por termofusão e por extrusão; 1 provete deve apresentar um valor igual ou superior a 80% do valor obtido nos outros 4 provetes;
- separação (proporção da área da soldadura separada relativamente à área original da soldadura) $\leq 25\%$;
- tipos de rotura inadmissíveis:
 - AD e AD-BRK no caso de a separação ser superior a 25%, para as soldaduras por termofusão,
 - AD1 e AD2; AD-WLD1 & AD-WLD2 (excepto se satisfizerem o valor da resistência), para as soldaduras por extrusão.

De referir que, para soldaduras por termofusão duplas, o ensaio de arranque deve realizar-se sobre ambas as partes da soldadura.

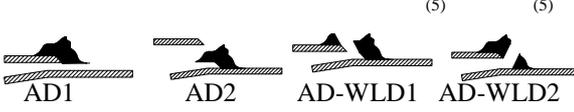
(ii) Ensaio de corte

- resistência ao corte: 4 de 5 provetes devem apresentar valores iguais ou superiores ao valor correspondente a 95% da tensão de cedência da geomembrana; 1 provete deve apresentar um valor igual ou superior a 80% do valor obtido nos outros 4 provetes;
- extensão correspondente à resistência ao corte $\geq 50\%$;
- tipos de rotura inadmissíveis:
 - AD e AD-BRK no caso de a separação ser superior a 25%, para as soldaduras por termofusão,
 - AD1 e AD2; AD-WLD1 e AD-WLD2 (excepto se satisfizerem o valor da resistência), para as soldaduras por extrusão.

Para GM de PEAD com 2 mm de espessura (usualmente aplicadas nos sistemas de confinamento da base e dos taludes em Portugal), o GRI-GM 19 (2002) preconiza os valores mínimos indicados no Quadro 9.

Verifica-se, pois, que a questão da qualidade das soldaduras é da maior relevância, devendo o projecto indicar claramente quais os ensaios a realizar para evidenciar a qualidade e a correspondente frequência, tanto do ponto de vista da estanqueidade, como da resistência mecânica. Deve igualmente definir os critérios de aceitação/rejeição das soldaduras.

Quadro 9 – Critérios de aceitação/rejeição recomendados pelo GRI-GM 19 (2002) para soldaduras de geomembranas de PEAD com 2 mm de espessura (Barroso & Lopes, 2008)

Soldadura	Ensaio	Aspecto	Critérios de aceitação/rejeição para soldaduras de geomembranas de PEAD com 2 mm de espessura
 Termofusão	arranque	resistência ao arranque	4 provetes com resistência ao arranque $\geq 21,2 \text{ N/m}^{(1)}$ e 1 provete com resistência ao arranque $\geq 17,0 \text{ kN/m}$
		separação	$\leq 25\%$
		tipos de rotura inadmissíveis	 AD AD - BRK ⁽²⁾
	corte	resistência ao corte	4 provetes com resistência ao corte $\geq 28,1 \text{ kN/m}^{(3)}$ e 1 provete com resistência ao corte $\geq 22,5 \text{ kN/m}$
		extensão	$\geq 50\%$
		tipos de rotura inadmissíveis	 AD AD - BRK ⁽²⁾
 Extrusão	arranque	resistência ao arranque	5 provetes com resistência ao arranque $\geq 18,2 \text{ kN/m}^{(4)}$ e 1 provete com resistência ao arranque $\geq 14,6 \text{ kN/m}$
		separação	$\leq 25\%$
		tipos de rotura inadmissíveis	 AD1 AD2 AD-WLD1 AD-WLD2 ⁽⁵⁾ ⁽⁵⁾
	corte	resistência ao corte	4 provetes com resistência ao corte $\geq 28,1 \text{ kN/m}^{(3)}$ e 1 provete com resistência ao corte $\geq 22,5 \text{ kN/m}$
		extensão	$\geq 50\%$
		tipos de rotura inadmissíveis	 AD1 AD2 AD-WLD1 AD-WLD2 ⁽⁵⁾ ⁽⁵⁾

⁽¹⁾ desde que corresponda a 72% da tensão de cedência da GM.

⁽²⁾ AD-BRK > 25% inadmissível.

⁽³⁾ desde que corresponda a 95% da tensão de cedência da GM.

⁽⁴⁾ desde que corresponda a 62% da tensão de cedência da GM.

⁽⁵⁾ roturas inadmissíveis, excepto se os valores da resistência forem satisfatórios.

Uniões de outros geossintéticos

Para as GCLs, quando constituídas por uma camada de argila bentonítica e por GTXs, a união é normalmente efectuada por sobreposição. No caso das GCLs constituídas por uma camada de argila bentonítica e GM(s), a união pode também realizar-se mediante termofusão. De referir que, em alguns tipos de GCLs, é, por vezes, preconizada a adição de bentonite na zona de sobreposição. O tipo e a quantidade de bentonite devem ser indicados pelo produtor.

No que se refere aos GTXs, a união entre painéis pode ser efectuada por costura, soldadura a quente ou somente por sobreposição, consoante a função que desempenham.

Relativamente aos geocompósitos de drenagem, a união entre painéis pode ser efectuada por sobreposição da parte do dreno e da parte do filtro (Figura 18). Normalmente, as sobreposições

no sentido do fluxo são duas vezes superiores às sobreposições na direcção perpendicular ao fluxo.



Figura 18 – Exemplo de união de rolos de geocompósito drenante

De referir, por último, que, nos taludes com inclinações superiores a 1(V):5(H), independentemente do tipo de geossintético, as juntas devem ser orientadas paralelamente à linha de maior declive, não devendo ser permitidas juntas horizontais a não ser em pequenas reparações.

3.4 Garantia de Qualidade de Instalação dos Geossintéticos

A Garantia de Qualidade da Instalação dos Geossintéticos (GQIG) é da maior importância, sobretudo, para os aterros de resíduos, pois a deficiente instalação destes materiais, nestas obras, pode pôr em risco, não só o confinamento dos resíduos, como induzir a fuga de lixiviados ou biogás, com as repercussões ambientais (contaminação do ar, do solo, das águas superficiais e subterrâneas) que se conhecem.

No âmbito da garantia de qualidade, é usual elaborar-se um plano de GQIG, onde se indica o conjunto de actividades a empreender com o objectivo de assegurar e documentar que os geossintéticos e técnicas construtivas empregues pelo instalador de geossintéticos, cumprem as condições estabelecidas no projecto e as regras de boa prática. O plano de GQIG deve incluir os vários intervenientes na construção (dono de obra, projectista, empreiteiro, fiscalização, fornecedor e/ou instalador de geossintéticos, entidade independente, etc.), bem como o tipo de auditorias, fiscalizações e avaliações dos materiais e actividades necessárias para garantir a qualidade da instalação dos geossintéticos (Lopes & Barroso, 2007).

Para garantir a qualidade da instalação dos geossintéticos deve realizar-se um conjunto de actividades, a empreender por uma entidade independente incumbida dessa garantia, entre as quais se destacam as seguintes (Barroso & Lopes, 2008):

- Verificação dos procedimentos de recepção e aceitação dos geossintéticos (análise da conformidade e realização de ensaios de verificação da conformidade,
- Verificação dos procedimentos de transporte, manuseamento e armazenamento dos geossintéticos;
- Verificação dos procedimentos de instalação dos geossintéticos e eventual reparação dos mesmos após colocação;

- Realização de observações/inspecções para avaliar a qualidade da instalação dos geossintéticos;
- Realização e/ou verificação dos resultados dos ensaios não-destrutivos realizados pelo instalador, para verificação da estanqueidade das juntas, nomeadamente ensaios de pressão de ar sobre as soldaduras por termofusão e ensaios de vácuo e/ou fio de cobre, sobre as soldaduras por extrusão;
- Realização de ensaios destrutivos (corte e arranque), segundo a frequência especificada no projecto;
- Realização de ensaios de verificação da integridade da GM (ensaios de detecção de fugas).

No que se refere à última actividade, deve salientar-se que não é actualmente obrigatória em Portugal, apesar da sua inquestionável importância, para avaliar a integridade da GM, especialmente após a colocação da camada de drenagem. Recorda-se que é durante a colocação desta camada que ocorre a maior percentagem de orifícios na GM.

Os ensaios de detecção de fugas mais utilizados baseiam-se em métodos os eléctricos, destacando-se neste trabalho os seguintes: ensaio com sistema fixo de detecção e localização de orifícios (*grid method*), ensaio da geomembrana condutora (*electrically conductive geomembrane method*) e ensaio da sonda eléctrica móvel (*water and soil covered geomembrane method*).

Para o ensaio com sistema fixo de detecção e localização de orifícios, antes da colocação da GM, é necessária a colocação no solo, a pequena profundidade, de uma rede de sensores, segundo uma quadrícula pré-definida. Cada sensor é ligado através de um cabo eléctrico a um aparelho de aquisição de dados, situado na proximidade da obra (Figura 19).

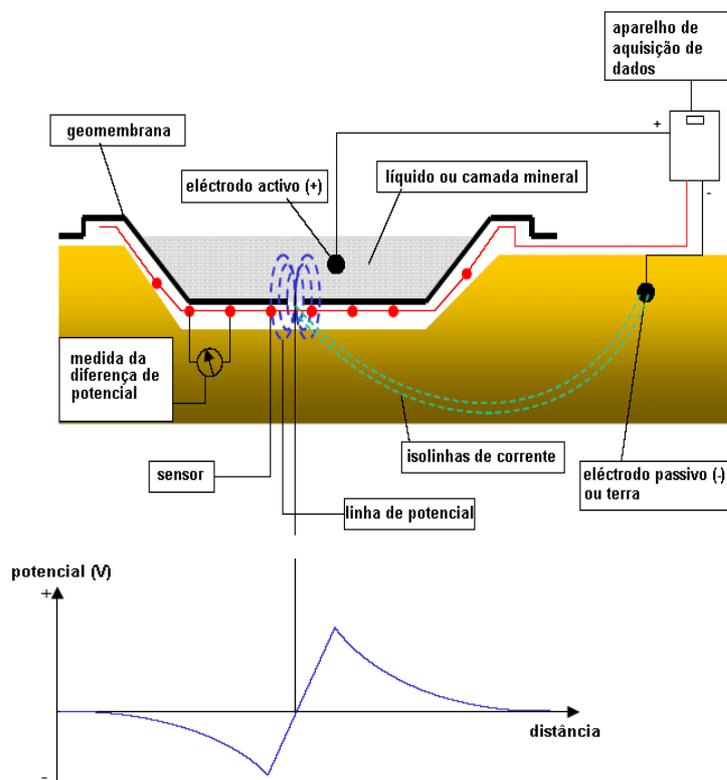


Figura 19 – Esquema do ensaio com sistema fixo de detecção e localização de orifícios (Comité Français des Géosynthétiques, 2003)

Depois da colocação da GM (ou também da camada de protecção e camada drenante) instala-se um gerador de corrente eléctrica ao qual se ligam dois eléctrodos, um colocado acima da GM e outro (o eléctrodo terra) colocado no solo de fundação. Quando uma corrente eléctrica é aplicada, a densidade de corrente sob a GM pode ser medida pelos diferentes sensores. Qualquer perfuração da GM provoca uma anomalia na distribuição da densidade da corrente eléctrica. Através de um *software* específico podem localizar-se os orifícios da GM com bastante precisão. Este método permite localizar orifícios com uma precisão correspondente a 15% do espaçamento entre dois sensores, que varia normalmente entre 0,5 a 1m. A área máxima de ensaio não deve ser superior a 10 000m² (compreendendo em média entre 130 a 200 sensores), sendo necessário entre 5 e 12 minutos para se efectuarem as leituras, após calibração do equipamento. Este ensaio pode ser realizado em geomembranas não condutoras, cobertas ou não, desde que os materiais em contacto com as suas superfícies inferior e superior sejam condutores e o mais homogêneos possível.

Para o ensaio da GM condutora é necessário utilizar uma GM com uma camada inferior coextrudada condutora fina (com cerca de 0,1mm). Essa camada consegue ser electricamente condutora por possuir um elevado teor em negro de carbono. Começa-se por carregar uma placa condutora de neoprene, colocada na superfície superior da GM, com uma tensão entre 15 a 30 kV. A carga é transferida para a camada condutora da GM através do efeito capacitivo. De seguida, com a ajuda de uma vassoura eléctrica faz-se a prospecção da superfície superior não condutora da GM. Quando existe um orifício estabelece-se uma corrente, gerando uma faísca e/ou um sinal sonoro (Figura 20). A velocidade de prospecção é da ordem dos 6000-8000 m²/dia/aparelho/equipa de dois operadores, podendo detectar-se orifícios da ordem do milímetro.

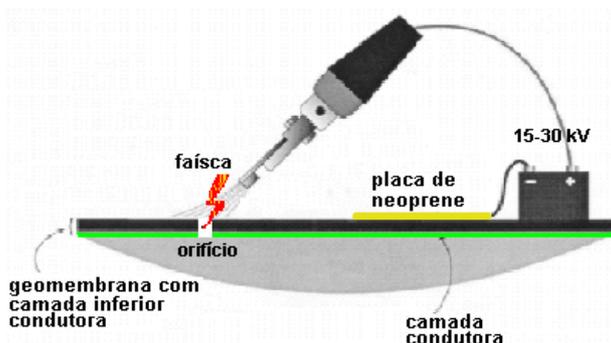


Figura 20 – Esquema do ensaio da geomembrana condutora (adaptado de ASTM D 6747 por Lopes, 2006a)

Este ensaio pode ser realizado em geomembranas não cobertas ou cobertas, desde que a sua superfície superior esteja seca. É desaconselhada a sua utilização em dias de chuva.

No ensaio da sonda eléctrica móvel utilizam-se dois eléctrodos, um colocado no solo de suporte e outro colocado no material que cobre a superfície superior da GM, de modo a estabelecer-se uma diferença de potencial entre o solo exterior e o meio interno. Os dois eléctrodos são ligados a um gerador de corrente contínua (Figura 21). Com a ajuda de uma sonda eléctrica móvel, efectuam-se medidas de potencial eléctrico, segundo uma densidade pré-determinada. Uma mudança de sinal nos valores medidos pode indicar a existência de um orifício. Como o campo de potencial diminui à medida que a sonda se afasta do eléctrodo, se tal não acontecer e se pelo contrário se verificar um aumento do potencial, significa que a sonda está na proximidade de um orifício. O potencial é máximo quando a sonda se encontrar mesmo por cima do orifício. Quando o orifício se encontrar equidistante dos eléctrodos, nenhum gradiente de potencial será detectado (Phaneuf & Peggs, 2001).

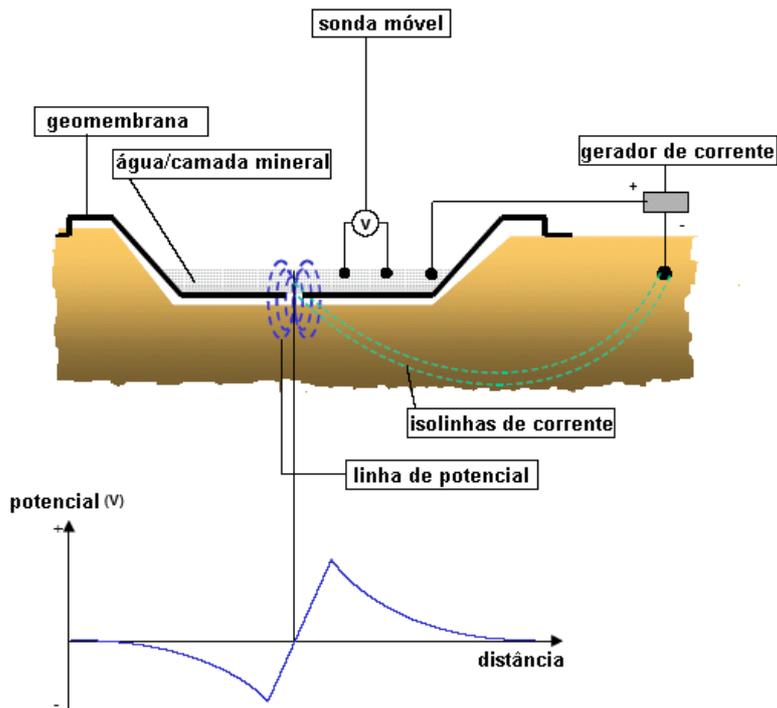


Figura 21 – Esquema do ensaio da sonda eléctrica móvel (Comité Français des Géosynthétiques, 2003)

Este ensaio pode ser realizado em geomembranas não condutoras cobertas, desde que os materiais em contacto com as suas superfícies inferior e superior sejam condutores. A existência, por exemplo, de uma argila muito seca, ou de uma geogrelha pode comprometer as medições. No caso da GM estar coberta com água, a altura desta deve estar compreendida entre 0,1 e 1 m. Uma altura de água superior pode dificultar a mobilidade do operador. Depois da colocação e calibração do aparelho de aquisição de dados, o tempo de leitura é imediato e a interpretação dos resultados é de cerca de 10 minutos. A velocidade de prospecção depende do tipo de material que cobre a GM, da geometria do local e das condições meteorológicas, variando entre 150 a 250 m²/hora/operador.

As vantagens associadas à implementação da garantia de qualidade, em aterros de resíduos, são evidenciadas pela análise da densidade dos danos na GM (número de orifícios por unidade de área). De acordo com vários estudos, a densidade dos danos na GM é inferior nos aterros de resíduos em que foram adoptados de planos de GQIG. A título de exemplo, refira-se um estudo realizado por Forget *et al.* (2005), com base numa compilação de dados recolhidos ao longo de 10 anos, segundo o qual a densidade dos danos era de 0,5 orifícios/hectare, em aterros sujeitos a esses planos, e de 16 orifícios/hectare em aterros onde os mesmos não foram implementados.

Os benefícios da implementação de planos de GQIG podem também ser ilustrados pelo volume de lixiviado que atravessa o sistema de confinamento, ao longo do tempo, devido a orifícios na GM. Segundo um estudo realizado por Bonaparte & Gross (1990), em aterros com planos de GQIG implementados, foram medidos caudais inferiores a 200 l/ha/dia, enquanto em aterros de resíduos onde esses planos não foram implementados, o caudal aumentou para valores superiores a 1000 l/ha/dia. Também, num estudo conduzido pela USEPA, são indicados caudais médios, variando entre 10 e 1400 l/ha/dia durante o período inicial de operação, entre 0 e 370 l/ha/dia durante a operação do aterro e entre 5 e 210 l/ha/dia após o seu encerramento (Majdi *et al.*, 2002).

4. GEOSSINTÉTICOS EM LAGOAS E RESERVATÓRIOS

4.1 Âmbito de Utilização e Desafios Geoambientais

Em lagoas e reservatórios, o tipo de geossintético mais utilizado é a GM, embora os GTXs e os geocompósitos drenantes possam também atingir alguma expressão. Como é de prever, as GMs são sobretudo usadas para contenção/armazenamento de líquidos, desde água potável a efluentes resultantes de processos industriais. Os GTXs são, fundamentalmente, empregues sob as GMs, com o objectivo de prevenir o punçamento pelos materiais da camada subjacente. Os GTXs podem também ser usados para drenar águas sub-superficiais, sendo que esta função é geralmente assegurada pelos geocompósitos drenantes.

Pela sua preponderância, esta palestra debruça-se, sobretudo, sobre as GMs. Os principais desafios geoambientais que se colocam a este tipo de geossintéticos quando empregues em lagoas e reservatórios são os seguintes:

- Compatibilidade química com os líquidos que contêm e com os elementos que compõem o sistema;
- Estabilidade dos taludes;
- Efeito de sucção produzido pela acção do vento;
- Características geológico-geotécnicas dos terrenos subjacentes. Por exemplo, em zonas pantanosas, com solos ricos em matéria orgânica, podem acumular-se gases resultantes de fermentação e provocar um empolamento da GM;
- Características geomorfológicas da zona envolvente. Por exemplo, reservatórios localizados em vales encaixados, de difícil acesso, podem dificultar a instalação dos geossintéticos;
- Características da camada de apoio;
- Durabilidade.

A secção seguinte procura ilustrar de que forma a engenharia lida com estes desafios.

4.2 Aspectos Relevantes do Dimensionamento

Os principais aspectos a levar em consideração no dimensionamento das GMs para aplicações em lagoas e reservatórios são (Alonso Franco, 2005): a acção do vento; a acção punçante dos solos de fundação; a temperatura ambiente; acções da flora e da fauna; a acção dos raios UV; a acção das ondas; a acção do peso próprio dos geossintéticos (taludes); potenciais reacções químicas com os líquidos contidos; potenciais deslizamentos.

A **acção do vento** sobre as GMs é particularmente importante durante a fase de instalação (Figura 22), embora possa ser também considerável durante a fase de exploração. O vento pode originar acções de sucção suficientes para provocar o rasgamento, ou mesmo arrancamento da GM, como aconteceu numa lagoa localizada na Ilha da Madeira (Lagoa do Santo da Serra). Para evitar estes problemas, as GMs podem ser ancoradas a várias cotas, nomeadamente, na crista do talude, na zona intermédia do talude, no pé do talude e no fundo da lagoa/reservatório.



Figura 22 – Exemplos de danos na geomembrana por acção do vento

As ancoragens podem realizar-se, por exemplo, através de blocos de betão, colocados sobre uma faixa de GM simplesmente apoiada e posteriormente carregada (lastro), tal como esquematizado na Figura 23, ou através de valas de ancoragem (Figura 24). Qualquer das soluções carece de dimensionamento, o qual pode ser realizado, por exemplo, de acordo com o método apresentado em Koerner (1998).

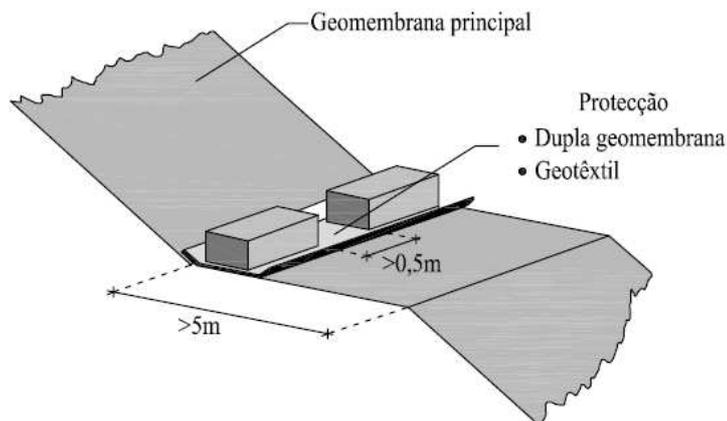


Figura 23 – Exemplo de ancoragem na banquetta intermédia (adaptado de Garcia Gironés & Donoso Sanz, 2010)

Neste âmbito, o Comité Nacional Español de Grandes Presas (2010) recomenda:

- Vala de ancoragem na crista do talude: secção mínima de 0,4m×0,4m, situada a uma distância superior a 0,5m da crista do talude (ver Figura 24); os geossintéticos deverão acompanhar a geometria da vala; o material de enchimento deve ter uma massa superior a 150kg/metro;
- Valas de ancoragens intermédias no talude (recomendáveis quando a inclinação e a altura do talude são elevadas e quando os ventos são fortes): a primeira ancoragem deve instalar-se a 4m da crista do talude; a segunda a 6m da anterior e as seguintes espaçadas de 10m;
- Vala de ancoragem no pé do talude: secção mínima de 0,4m×0,4m; o material de enchimento deve ter uma massa superior a 150kg/metro; segundo Ruiz Caballero (2005) deve situar-se a uma distância superior a 0,5 m do pé do talude;
- Vala de ancoragem no fundo: dimensões a especificar no projecto; salienta-se que, segundo Ruiz Caballero (2005), no caso de grandes superfícies impermeabilizadas, devem realizar-se ancoragens no fundo sempre que não seja possível garantir uma altura mínima de 0,2m de água sobre a GM.

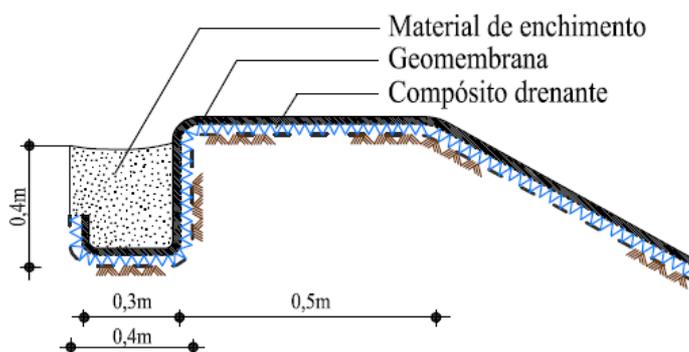


Figura 24 – Dimensões mínimas da vala de ancoragem localizada na crista do talude (Comité Nacional Español de Grandes Presas, 2010)

De salientar, também, a **acção punçante dos solos de fundação**, a qual constitui uma das maiores causas de danos na GM, tal como evidenciado no inventário realizado por Poulain *et al.* (2011). Estes autores analisaram as principais patologias associadas às lagoas e reservatórios de montanha (obras localizadas a altitudes elevadas, onde as solicitações provocadas pela neve e gelo assumem especial importância), tendo verificado que características contundentes do solo de fundação influenciaram fortemente a estanqueidade do sistema de confinamento. As fugas através das GMs ocorriam, na maioria dos casos, em obras em que os solos de fundação eram constituídos por materiais granulares, mesmo quando sob a GM existia um GTX para protecção da mesma contra o punçamento.

Com base na informação recolhida, Poulain *et al.* (2011) elaboraram um conjunto de recomendações gerais para o dimensionamento de lagoas/reservatórios de montanha, incluindo o sistema de confinamento. Considera-se que as recomendações apresentadas por estes autores, de um modo geral, são úteis para concepção do sistema de confinamento de lagoa/reservatórios, destacando-se, neste trabalho, somente os aspectos mais relevantes.

O sistema de confinamento deve ser capaz de proporcionar simultaneamente (Poulain *et al.*, 2011): (1) resistência mecânica (fundo e taludes); (2) protecção da GM contra o punçamento (fases de instalação e operação); (3) drenagem da água sub-superficial e de gases; (4) filtragem para evitar a migração de finos e a colmatagem dos materiais de drenagem.

Para cumprir os requisitos mencionados, o sistema de confinamento pode incluir várias camadas sob a GM, como por exemplo, da base para o topo, as seguintes (Poulain *et al.*, 2011):

- Camada de solo (camada de apoio) colocada sobre o terreno natural, isenta de fragmentos rochosos ou materiais contundentes; se necessário, pode ser estabilizada com cimento ou betão projectado;
- Geotêxtil com função de filtro;
- Georrede, ou camada de solo granular (areia grosseira com 5/20 mm de diâmetro), para promover a drenagem da água sub-superficial e de gases;
- Geotêxtil de protecção da geomembrana.

Sublinha-se que as três últimas camadas podem ser combinados num único produto, nomeadamente, num geocompósito drenante.

O sistema de drenagem é frequentemente concebido levando em consideração sobretudo a drenagem das águas sub-superficiais. Porém, nos locais onde o nível freático se encontra muito próximo da cota de fundação, ou em que os terrenos subjacentes são ricos em matéria orgânica,

pode ocorrer acumulação de gás sob a GM, levando ao empolamento da mesma, tal como ilustrado na Figura 25. A acumulação de gás pode resultar das oscilações sazonais no nível freático, que, no seu movimento, empurram o gás presente nos vazios do solo em direcção à GM, a qual o impede de sair, ou resultar da biodegradação da matéria orgânica.



Figura 25 – Exemplo de empolamento em geomembranas

Salienta-se, por último, o importante papel de monitorização que o sistema de drenagem sub-superficial desempenha em simultâneo, na medida em que serve de detecção de fugas na GM. Neste âmbito, é importante que este sistema seja sectorizado, por forma a permitir identificar com facilidade o sector da lagoa/reservatório onde a GM se encontra danificada.

A **temperatura ambiente** também pode levar a GM a esforços adicionais devidos à contracção/expansão, tanto ao nível das ancoragens, como ao nível das ligações, por exemplo, a tubos. Assim, no dimensionamento da GM, devem estimar-se as temperaturas máximas e mínimas (diárias e sazonais), bem como as deformações a que as mesmas podem estar sujeitas.

A deformação de um painel/rolo de GM devido à variação térmica (ΔL) pode ser expressa pela seguinte expressão (Vertematti, 2004):

$$\Delta L = \mu \times L \times \Delta T \quad [1]$$

Onde:

μ = coeficiente linear de expansão térmica (para o PEAD, varia entre 11×10^{-5} e $13 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ \text{C}^{-1}$)

L = comprimento do painel/rolo (m);

ΔT = variação da temperatura ($^\circ \text{C}$).

Salienta-se que, para efeitos de cálculo, deve considerar-se a temperatura da GM e não a temperatura ambiente, visto que a primeira atinge valores muito superiores.

De destacar, ainda, as **acções da flora e da fauna**. Embora se possam aplicar herbicidas na zona onde serão instalados os geossintéticos, a verdade é que a vegetação pode provocar danos significativos, tal como pode ver-se na Figura 26. No que se refere à GM, preconiza-se a realização de ensaios de resistência à perfuração pelas raízes que comprovem a sua adequabilidade às condições de serviço.



Figura 26 – Exemplo de dano na geomembrana devido à vegetação (Comité Nacional Español de Grandes Presas, 2010)

Ainda que os geossintéticos não constituam um alimento para os animais, é possível que, especialmente os roedores, procurem abrir caminho através dos mesmos, para assegurar a sua sobrevivência. Também é possível que procurem saciar a sede em reservatórios de água, não só as aves, como animais terrestres. Estes últimos, como as GMs são lisas e escorregadias, podem não conseguir subir os taludes, acabando por morrer. Na luta pela sobrevivência, provocam, muitas vezes, danos no sistema de confinamento. Para evitar este tipo de problemas, podem deixar-se escadas móveis ou cordas nos taludes, que ajudem a progressão dos animais. Em todo o caso, para evitar o acesso dos animais é recomendável vedar as lagoas e os reservatórios.

O ataque por microorganismos é também possível, pelo que as GMs devem apresentar uma adequada resistência aos microorganismos. Salienta-se que as GMs podem incorporar aditivos, nomeadamente, biocidas e fungicidas, que podem migrar para a água, por exemplo, por difusão, com consequências tanto para a GM, que pode ficar desprotegida, como para qualidade da água.

De acordo com o atrás exposto, para aplicações em lagoas/reservatórios, as GMs devem cumprir, entre outros, os seguintes requisitos: resistência mecânica suficiente para suportar as tensões de ancoragem, bem como as solicitações ao vento; resistência ao punçoamento, para resistir ao material anguloso do solo de fundação; resistência às condições climáticas. Devem, igualmente, providenciar soldaduras resistentes e apresentar facilidade de instalação e de reparação.

As GMs mais utilizadas em lagoas e reservatórios têm sido as de PVC-P (cloreto de polivinilo plastificada), PEAD, PP e EDPM. No Quadro 10 apresentam-se as principais características destes tipos de GMs, de acordo com os requisitos atrás mencionados.

Quadro 10 – Principais características das GMs tipicamente usadas em lagoas e reservatório (adaptado de Comité Nacional Español de Grandes Presas, 2010)

Propriedade	Geomembranas			
	PVC-P	PEAD	PP	EDPM
Resistência à tracção	++	++++	+++	++
Resistência ao rasgamento	++	++++	++++	+
Resistência ao punçoamento: dinâmico/estático	+++/>+++	++++/>+	+++/>+++	+/>++++
Resistência aos UV	++	++++	+++	++++
Resistência ao ozono	++++	++++	++++	+++
Resistência das soldaduras: corte/arranque	++++/>+++	+++/>++++	++/>+++	+/>+
Facilidade de instalação	++++	++++	+++	+++
Reparação	++++	++++	++	+

Grau de desempenho: ++++ muito bom, +++ bom, ++suficiente, + sofrível

4.3 Aspectos Relevantes da Construção

Os aspectos mais relevantes associados aos geossintéticos, na construção de lagoas e reservatórios são, de um modo geral, os mesmos que os indicados para os aterros de resíduos, nomeadamente, no que se refere às operações de transporte, manuseamento, armazenamento e de preparação da camada de apoio (ver Secção 3.3). Os cuidados com as ancoragens assumem maior relevância, neste tipo de obras, sobretudo, devido à acção do vento.

Igualmente importantes são as questões relacionadas com a execução das soldaduras. Por exemplo, as soldaduras de GMs de PVC, ou de CSPE, podem também ser realizadas por colagem (união entre painéis mediante a incorporação de um adesivo na zona de sobreposição dos mesmos), ou processos químicos (união entre painéis mediante o “ataque” químico das superfícies, provocado por um solvente volátil que leva à união dos painéis de GM superior e inferior, com auxílio de uma pressão mecânica).

4.4 Garantia de Qualidade de Instalação dos Geossintéticos

As actividades de garantia de qualidade de instalação dos geossintéticos em lagoas e reservatórios são, em geral, semelhantes às descritas na secção 3.4, para os aterros de resíduos.

5. OS GEOSSINTÉTICOS EM MINAS

5.1. Âmbito de Utilização e Desafios Geoambientais

Os desafios geoambientais relacionados com a utilização dos geossintéticos em minas são entre outros:

- As minas, ao contrário de outras aplicações, incluindo os aterros de resíduos, ocupam uma área muito grande (tipicamente centenas de hectares);
- As minas, sobretudo as localizadas em climas nórdicos, têm em muitos casos falta de solos locais adequados, como sejam argilas, seixos, areia ou siltes;
- A maior parte das minas localiza-se em locais remotos e de difícil acesso, pelo que o transporte de materiais para construção se torna problemático e dispendioso;
- Por razões logísticas, a maior parte das minas situa-se em zonas de depressão ou no sopé de montanhas, onde existem fluxos elevados de água, pelo menos durante uma parte do ano;
- Comparativamente com outras aplicações, em minas, os geossintéticos podem estar sujeitos a sobrecargas muito elevadas (> 3,3 MPa), a cargas hidráulicas significativas (alturas do efluente líquido > 60 m) e ao ataque químico de soluções ácidas/básicas (ex.: soluções com 96% de H₂SO₄), combinado com o efeito de temperaturas que podem ascender a 70°C;
- Muitas minas localizam-se a mais de 3000 m de altura expondo os geossintéticos a altos níveis de radiação solar e a temperaturas extremas;
- O período de responsabilidade da obra é muito superior ao de outras aplicações, sobretudo no caso de se gerarem ácidos ou resíduos tóxicos;
- Contrariamente aos resíduos sólidos urbanos, em que são aplicadas taxas, possibilitando uma gestão mais sustentável, a gestão dos resíduos da exploração das minas, não gera dividendos, havendo poucos recursos para a manutenção, monitorização e inspecção, durante os períodos de encerramento e pós-encerramento.

Nas actividades mineiras, os geossintéticos mais usados (ver Quadro 1) são as GMs, as GCL, os geotubos e os GTXs. Estes materiais são utilizados principalmente em três aplicações distintas:

bacias/aterros de rejeitados (*tailings impoundments*) resultantes da exploração do minério; lagoas de evaporação (*evaporation (or solar) ponds*) para recuperação de sais; pilhas de lixiviação (*heap leaching*) utilizadas para extrair metais a partir do minério (Breitenbach e Smith, 2006).

Pela extensão e complexidade que envolvem, nos itens seguintes, serão explicados os desafios/problemas associados às pilhas de lixiviação (*heap leaching*). Quanto aos aterros/bacias de rejeitados e às lagoas de evaporação, pela similitude com os aterros de RSU e lagoas/reservatórios, os aspectos mais relevantes já foram referidos nos itens respectivos.

5.2 Pilhas de Lixiviação

No processo de extração de metais utilizando a lixiviação em pilhas, o minério, depois de reduzido a pequenas dimensões, é transportado para uma área previamente impermeabilizada com GM, sobre a qual foi colocado um sistema de geotubos (Figura 27). Os geotubos têm normalmente 10 a 15 cm de diâmetro e são espaçados cerca de 2 m.

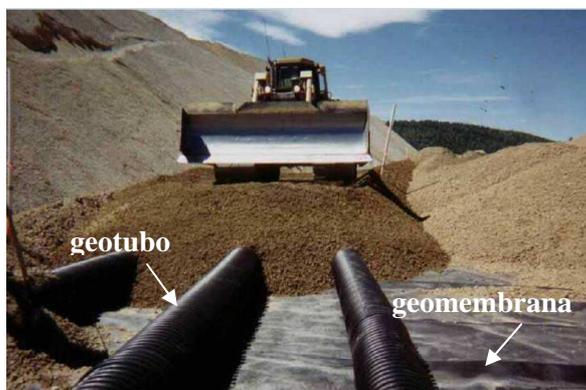


Figura 27 – Preparação do sistema de confinamento da pilha de lixiviação (Touze-Foltz *et al.*, 2008)

Muitas vezes, o minério é pré-tratado com uma solução (de ácido sulfúrico concentrado, no caso do cobre), antes de ser amontoado em pilhas. Sobre a superfície das pilhas de minério, através de um sistema de pulverização, é espalhada uma solução lixivante (no caso do cobre: ácido sulfúrico diluído a uma concentração de cerca de 2% e um pH de cerca de 2). À medida que a solução (ácida no caso do cobre e níquel e alcalina no caso do ouro e prata) percola através da pilha de minério, dissolve o metal, produzindo uma “solução fértil” (*pregnant solution*). Este processo pode levar várias semanas (30 a 120 dias ou mesmo mais). A “solução fértil” é depois recolhida e transportada pelo sistema de geotubos, para a instalação de recuperação do metal (por exemplo: o cobre é normalmente recuperado por electrólise).

5.2.1 Configurações das Pilhas de Lixiviação

As configurações das pilhas de lixiviação podem ser essencialmente de 4 tipos: “tradicional” “reutilizável”, “em vale” e “híbrida” (combinação das anteriores).

A configuração da pilha tradicional é recomendada em zonas relativamente planas e para diferentes tipos de minério e ciclos de lixiviação (Figura 28).

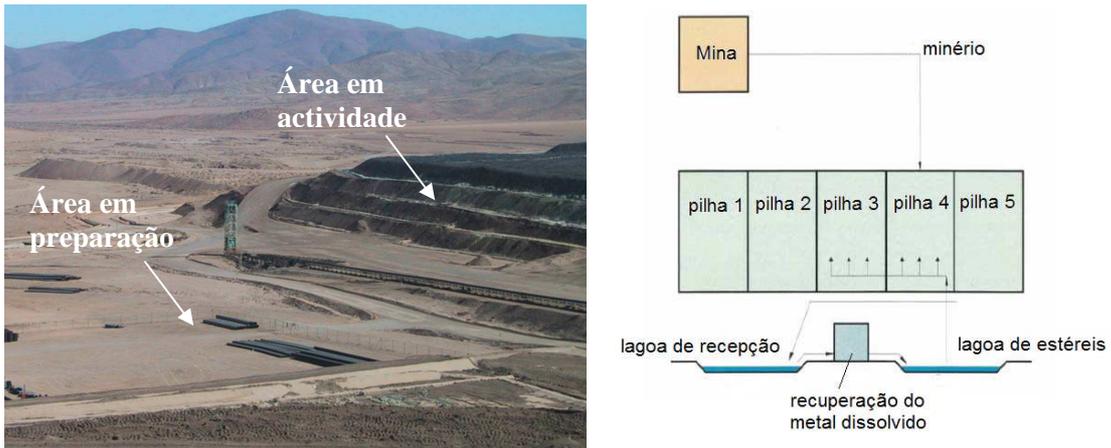


Figura 28 – Configuração da pilha tradicional (Thiel & Smith, 2004 e adaptado de Lupo, 2010)

Na configuração da pilha reutilizável, como o nome indica, as células são reutilizáveis para lixiviação de diferentes pilhas de minério, pelo que requer uma zona para deposição do refugo. Esta configuração é recomendada em locais onde as áreas planas são limitadas e para minérios com pequenos ciclos de lixiviação (Figura 29).

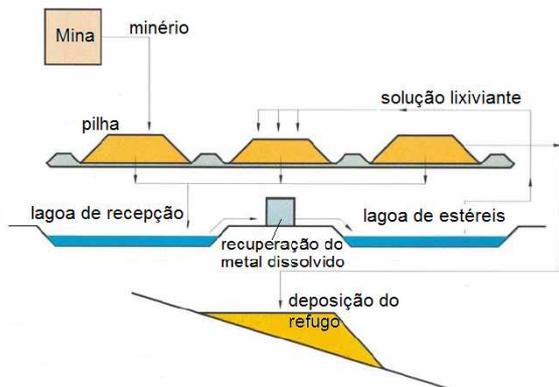


Figura 29 – Configuração da pilha reutilizável (adaptado de Lupo, 2010)

A configuração da pilha em vale é recomendada em terrenos íngremes (inclinações > 40%) e para minérios rijos, podendo suportar ciclos de lixiviação longos. Não requer a existência de uma lagoa de recepção, mas, em contrapartida, necessita da construção de uma estrutura de suporte para contenção da pilha. O sistema de impermeabilização tem de ser robusto para poder resistir a cargas hidráulicas elevadas (Figura 30).

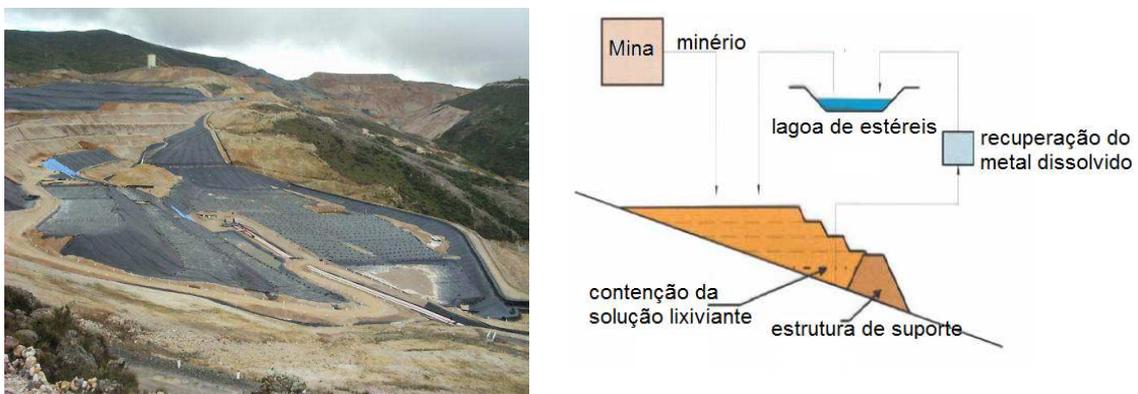


Figura 30 – Configuração da pilha em vale (Thiel & Smith, 2004 e adaptado de Lupo, 2010)

5.2.2 Constituição do Sistema de Confinamento

A constituição do sistema de confinamento das pilhas de lixiviação depende do tipo de configuração, das condições locais (topografia, clima e materiais disponíveis) e do tipo de minério. Existem duas variantes: utilização de uma só GM (sistema de confinamento de camada simples) ou de duas GMs (sistema de confinamento de dupla camada).

O sistema de confinamento de camada simples é normalmente constituído pelos seguintes elementos (Figura 31a): fundação, camada com solo de baixa permeabilidade, GM e por fim uma camada superior à GM, cuja constituição, dependendo do tipo de minério e processo de lixiviação utilizado, poderá ser constituída, alternativamente, por: (i) uma camada permeável de drenagem (onde pode ou não ser incorporado o sistema de geotubos de colecta e transporte da “solução fértil”); (ii) por uma camada de protecção com solo de baixa permeabilidade compactado, seguida de uma camada permeável de drenagem (onde é incorporado o sistema de geotubos); (ii) por uma camada permeável de drenagem com um sistema de geotubos incorporados, seguida por uma camada permeável de protecção (onde podem ou não ser incorporados tubos para injeção de ar). De acordo com Lupo (2010), este sistema é normalmente usado quando a carga hidráulica é reduzida (inferior a alguns metros).

O sistema de confinamento de dupla camada difere do anterior, somente pelo facto de em vez de uma GM ter duas GMs com uma camada intermédia para detecção de fugas (Figura 31b). Este sistema é normalmente usado quando a carga hidráulica é elevada, que é o caso, por exemplo, das configurações em vale.

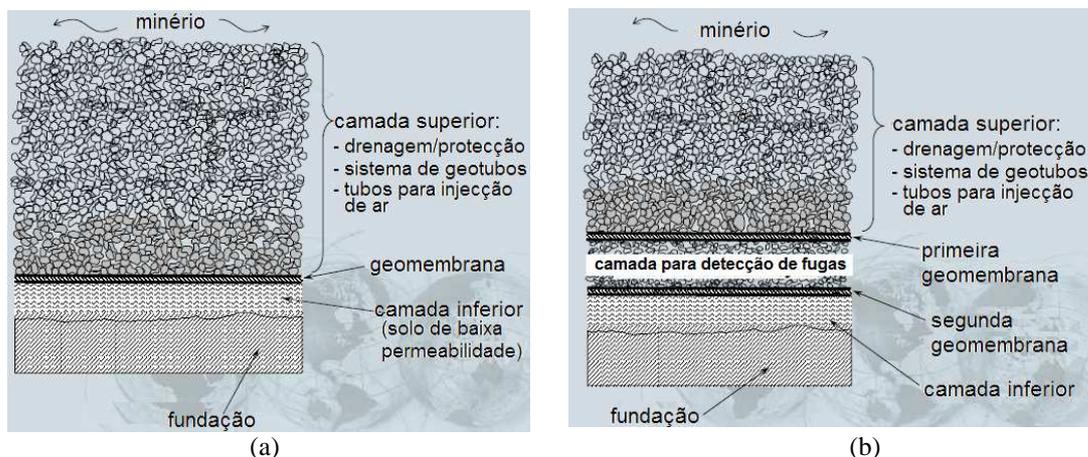


Figura 31 – Sistema de confinamento: (a) camada simples, (b) dupla camada (Lupo, 2010)

O **solo de fundação** deve ser firme, para minimizar os assentamentos sob as cargas elevadas e assim minimizar as deformações na GM e nos geotubos. Contudo, em muitos casos, o solo de fundação não tem a qualidade desejável, dando origem a assentamentos, que podem ser ampliados se o nível freático estiver ao nível da fundação ou se houver extracção de água. Estes casos devem ser devidamente identificados para se decidir sobre a geometria a preconizar para a zona de realização das pilhas, evitando as zonas piores, ou sobre a necessidade de fazer o melhoramento do solo de fundação (Lupo, 2005).

A **camada inferior** tem como objectivo principal providenciar uma camada de baixa permeabilidade (com cerca de 0,3 m depois de compactada), para minimizar qualquer possível fuga da “solução fértil” através da GM. Para o efeito, o solo deve ser bem graduado, com partículas inferiores a 38 mm, com uma percentagem significativa de finos, plasticidade moderada e uma condutividade hidráulica inferior a 10^{-8} m/s. Para minimizar os custos, esta

camada é normalmente realizada com solos locais. Se não existirem solos com as características indicadas, é usual fazerem-se misturas com bentonite (3 a 8% do peso seco) ou substituir por uma barreira GCL, com uma espessura de 10 mm e uma permeabilidade de 3×10^{-9} m/s. De referir, que sob uma sobrecarga de 500 kPa, a permeabilidade da GCL pode reduzir-se para 1×10^{-12} m/s, mas, em contrapartida, se a bentonite for sódica é mais sujeita ao ataque iónico e o valor da permeabilidade pode aumentar. Segundo Gates *et al.* (2009), permeabilidade da GCL também pode ser seriamente prejudicada quando exposta a lixiviados com resistência iónica excessiva ($> 0,3$ M), temperaturas elevadas ($> 60^\circ$ C) e pH extremos (soluções fortemente ácidas ou fortemente alcalinas). Uma alternativa consiste em hidratar a GCL, antes do contacto com o lixiviado, diminuindo-se assim o ataque da solução lixivante e aumentando-se a sua vida útil. A opção por uma GCL tem a vantagem de ter um poder “autocicatrizante” para ciclos de secagem molhagem, assim como de ser mais fácil e mais rápida de colocar do que a bentonite. Quer se use bentonite ou GCL, é necessário ainda estudar a compatibilidade com os solos locais e “solução fértil”. Uma vez que a camada inferior fica em contacto directo com a GM, para além da permeabilidade, outra característica importante é o atrito na interface (Pries *et al.*, 2008).

Os tipos de **GM**, que têm sido usados nas pilhas de lixiviação, são sobretudo PEAD e PEBD e, em alguns casos, também PVC. Para a selecção do tipo e espessura da GM é necessário ter em consideração: as sobrecargas (da pilha minério) a que vai ficar sujeita; o ataque químico da solução lixivante; as condições climáticas; os assentamentos da fundação; a forma e dimensão das partículas das camadas superior e inferior à GM; o atrito na interface e os requisitos de estabilidade; o nível de controlo de qualidade de aplicação implementado. De referir que, relativamente às GMs de PEAD, a opção por GMs em PEBD tem as seguintes vantagens: (a) maiores valores de atrito na interface; (b) mais fácil colocação, por terem maior flexibilidade (o que é uma vantagem sobretudo em climas frios); (c) permitem maior deformação, o que pode ser importante quando os assentamentos são uma preocupação (Lupo & Morrison, 2005). Têm contudo os inconvenientes de ter inferior resistência química e aos raios UV. Relativamente às GMs de PEBD, a opção por GMs em PEAD é feita quando: (a) a exposição aos UV é uma preocupação; (b) é exigida uma resistência à tracção elevada para fazer face às sobrecargas elevadas das pilhas de minério; (c) é exigida uma maior resistência química, face à solução lixivante e reacções biológicas e exotérmicas que se verificam nas pilhas de lixiviação. De notar, ainda, que a verificação da durabilidade das GMs é essencial dada a vida útil da sua aplicação em pilhas de lixiviação. Por exemplo, ensaios sobre a massa volúmica da GM permitem inferir sobre a resina utilizada e indirectamente sobre a cristalinidade (Halse *et al.*, 1991), a qual afecta as propriedades térmicas (ponto de endurecimento, viscosidade e temperatura de fusão), mecânicas (resistência à tracção, flexibilidade e resistência ao “*stress cracking*”), químicas e a permeabilidade. Os ensaios para determinação do teor em negro de carbono e dispersão do negro de carbono dão informações importantes sobre a resistência aos UV. Os ensaios para a determinação do tempo de indução à oxidação (ensaio de OIT), indicam a quantidade (não o tipo) de antioxidante que ainda resta na GM, conhecimento que é extremamente útil uma vez que são os antioxidantes que protegem a GM da degradação (Barroso & Lopes, 2010).

A constituição da **camada superior** difere, como se referiu, consoante o tipo de minério e processo de lixiviação, mas inclui sempre uma camada drenante. Esta tem dois objectivos: proteger a GM do punçoamento sob o peso do minério (quando colocada directamente sobre a GM) e assegurar que os geotubos não são esmagados sob o peso da pilha de minério. Assim, esta camada deve ter uma granulometria tal que assegure uma permeabilidade adequada, mas também uma resistência ao corte apropriada e ainda que o punçoamento da GM seja minimizado (no caso de ser colocada directamente sobre a GM). Normalmente esta camada é constituída por seixo arredondado, areia grossa ou até minério. Qualquer destes materiais deve ser

bem graduado, com partículas inferiores a 33 mm, com uma percentagem baixa de finos, não ser plástico e ter uma condutividade hidráulica superior a 10^{-2} cm/s.

Quando a camada superior incluir uma camada de protecção, esta pode ser colocada directamente sobre a GM ou sobre a camada de drenagem. No primeiro caso, o objectivo é proteger a GM da camada drenante (no caso desta ter uma granulometria mais grosseira). Neste caso, a camada de protecção deve ter uma granulometria adequada para não punçar a GM, mas também deve providenciar uma resistência ao corte adequada na interface, para assegurar a estabilidade da pilha de minério. Os materiais mais comumente empregues são os siltes, as areias siltosas e as argilas cascalhentas, uma vez que a permeabilidade não é um aspecto importante. De referir que os GTXs são muito pouco utilizados como camada de protecção por o atrito na interface ser muito mais baixo relativamente aos materiais referidos. Mas, por exemplo, na configuração da pilha reutilizável, sobre a GM, é usual existir uma camada espessa de protecção de “sacrifício” (que pode incluir um geotêxtil quer por cima quer em baixo) para proteger a GM de danos provocados aquando da remoção do minério da pilha (Lupo, 2010). No caso da camada de protecção ser colocada sobre a camada de drenagem, o objectivo é proteger esta e o sistema de geotubos da sobrecarga provocada pelo minério. Neste caso, a camada de protecção deve ter uma permeabilidade e uma resistência ao corte similares à da camada de drenagem, para a “solução fértil” poder escoar-se sem problema e assim não comprometer a estabilidade da pilha de minério. Os materiais mais utilizados são cascalhos grossos ou mesmo minério esmagado (*run-of-mine ore*).

Nos sistemas de confinamento com dupla camada, a **camada de detecção de fugas** tem por objectivo controlar a carga hidráulica sobre a GM inferior. A selecção do material para esta camada deve ter em consideração os seguintes aspectos: (a) ter uma granulometria que não leve ao punçoamento das GMs superior e inferior; (b) ter permeabilidade adequada (sob carga) para conseguir escoar a “solução fértil”, em caso de fuga através da GM superior; (c) possuir uma resistência ao corte suficiente para manter a estabilidade da pilha de minério; (d) possuir uma resistência ao corte na interface suficiente para manter a estabilidade da pilha de minério. Os materiais utilizados são do mesmo tipo dos usados na camada de drenagem (Lupo, 2005).

O sistema de **geotubos**, para além de colectar e transportar a “solução fértil”, para posterior tratamento, tem ainda a função de controlar o nível da solução dentro da pilha de minério (que pode afectar a estabilidade de toda a instalação). Os geotubos são usualmente em PEAD, PVC ou em polietileno corrugado. Nas pilhas de lixiviação, os tubos podem estar sob mais de 180 m de minério, ficando sujeitos a sobrecargas superiores a 3 MPa. Nestas condições, o nível de desempenho exigido é muito diferente do de outras aplicações, pelo que os métodos de dimensionamento tradicionais não são aplicáveis, até por serem baseados nos métodos de dimensionamento de tubos de betão ou de aço, em que o material dos tubos é muito mais rígido do que o solo envolvente, pelo que as sobrecargas eram praticamente suportadas pelo tubo (Figura 32b). Não é o caso dos geotubos empregues nesta aplicação (Lupo *et al.*, 2003), em que uma parte da sobrecarga é suportada pelo solo envolvente através do chamado efeito de arco no solo (Figura 32a).

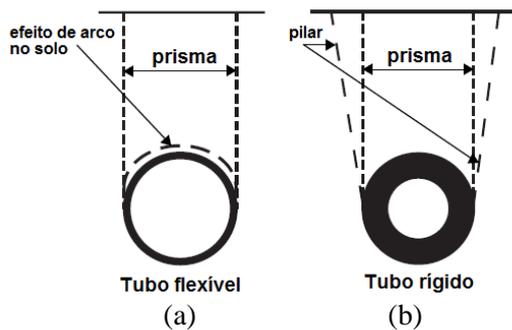


Figura 32 – Transferência de sobrecargas para o geotubo e solo envolvente (Plastics Pipe Institute, 2007)

Na Figura 33, exemplificam-se os possíveis tipos de comportamento dos geotubos sob a acção da sobrecarga de minério. Estudos desenvolvidos por Brachman *et al.* (2008), mostraram que o comportamento dos geotubos é função da rigidez do material do tubo, mas também do grau de compactação e tipo do solo envolvente.

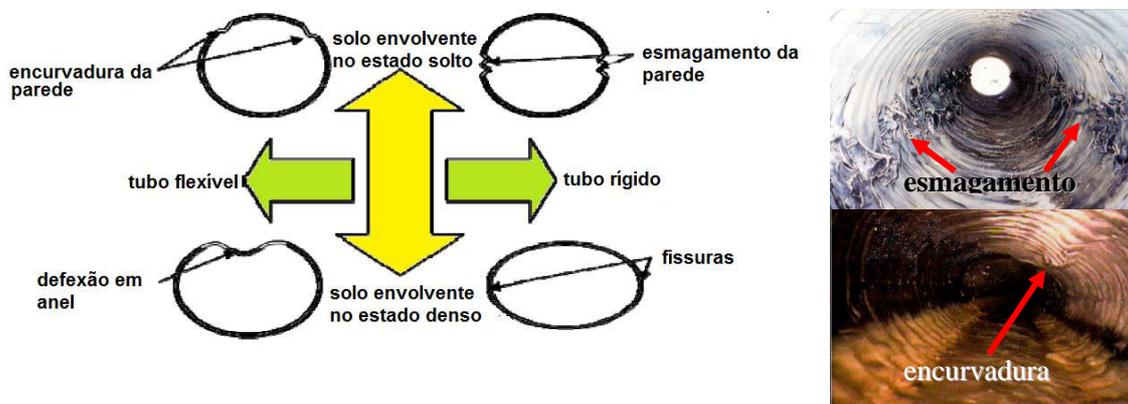


Figura 33 – Comportamento dos geotubos sob cargas externas, em função da sua rigidez e solo envolvente (Watkins & Reeve, 1979)

O esmagamento da parede ocorre quando a tensão na parede do geotubo excede a resistência à compressão do material do tubo. A encurvadura da parede ocorre quando a pressão total do solo excede a pressão de encurvadura crítica do geotubo.

5.2.3 Geomembranas em Coberturas Temporária e entre Camadas de Minério

O balanço hídrico de uma pilha de lixiviação pode ser muito perturbado, durante a estação chuvosa, por infiltração excessiva da água das chuvas. A chuva que cai infiltra-se na pilha de minério e mistura-se com a solução lixiviante, tendo como consequência não só a diluição dessa solução (afectando a recuperação do metal), como um aumento da carga hidráulica na base da pilha. Também o impacto e a infiltração da água das chuvas pode provocar a degradação do minério menos resistente e a migração de finos. A segregação, na pilha de minério, pode levar, por um lado, à existência de zonas de diferentes permeabilidades (havendo por isso caminhos preferenciais para a passagem da solução de lixiviação) e, por outro lado, a problemas de instabilidade (Figura 34). Uma forma de evitar estes problemas é colocar coberturas temporárias com GMs (*raincot liners*), para cobrir parcialmente ou na totalidade as pilhas de lixiviação (Figura 35). A sua utilização contribui, ainda, para proteger a pilha de minério da erosão, permite a redução do consumo de reagentes das soluções de estéreis, evita eventuais derramamentos acidentais nas lagoas devido à acumulação excessiva de águas pluviais ou a necessidade de aumentar os sistemas de colecta e recepção da solução fértil.



Figura 34 – Rotura do talude devido à segregação do solo e caminhos de preferenciais de solução lixivante (Steemson & Smith, 2009)



Figura 35 – Cobertura temporária com geomembrana (*raincoats*) (Breitenbach & Smith, 2007; Lupo, 2010)

Para as coberturas temporárias, utilizam-se normalmente GMs em PVC (de 0,75 mm), quando se pretendem coberturas apenas até à próxima estação seca, e GMs em PEAD (de 0,75 a 1,5 mm) para utilizações mais permanentes e reutilizáveis (Breitenbach & Smith, 2006). Na escolha das GMs deve ter-se em consideração as seguintes características: (i) resistência aos raios UV, para o tempo previsto de utilização; (ii) flexibilidade para facilitar a remoção, colocação e recolocação da GM; (iii) resistência ao punção para resistir ao material anguloso da pilha de minério; (iv) resistência suficiente para suportar as tensões de ancoragem e solicitações do vento; (v) boa qualidade das soldaduras (Breitenbach & Smith, 2007).

Por razões económicas, são também utilizadas geomembranas (*interlift liners*) para separar as camadas de minério “fresco” das camadas (inferiores) de minério já percoladas pela solução lixivante, de modo a reduzir o consumo de ácido/base da solução lixivante. A superfície da pilha de minério subjacente é alisada e preparada para receber uma GM fina e o sistema de drenagem das camadas subsequentes de minério “fresco” (Figura 36). A GM pode ser dimensionada para deixar passar só uma parte da solução lixivante para as camadas inferiores da pilha, enquanto a maior parte (cerca de 90%), após passar apenas pelo minério “fresco”, será directamente colectada e encaminhada para as instalações de recuperação do metal. Desta forma, consegue-se diminuir a quantidade de lixiviado a percolar, ao longo de toda a pilha de minério, aumentando a sua estabilidade, e diminuir o tempo para recuperação do metal proveniente das camadas superiores. Estas GMs, normalmente de PVC (0,45 a 0,75 mm) ou de PEBD (0,75 a 1 mm), podem ser espaçadas só de 2 m, mas 4 a 8 m é o mais comum (Thiel & Smith, 2004; Breitenbach & Smith, 2006).



Figura 36 – Geomembrana (*interlift liner*) antes da colocação do minério fresco (Lupo, 2010)

5.2.4 Aspectos Relevantes do Dimensionamento das Pilhas de Lixiviação

Os aspectos geotécnicos mais relevantes no dimensionamento das pilhas de lixiviação são os indicados no Quadro 11.

Quadro 11 - Aspectos geotécnicos relevantes no dimensionamento das pilhas de lixiviação (adaptado de Thiel & Smith, 2004)

Aspectos relevantes	Tipo de problemas
Durabilidade da geomembrana e possibilidade de fuga da solução lixiviante	<ul style="list-style-type: none"> • Compatibilidade com o meio envolvente: altas temperaturas e ataque químico pelas soluções usadas (ex.: soluções com 96% de H₂SO₄) • Pressões elevadas devido ao peso do minério e equipamentos (> 53 ton/roda). Níveis elevados das soluções, sobretudo na configuração da pilha em vale • Comportamento a longo prazo: UV, oxidação, ataque biológico • Punçamento devido às camadas de minério sobrejacente (normalmente a GM não é protegida por um geossintético, para evitar problemas de deslizamento) • Resistência à tração, ao rasgamento e flexibilidade da GM para fazer face aos assentamentos diferenciais e às operações de instalação • Resistência das soldaduras: espessura e uniformidade da GM
Resistência deformabilidade e durabilidade dos geotubos	<ul style="list-style-type: none"> • Compatibilidade do geotubo com a solução lixiviante, altas temperaturas e pressões elevadas • Compatibilidade do geotubo com o material da camada (efeito de arco)
Estabilidade de taludes	<ul style="list-style-type: none"> • Rotura devido a grandes alturas e pressão elevada na base • Deslizamento nas interfaces com geossintéticos • Instabilidade provocada pelas GMs entre camadas (<i>interlift liners</i>) • Elevado grau de saturação provocada pela solução lixiviante • Degradação química e biológica, a longo prazo, do minério (com diminuição da resistência ao corte, diminuição da permeabilidade, aumento do grau de saturação e aumento de migração de finos) • Estabilidade da 1ª camada, pela sua espessura (5 a 50 m) e direção de empilhamento
Liquefacção (sob cargas dinâmicas e estáticas)	<ul style="list-style-type: none"> • Liquefacção (dinâmica) durante sismo • Liquefacção (estática) por elevação do nível de água, carregamentos rápidos ou excesso de pluviosidade
Gestão da água existente	<ul style="list-style-type: none"> • Grandes quantidades repentinas de água (sobretudo em climas tropicais), implicando a necessidade de prever coberturas temporárias • Cargas hidráulicas elevadas (alturas do efluente líquido de 1 a 60 m acima da GM de impermeabilização)

Como já foi referido, os maiores desafios geoambientais relacionados com a utilização de geossintéticos nas pilhas de lixiviação devem-se ao facto de aqueles estarem simultaneamente sujeitos a grandes sobrecargas, soluções lixiviantes com pH extremos (de 1 ou 2 ou de 10 ou mais) e temperaturas que podem chegar aos 70°C.

Assim, os geossintéticos têm de ser quimicamente compatíveis com as soluções lixiviantes com que vão estar em contacto. Estudos realizados em laboratório mostraram que o PEAD era mais resistente que o PEBD e que o PVC. O PEAD comporta-se satisfatoriamente até 60°C quando exposto às seguintes soluções com as concentrações indicadas: 35% HCl, 50% H₂SO₄, e uma solução saturada de cianeto de sódio (GSE, 2002). Todavia, os hidrocarbonetos halogenados (tetracloro de carbono, tricloretileno) podem afectar gravemente a propriedades do polietileno (Renken *et al.*, 2005).

A cristalinidade torna um polímero mais resistente química e mecanicamente, mas diminui a sua resistência ao punçoamento e aumenta a sua susceptibilidade ao *stress cracking* (Scheirs, 2009). O PEAD tem entre 40 a 60% de cristalinidade, o PEBD tem entre 15 a 30% e o PVC tem 0%. Assim e embora as GMs em PEAD sejam em muitos casos preferidas pela sua resistência mecânica e química, tem de se avaliar a sua resistência ao *stress cracking*, sobretudo, quando sujeitas a tensões elevadas e expostas a meios quimicamente agressivos.

Estudos, realizados em laboratório, mostraram que o período de vida útil do PEAD depende da temperatura, do tipo de solução lixiviante e do OIT inicial. Por exemplo, verificou-se que a vida do PEAD variou de 67,3-83,3 anos, quando submetido a uma solução sintética de drenagem ácida das rochas (ARD) a 20°C, e variou de 3,7-4,5 anos, quando se aumentou para 60°C a mesma solução. Também se verificou uma perda de 73% de OIT para o PEBD e de 64% para o PEAD (Renken *et al.*, 2005; Fourie *et al.*, 2010).

Quanto às deformações nas GMs, estas são calculadas com base nos assentamentos da fundação (determinados por métodos numéricos ou analíticos), que obviamente não terão em consideração deformações por cargas pontuais (por exemplo por eventuais fragmentos de rochas existentes acima ou abaixo da GM). Peggs *et al.* (2005) sugerem que não se ultrapasse valores de 4% a 8% para GMs de PEAD e valores de 8 a 12% para GMs de PEBD.

Quanto à resistência ao punçoamento da GM, esta é função do seu tipo e espessura, do tipo de solo das camadas superiores e inferiores, assentamento da fundação e sobrecargas a que está sujeita. O ensaio que melhor tem em consideração os factores indicados, e por isso é o mais usado, é o ensaio de carga (*liner load test* ou *cylinder test*, descrito por, Lupo & Morrison (2007) e por Thiel & Smith (2004), entre outros. Este ensaio também é usado para avaliar o tipo e espessura da GM mais adequados.

Para a determinação das propriedades físicas, mecânicas e químicas de GMs de PEAD e seus requisitos mínimos podem seguir-se, por exemplo, as especificações do GRI-GM13 (2003), com a ressalva de que estas especificações não são específicas para esta aplicação em particular.

No Quadro 12 são dadas algumas linhas orientadoras para a selecção das GM para utilização em pilhas de lixiviação, não dispensando, contudo, a realização de ensaios para avaliação das suas características, nomeadamente, ensaios de resistência ao corte na interface (*interface shear test*) e ensaios de carga (*liner load test* ou *cylinder test*), em que se simula o sistema de confinamento e o carregamento a que vai ficar sujeito.

Quadro 12 - Linhas orientadoras para a selecção da geomembrana (adaptado de Lupo & Morrison, 2007)

Fundação	Camada inferior	Camada superior	Tensão efectiva sobre a geomembrana	
			< 1,2 Mpa	> 1,2 Mpa
Solo rijo	Mat. grosseiro	Mat. grosseiro	PEBD/PEAD	PEBD/PEAD
		Mat. fino	(2 mm)	(2,5 mm)
	Mat. fino	Mat. grosseiro	PEBD/PEAD	PEBD/PEAD
		Mat. fino	(1,5 mm)	(2 mm)
Solo mole	Mat. grosseiro	Mat. grosseiro	PEBD	PEBD
		Mat. fino	(2 mm)	(2,5 mm)
	Mat. fino	Mat. grosseiro	PEBD	PEBD
		Mat. fino	(2 mm)	(2,5 mm)
		Mat. fino	PEBD	PEBD
			(1,5 mm)	(2,5 mm)

Nota: PEAD – Polietileno de alta densidade; PEBD – Polietileno de baixa densidade.

Relativamente aos geotubos, o critério de dimensionamento apropriado para avaliação do seu desempenho depende da aplicação em que se insere. Ou seja, o desempenho de um geotubo pode ter diferentes níveis de aceitação, consoante os impactos ambientais e económicos que a sua disfunção implique. Por exemplo, a rotura de um geotubo, numa unidade de extracção do metal, poderia ser crítica enquanto, por exemplo, a deformação significativa (havendo mesmo encurvadura) das paredes dos geotubos, que constituem o sistema de colecta e encaminhamento da solução fértil numa pilha de lixiviação, pode ser tolerada desde que continue a deixar fluir a solução. De referir que os geotubos em polietileno sofrem colapso para uma flexão de cerca de 25%, e que esta é afectada pela temperatura (ver Quadro 13), devendo por isso tê-la em consideração no dimensionamento (Steeatson & Smith, 2009).

Quadro 13 – Flexão vertical (% do diâmetro inicial) de tubos corrugados de PE de parede dupla com 150 mm de diâmetro (Steeatson & Smith, 2009)

Altura da pilha de minério (m)	Flexão a 23°C (%)	Flexão a 50°C (%)
20	5,0	8,0
60	11,6	17,6
100	16,8	24,9
140	21,4	31,0

Lupo (2005, 2010) refere algumas linhas orientadoras para a selecção do solo envolvente e geotubo mais adequado, as quais se enumeram seguidamente:

- O dimensionamento da camada de solo envolvente é tão importante quanto o do geotubo. Essa camada deve ser projectada para promover o efeito de arco no solo (materiais dessa camada num estado mais solto tendem a transmitir maiores cargas ao geotubo levando a deformações significativas destes; materiais no estado mais denso tendem a promover o efeito de arco no solo e transmitir apenas uma parte da carga ao geotubo).
- O tipo de material, espessura e rigidez do geotubo devem ser seleccionados para serem compatíveis com o material da camada envolvente (um geotubo com uma rigidez maior que a do material da camada envolvente tende a ficar sujeito a maiores tensões, portanto, a secção e propriedades do geotubo precisam de ser compatíveis com o nível tensão a que o geotubo vai ficar sujeito; um geotubo com uma rigidez inferior à do material da camada

envolvente irá deformar-se significativamente, devendo o material do tubo ser seleccionado para permitir essa deformação sem que se verifique uma rotura frágil).

- Como pré-dimensionamento, a espessura da camada envolvente do geotubo deve ser no mínimo duas vezes o diâmetro do geotubo. Esta espessura, aparentemente, permite o desenvolvimento do efeito de arco no solo, que permite suportar parte da carga aplicada.
- Na camada envolvente, a selecção de um material angular ajuda a promover o efeito de arco no solo na zona adjacente do geotubo. Solos com partículas de dimensão máxima inferior a 25 mm têm mostrado conseguir um bom efeito de arco na periferia do tubo.
- Tem de se realizar ensaios para atestar da compatibilidade do material envolvente com a solução lixiviante, pois a sua degradação ao longo do tempo pode diminuir o efeito de arco no solo.
- Se o solo envolvente for utilizado como camada drenante, as suas características hidráulicas devem ser testadas sob tensões mais elevadas do que as correspondentes à profundidade do tubo. As tensões podem exceder as impostas pela profundidade a que o tubo se encontra como resultado do efeito de arco no solo na periferia do geotubo. Estas tensões podem ser suficientes para esmagar o material, causando perda de permeabilidade.

Os cálculos de estabilidade global são efectuados através dos métodos clássicos de equilíbrio limite. Contudo, como as pilhas de minério podem ficar localmente saturadas pela solução lixiviante, deve ser avaliado o risco de liquefacção. Para os cálculos de estabilidade é também muito importante o conhecimento da resistência ao corte na interface entre os diferentes componentes do sistema de confinamento, para as sobrecargas aplicadas. Dependendo do tipo de aplicação e do sistema de confinamento, são utilizados quer os valores de pico, quer os valores residuais obtidos em ensaios de resistência ao corte na interface (*interface shear test* segundo as normas NP EN ISO 12957 ou ASTM D5321. No caso das pilhas de lixiviação, são os valores residuais do atrito que são usados para efectuar a avaliação da estabilidade da pilha. De referir que o uso cada vez mais corrente de GMs, entre camadas de minério (*interlift liners*), pode levar à existência de planos de menor resistência ao corte e níveis freáticos suspensos, pondo em risco a estabilidade da pilha. Outro problema, para a estabilidade, é o efeito da solução lixiviante, na degradação ao longo do tempo do minério (por dissolução mineral e acção bacteriana), levando não só a uma diminuição da resistência ao corte do minério e ao longo das interfaces com os geossintéticos, mas também a uma diminuição da permeabilidade do material e conseqüente aumento do grau de saturação (Lupo & Morrison, 2007; Thiel & Smith, 2004).

5.2.5 Aspectos Relevantes da Construção das Pilhas de Lixiviação

No Quadro 14 sumarizam-se os aspectos geotécnicos relevantes na construção das pilhas de lixiviação.

A preparação da fundação e camadas superior e inferior à GM são de importância fundamental, para a garantia da estabilidade da pilha de lixiviação, sendo do conhecimento geral de qualquer geotécnico. Já as regras de boa prática, para a construção da pilha, serão menos conhecidas, pela sua especificidade. No que respeita à velocidade de deposição do minério, esta deve ser a adequada para não causar mudanças muito rápidas do estado de tensão, o que poderia ter conseqüências adversas para a sua estabilidade e assentamento.

O tipo de configuração adoptado para a pilha determina procedimentos construtivos específicos. Por exemplo, a construção da base da pilha deve levar em conta a inclinação do terreno, para que pela acção da gravidade, a solução fértil seja drenada para os pontos topograficamente mais baixos e então recolhida para a lagoa de recepção. Se a zona escolhida para a construção da pilha for muito plana ou íngreme, os trabalhos de corte e escavação devem ser executados para atingir uma inclinação adequada do terreno (tipicamente menor do que 5%, preferencialmente

cerca de 2%). Alternativamente, no caso de os taludes serem muito acentuados, pode ser utilizada a técnica de pilha em vale. Na construção da pilha, a sua altura total depende das condições da fundação, da resistência da base, do seu confinamento, da topografia do terreno, mas também das propriedades mecânicas do minério e do tipo de equipamento utilizado na construção. Durante a construção, as preocupações são os movimentos ou deslizamentos da pilha que podem ocorrer, sobretudo, em fundações pouco resistentes, pilhas de grande altura, terrenos muito inclinados, e desenvolvimento de zonas de saturação acima do confinamento da base (Figura 37a). Alguns autores (Smith & Giroud, 2000) consideram que a primeira camada de minério lançada sobre a base, sem compactação, é a mais crítica em termos de estabilidade. Além disso, aqueles autores também argumentam que o factor de segurança será maior se o empilhamento for na direcção de montante (*up-gradient slope*) do que na direcção de jusante (*down-gradient slope*), conforme ilustra a Figura 37b.

Quadro 14 – Aspectos relevantes na construção das pilhas de lixiviação (adaptado de Smith, 2008 e de Steemson & Smith, 2009)

Aspectos relevantes	Tipo de problemas
Influência do modo de construção da pilha de minério	<ul style="list-style-type: none"> • Preparação das camadas subjacentes e sobrejacentes à GM: colocação das camadas, compactação e preparação da superfície • Velocidade de deposição do minério • Configuração da pilha • Equipamentos para transporte e deposição do minério • Caudal da solução lixiviante
Influência das condições climáticas e atmosféricas	<ul style="list-style-type: none"> • Zonas de alta pluviosidade • Zonas de grande queda de neve • Zonas com ventos fortes • Zonas com grandes amplitudes térmicas
Transporte, colocação e união dos geossintéticos do sistema de confinamento	<ul style="list-style-type: none"> • Forma de envio para o local dos geossintéticos: em rolos ou caixas • Colocação dos geossintéticos: ligação entre painéis/tubos • Facilidade de reparação: equipamentos e peritos • Acesso ao local: área de armazenamento, acesso perimetral, taludes • Condições de carregamento (estático e dinâmico): coberturas, estradas de acesso, tráfego de obra, sobrecarga máxima • Problemas de danos nos geotubos e GMs • Problemas de <i>stress cracking</i> e expansão/contractão • Pontos singulares: cantos, bermas, mangas (tubos) • Possibilidade de expansão da instalação

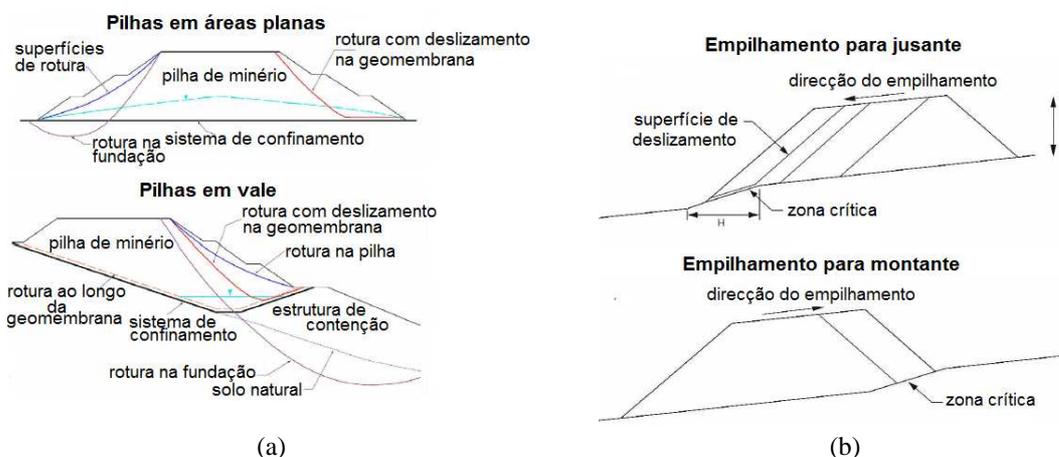


Figura 37 – Potenciais superfícies de rotura na pilha e influência da direcção do empilhamento (Harper *et al.*, 1987; Smith & Giroud, 2000)

Outra preocupação, para a estabilidade da pilha (sobretudo na primeira camada), é o movimento dos equipamentos de transporte, descarga e deposição do minério (Figura 38), pelas cargas (estáticas e dinâmicas) que implicam, algumas opostas ao peso da pilha. Sobretudo, também, na primeira camada, tem de se ter o máximo cuidado para os equipamentos não esmagarem os geotubos do sistema de drenagem ou causarem danos na GM.



Figura 38 – Equipamentos de transporte e deposição do minério para lixiviação em pilhas (Steemson & Smith, 2009)

Outro aspecto importante relaciona-se com o caudal da solução lixiviante. A solução lixiviante é transportada, da lagoa de estéreis para a pilha, através de um sistema de tubos. Um conjunto de bombas fornece a pressão suficiente aos pulverizadores que garantem a distribuição (o mais uniforme possível) da solução no topo da pilha. O caudal deve ser tal que garanta condições de não-saturação ao longo da altura da pilha, pois a reação química, na qual os metais são dissolvidos, exige a presença de oxigênio e, portanto, a condição não-saturada é essencial para o processo de lixiviação. De acordo com Thiel & Smith (2004), o coeficiente de permeabilidade do minério saturado deve ser, pelo menos, 10 vezes maior do que o caudal de aplicação da solução lixiviante, para garantir condições de não saturação na pilha, evitando simultaneamente problemas de instabilidade. Normalmente, após a construção de uma camada da pilha de minério (em geral com 4 a 10 m de altura) e subseqüente pulverização, é usual deixar uma berma, antes da colocação da camada seguinte, para aumentar a estabilidade.

Outro aspecto, que influencia a construção das pilhas de lixiviação, está relacionado com as condições climáticas e atmosféricas existentes. O melhor clima para a construção das pilhas de lixiviação é um clima temperado semi-árido, contudo, podemos ver este tipo de pilhas em todo o tipo de climas, bastando ter em consideração alguns problemas que podem surgir e dimensionar as instalações em conformidade. Por exemplo, em climas tropicais húmidos, a precipitação de 2,5 m/ano pode adicionar mais de 5 toneladas de água para o sistema de

lixiviação para cada tonelada de minério empilhado. Isto tem implicações na estabilidade da pilha e no aumento da diluição da solução lixiviante, o que pode levar a derramamentos acidentais nas lagoas, conforme referido na secção 5.2.3. Os problemas que se irão expor vão-se restringir à aplicação dos geossintéticos em diferentes climas e condições atmosféricas. Por exemplo, em zonas com ventos fortes, deve limitar-se a quantidade máxima de GM exposta e ajustar os cronogramas de colocação, para os períodos do dia em que os ventos são menos fortes. Em áreas de elevada pluviosidade, a colocação da GM deve ser agendada com base nas previsões meteorológicas, para maximizar a implantação durante os períodos secos. Isto pode ser um desafio difícil, em áreas com precipitação superior a 2 m/ano. Nesses casos, podem incluir-se várias zonas de expansão de áreas mais pequenas, para facilitar a construção durante o período seco. Em zonas de queda de neve, a colocação da GM só é possível, durante o período do dia em que a temperatura permita a realização das soldaduras (superiores a 5° C, ou outras indicadas especificamente consoante o tipo de GM). Em áreas com grandes amplitudes térmicas, deve ter-se em atenção os problemas de expansão/contracção das GMs de PEAD. Podem, por exemplo, definir-se as limitações relativas à quantidade de painéis que podem ficar expostos, qual a temperatura máxima para se realizar as soldaduras e colocação da camada sobrejacente.

5.2.6 Garantia da Qualidade da Construção e Operação e Pós-Encerramento

Como em qualquer projecto, o desempenho da pilha de lixiviação é muito dependente da qualidade de construção e garantia de qualidade. Quando os materiais geossintéticos são utilizados em ambientes “extremos” e/ou sob cargas elevadas, justifica-se ainda mais um nível elevado da garantia de qualidade da construção (CQA) e de monitorização. Para esta aplicação particular indicam-se, no Quadro 15, os aspectos mais relevantes a contemplar.

Segundo Thiel *et al.* (2005), a utilização de métodos de detecção de fugas na GM, ainda não é obrigatória em pilhas de lixiviação, mas é já largamente utilizada. Para além dos problemas ambientais que se podem evitar com a sua implementação, também são importantes do ponto de vista económico. Por exemplo, em pilhas de lixiviação para extracção de ouro, podem conduzir a poupanças da ordem dos 15000 €/ha (valor da solução lixiviada que de outra forma seria perdida através dos furos não detectados na GM ao longo da vida útil da instalação).

Quadro 15 - Aspectos relevantes do CQA para pilhas de lixiviação (adaptado de Lupo, 2007)

Aspectos relevantes	Tipo de controlo
Colocação do material subjacente à GM	<ul style="list-style-type: none"> • Controlo das características do material de empréstimo: granulometria, plasticidade e permeabilidade • Controlo das camadas de solo compactado: teor em água e peso volúmico seco e se necessário de permeabilidade
Colocação da GM	<ul style="list-style-type: none"> • Aceitação prévia da camada subjacente (angulosidades, dessecação) • Ensaio de conformidade da GM • Realização do plano (layout) de colocação dos painéis e soldaduras • Ensaio de controlo (de resistência e continuidade) às soldaduras
Colocação da camada de material drenante	<ul style="list-style-type: none"> • Verificação de que o equipamento utilizado está de acordo com o projecto • Verificação de que a espessura está de acordo com o projecto • Verificação de que o método de colocação não danifica a GM • Verificação de que a instalação dos geotubos de drenagem é realizada de acordo com o projecto
Deteção de furos e rasgos na GM	<ul style="list-style-type: none"> • Utilização mais corrente: método do dipolo (ASTM D 7007)

Entre os métodos de detecção de fugas mais utilizados, neste tipo instalações, está o método do dipolo (ASTM D 7007). A sensibilidade de detecção do Método Dipolo depende da espessura do material sobrejacente e subjacente à GM e de sua condutividade que, tipicamente, depende do teor em água e da sua mineralogia. Quando sob a GM se usam GCL, alguns autores referem a necessidade de controlar o seu teor em água para assegurar o desempenho do método. Mas, de acordo com Erickson & Thiel (2002), um aumento do teor em água pode reduzir a resistência ao corte na interface com a GCL (sobretudo para teores em água superiores a 40-50%). Assim, para evitar problemas de instabilidade, as especificações de construção devem indicar o limite máximo do teor em água e o limite mínimo da permeabilidade da GCL (Beck *et al.*, 2008).

As medidas a tomar, após o encerramento da extração do minério, são muito importantes devido a factores como o clima (pluviosidade), propriedades físicas e químicas do material das pilhas e problemas de sismicidade. No Quadro 16, resumem-se alguns dos aspectos mais relevantes do pós-encerramento deste tipo de instalação.

Quadro 16 - Aspectos relevantes do pós-encerramento das pilhas de lixiviação (adaptado de Steemson & Smith, 2009)

Aspectos relevantes	Tipo de problema/acção
Monitorização/manutenção	<ul style="list-style-type: none"> • Rega da pilha com água para diminuir o potencial de contaminação • Reparação dos danos devidos à erosão/pluviosidade • Manutenção das estradas de acesso • Monitorização das águas subterrâneas, para detecção de eventual contaminação
Elevada pluviosidade	<ul style="list-style-type: none"> • Necessidade de realização de cobertura das pilhas (e consequente adoçamento da inclinação dos taludes) e desvio de fluxos de água superficiais • Necessidade de realizar medidas de protecção contra a erosão dos taludes
Assentamentos	<ul style="list-style-type: none"> • Danos nas tubagens e interrupção da drenagem • Rotura das coberturas • Instabilidade
Solução lixivante	<ul style="list-style-type: none"> • Necessidade de gestão do fluxo, que pode continuar por alguns anos após o encerramento

6. CONCLUSÕES

O presente trabalho teve por objectivo providenciar uma visão do estado actual da prática, relativamente à utilização de geossintéticos em engenharia ambiental, nomeadamente, em aterros de resíduos, em lagoas e reservatórios e em minas. Em particular, visou apresentar os aspectos geoambientais a ter em consideração no projecto e na construção, integrando os principais avanços no conhecimento, relatados na literatura, sobretudo na última década, sobre os factores que podem afectar o desempenho destes materiais, não convencionais, nas aplicações referidas.

No que se refere à utilização de geossintéticos em aterros de resíduos, entre os principais desafios geoambientais que se colocam, destacam-se: (i) a estanqueidade das barreiras à migração fluidos; (ii) a compatibilidade química dos geossintéticos com os lixiviados, no sistema de protecção ambiental da base e taludes, e com o biogás, no sistema de cobertura; (iii) a resistência mecânica; (iv) a deformabilidade/flexibilidade; (v) a durabilidade; (vi) a qualidade das juntas, especialmente no caso das GMs.

Relativamente à aplicação de geossintéticos em lagoas e reservatórios, os principais desafios a realçar são: (i) a compatibilidade química com os líquidos que contêm; (ii) as características da camada de fundação; (iii) o efeito de sucção produzido pela acção do vento; (iv) a durabilidade; (v) as características geológicas, geotécnicas e geomorfológicas dos terrenos onde estas obras são implantadas.

No que diz respeito às aplicações mineiras, o emprego de geossintéticos constitui um grande desafio, para o desenvolvimento de novas tecnologias, dadas as condições extremas em que se faz a extracção dos metais. Alguns dos desafios geoambientais actuais incluem a sujeição dos geossintéticos a: (i) grandes sobrecargas (do minério e dos equipamentos de deposição); (ii) soluções lixiviantes com pH extremos; (iii) cargas hidráulicas elevadas; (iv) elevadas temperaturas; (v) estabilidade de taludes crítica; (vi) locais geologicamente difíceis; (vii) condições climáticas problemáticas.

Foram igualmente apresentados os aspectos mais relevantes para o dimensionamento e para a instalação dos geossintéticos, com destaque para as geomembranas, dado que estas desempenham a função principal em todas as aplicações abordadas neste trabalho. Foram, também, brevemente descritas as actividades de garantia de qualidade de instalação, incluindo os métodos de detecção de fugas, preconizadas para minimizar potenciais riscos.

AGRADECIMENTOS

Agradece-se à Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) o financiamento concedido no âmbito do Projecto PTDC/AAC-AMB/102846/2008.

REFERÊNCIAS

- Alonso Franco, M. (2005). Las geomembranas en las balsas, *I Simposio Nacional sobre Proyecto, Construcción e Impermeabilización de Balsas*, 26 p. (CD-ROM).
- ASTM D 5321 – *Standard Test Method for Determining the Coefficient of Soil and Geosynthetic or Geosynthetic and Geosynthetic Friction by the Direct Shear Method*, American Society for Testing Materials, USA.
- ASTM D 5820 – *Standard practice for pressurized air channel evaluation of dual seamed geomembranes*, American Society for Testing Materials, USA.
- ASTM D 5891 – *Standard test method for fluid loss of clay component of geosynthetic clay liners*, American Society for Testing Materials, USA.
- ASTM D 6392 – *Standard test method for determining the integrity of nonreinforced geomembrane seams produced using thermo-fusion methods*, American Society for Testing Materials, USA.
- ASTM D 6747 – *Standard Guide for Selection of Techniques for Electrical Detection of Potential Leak Paths in Geomembrane*, American Society for Testing and Materials, USA.
- ASTM D 7007 – *Standard Practices for Electrical Methods for Locating Leaks in Geomembranes Covered with Water or Earth Materials*, American Society for Testing and Materials, USA.
- Barroso, M. & Lopes, M.G. (2008). *Plano de Garantia de Qualidade da Instalação dos Geossintéticos (Plano GQIG) em Aterros de Resíduos*; Informação Técnica do LNEC, ITG 27, Lisboa.
- Barroso, M. & Lopes, M.G. (2010). Integridade das geomembranas: influência da exposição aos agentes atmosféricos, *12º Congresso Nacional de Geotecnia*, Guimarães, Portugal (CD-ROM).

- Beck, A.; Kramer, E. & Smith, M. E. (2008). Specifications for Moisture Content of GCL to Perform Electrical Leak Location Surveys, *Proceedings of EuroGeo 4*, Scotland, U.K.
- Bonaparte, R. & Gross, B. A. (1990). Field Behavior of Double-Liner Systems, Waste Containment Systems: Construction, Regulation, and Performance, *ASCE Geotechnical Special Publication No. 26*, R. Bonaparte, ed., New York, pp. 52-83.
- Bouazza, A. & Gates, W.P. (2010). On the compatibility of GCLs to leachates of extreme chemistry?, *Proceedings of 9th International Conference on Geosynthetics*, Brazil, 2010, pp.345-357.
- 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.
- Brachman, R.W. I.; Moore, I. D. & Munro, S.M. (2008). Compaction effects on strains within profiled thermoplastic pipes, *Geosynthetics International*, Vol.15, No.2, pp. 72–85.
- Breitenbach, A.J. & Smith, M.E. (2006). Overview of geomembrane history in the mining industry, *Proceedings of 8th International Conference on Geosynthetics*, Japão, pp.345-349.
- Breitenbach, A.J. & Smith, M.E. (2007). *Geomembrane raincoat liners in the mining heap leach industry*, Geosynthetics, IFAI, Vol.24, No.2.
- Carneiro, J.R.C. (2009). *Durabilidade de materiais geossintéticos em estruturas de carácter ambiental – a importância da incorporação de aditivos químicos*, Dissertação de Doutoramento em Engenharia do Ambiente, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, LXVIII-534p.
- Comité Français des Géosynthétiques (2003). *Présentation de méthodes de détection et de localisation de défauts dans les dispositifs d'étanchéité par géomembranes*, 44 p. www.cfg.asso.fr, acesso em 20/09/2011.
- Daniel, D.E. & Koerner, R.M. (1995). *Waste Containment Facilities: Guidance for construction, quality assurance, and quality control of liner and cover systems*, ASCE ISBN 0784400032, 384 p.
- Daniel, D.E. & Koerner, R.M. (2007). *Waste Containment Facilities*, Second Edition, ASCE, ISBN 0784408599, 368 p.
- Erickson, R. B. & Thiel, R. (2002). *Design and application of the geomembrane supported GCL in one-product and encapsulated composite liner systems*. Swets & Zeitlinger, Lisse, ISBN 90 5809 380 8.
- 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).
- Fourie, A.B.; Bouazza, A.; Lupo, J.M. & Abrão, P. (2010). Improving the performance of mining infrastructure through the judicious use of geosynthetics, *Proceedings of 9th International Conference on Geosynthetics*, Brazil, pp. 193-219 (CD-ROM).
- Garcia Gironés, G.M. & Donoso Sanz, J. L. (2005). Recomendaciones generales de diseño y detalles constructivos para la impermeabilización de balsas de água com geomembranas de polietileno de alta densidade, *I Simposio Nacional sobre Proyecto, Construcción e Impermeabilización de Balsas*, 9 p. (CD-ROM).
- Gates, W.P.; Bouazza, A. & Churchman, G.J. (2009). *Bentonite clay keeps pollutants at bay*, Elements, pp.105–110.
- GRI (Geosynthetic Research Institute) – GM13 (2003). *Standard specification for test properties, testing frequency and recommended warranty for high density polyethylene (HDPE) smooth and textured geomembranas*, www.geosynthetic-institute.org/grispecs/gm13.pdf, acesso em 22/08/2011.
- GRI (Geosynthetic Research Institute) – GM19 (2002). *Standard specification for seam strength and related properties of thermally bonded polyolefin geomembranas*, www.geosynthetic-institute.org/grispecs/gm13.pdf, acesso em 18/09/2011.

- GSE (2002). *Carta de resistência química*, www.gseworld.com/Literature/TechnicalNotes/PDF/TN032ResistChart.pdf, Acesso em 22/08/2011.
- Guyonnet, D.; Touze-Foltz, N.; Norotte, V.; Pothier, C.; Didier, G.; Gailhanou, H.; Blanc, P. & Warmont, F. (2009). Performance-based indicators for controlling geosynthetic clay liners in landfill applications, *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 27, pp. 321–331.
- Halse, Y.; Wiertz, J.; Rigo, J.M. & Cazzuffi, D.A. (1991). *Chemical Identification Methods Used to Characterize Polymeric Geomembranes*. RILEM: Report of Technical Committee 103, pp. 316-335.
- Harper, T.G.; Leach, J.A. & Tape, R.T. (1987). *Slope stability in heap leach design*, Geotechnical Aspects of Heap Leach Design (Ed: D van Zyl.), pp. 33-40 (Society of Mining Engineers, Inc.: Littleton Colorado).
- Holtz, R.D.; Christopher, B.R. & Berg, R. R. (1997). *Geosynthetic Engineering*, Published by BiTech Publishers Ltd., 451p.
- Kavazanjian, R., Jr.; Diwon, N.; Katsumi, T.; Kortegast, A.; Legg, P. & Zanzinger, H. (2006). Geosynthetic barriers for environmental protection at landfills, *Proceedings of 8th International Conference on Geosynthetics*, Yokohama, Japão, pp. 121-152.
- Koerner, G.R. & Koerner, R.M. (2006). Long-term temperature monitoring of geomembranes at dry and wet landfills, *Geotextiles and Geomembranes*, 24, pp.72–77.
- Koerner, R. M. (2005). *Reduction Factors Used in Geosynthetics Design*, GSI White Paper 4, GRI Publications, Folsom, Pennsylvania, 13 p.
- Koerner, R. M.; Koerner, G. R.; Eith, A.W. & Ballod, C.P. (2008). Geomembrane temperature monitoring at dry and wet landfills, *Proceedings of 1st Global Waste Management Symposium*, Copper Mountain Conference Center (CD-ROM).
- Koerner, R.M. (1998). *Designing with Geosynthetics*, Prentice Hall, Fourth Edition, 761 p.
- Lopes, M. G. (2006a). Análise dos métodos de controlo de integridade de geomembranas de PEAD usadas em aterros de RSU, *Revista Geotecnia*, nº106, Março, pp. 107-131.
- Lopes, M. G. (2006b). Experiência de colocação de geomembranas de PEAD em aterros de RSU, *Revista Geotecnia*, nº106, Março, pp. 55-74.
- Lopes, M.G. & Barroso, M. (2007). Plano de garantia de qualidade da construção para geossintéticos: sugestões para o futuro, *Seminário Geotécnico sobre Aterros de Resíduos*, LNEC, Lisboa, Portugal, 23 p.
- Lupo, J. F. (2010). Liner system design for heap leach pads, *Geotextiles and Geomembranes*, 28, pp. 163-173.
- Lupo, J.F. & Morrison, K.F. (2005). Innovative geosynthetic liner design approaches and construction in the mining industry, *Proceedings of the ASCE Geo-Frontiers*, Austin, TX, pp. 24–26.
- Lupo, J.F. & Morrison, K.F. (2007). Geosynthetic design and construction approaches in the mining industry, *Geotextiles and Geomembranes*, 25, pp. 96–108.
- Lupo, J.F. (2005). Heap leach facility liner design, *Proceedings of NAGS/GRI-19 Conference*, Las Vegas, Nevada, USA.
- Lupo, J.F.; Harmon J.S. & Morrison, K.F. (2003). Solution Collection Design Issues on large heap facilities, *Proceedings of the Tenth International Conference on Tailings and Mine Waste*, Colorado, USA.
- Majdi, A.O.; Gross, B.A.; Bonaparte, R. & Warren, D. (2002). *Evaluation of Liquids Management Data for Double-Lined Landfills*, Appendix E of United States Environmental Protection Agency Report EPA/600/R-02/099, Cincinnati, OH, USA, 206 p.
- Comité Nacional Español de Grandes Presas (2010). *Manual para el diseño, construcción, explotación y mantenimiento de balsas*, ISBN 9788489567160, ESPAÑA, 272 p.
- NP EN ISO 12957 – *Geossintéticos – Determinação das características de atrito*.
- 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.

- Peggs I. D. & Little D. (1985). The Effectiveness of peel and shear tests in evaluating HPDE geomembrane seams, *2nd Canadian Symposium on Geotextiles and Geomembranes*, pp. 141-146.
- Peggs I. D. (1990). Destructive testing of polyethylene geomembrane seams: Various methods to evaluate seams strength, *Geotextiles and Geomembranes*, No. 9 (4), pp. 405-414.
- Peggs, I.D.; Schmucker, B. & Carey, P. (2005). Assessment of maximum allowable strains in polyethylene and polypropylene geomembranas, *Proceedings of Geo-Frontiers 2005 Congress*, Austin, USA.
- Phaneuf, R. & Peggs, I. D. (2001). Landfill construction quality, lessons learned from electrical resistivity testing of geomembrane liners, *Geotechnical Fabrics Report*, pp. 28-35.
- Plastics Pipe Institute (2007). *Handbook of PE Pipe*, Plastics Pipe Institute
- Poulain, D.; Peyra, L. & Meriaux, P. (2011). Feedback and guidelines for geomembrane lining systems of mountain reservoirs in France, *Geotextiles and Geomembranes*, 29, pp. 415-424.
- Pries, J., Bishop, D. & Hayes, S. (2008). The use of geosynthetics in mining works, *1st International Seminar on the management of rock dumps, stockpiles and heap leach pads*. Perth, Australian.
- Qian, X., Koerner, R.M. & Gray, D.H. (2001). *Geotechnical aspects of landfill design and construction*, Prentice-Hall, ISBN 0130125067, USA, 717 p.
- Rayhani, M.T.; Rowe, R.K.; Brachman, R.W.I.; Take, W.A. & Siemens, G. (2011). Factors affecting GCL hydration under isothermal conditions, *Geotextiles and Geomembranes*, 29, pp.525-533.
- Recomendações da IGS-Brasil: IGSBR GM 01 (2003). www.igsbrasil.org.br, acesso em 18.09.2011.
- Renken, K.; Mchaina, D.M. & Yanful, E.K. (2005). Geosynthetics research and applications in the mining and mineral processing environment, *Proceedings of NAGS/GRI-19 Conference*, Las Vegas, Nevada, USA, 20 p.
- Rimal, S. & Rowe, R.K. (2009). Diffusion modelling of OIT depletion from HDPE geomembrane in landfill applications, *Geosynthetics International*, 16, No. 3, pp.183-196.
- Rosin-Paumier, S.; Touze-Foltz, N. & Pantet, A. (2011). Impact of a synthetic leachate on permittivity of GCLs measured by filter press and oedopermeameter tests, *Geotextiles and Geomembranes*, 29, pp. 211-221.
- Rowe, R. K. & Hoor, A. (2009). Predicted temperatures and service lives of secondary geomembrane landfill liners, *Geosynthetics International*, 16, No. 2, pp.71-82
- 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, GA, USA, Vol. 1, pp. 27-103.
- Rowe, R.K. (2005). Long-term performance of contaminant barrier systems, *Géotechnique*, 55(9), pp. 631-638.
- Rowe, R.K. (2007). Advances and remaining challenges for geosynthetics in geoenvironmental engineering applications, *Soils and Rocks*, 30(1), pp.3-30.
- Rowe, R.K.; Rimal, S. & Sangam, H.P. (2009). Ageing of HDPE Geomembrane Exposed to Air, Water and Leachate at Different Temperatures, *Geotextiles and Geomembranes*, 27, pp. 137-151.
- Ruiz Caballero (2005). Puesta en obra de los geosintéticos, *I Simposio nacional sobre proyecto, construcción e impermeabilización de balsas*, 21 p. (CD-ROM).
- Sarsby, R. W. (2007). *Geosynthetics in Civil Engineering*, Published by Woodhead Publishing Limited in association with The Textile Institute, 295 p.
- Scheirs, J. (2009). *A guide to polymeric geomembranes: a practical approach*. John Wiley & Sons. Ltd., 572 p.
- Sharma, H. D. & Lewis, S. P. (1994). *Waste containment systems, waste stabilization, and landfills. Design and evaluation*. John Wiley & Sons, Inc, New York.

- Smith, M.E. & Giroud, J.P. (2000). *Influence of the direction of ore placement on the stability of ore heaps on geomembrane-lined pads*, Chapter 49 of *Slope Stability in Surface Mining*, W.A. Hustrulid, M.K. McCarter and D.J.A. van Zyl (Editors), Society of Mining, Metallurgy and Exploration, Inc. (SME), Littleton, CO, pp. 435 – 438.
- Smith, M.E. (2008). Emerging issues in heap leaching technology, *Proceedings of 4th European Geosynthetics Conference*, Edinburgh, United Kingdom, 7 p.
- Stemson, M.L. & Smith, M.E. (2009). The development of nickel laterite heap leach projects, *Proceedings of ALTA 2009 Nickel/Cobalt Conference*, ALTA Metallurgical Services, Perth, Australia, 20 p.
- 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. (2010). Optimization of anchor trench design for solar evaporation ponds, *9th International Conference on Geosynthetics*, Brazil, pp.963-966 (CD-ROM).
- Thiel, R.; Beck, A. & Smith, M. (2005). The value of geoelectric leak detection services for the mining industry, *Geofrontiers Conference Proceedings*, USA.
- Thiel, R.S. & Smith, M.E. (2004). *State of the practice review of heap leach pad design issues*, *Geosynthetics* 25(2), Industrial Fabrics Association International (IFAI), 17 p.
- Touze-Foltz, N. (2009). Outstanding issues regarding the use of geosynthetics in landfills, *3^oSeminário Português sobre Geossintéticos*, Coimbra, Portugal, 21p. (CD-ROM).
- Touze-Foltz, N.; Buessard, J.; Didier, G.; Norotte, V.; Mazzoleni, G. & Mahuet, J.L. (2009). Influence of prehydration without load on hydraulic performance of Geosynthetic Clay Liners, *Proceedings of GeoAfrica*, 10 p. (CD-ROM).
- Touze-Foltz, N.; Lupo, J. & Barroso, M. (2008). Geoenvironmental applications of geosynthetics, Keynote paper, *Proceedings of EuroGeo 4*, Edinburgh, Scotland, 98p. (CD-ROM).
- Vertemati, J.C. (2004). *Manual Brasileiro de Geossintéticos*, Editado por Edgard Blucher, Brasil, 413 p.
- Watkins, R.K. & Reeve, R.C. (1979). Structural performance of buried corrugated polyethylene tubing, *30th Annual Highway Geology Symposium*, FHA, Portland, USA, 12 p.
- Yako, M.A.; Koerner, G.R.; Koerner, R.M. & Hsuan, Y.G. (2010). Case History of a 20-year old exposed HDPE surface impoundment liner, *Proceedings of 9th International Conference on Geosynthetics*, Brazil, pp.805-808(CD-ROM).
- 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).
- Zornberg, J.G., & Christopher, B.R. (2007). Chapter 37: Geosynthetics.” In: *The Handbook of Groundwater Engineering*, 2nd Edition, Jacques W. Delleur (Editor-in-Chief), CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, Florida, USA.