
EXPERIÊNCIA NA MONITORIZAÇÃO DE GEOMEMBRANAS EM ÁTERROS SANITÁRIOS

Lopes, M.G., Civil Engineering Ph. D. – ISEL - Portugal – glopes@dec.isel.pt

Barroso, M, Civil Engineering Ph. D. – LNEC - Portugal - mbarroso@lneec.pt

Ramízio, P, Civil Engineering Ph. D. – UM - Portugal - pramisio@civil.uminho.pt

RESUMO

Nos aterros sanitários as geomembranas têm como função principal garantir uma barreira à fuga de lixiviados. Para cumprir essa função é necessário garantir a integridade física das geomembranas face às solicitações a que são sujeitas. Estudos realizados por inúmeros autores (Laine & Darilek (1993), Colucci & Lavagnolo (1995), Nosko *et al.* (1996), McQuade & Needham (1999), Nosko & Touze-Foltz (2000)) permitiram concluir que cerca de 98% dos danos observados em geomembranas utilizadas no confinamento de aterros sanitários ocorrem durante o período de construção. Destes 25% ocorrem durante a colocação da geomembrana e ligação dos painéis, 73% durante a colocação da camada drenante sobrejacente à geomembrana e só cerca de 2% ocorrem durante a fase de operação do aterro. Os danos mais recorrentes estão relacionados com soldaduras defeituosas e com orifícios por punçoamento da geomembrana, devido a fragmentos rochosos angulosos aquando da colocação da camada drenante. É por isso, da máxima importância fazer uma supervisão cuidada dessas operações, mas também uma adequada monitorização da geomembrana para garantir que possíveis danos nos painéis e soldaduras sejam detetados e reparados atempadamente, de modo a não porem em risco a sua funcionalidade de barreira. A monitorização passa pela realização de ensaios para a determinação da estanqueidade dos painéis da geomembrana e ensaios de estanqueidade e de resistência mecânica das soldaduras entre os painéis da geomembrana. Para monitorizar a estanqueidade da geomembrana, após a colocação e ligação dos seus painéis, costumam-se usar ensaios destinados a detetar fugas de fluidos, ou seja, aqueles que afetam a geomembrana em toda a sua espessura. Para monitorizar a integridade das soldaduras é comum efetuarem-se dois tipos de ensaios, um para avaliar a resistência ao arranque e corte (sobre amostras cortadas nas soldaduras existentes) e outro para averiguar a perda de estanqueidade (realizados ao longo de todo o comprimento das soldaduras).

Neste artigo pretende-se mostrar a experiência portuguesa acumulada desde 1997 na monitorização de geomembranas em aterros sanitários, nomeadamente no que se refere às técnicas utilizadas e às dificuldades encontrados e ainda retirar alguns ensinamentos práticos para o futuro.

Palavras-chave: monitorização, aterros sanitários, geomembranas, ensaios destrutivos e não destrutivos.

INTRODUÇÃO

As geomembranas em polietileno de alta densidade (PEAD) são cada vez mais utilizadas como barreira à fuga de lixiviados nos aterros sanitários, sendo o seu bom desempenho fundamental para a eficácia do funcionamento dos sistemas de confinamento dos aterros sanitários. A experiência tem demonstrado que, na generalidade, a produção em fábrica das geomembranas é sujeita a um controlo de qualidade rigoroso não constituindo assim uma fonte de problemas para o seu desempenho. Por outro lado tem-se constatado que o desempenho das geomembranas é muito influenciado pelo seu modo de instalação e dos materiais subjacentes e suprajacentes, verificando-se os principais danos na geomembrana durante a fase de construção do aterro sanitário. É por isso, da máxima importância, não só uma supervisão cuidada das operações de seleção, transporte, armazenamento e colocação em obra das geomembranas, mas também a sua monitorização para garantir que possíveis danos nos painéis e soldaduras são detetados e reparados, de modo a não porem em risco a funcionalidade de barreira da geomembrana.

Neste artigo pretende-se mostrar a experiência portuguesa acumulada desde 1997 na monitorização de geomembranas em aterros sanitários, nomeadamente no que se refere às técnicas utilizadas e às dificuldades encontrados e ainda retirar alguns ensinamentos para o futuro.

DANOS NAS GEOMEMBRANAS

Os danos existentes nas geomembranas podem ocorrer por deficiente fabrico da geomembrana ou resultarem das atividades de construção ou exploração do aterro. No Quadro 1 mostram-se exemplos dos vários tipos de danos que a geomembrana pode sofrer durante a fase de fabrico e durante a construção e exploração do aterro, bem como as possíveis causas.

Quadro 1 Geomembranas: Tipos de Danos e Possíveis Causas (adaptado de McQuade e Needham, 1999)

	tipo de operação	tipo de dano	causas/ comentários
	fabrico	pequenos orifícios, variação de espessura, baixa resistência ao “stress cracking”	resina de má qualidade (pouco comum se existir controlo de qualidade de fabrico adequado)
construção	transporte	sulcos, cortes, rasgos, furos, roturas	equipamento de transporte, carga e descarga e locais de armazenamento inadequados
	colocação	sulcos, cortes, orifícios, rasgos	arrastamento dos rolos, rebarbação descuidada dos painéis, superfície subjacente inadequada, utilização menos própria de equipamentos sobre os painéis, vento, rugas, dobras
	soldadura	cortes, sobreaquecimento, incisões, descolagem, rugas	rebarbação descuidada dos bordos, velocidade e temperatura de soldadura incorretas, excessiva pressão dos rolos, zona de soldadura suja ou molhada
	colocação da camada drenante sobrejacente	rasgos, cortes, sulcos, orifícios, tensões na geomembrana	insuficiente proteção da geomembrana, ação dos equipamentos de movimentação de terras, contração da geomembrana devido a redução da temperatura, inadequada espessura mínima da 1ª camada de material drenante, ou dimensões inadequadas das partículas
	exploração	orifícios, rasgos, sulcos, roturas	punçoamento devido à deposição de resíduos, rotura de soldaduras de baixa resistência, tensões causadas por assentamento dos resíduos ou assentamentos diferenciais na base

Inúmeros autores têm efetuado estudos com o objetivo de verificar o tipo, localização, dimensão, frequência e causa dos orifícios nas geomembranas, nomeadamente Laine & Darilek (1993), Colucci & Lavagnolo (1995), Nosko et al. (1996), McQuade & Needham (1999), Nosko & Touze-Foltz (2000),

entre outros. Destes estudos pode concluir-se que cerca de 98% dos danos observados em geomembranas utilizadas no confinamento de aterros de resíduos ocorrem durante o período de construção. 25% dos danos ocorrem durante a colocação da geomembrana e ligação dos painéis, 73% durante a colocação da camada drenante sobrejacente à geomembrana e só cerca de 2% ocorrem durante a fase de operação do aterro (Figura 1).



Figura 1 Geomembranas: percentagem e causas dos danos

O número e tipo dos defeitos estão relacionados com a qualidade do material da camada subjacente, da qualidade do material da camada sobrejacente, da qualidade da instalação da geomembrana e da fiscalização dessas operações. Mesmo que seja implementado um bom controlo de qualidade durante as operações de colocação da geomembrana, Snow *et al.* (1999) relata uma densidade média de 2,8 orifícios/ha após a colocação da geomembrana e 11,9 orifícios/ha após a colocação da camada de drenagem. Os danos mais recorrentes estão relacionados com soldaduras defeituosas e com orifícios por punçoamento da geomembrana, devido a fragmentos rochosos angulosos aquando da colocação da camada drenante.

Para monitorizar a geomembrana com o objetivo de detetar este tipo de danos foram por um lado desenvolvidos métodos para verificar a estanqueidade e resistência das soldaduras e por outro lado métodos para detetar e localizar orifícios nos painéis da geomembrana que serão objeto da secção seguinte.

MONITORIZAÇÃO DAS GEOMEMBRANAS

ENSAIOS DE CONTROLO DA ESTANQUEIDADE E RESISTÊNCIA DAS SOLDADURAS

Nos aterros sanitários, as uniões entre os diferentes painéis de geomembranas de PEAD podem ser efetuadas por extrusão e por termofusão.

Nas soldaduras por extrusão há deposição de material, obtido por extrusão de um cordão do mesmo polímero da geomembrana, a temperatura elevada, na borda do painel da geomembrana superior (Figura 2).

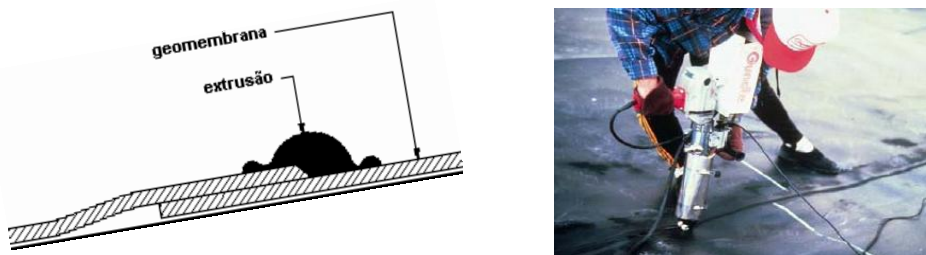


Figura 2 Soldadura por Extrusão

Nas soldaduras por termofusão aquece-se as geomembranas superior e inferior, através de uma cunha metálica quente ou por insuflação de ar quente e auxílio de uma pressão mecânica de rolos compressores.

As soldaduras por termofusão podem ser simples (figura 3a) ou duplas (Figura 3b), mas normalmente recorre-se a soldaduras por termofusão duplas, procurando assim diminuir a probabilidade de perda de estanqueidade, pois, neste caso é necessário que a soldadura em ambos os lados seja defeituosa, para haver fuga de lixiviados. Por outro lado, também, só as soldaduras por termofusão duplas permitem monitorizar a estanqueidade da soldadura, através da injeção de ar sob pressão no canal existente entre as duas zonas de soldadura (Figura 3b).

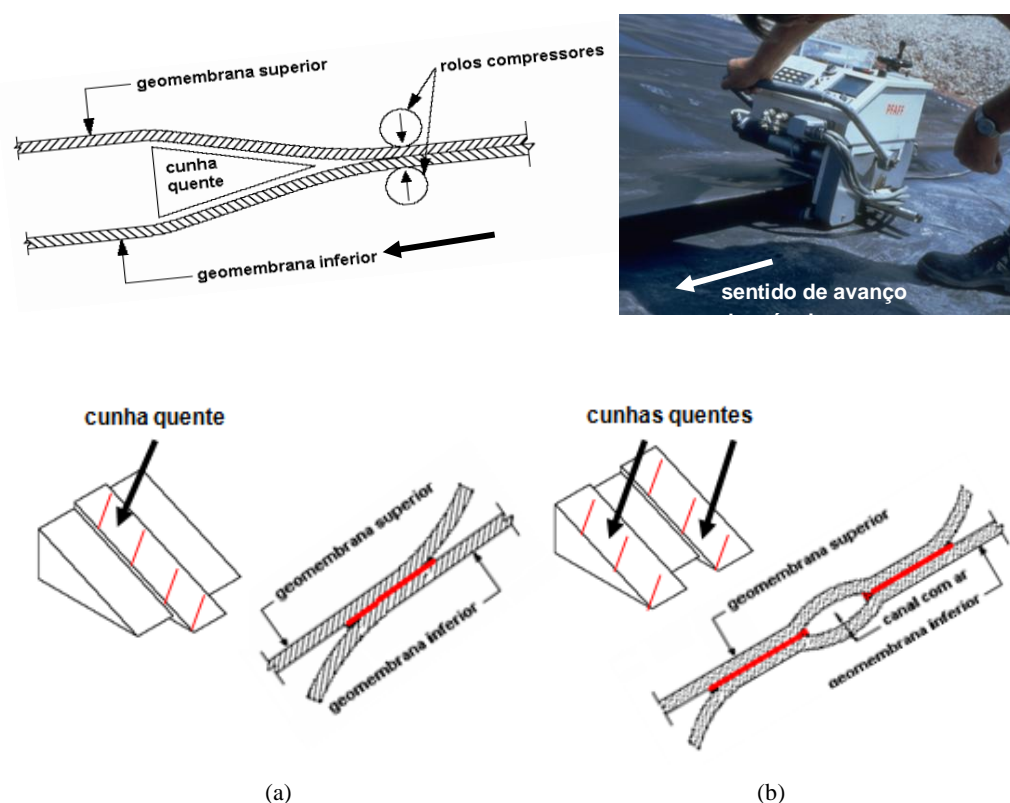


Figura 3 Soldaduras por Termofusão Simples (a) e Dupla (b) (adaptado de Steel Dragon Enterprise CO, 2001)

Ensaio de Controlo da Estanqueidade das Soldaduras

Para a verificação da estanqueidade das soldaduras são realizados ensaios (não-destrutivos) de pressão de ar (para as soldaduras duplas por termofusão) e ensaios com o fio de cobre (para as soldaduras por extrusão). Estes ensaios são realizados ao longo de todo o comprimento da soldadura e para todas as soldaduras.

O ensaio de pressão de ar (*Pressurized Air Channel Evaluation of Dual Seamed Geomembranes test*) realiza-se segundo a norma ASTM D5820 (2011) e consiste em injetar, com uma agulha, uma determinada pressão (dependente da espessura da geomembra, ver Quadro 2) no canal existente nas soldaduras de termofusão duplas (Figura 4a) e verificar se existe estabilização da pressão ou se ocorre uma queda de pressão inferior ao valor máximo admissível indicado no Quadro 2, durante 5 minutos.

De referir que se a pressão permanecer estável esse facto não é por si só condição suficiente para se considerar que a soldadura está estanque. Tem seguidamente de se efetuar um pequeno orifício na geomembrana superior, no extremo oposto àquele em que se inseriu a agulha na soldadura e verificar se o ar sai livremente por esse orifício ao mesmo tempo que a pressão desce no manómetro. Só após esta

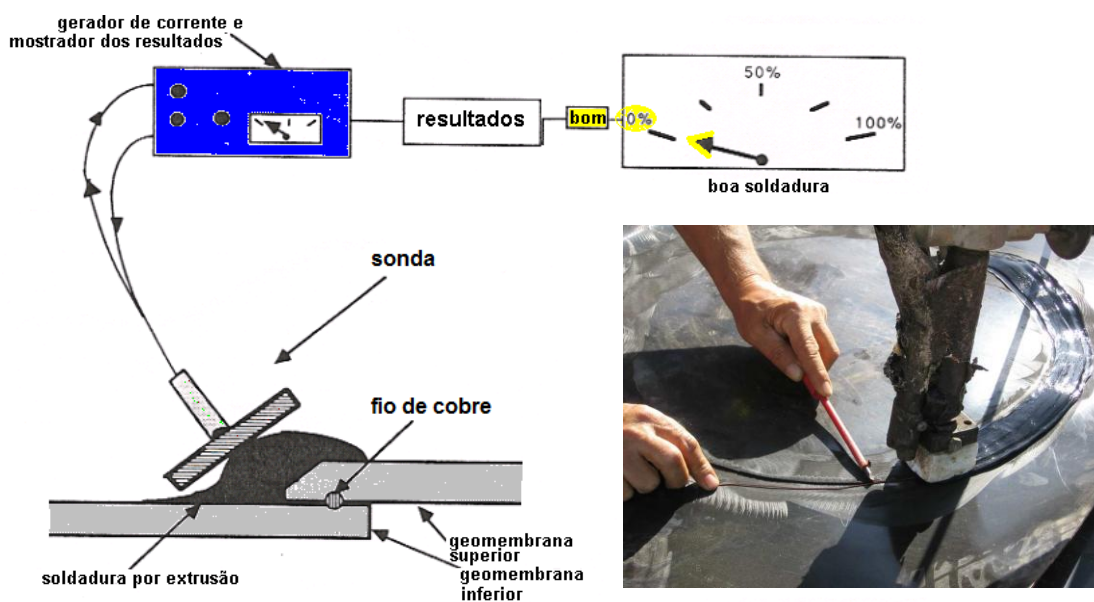
verificação se pode considerar que a soldadura está estanque. Chama-se a atenção de que se a pressão não descer no manómetro é porque existe uma obstrução, sendo necessário localizá-la e repetir o ensaio na zona a seguir à obstrução.

Quadro 2 Gama de Pressões para Geomembranas de PEAD Lisas e Texturadas (baseado em Recomendações IGS-Brasil, 2003)

espessura da GM (mm)	pressão máxima (kPa)	pressão máxima (kPa)	queda máxima de pressão admissível (kPa)
1,0	165	205	28
1,5	185	240	21
2,0	205	240	14
2,5	205	240	14



(a)



(b)

Figura 4 Ensaio Não - Destrutivos de Pressão de Ar (a) e do Fio de Cobre (b) (adaptado de Koerner e Lord Jr., 1990)

O ensaio do fio de cobre (*spark test*) realiza-se segundo a norma ASTM D6365 (2011), sendo necessário para a sua realização a introdução de um fio de cobre na zona de sobreposição das geomembranas superior e inferior durante a realização da soldadura (Figura 4b). As duas extremidades do

fio de cobre são depois retiradas da área de soldadura para serem sujeitas a uma corrente elétrica. 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 o mostrador do voltímetro registar um aumento brusco do sinal, significa que a soldadura pode estar defeituosa.

Deve ter-se em atenção que os resultados podem ser afetados pela existência de humidade na superfície inferior da geomembrana.

Os problemas de estanqueidade verificados deveram-se a vários factores: condições meteorológicas adversas (temperaturas muito baixas ou muito altas e chuva) e erros humanos. Os erros humanos mais comuns foram nomeadamente: (i) inexperiência dos soldadores, nomeadamente dificuldade das equipas de efectuarem soldaduras em “T”; (ii) esquecimento de selar os orifícios deixados após realizar os ensaios não-destrutivos de pressão de ar; (iii) dificuldade em efectuar soldaduras na zona de junção a tubos; (iv) existência de rugas ou dobras na zona da soldadura; (v) desrespeito pela sobreposição mínima entre painéis; (vi) fusões deficientes por sobreaquecimento e (vii) utilização de pressões demasiado elevadas nos ensaios das soldaduras duplas de fusão.

Nos locais onde os resultados dos ensaios (não – destrutivos) não foram satisfatórios, ou que um defeito foi detectado, fez-se um remendo, ou removeu-se a soldadura e substituiu-se por uma faixa de geomembrana, (soldada em ambos os lados por termofusão) ou ainda reforçou-se a junta com uma soldadura por extrusão, sendo esta a solução de último recurso.

Ensaio de Avaliação da Resistência Mecânica das Soldaduras

Para a verificação da resistência mecânica das soldaduras são realizados ensaios (destrutivos) de arranque (*peel test*) e de corte (*shear test*), segundo a norma ASTM D 6392 (2012). O princípio do ensaio é simples, consistindo em tracionar, a velocidade preconizada (50 mm/min para geomembranas de PEAD), cada provete conforme é indicado na Figura 5, respetivamente para o ensaio de arranque e corte.

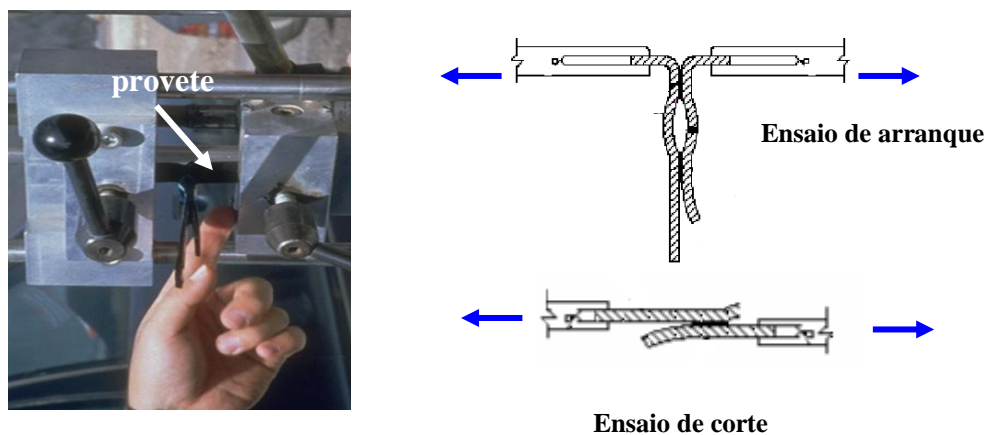


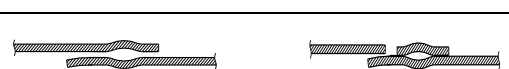

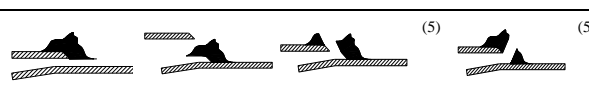
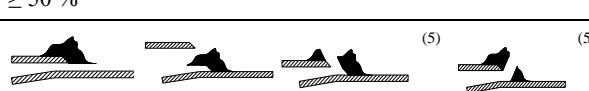
Figura 5 Ensaio Destrutivos de Arranque e Corte

No ensaio de arranque procura-se avaliar a resistência da soldadura (Peggs & Little, 1985). No ensaio de corte procura-se avaliar de que forma o processo de soldadura afeta a resistência da geomembrana adjacente à soldadura (Peggs, 1990).

Tendo por base os resultados obtidos nos ensaios destrutivos, vários critérios de aceitação/rejeição de soldaduras de geomembranas de PEAD têm sido desenvolvidos, nomeadamente por Haxo e Kamp (1990), NSF (1983), Peggs e Rollin (1984), Rollin *et al* (1991) e GRI-GM19 (2002), não havendo ainda consenso sobre o critério que melhor qualifica as soldaduras em termos de resistência mecânica.

Para os aterros sanitários construídos no nosso país tem-se seguido os critérios de aceitação/rejeição desenvolvidas pelo GRI–GM19 (2002) que preconiza para para soldaduras de geomembranas de PEAD com 2 mm de espessura os valores indicados no Quadro 3.

Quadro 3 Critérios de aceitação/rejeição recomendados pelo GRI–GM 19 (2002) para soldaduras de geomembranas de PEAD com 2 mm de espessura (Barroso e Lopes, 2008)

Soldadura	Ensaio	parâmetro	Critérios de aceitação para soldaduras de geomembranas de PEAD com 2 mm de espessura
termofusão	arranque	resistência ao arranque	4 provetes com resistência ao arranque $\geq 21,2$ N/m ⁽¹⁾ e 1 provete com resistência ao arranque $\geq 17,0$ kN/m
		separação	$\leq 25\%$
		tipos de rotura inadmissíveis	 ⁽²⁾
	corte	resistência ao corte	4 provetes com resistência ao corte $\geq 28,1$ kN/m ⁽³⁾ e 1 provete com resistência ao corte $\geq 22,5$ kN/m
		Extensão na rotura	$\geq 50\%$
		tipos de rotura inadmissíveis	 ⁽²⁾
Extrusão	arranque	resistência ao arranque	5 provetes com resistência ao arranque $\geq 18,2$ kN/m ⁽⁴⁾ e 1 provete com resistência ao arranque $\geq 14,6$ kN/m
		separação	$\leq 25\%$
		tipos de rotura inadmissíveis	 ⁽⁵⁾ ⁽⁵⁾
	corte	resistência ao corte	4 provetes com resistência ao corte $\geq 28,1$ kN/m ⁽³⁾ e 1 provete com resistência ao corte $\geq 22,5$ kN/m
		Extensão na rotura	$\geq 50\%$
		tipos de rotura inadmissíveis	 ⁽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, exceto se os valores da resistência forem satisfatórios.

A verificação da resistência das soldaduras é avaliada estatisticamente, através de ensaios realizados sobre amostras cortadas nas soldaduras existentes e a posterior reparação daquelas zonas de soldadura com um remendo (da mesma geomembrana) de forma arredondada nos cantos e numa área que exceda pelo menos 0,15 m para cada lado da amostra retirada, e subsequente união por extrusão à geomembrana (figura 6). Depois, são realizados ensaios não-destrutivos para comprovação da estanqueidade da nova soldadura efetuada.

O facto das soldaduras por fusão, serem substituídas, na zona do remendo, por soldaduras por extrusão, comprovadamente de pior qualidade, tem criado grande polémica sobre se a realização dos ensaios destrutivos traz mais benefícios ou inconvenientes. Até porque o remendo e a rigidez da soldadura por extrusão introduzirem pontos de maior concentração de tensões, sob carga, para além de se questionar se o ensaio de arranque simula as solicitações de serviço. Mas a polémica sobre estes ensaios estende-se ainda à localização das amostras e frequência de amostragem. Embora em muitos países ser

comum a frequência de amostragem ser da ordem dos 150 m, nos aterros sanitários portugueses a localização das amostras e frequência da amostragem é definida pela fiscalização, com o acordo do dono de obra, em função da qualidade das soldaduras evidenciada pelo instalador, que não saberá *à priori* os locais onde se fará a amostragem. Tem-se ainda recomendado que o ensaios destrutivos sejam em número reduzido e retiradas em locais não críticos, por exemplo na vala de ancoragem, no fim ou princípio da soldadura, ou em locais onde já seja previsível haver necessidade de se efetuar remendos, obviamente sem prejuízo da recolha de amostras em todos locais considerados suspeitos.



a) corte da amostra b) remendo

Figura 6 Corte da Amostra e Respetivo Remendo

Muitos problemas de deficiência de resistência verificados deveram-se nomeadamente aos seguintes fatores: (i) esquecimento de retirar a banda protectora de sujidade existente no bordo do painel de algumas geomembranas ou existência de sujidade ou humidade na zona de soldadura; (ii) dificuldade em efetuar soldaduras na zona de junção a tubos; (iii) dificuldade em efetuar soldaduras entre geomembranas exturadas e lisas; (iv) dificuldade em efetuar soldaduras entre geomembranas colocadas em diferentes fases diferentes de construção; (v) existência de rugas ou dobras na zona da soldadura; (vi) desrespeito pela sobreposição mínima entre painéis e (vii) utilização de cordões de extrusão de um polietileno com características diferentes da utilizada na geomembrana.

Um aspeto importante a ter em consideração é que tanto nos ensaios de arranque como nos ensaios de corte, quando a temperatura de ensaio é superior à preconizada pela norma (23 °C) os valores da resistência são inferiores aos que se obtêm quando se realiza o ensaio à temperatura de 23 °C. Pelo contrário, quando a temperatura de ensaio é inferior à preconizada pela norma os valores da resistência são superiores aos que se obtêm quando se realiza o ensaio à temperatura de 23 °C. A título de exemplo veja-se na figura 7 o que pode acontecer (no inverno) quando os ensaios de arranque são realizados *in situ* a uma temperatura mais baixa que a preconizada pela norma de ensaio.

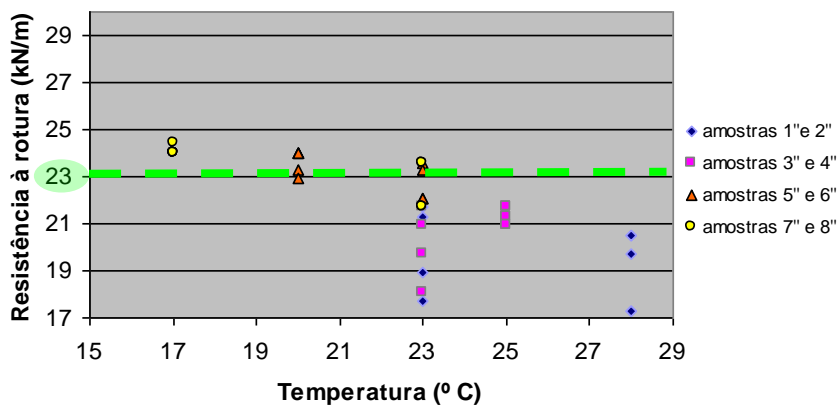


Figura 7 Ensaio de Arranque: Variação da Resistência à Rotura com a Temperatura

Se *in situ* os ensaios fossem realizados à temperatura de 17 °C, como os resultados da resistência à rotura obtidos são superiores ao valor mínimo admitido pelo critério adoptado (23 kN/m), decidir-se-ia pela aceitação da soldadura, o que seria incorrecto pois à temperatura preconizada pela norma (23 °C) obtêm-se valores inferiores ao mínimo recomendado.

Com base nos resultados apresentados, será aconselhável que a temperatura de realização dos ensaios *in situ* tenha um valor próximo do preconizado na norma de ensaio ou, em alternativa, que seja obtido em laboratório o valor de resistência mínima aceitável correspondente à temperatura para a qual se vão realizar os ensaios.

ENSAIOS PARA DETECÇÃO E LOCALIZAÇÃO DE ORIFÍCIOS NOS PAINÉIS DA GEOMEMBRANA

Os ensaios (não-destrutivos) desenvolvidos para verificar a estanqueidade da geomembrana, após a colocação e ligação dos seus painéis, destinam-se só a detetar danos (resultantes das operações de construção) que impliquem a subsequente fuga de fluidos, ou seja, aqueles que afetam a geomembrana em toda a sua espessura. Estes métodos de ensaio podem ser permanentes ou temporários e destes últimos alguns aplicam-se só para geomembranas cobertas e outros para geomembranas não cobertas.

Ensaio Permanente (para geomembranas cobertas e não cobertas)

O ensaio (*grid test*) realiza-se segundo a norma ASTM D 6747 (2012) e utiliza um sistema com sensores fixos/permanentes para deteção e localização de orifícios em geomembranas antes e após a sua cobertura. Para a realização destes ensaios, antes da colocação da geomembrana, é necessária a colocação no solo, a pequena profundidade, de uma rede de sensores, segundo uma quadrícula pré-definida (fixa/permanente). Cada sensor é ligado através de um cabo elétrico a um aparelho de aquisição de dados, situado na proximidade da obra. Depois da colocação da geomembrana (ou após a a sua cobertura com a camada drenante) instala-se um gerador de corrente elétrica ao qual se ligam dois eléctrodos, um colocado acima da geomembrana e outro (o eléctrodo terra) colocado no solo de fundação. Quando uma corrente elétrica é aplicada, a densidade de corrente sob a geomembrana pode ser medida pelos diferentes sensores. Qualquer perfuração da geomembrana provoca uma anomalia na distribuição da densidade da corrente elétrica (Figura 8).

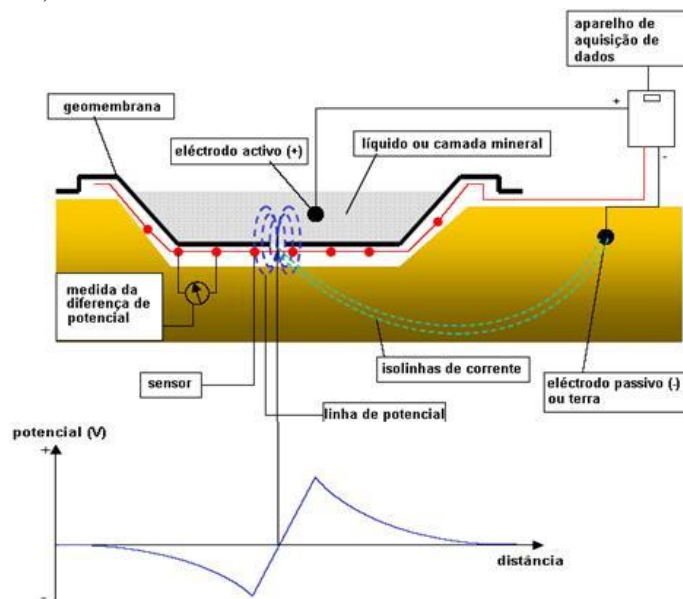


Figura 8 Esquema do Ensaio que Utiliza um Sistema de Sensores Fixos para Deteção e Localização de Orifícios na Geomembrana (CFGG, 2003)

Através de um *software* específico podem localizar-se os orifícios da geomembrana 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 1 m. A área máxima de ensaio não deve ser superior a 10 000 m² (compreendendo em média entre 130 a 200 sensores), sendo necessário entre 5 e 12 minutos para se efetuarem 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. A principal desvantagem deste método relaciona-se com a necessidade de colocação prévia da rede de sensores no solo. A grande vantagem é permitir a realização de ensaios não só antes e após a cobertura da geomembrana, mas também durante o período de exploração do aterro, apesar de neste período já ser difícil implementar medidas corretivas, caso sejam detetados orifícios na geomembrana.

Ensaio Temporários

Começando pelos ensaios de verificação da estanqueidade da geomembrana a realizar antes da sua cobertura tem-se o ensaio do jacto ou da poça de água, para geomembranas não condutoras e o ensaio da geomembrana condutora, exclusivamente usado para este tipo de geomembranas.

– Ensaio da poça de água e do jacto de água (para geomembranas não cobertas) –

No caso dos ensaios da poça de água e do jacto de água (*water puddle* e *water lance tests*), realizados respetivamente segundo as normas ASTM D 7002 (2010) e ASTM 7703 (2011), é necessário utilizar dois eléctrodos, um passivo ligado ao subsolo e outro ligado ao jacto de água ou à ferramenta usada para espalhar a água. Os dois eléctrodos são ligados a um gerador de corrente contínua (entre 12 e 24 V). Se a água entrar em contacto com o solo carregado negativamente, devido à existência de um orifício, o circuito fecha-se aumentando o sinal eléctrico. Um sinal sonoro avisa o operador da existência do defeito (Figura 9).

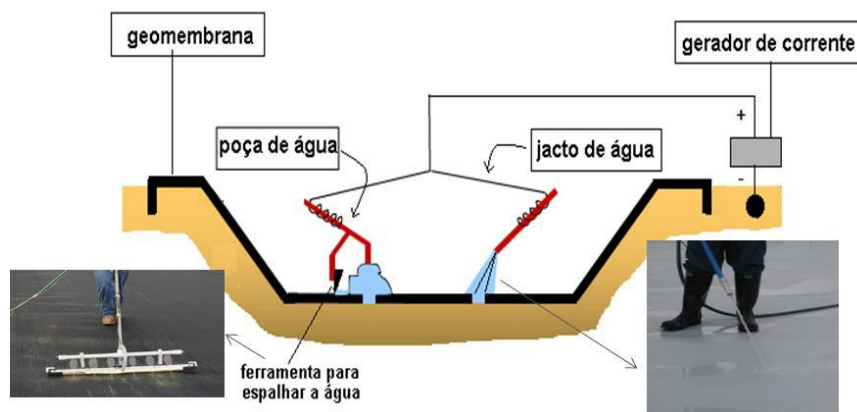


Figura 9 – Esquema do Ensaio da Poça de Água e do Jacto de Água (adaptado de CFGG, 2003)

A velocidade de prospeção é da ordem dos 500 m²/hora por operador, podendo detetar-se orifícios da ordem do milímetro.

A vantagem deste método de ensaio é que a existência de orifícios maiores não mascara a existência de outros mais pequenos. Uma limitação é que este ensaio só pode ser realizado em geomembranas não cobertas e desde que o material em contacto com a sua superfície inferior seja condutor, a existência, por exemplo, de geogrelhas, geossintéticos bentoníticos ou uma argila muito seca, pode comprometer os resultados das medidas. Por outro lado a presença de rugas na geomembrana ou ainda, taludes íngremes

podem diminuir a velocidade do ensaio. Este ensaio também não pode ser realizado durante o tempo chuvoso.

– Ensaio da geomembrana condutora (para geomembranas cobertas e não cobertas) –

Neste ensaio (*electrically conductive geomembrane test*) é necessário utilizar uma geomembrana com uma camada inferior condutora fina (com cerca de 0,1 mm). Essa camada consegue ser eletricamente condutora por possuir um elevado teor em negro de carbono. Este ensaio realiza-se de acordo com a norma ASTM D 6747 (2012), começando por carregar uma placa condutora de neoprene, colocada na superfície superior da geomembrana, com uma tensão entre 15 a 30 kV. A carga é transferida para a camada condutora da geomembrana através do efeito capacitivo. De seguida, com a ajuda de uma vassoura elétrica faz-se a prospeção da superfície superior não condutora da geomembrana. Quando existe um orifício estabelece-se uma corrente, gerando uma faísca e/ou um sinal sonoro (Figura 10).

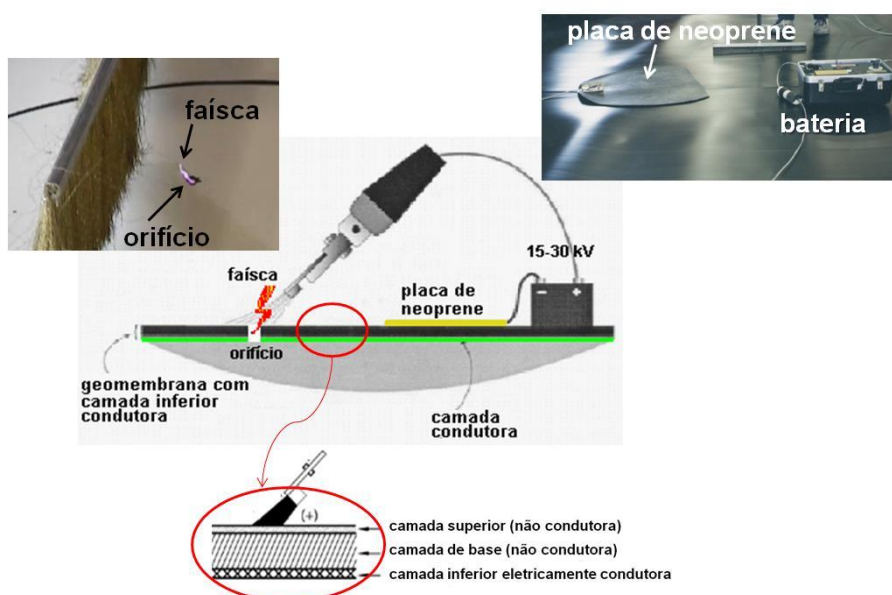


Figura 10 – Esquema do Ensaio da Geomembrana Condutora (adaptado de ASTM D 6747, 2012)

A velocidade de prospeção é da ordem dos 500 a 1500 m²/hora/aparelho por equipa de dois operadores, podendo detetar-se orifícios da ordem do milímetro.

Uma das vantagens deste ensaio é que não é necessário bombear água para a zona de ensaio, aliás a geomembrana tem de estar seca (não devendo realizar-se o ensaio em dias de chuva) e funciona bem para qualquer inclinação dos taludes. Outra vantagem é poder ser utilizado tanto em geomembranas descobertas ou cobertas (desde que a camada esteja seca), mas neste último caso embora se detete o orifício a sua localização é difícil. Uma das vantagens da utilização de geomembranas condutoras é que não é necessário garantir um bom contacto com a camada subjacente à geomembrana, no entanto a realização do ensaio é limitada a este tipo de geomembranas. A presença de rugas na geomembrana pode diminuir a velocidade do ensaio.

– Ensaio da sonda elétrica móvel (para geomembranas cobertas) –

Já se viu que nos aterros sanitários a maior parte dos danos na geomembrana são devidos à colocação da camada drenante e dado que estes não são facilmente detetáveis por a geomembrana já estar coberta, a utilização de métodos de deteção de orifícios para geomembranas cobertas é particularmente importante. Apesar dos custos que envolvem, a sua utilização será sempre mais eficaz e conduzirá a soluções mais

económicas que quaisquer medidas corretivas a realizar, quando, através da monitorização das águas subterrâneas, se concluir haver fugas de lixiviado.

Em geomembranas cobertas pode usar-se o ensaio da geomembrana condutora (só possível para este tipo de geomembranas) e ainda o ensaio da sonda elétrica móvel para as geomembranas não condutoras. Este último é realizado segundo a norma ASTM D 7007 (2009) e utiliza dois eléttodos, um colocado no solo subjacente à geomembrana e outro colocado no material que cobre a superfície superior da geomembrana, de modo a estabelecer-se entre eles uma diferença de potencial. Os dois eléttodos são ligados a um gerador de corrente contínua. Com a ajuda de uma sonda elétrica móvel efetuam-se medidas de potencial elétrico, segundo uma malha pré-definida. 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 eléttodo, 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 (Figura 11).

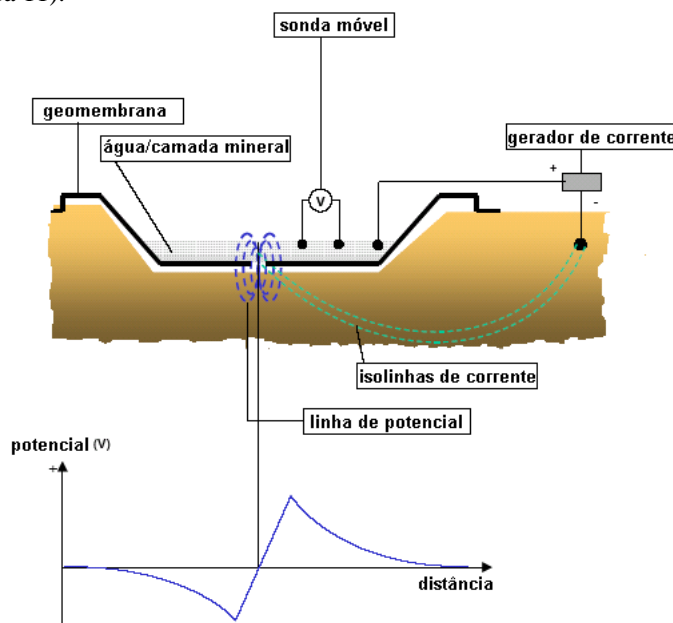


Figura 11 – Esquema do Ensaio da Sonda Elétrica Móvel (CFGG, 2003)

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 prospeção depende do tipo de material que cobre a geomembrana, da geometria do local e das condições meteorológicas, variando entre 400 a 1000 m²/hora por operador, podendo detetar orifícios superiores a 2-3 mm.

A grande vantagem deste ensaio é poder ser realizado, mesmo com tempo chuvoso, em geomembranas (não condutoras) cobertas, sem necessidade de colocação de uma rede de sensores na camada subjacente à geomembrana. Uma limitação do ensaio é que só é possível realizar-se quando os materiais em contacto com as superfícies inferior e superior da geomembrana tenham alguma humidade (1 a 2% do peso é suficiente). No caso da camada subjacente à geomembrana ser uma barreira geossintética argilosa (GCL), basta esta ter um teor em água superior a 10% (valor típico do teor em água natural dos GCL) para se poder realizar o ensaio. Já a existência, por exemplo, de uma argila muito seca, ou de uma geogrelha pode comprometer os resultados das medidas. Outra limitação é que a existência de orifícios maiores pode mascarar a existência de outros mais pequenos.

Muito embora esteja demonstrado que a maior percentagem (73%) de danos em geomembranas aplicadas em aterros sanitários é devida à colocação menos cuidada da camada drenante, em Portugal não é obrigatório a utilização de métodos de detecção de orifícios na geomembrana após a colocação dessa

camada drenante. Apesar dos custos, preconiza-se a sua utilização por ser mais eficaz e conduzir a soluções mais económicas que quaisquer medidas correctivas a realizar, quando, através da monitorização das águas subterrâneas, se concluir haver fugas de lixiviado.

CONCLUSÕES

Tendo presente a experiência acumulada na aplicação de geomembranas em aterros sanitários foi efetuada uma análise dos danos decorrentes das práticas construtivas seguidas, foi realizada uma análise da eficácia dos métodos de monitorização utilizados para as geomembranas e indicadas propostas de alteração no sentido de aumentar a sua proficiência.

Assim de uma forma resumida as alterações propostas foram as seguintes:

- No que respeita aos ensaios não-destrutivos, deve dar-se indicações específicas sobre a sua realização. Para as soldaduras duplas por termofusão, monitorizadas através do ensaio de pressão com ar, o valor da pressão a ser injetado no canal central da soldadura deve ser especificada em função da espessura da geomembrana e temperatura, por forma a evitar danos na soldadura, por excesso de pressão. Para as soldaduras por extrusão, monitorizadas através do ensaio do fio de cobre, cuidados especiais devem ser tomados nas soldaduras efetuadas nas zonas de interseção com tubagens de modo a garantir a sua efetiva realização;

- Relativamente aos ensaios destrutivos, as amostras a cortar para a sua realização devem ser retiradas em locais não críticos, por exemplo na vala de ancoragem, no fim ou princípio da soldadura, ou em locais onde já seja previsível haver necessidade de se efetuar remendos, obviamente sem prejuízo da recolha de amostras em todos locais considerados suspeitos;

- A frequência de amostragem para os ensaios destrutivos deve ser função da qualidade das soldaduras, devendo ser indicada qual a metodologia a seguir para a sua definição;

- A frequência da amostragem para os ensaios destrutivos poderá ser diminuída se forem recolhidos dois provetes no início e no final de cada soldadura extensa, um para ser ensaiado ao arranque e outro ao corte;

- É importante a realização de ensaios de arranque (para se poder avaliar a resistência da soldadura) e de corte (para verificar se a zona adjacente à soldadura foi afetada por esta) e que seja tomada especial atenção à temperatura de ensaio e bem especificados os critérios de rejeição/aceitação das soldaduras;

- Preconiza-se que haja recomendações mais específicas sobre os cuidados a ter na realização da camada drenante, nomeadamente no que respeita ao tipo de equipamento a utilizar para o espalhamento e forma de o efetuar, de modo a não danificar a geomembrana,

- Preconiza-se a obrigatoriedade de se efetuar a monitorização de orifícios nas geomembranas após a colocação da camada drenante, pois a existência de orifícios não reparados pode ter repercussões graves na fuga de lixiviado.

AGRADECIMENTOS

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

REFERENCES

ASTM D 5820 (2011). “Standard practice for pressurized air channel evaluation of dual seamed geomembranes”. American Society for Testing Materials, USA.

ASTM D 6365 (2011). “Standard Practice for the Nondestructive Testing of Geomembrane Seams using the Spark Test”. American Society for Testing Materials, USA.

ASTM D 6392 (2012). “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 (2012). “*Standard Guide for Selection of Techniques for Electrical Detection of Potential Leak Paths in Geomembrane*”. American Society for Testing and Materials, USA.

ASTM D 7002 (2010). “*Standard Practice for Leak Location on Exposed Geomembranes Using the Water Puddle System*”. American Society for Testing and Materials, USA.

ASTM D 7007 (2009). “*Standard Practices for Electrical Methods for Locating Leaks in Geomembranes Covered with Water or Earth Materials*”. American Society for Testing and Materials, USA.

ASTM D 7703 (2011). “*Standard Practice for Electrical Leak Location on Exposed Geomembranes Using the Water Lance System*”. 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. (2011). “*Geossintéticos em engenharia ambiental: desenvolvimentos recentes em materiais e aplicações*”. Atas do 4º Seminário Português sobre Geossintéticos, Aveiro, 22 a 23 de Novembro.

Bouzza, A., Zornberg, J. G. & Adam, D. (2002). “*Geosynthetics in waste containment facilities: recent advances*”. 7th International Conference on Geosynthetics, Nice, França de 21 a 23 de Setembro.

Colucci, P., Lavagnolo, M. C. (1995). “*Three Years Field Experience in Electrical Control of Synthetic Landfill Liners*”. Proceedings of the 5th International Landfill Symposium, Sardinia, Italy, pp. 437-451.

Comité Français des Géosynthétiques (2003). “*Présentation de méthodes de détection et de localisation de défauts dans les dispositifs d'étanchéité par géomembranes*”. 44 pp. www.cfg.asso.fr, acesso em 20/09/2011.

Directive DVS 2225, Parte 4 (1996). “*Soudage de géomembranes en polyéthylène utilisées pour l'étanchéification de décharges d'ordure et des déchets*”. Institut de Soudure.

GRI GM19 (2002). “*Standard specification for seam strength and related properties of thermally bonded polyolefin geomembranes*”. www.geosynthetic-institute.org/grispecs/gm13.pdf, acesso em 20/07/2011.

Gross, B. A., Bonaparte, R. B. & Giroud, J. P. (1990). “*Evaluation of Flow from Landfill Leakage Detection Layers*”. Proceedings of 4th International Conference on Geotextiles, Vol. 2, Haia, Holanda, pp. 481-486.

Haxo H., Kamp L. (1990). “*Destructive Testing of Geomembranes Seams: Shear and Peel Testing of Seam Strength*”. Geotextiles and Geomembranes, vol. n°9, pp 369-404.

Hsuan, Y.G., Koerner, R.M. (1998). “*Antioxidant depletion lifetime in high density polyethylene geomembranes*”. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering vol. 124 n° 6 pp. 532-541.

IAGI (2004). “*Improving Geomembrane Installations*”. White paper, pp. 1-17.

Koerner, R. M. (1998). “*Designing with Geosynthetics*”. 4th Edition, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey.

Koerner, R. M., Lord Jr A. E. (1990) – “*Nondestructive evaluation of geomembrane seams: methods in development*”, Geotextiles and Geomembranes n° 9 (4) pp 431-443.

Laine, D. L., Darilek, G. T. (1993). “*Locating Leaks in Geomembrane Liners of Landfills Covered With a Protective Soil*”. Proceedings of the Geosynthetics '93 Conference, Vol. 3, IFAI, Vancouver, Canada, pp. 1403-1412.

Lopes, M. G. (2006 a). “*A experiência de colocação de geomembranas de PEAD em aterros de RSU*”. Revista Geotecnia n°106, Março, pp. 55-74.

Lopes, M. G. (2006 b). “*Análise dos métodos de controlo de integridade de geomembranas de PEAD usadas em aterros de RSU*”. Revista Geotecnia n°106, Março, pp. 107-131.

Lopes, M. G. (2006 c). “*Problèmes liés a la mise en place de géosynthétiques dans des centres de stockage de déchets ménagers au Portugal*”. Actas dos Rencontres 06–Géosynthétiques, Montpellier, França, 12 a 14 de Junho, pp. 115-122.

McBean, E. A., Rovers, F. A. & Farquhar, G. J. (1995). “*Solid Waste Landfill Engineering and Design*”. Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, New Jersey.

McQuade, S. J., Needham, A. D. (1999). “*Geomembrane liner defects-causes, frequency and avoidance*”. Geotechnical Engineering nº137 pp. 203-213.

National Sanitation Foundation (1983). “*International Standard 54: Flexible membrane liners*”. Ann Arbor, Michigan, USA (revisto em 1985 e 1993).

Nosko, V., Andrezal, T., Gregor, T. & Ganier, P. (1996). “*SENSOR damage detection system (DDS)-the unique geomembrane testing method*”. Proceedings of the 1st European Geosynthetics Conference, Maastricht, pp. 743-748.

Nosko, V., Touze-Foltz, N. (2000). “*Geomembrane liner failure: modelling of its influence on contaminant transfert*”. Proceedings of the 2nd European Geosynthetics Conference, Bologna, vol 2, 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*”. Geotextile and Geomembranes, nº 9, pp. 405-414.

Peggs, I. D., Rollin, A. (1994). “*Seams in HPDE Geomembranes: The Quality Target*”. 5th International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products, pp 949-952.

Recomendações da IGS-Brasil: IGSBR IGMT 01 (2003). <www.igsbrasil.org.br> Portal, consultado em 18 de Dezembro de 2006.

Rollin A. L., Fayoux, Benneton (1991). “*Non destructive and destructive seam testing*”. Geomembranes Identification and performance testing – RILEM – Chapman and Hall.

Rollin A. L., Marcotte M., Chaput L. & Caquel F. (2002). “*Lessons learned from geo-electrical leaks surveys*”. Proceedings of 7th International Conference on Geosynthetics, Nice França, pp. 527-530.

Rowe, R.K., Sangam, H.P. (2002). “*Durability of HDPE geomembranes*”, Geotextiles and Geomembranes vol. nº 20, nº 2 pp. 77-95.

Sharma, H. D., Lewis, S. P. (1994). “*Waste containment Systems, waste stabilization, and landfills. Design and evaluation*”, John Wiley & Sons, Inc, New York.

Snow, M., Bishop, Keenan, R. (1999). “*Case History of Geomembrane Damage Assessement*”. Proceedings of Geosynthetics’99, Vol. 1, Boston, USA, pp. 635-644.

Steel Dragon Enterprise CO, Ltd (2001) – “*Quality Assurance Manual for the installation of flexible membrane lining systems*”. Publicação editada na página da empresa Steel Dragon Enterprise CO, Ltd e consultada em 9 de Novembro de 2001. <[www.steel-dragon.com / literature /manuals / installation_qa_qc_manual.pdf](http://www.steel-dragon.com/literature/manuals/installation_qa_qc_manual.pdf)>.

Thiel, R.; Darilek, G.; Laine D. (2003). “*Cutting holes for testing vs testing for holes*”. GFR, junho/Julho, pp 20–23.