

ANÁLISE DOS MÉTODOS DE CONTROLO DE INTEGRIDADE DE GEOMEMBRANAS DE PEAD USADAS EM ATERROS DE RSU

Analysis of HDPE geomembrane integrity control methods used in MSW landfills

Maria da Graça Alfaro Lopes*

RESUMO – Nos aterros de resíduos sólidos urbanos (RSU), as geomembranas são utilizadas no sistema de confinamento da base e taludes, como barreira à fuga de lixiviados, devendo resistir a agressões químicas e biológicas por parte dos resíduos, lixiviados e biogás, a agressões mecânicas durante a construção (tráfego de obra, colocação de camadas sobrejacentes, etc.) e exploração (peso dos resíduos, assentamentos da fundação, etc.) e ao efeito da exposição aos raios solares, entre outros. Como a eficácia do funcionamento do sistema de confinamento dos aterros de RSU está muito dependente do desempenho das geomembranas e este da sua integridade física, considerou-se importante apresentar os possíveis tipos e origens dos danos a que as geomembranas podem ser sujeitas e fazer uma análise dos métodos mais adequados para a detecção de orifícios e subsequente reparação.

ABSTRACT – Geomembranes are currently used in municipal solid waste landfills (MSW) to act as an effective barrier against leachate migration. Geomembranes should also present a good chemical compatibility with waste and leachate, an adequate mechanical resistance to withstand the stresses often imposed during construction and operation phases and a high resistance to UV degradation. The liner system effectiveness is very dependent of the geomembrane performance, and this one of its physical integrity. Thus, it was considered important to present the possible causes and types of the geomembrane damages and to analyze the most suitable methods for their detection and subsequent repair.

1 – INTRODUÇÃO

A consciencialização da necessidade de preservar a saúde pública, qualidade do meio ambiente e de proteger os solos e recursos hídricos levou a que se tenha optado pela utilização de barreiras múltiplas (naturais e artificiais) na constituição do sistema de confinamento dos aterros de resíduos. Nesses sistemas tem-se assistido a um aumento sistemático da aplicação de geossintéticos, nomeadamente de geomembranas (tecnicamente designadas também por barreiras geossintéticas poliméricas), cujo desempenho é fundamental para garantir o isolamento dos solos envolventes, evitando a entrada de água do exterior sobre os resíduos e minimizando a fuga dos lixiviados.

Dada a importância primordial que a manutenção da integridade física da geomembrana tem no seu desempenho de barreira à migração de fluidos, considerou-se fundamental não só chamar a atenção para os aspectos que podem por em causa essa integridade, nomeadamente os danos a que as geomembranas podem estar sujeitas durante as fases de construção e exploração, mas também fazer uma análise dos métodos mais adequados para a sua detecção e posterior reparação.

*Professora Coordenadora do ISEL. E-mail: glopes@dec.isel.ipl.pt

2 – AS GEOMEMBRANAS UTILIZADAS EM ATERROS DE RSU

As geomembranas são membranas sintéticas de muito baixa permeabilidade, usadas como barreira à migração de fluidos. Nos aterros de resíduos de RSU, as geomembranas são utilizadas no sistema de confinamento da base e dos taludes, com a função de minimizar a fuga de lixiviados e no sistema de cobertura, com a função de controlar a infiltração das águas superficiais (e consequentemente a produção de lixiviado) e evitar a migração não controlada do biogás. Para além de terem de cumprir as funções indicadas, as geomembranas têm ainda de resistir a agressões químicas e biológicas por parte dos resíduos, lixiviados e biogás, a agressões mecânicas durante a construção (tráfego de obra, colocação de camadas sobrejacentes) e exploração (peso dos resíduos, assentamentos da cobertura ou fundação) e ainda ao efeito da exposição aos raios solares, entre outros.

As propriedades das geomembranas necessárias ao cumprimento das funções atrás indicadas dependem dos seus componentes e processo da fabrico. Para além da resina, os outros componentes são os plastificantes, que como o nome indica são utilizados para aumentar a flexibilidade, os fillers, que são pequenas partículas minerais (carbonato de cálcio, por exemplo) utilizadas para aumentar a rigidez, o negro de carbono, que tem por objectivo aumentar a rigidez e retardar a degradação pelos UV, os aditivos, sendo os mais comuns os fungicidas (para evitar o ataque de fungos e bactérias) e os antioxidantes (para evitar a degradação por oxidação). Na Tabela 1 estão indicados os tipos de geomembranas mais utilizadas em aterros de resíduos, os seus principais componentes e propriedades.

Tabela 1 – Tipos de geomembranas mais utilizadas em aterros de resíduos, principais componentes e propriedades (adaptado de Daniel e Koerner (1995)).

Tipo de geomembrana	Componentes (% em peso)					Propriedades
	resina	plastificantes	fillers	negro de carbono	aditivos	
polietileno de alta densidade (PEAD)	95 - 98	0	0	2 - 3	0,25 - 1	<ul style="list-style-type: none"> – a mais alta resistência química e à tracção – boa resistência aos UV(*) e temperatura – satisfatória a boa resistência ao punçoamento
polietileno de baixa densidade (PEBD)	94 - 96	0	0	2 - 3	1 - 4	<ul style="list-style-type: none"> – boa resistência química – boa resistência ao punçoamento e tracção – boa resistência aos UV – boa flexibilidade
policloreto de vinilo (PVC)	50 - 70	25-35	0 - 10	2 - 5	2 - 5	<ul style="list-style-type: none"> – boa resistência química – fraca resistência aos UV – muito boa resistência ao punçoamento – excelente flexibilidade – a mais fácil de colocar
polietileno clorosulfonado (CSPE)	40 - 60	0	40 - 50	5 - 40	5 - 15	<ul style="list-style-type: none"> – boa resistência química – boa resistência aos UV e à temperatura – satisfatória a boa resistência ao punçoamento e rasgamento

(*)especialmente se contiver negro de carbono e antioxidantes

As geomembranas de PEAD têm sido as mais utilizadas no confinamento da base dos aterros de resíduos devido à sua resistência química, mecânica, durabilidade e também por permitirem soldaduras resistentes do ponto de vista mecânico e hidráulico. Estas geomembranas, embora rígidas, têm boas propriedades físicas e conseguem suportar tensões elevadas muitas vezes impostas durante a construção do aterro.

3 – A IMPORTÂNCIA DO CONTROLO DA INTEGRIDADE FÍSICA DA GEOMEMBRANA

Como foi referido, nos aterros de RSU, as geomembranas têm como função principal garantir uma barreira à migração de fluidos. Para cumprir essa função é necessário garantir a integridade física das geomembranas face às solicitações a que ficam sujeitas durante o período de construção e exploração do aterro. É assim da máxima importância identificar os tipos de danos ou defeitos nas geomembranas, as possíveis causas e providenciar os métodos adequados para a sua detecção e reparação atempada, minimizando-se assim a fuga de lixiviados e contaminação dos solos e água subterrânea.

4 – TIPOS DE DANOS OU DEFEITOS NAS GEOMEMBRANAS

Os defeitos existentes nas geomembranas podem ocorrer por deficiente fabrico ou resultarem das actividades de construção e exploração. Outras características, como por exemplo as rugas (Bouzza et al, 2002), devidas à elevada expansão térmica das geomembranas de PEAD e a flutuações da temperatura ambiente durante a sua colocação, podem ainda contribuir para o aumento da fuga de lixiviados (Rowe, 1998). A Tabela 2 mostra exemplos dos vários tipos de defeitos que a geomembrana pode sofrer durante as fases de fabrico, construção e exploração do aterro e as suas possíveis causas.

Dos primeiros estudos apresentados por Nosko et al. (1996) sobre danos (que afectam toda a espessura) das geomembranas, ou seja danos que permitem a fuga de lixiviado, concluiu-se que 25% ocorriam durante a colocação da geomembrana, 73% ocorriam durante a colocação da camada drenante e cerca de 2% ocorriam durante a fase de exploração do aterro (Figura 1).

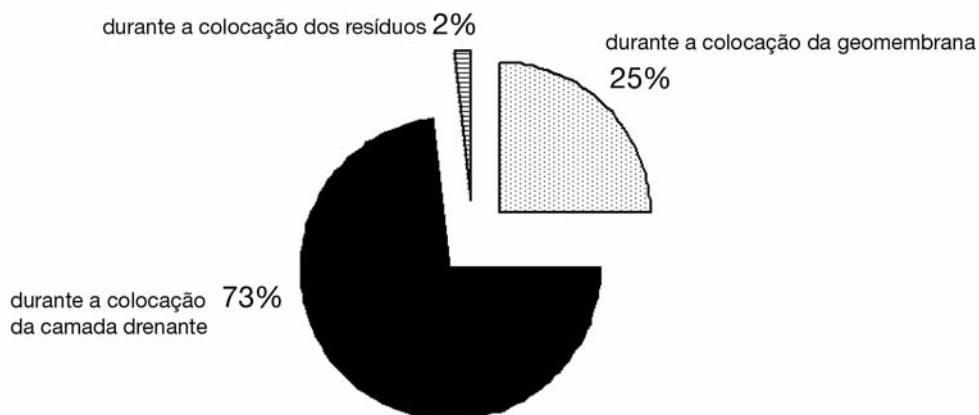


Fig. 1 – Percentagem de danos na geomembrana, consoante o período em que ocorrem

Dos 25% de danos ocorridos durante a colocação da geomembrana, 61% deveram-se a extrusões deficientes, 18% a fusões deficientes por sobreaquecimento, 17% a punçoamentos devido a pedras existentes no solo subjacente e 4% a cortes decorrentes das operações de colocação e ensaios (Figura 2 a).

Tabela 2 – Tipos de defeitos e possíveis causas (adaptado de McQuade e Needham (1999)).

Tipo de operação		Tipo de defeito	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 incorrectas, excessiva pressão dos rolos, zona de soldadura suja ou molhada
	colocação da camada drenante sobrejacente	rasgos, cortes, sulcos, orifícios, tensões na geomembrana	insuficiente protecção da geomembrana, acção dos equipamentos de movimentação de terras, contracção 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

Dos 73% de danos ocorridos durante a colocação da camada drenante, 68% são devidos a pedras angulosas, a inaceitáveis dimensões das partículas constituintes da camada drenante ou a deficiente dimensionamento do geotêxtil de protecção, 16% devido ao equipamento pesado usado para espalhar a camada drenante, sobretudo nos locais onde existiam rugas ou dobras ou inadequado espalhamento e 16% devido à incorrecta utilização do utensílio usado para verificar a espessura da camada drenante (Figura 2 b).

Uma pesquisa mais recente apresentada por Nosko e Touze-Foltz (2000) mostrou que a localização dos danos na geomembrana tinham a seguinte distribuição: 78% na base do aterro, 9% nos cantos, 4% por baixo dos tubos de drenagem, 2% em ligações com tubos e 7% em outros locais (Figura 3).

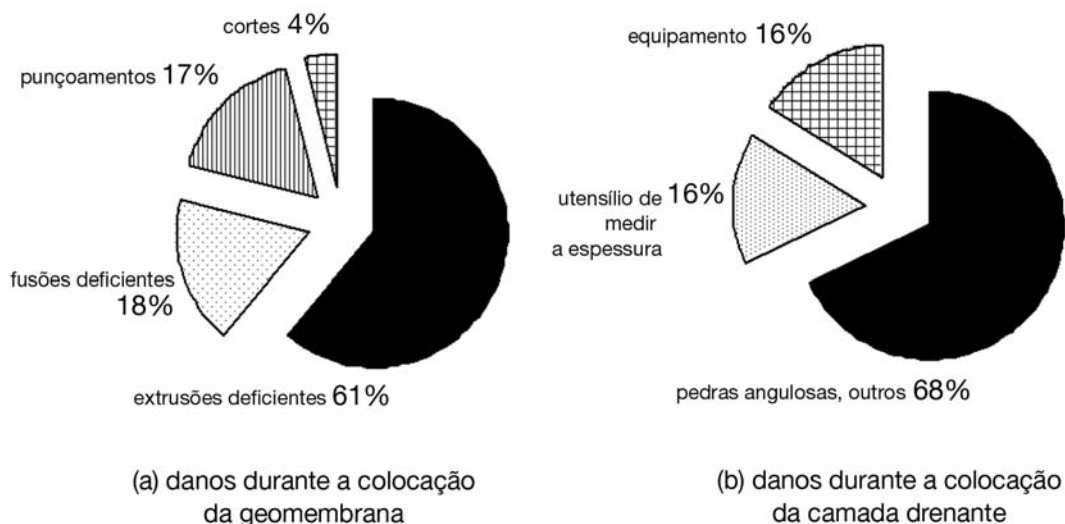


Fig. 2 – Percentagem de danos na geomembrana durante as fases de colocação da geomembrana (a) e camada drenante (b), consoante as causas.

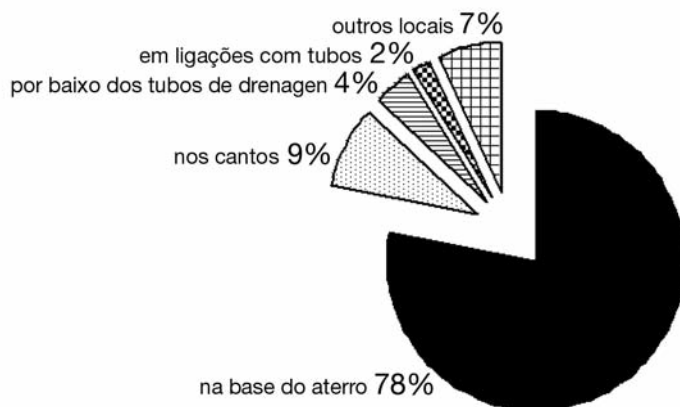


Fig. 3 – Percentagem de danos na geomembrana, consoante a sua localização.

Dos 78% de danos ocorridos na geomembrana colocada na base do aterro, 81% deveram-se a punçoamentos por pedras existentes no solo subjacente, 13% a equipamento pesado, 4% aos trabalhadores, 1% a cortes e 1% a soldaduras deficientes (Figura 4 a).

Dos 9% de danos ocorridos nos cantos deveram-se 59% a punçoamentos por pedras existentes no solo subjacente, 19% a equipamento pesado, 4% aos trabalhadores, 1% a cortes e 17% a soldaduras deficientes (Figura 4 b).

Dos 4% de danos ocorridos por baixo dos tubos de drenagem deveram-se 30% a punçoamentos por pedras existentes no solo subjacente, 14% a equipamento pesado, 15% aos trabalhadores, 14% a cortes e 27% a soldaduras deficientes (Figura 4 c).

Dos 2% de danos ocorridos em ligações com tubos deveram-se 8% aos trabalhadores, 1% a cortes e 91% a soldaduras deficientes (Figura 4 d).

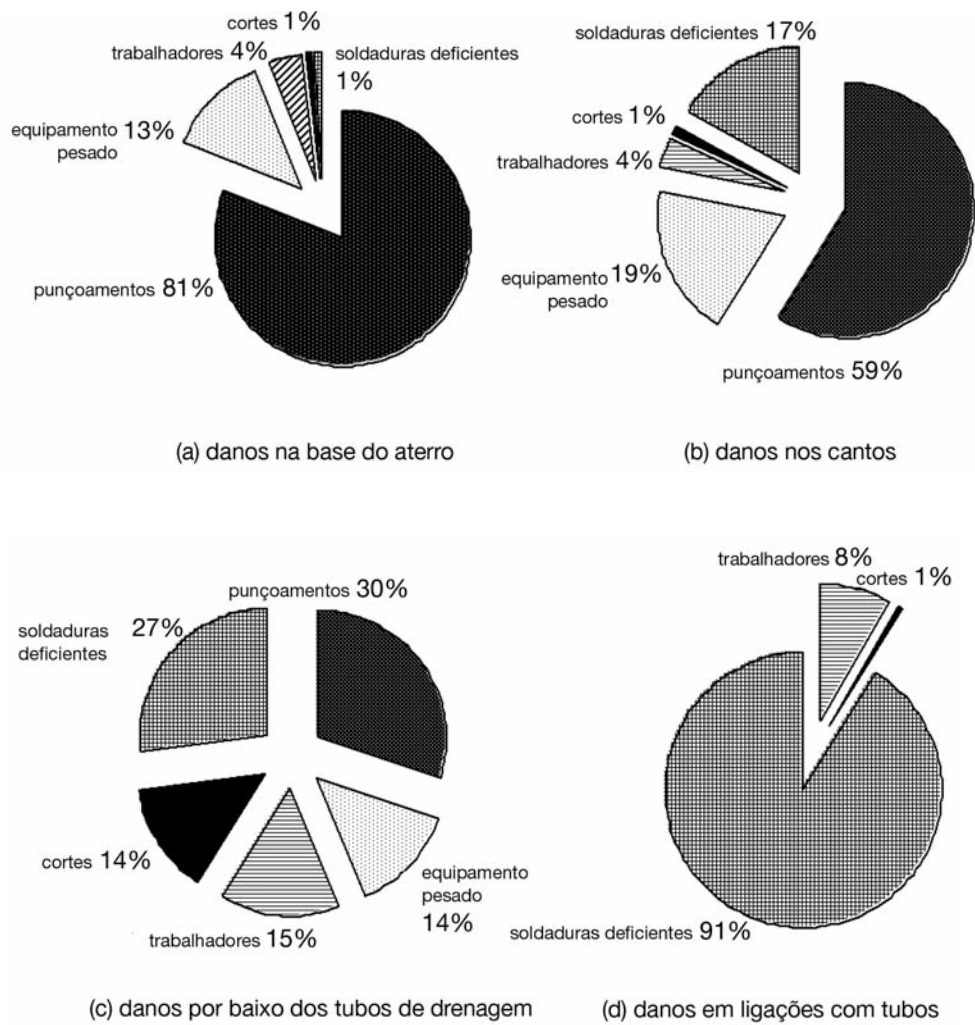


Fig. 4 – Percentagem de danos na geomembrana colocada na base do aterro (a), nos cantos (b), por baixo dos tubos de drenagem (c) e em ligações com tubos (d), consoante as causas.

5 – MÉTODOS DE DETECÇÃO DE DANOS OU DEFEITOS NAS GEOMEMBRANAS

Os danos ou defeitos das geomembranas podem surgir, como se referiu no item anterior, num de três períodos críticos: fabrico, construção ou exploração do aterro de resíduos. Assim, para que a geomembrana garanta a longo prazo um bom desempenho como barreira aos fluidos, torna-se necessário verificar a sua conformidade e a sua integridade não só durante a construção (a curto prazo) como também durante a exploração (a longo prazo). Com esta finalidade foram desenvolvidos os ensaios que seguidamente se apresentam.

5.1 – Ensaios de conformidade

Os ensaios de conformidade, como o nome indica, destinam-se a assegurar que as características da geomembrana fornecida se encontram em conformidade com os valores indicados nas especificações técnicas do fabricante e ainda a verificar possíveis defeitos de fabrico.

O número de ensaios de conformidade, a realizar logo após a recepção da geomembrana em obra, depende das informações disponíveis sobre o controlo de qualidade de fabrico das geomembranas, implementado pelo fabricante, incluindo a existência de certificado de controlo de qualidade do produto, emitido por organismo de certificação idóneo e independente.

O controlo de qualidade de fabrico diz respeito por um lado às matérias primas empregues e por outro ao processo de fabrico utilizado. Na Tabela 3 estão indicados, a título de exemplo, o tipo e frequência dos ensaios de controlo de fabrico que podem ser realizados, para geomembranas de PEAD.

Tabela 3 – Exemplo do tipo e frequência dos ensaios de controlo de fabrico de uma geomembrana de PEAD.

Tipo de ensaio			Frequência
Nome		Norma	
espessura		ASTM D 5199	cada rolo
massa volúmica da resina		ASTM D 1505	cada lote
índice de fluidez		ASTM D 1238	
massa volúmica da geomembrana		ASTM D 1505	cada 2 rolos
teor em negro de carbono		ASTM D 4218	cada 2 rolos
dispersão em negro de carbono		ASTM D 5596	cada 6 rolos
resistência à tracção	na cedência	ASTM D 6693	cada 2 rolos
	na rotura		
extensão	na cedência		
	na rotura		
resistência ao punçoamento (estático)		ASTM D 4833	cada 6 rolos
resistência ao rasgamento		ASTM D 1004	cada 6 rolos
estabilidade dimensional		ASTM D 1204	cada 6 rolos
resistência à oxidação (envelhecimento térmico)		ASTM D 3895	cada lote
resistência ao “stress cracking” (por exposição atmosférica)		ASTM D 5397	cada lote
resistência aos UV		ASTM D 5885	por formulação

Para as geomembranas de PEAD, os ensaios de conformidade mais comuns são os indicados na Tabela 4.

Tabela 4 – Ensaios de conformidade mais comuns em geomembranas de PEAD.

Tipo de ensaio		
Nome		Norma
espessura		ASTM D 5199 DIN 53353 ISO 9863
massa volúmica		ASTM D 792 ASTM D 1505 DIN 53479 ISO 1183
teor em negro de carbono		ASTM D 1603 ASTM D 4218 ISO 11358 ISO 06964
resistência à tracção	na cedência	ASTM D 638 ASTM D 6693 ASTM D 4885 DIN 53255 PK4 ISO 527
	na rotura	
extensão	na cedência	
	na rotura	
resistência ao punçoamento (estático)		EN ISO 12236 ASTM D 4833 FTMS 101, m. 2065 DIN 43507 ISO 12236
resistência ao rasgamento		ASTM D 1004 DIN 5315 ISO 13434

5.2 – Ensaios de verificação da integridade da geomembrana a realizar durante a construção

Para além da garantia de um fabrico de geomembranas sem defeitos, é necessário garantir que durante a construção do aterro a integridade da geomembrana também não é afectada. Tendo em consideração o tipo de operações passíveis de induzir danos na geomembrana, durante este período (referidos na secção 4), os ensaios de verificação da integridade a realizar sobre a geomembrana podem dividir-se em dois grandes grupos, os usados para detectar defeitos durante a colocação e ligação dos painéis de geomembrana e ou usados após a colocação e ligação dos painéis de geomembrana (nomeadamente os usados para detectar defeitos decorrentes da colocação da camada drenante suprajacente à geomembrana).

5.2.1 – Ensaios de verificação da integridade da geomembrana a realizar durante a colocação e ligação dos painéis de geomembrana

Conforme já foi referido, os danos que se verificam durante a colocação e ligação dos painéis podem ocorrer no próprio painel ou na ligação (zona de soldadura). Tendo sido efectuado um con-





trol de qualidade de fabrico adequado, em princípio não haverá razões para haver defeitos nos painéis de geomembrana que ponham a sua integridade física em causa, a não ser os que ocorram durante o transporte e colocação.

No que respeita às soldaduras entre painéis (que não podem ser efectuadas em fábrica, dada a dimensão dos aterros de resíduos), tem havido uma grande preocupação na verificação da sua qualidade, atendendo à variedade de factores humanos, ou relacionados com o equipamento e condições meteorológicas que as podem afectar. Assim, os métodos de controlo de qualidade desenvolvidos têm por objectivo, não só detectar a sua perda de continuidade, mas também de resistência.

5.2.1.1 – Ensaios de verificação da resistência das soldaduras (*ensaios destrutivos*)

Os ensaios de verificação da resistência das soldaduras dependem do tipo de geomembrana, que por seu lado pode condicionar o tipo de soldadura, conforme se mostra na Tabela 5.

Tabela 5 – Tipos de soldadura consoante os tipos de geomembranas (adaptado de Koerner (1998)).

Tipos de soldadura (exemplos mais comuns)	Tipos de geomembranas			
	PEAD	PEBD	CSPE	PVC
Extrusão: 	a	a	na	na
Termofusão (dupla): 	a	a	a	a
Química: 	na	na	a	a
Colagem: 	na	na	a	a

a – método aplicável

na – método não aplicável

Na **soldadura 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.

A **soldadura por termofusão** é conseguida por aquecimento das 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.

Na **soldadura química** a união entre painéis é conseguida pelo “ataque” químico das superfícies, provocado por um solvente volátil que leva à união dos painéis de geomembrana superior e inferior, com auxílio de uma pressão mecânica.

Na **soldadura por colagem**, contrariamente à soldadura química, há incorporação de um adesivo na zona de sobreposição dos painéis.

Embora para as soldaduras de geomembranas de PEAD sejam aplicáveis os métodos de extrusão e termofusão, por razões de fiabilidade, é este último método o mais utilizado nos aterros de RSU. Só nos locais onde, por dificuldades de acesso, seja inviável efectuar soldaduras por fusão, se executam soldaduras por extrusão.

As soldaduras por termofusão podem ser simples ou duplas (Figura 5), mas normalmente recorre-se a soldaduras por termofusão duplas, procurando assim diminuir a probabilidade de perda de continuidade (ou estanqueidade), pois, neste caso é necessário que a soldadura em ambos os lados seja defeituosa, para haver fuga de lixiviados.

A verificação da resistência das soldaduras efectuadas por extrusão e termofusão é normalmente avaliada estatisticamente, através de ensaios realizados sobre amostras cortadas nas soldaduras existentes, razão pela qual estes ensaios são classificados como ensaios destrutivos. As amostras são seleccionadas de forma aleatória, segundo determinada frequência de amostragem, por exemplo usando o método dos atributos, formalizado na norma GRI-GM14 (1998), recomendado para obras com áreas superiores a 100 ha, ou usando o método da carta de controlo formalizado na norma GRI-GM20 (2002), recomendado para obras de área inferior. A estratégia de amostragem escolhida, qualquer que seja, não deve no entanto limitar ou impedir a amostragem adicional em zonas suspeitas.

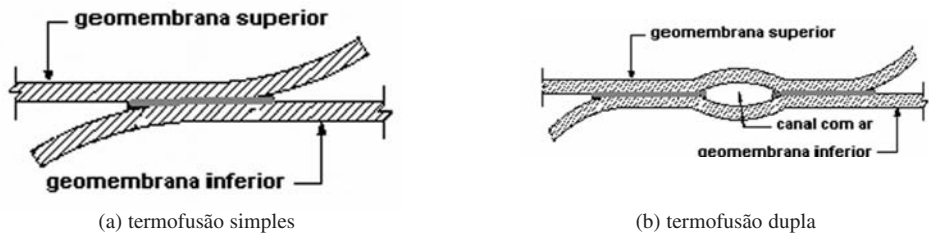


Fig. 5 – Soldaduras por termofusão simples e duplas (adaptado de Steel Dragon Enterprise CO, Ltd (2001)).

Os ensaios de verificação da resistência das soldaduras têm por objectivo avaliar essencialmente duas propriedades: a resistência ao corte e a resistência ao arranque.

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

Na Tabela 6 estão indicadas as normas de ensaio mais utilizadas para a avaliação da resistência ao corte e arranque de soldaduras para vários tipos de geomembranas.

Tabela 6 – Normas de ensaio para avaliação da resistência de soldaduras de vários tipos de geomembranas (adaptado de Daniel e Koerner (1995)).

Tipos de geomembranas	Ensaio de resistência ao corte (shear test)	Ensaio de resistência ao arranque (peel test)
PEAD	ASTM D-4437 ASTM D-6392	ASTM D-4437 ASTM D-6392
PEBD		
CSPE	ASTM D-751	ASTM D-413
PVC	ASTM D-3083 ASTM D-6392	ASTM D-413 ASTM D-6392

Para avaliar a resistência das soldaduras de geomembranas de PEAD, pode utilizar-se a norma ASTM D 4437 (1999), válida para geomembranas reforçadas e não reforçadas e a ASTM D 6392 (1999), válida para geomembranas não reforçadas e só para soldaduras obtidas por ligação térmica. O princípio do ensaio é semelhante para ambas as normas e consiste em traccionar o provete de soldadura, a uma determinada velocidade (dependente do tipo de geomembrana), da forma indicada na Figura 6 (a) e (b), respectivamente para o ensaio de corte e arranque.

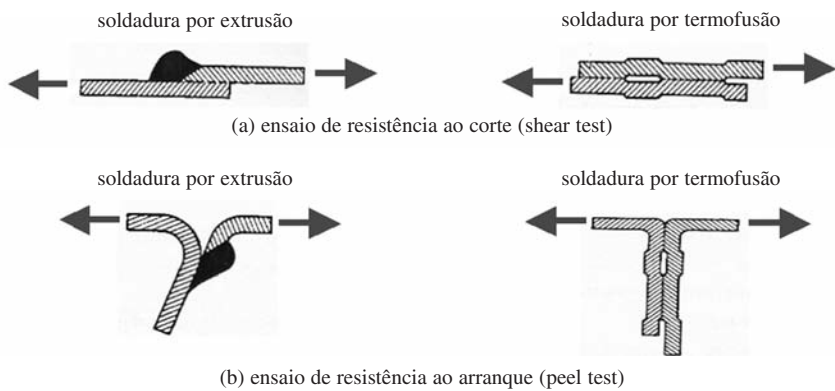




















Fig. 6 – Ensaios de resistência ao corte e arranque de soldaduras.

Para o ensaio de arranque a velocidade preconizada é de 50 mm/min para as geomembranas de PEAD (e PVC) e de 500 mm/min para as geomembranas de PEBD. O ensaio termina com a ruptura do provete.

Para o ensaio de corte a velocidade preconizada é de 50 mm/min para as geomembranas de PEAD, e de 500 mm/min para as geomembranas de PEBD (e PVC). Para as geomembranas de PEAD o ensaio termina quando o provete tiver atingido uma extensão de 50%, devendo o provete ser levado à ruptura para os outros tipos de geomembranas.

Deve registar-se o valor da resistência ao corte (máxima força por unidade de largura inicial) de cada provete de uma série de cinco, bem como o valor médio, máximo e mínimo da série. O mesmo deve ser efectuado para a resistência ao arranque. Deve ainda indicar-se o tipo de ruptura (ver Tabela 7).

Tabela 7 – Tipos de ruptura das soldaduras por termofusão e extrusão.

Tipos de soldadura	Tipos de ruptura					
termofusão						
extrusão						
						

soldaduras por termofusão não aceitáveis: (a), (e) > x%, (f);
soldaduras por extrusão não aceitáveis: (a), (b), (c), (m).

Têm sido desenvolvidos vários critérios de aceitação/rejeição para as soldaduras de geomembranas, tendo por base os resultados obtidos nos ensaios de resistência ao corte e arranque. Muitos dos critérios especificam para além dos tipos de rotura não aceitáveis, os valores mínimos da eficiência ao arranque e corte das soldaduras, definida pela relação entre a resistência na zona da soldadura e a resistência na cedência especificada da geomembrana (dois desvios padrão abaixo do valor médio da resistência na cedência). A percentagem de separação, verificada durante o ensaio de arranque, é um parâmetro que também tem sido considerado para a avaliação da qualidade do processo de soldadura. A extensão correspondente à resistência ao corte é outro parâmetro a que também se tem recorrido para averiguar a ductilidade da soldadura, uma vez que o processo de soldadura pode originar um aumento da cristalinidade, implicando consequentemente uma rotura mais frágil.

Na Tabela 8 indicam-se a título de exemplo alguns dos critérios de aceitação mais conhecidos para soldaduras por termofusão de geomembranas de PEAD.

Tabela 8 – Critérios de aceitação para soldaduras por termofusão de geomembranas de PEAD.

Tipo de soldadura	Ensaio	Parâmetro	Critérios			
			Haxo e Kamp (1990)	Daniel e Koerner (1995)	Peggs (1990)	GRI-GM 19 (2002)
termofusão	corte	eficiência ao corte (*)	>90%	>95 %	>95%	>95%
		extensão (**)	>50%	–	>100% (texturada) >500% (lisa)	>50%
	corte	eficiência ao arranque (*)	>60%	62 %	>80%	>72%
		separação	–	–	nenhuma	<25%

(*) relação entre a resistência na zona da soldadura e a resistência na cedência especificada da geomembrana

(**) correspondente à resistência ao corte

Embora não exista consenso sobre o critério que melhor qualifica as soldaduras de geomembranas de PEAD é actualmente aceite que a determinação da resistência ao arranque e respectiva localização da rotura e a determinação da resistência ao corte poderão dar indicações das características das soldaduras a curto prazo. No entanto, para a previsão da durabilidade da soldadura e da geomembrana adjacente há necessidade de determinar também a extensão correspondente à resistência ao corte e saber a percentagem de separação na zona de soldadura, no ensaio de arranque. O valor da extensão permite inferir se o processo de soldadura afectou a geomembrana adjacente (se a extensão for baixa a durabilidade poderá estar comprometida). Se existir separação (ainda que parcial) na zona de soldadura, fissuras induzidas nas superfícies separadas podem implicar uma redução da resistência ao “stress cracking” da geomembrana (Peggs, 1990).

5.2.1.2 – Ensaios de verificação da continuidade das soldaduras (*ensaios não-destrutivos*)

Os ensaios de verificação da continuidade (estanqueidade) a realizar sobre as soldaduras dependem, tal como os ensaios de verificação da sua resistência, do tipo de geomembrana e do tipo de soldadura, conforme se mostra na Tabela 9.

Contrariamente aos ensaios para verificação da resistência, os ensaios para verificação da continuidade são realizados ao longo de todo o comprimento da soldadura e para todas as soldaduras.

Tabela 9 – Métodos de ensaios não-destrutivos consoante os tipos de soldadura e de geomembrana (adaptado de Daniel e Koerner (1995)).

Métodos de ensaio não-destrutivos (exemplos mais comuns)		Tipo de soldadura	Tipo de geomembrana
ensaio do jacto de ar (air lance test)		química colagem	todas excepto PEAD
ensaio da haste metálica (mechanical point/pick test)		todas	todas
ensaio de pressão de ar (pressurized dual seam)		termofusão dupla	todas
ensaio de vácuo (vacuum box test)		todas	todas
ensaio do arame eléctrico (electric wire test)		todas (*)	todas
ensaios por ultrasons	ensaio de vibração (ultrasonic pulse echo test)	química colagem termofusão	PEAD, PEBD, PVC
	ensaio da impedância plana (ultrasonic impedance plane test)	química colagem termofusão	PEAD, PEBD, PVC
	ensaio da sombra (ultrasonic shadow test)	termofusão extrusão	PEAD, PEBD

(*) mas é necessário a introdução de um arame durante a realização da soldadura

O **ensaio de jacto de ar** consiste em aplicar, através de um tubo com um bocal, um jacto de ar sobre a extremidade superior da soldadura. Se localmente houver descontinuidade na soldadura formam-se fluxos de ar debaixo da geomembrana, fazendo-a empolar e/ou vibrar de forma audível. Este ensaio não é aplicável a geomembranas de PEAD.

O **ensaio da haste metálica** consiste em fazer uma certa pressão com uma haste metálica (por exemplo uma chave de fendas) ao longo da extremidade superior da soldadura, conforme indicado na Figura 7. Quando a ponta da haste ficar bloqueada ou conseguir entrar através da soldadura é porque foi detectado um defeito. É possível detectar defeitos da dimensão da ponta da haste metálica e os resultados, muito dependentes da sensibilidade do operador são de natureza qualitativa. Este ensaio pode ser realizado nas soldaduras das geomembranas (ainda não cobertas) e colocadas no fundo, taludes e cobertura dos aterros de resíduos, desde que a acessibilidade e segurança do operador estejam garantidas.

O **ensaio de pressão de ar** consiste em injectar ar, com uma agulha, a uma determinada pressão (entre 0,2 e 0,4 MPa, dependente da geomembrana e temperatura), no canal central existente nas soldaduras de termofusão duplas, e verificar se existe estabilização dessa pressão durante cerca de 5 min ou se a perda de pressão é inferior a 10 %, evidência de que a junta é estanque (Figura 8). Os defeitos com dimensões superiores ao milímetro podem ser detectados pela existência de “bolhas de sabão”, após lavar-se a soldadura com uma solução de água e detergente.

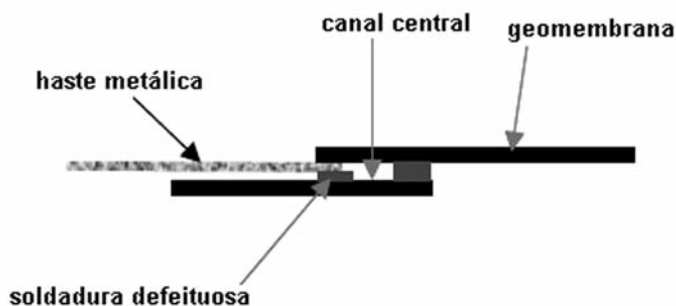


Fig. 7 – Esquema do ensaio da haste metálica (CFGG, 2003).



Fig. 8 – Ensaio de pressão de ar (Timothy et al., 2005).

Este ensaio pode ser realizado nas soldaduras das geomembranas colocadas no fundo, taludes e cobertura dos aterros de resíduos, durante a após a sua colocação, desde que não estejam ainda cobertas.

Para o **ensaio de vácuo** começa-se por lavar a zona a ensaiar com uma solução de água e detergente. Coloca-se depois uma câmara transparente sobre a zona em questão e cria-se uma depressão (de 0,05 MPa, para geomembranas de PEAD) pelo menos durante 30 segundos, com a ajuda de uma bomba. Verifica-se seguidamente a existência de “bolhas de sabão”, sinal evidente de fuga de ar através da geomembrana e consequentemente da sua não continuidade naquela zona (Figura 9). Este ensaio permite a detecção de defeitos mesmo inferiores ao milímetro, podendo ser realizado nas soldaduras das geomembranas de aterros de resíduos, desde que não estejam cobertas. É de difícil execução em taludes muito inclinados ou se a superfície de contacto entre a geomembrana e a câmara de vácuo não for suficientemente plana.

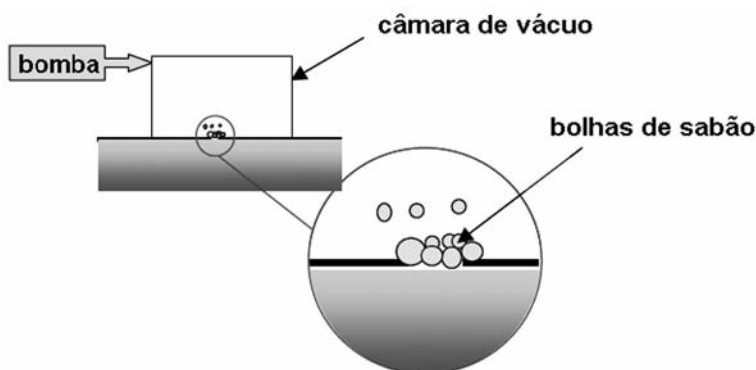


Fig. 9 – Esquema do ensaio de vácuo (CFGG, 2003).

O **ensaio do arame eléctrico** necessita da introdução de um arame de cobre na zona de sobreposição das geomembranas superior e inferior, durante a realização da soldadura. Após a soldadura, as duas extremidades do arame são 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 o mostrador do voltímetro registar um aumento brusco do sinal (ou se houver a emissão de um som agudo ou ainda uma faísca) significa que a soldadura pode estar defeituosa (Figura 10). Contudo os resultados podem ser afectados pela existência de humidade na superfície inferior da geomembrana. Este ensaio é usual ser realizado nas soldaduras por extrusão das geomembranas de aterros de resíduos, desde que não estejam cobertas.

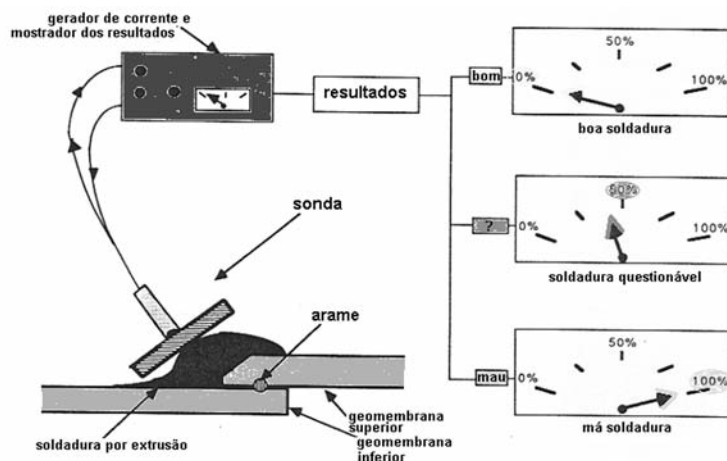


Fig. 10 – Esquema do ensaio do arame eléctrico (Koerner e Lord Jr, 1990).

O **ensaio de vibração** consiste basicamente em comparar a espessura real da soldadura com aquela que a soldadura deveria ter. É emitida uma vibração de alta frequência (5 a 15 MHz) à geomembrana superior, durante apenas alguns microsegundos, que será reflectida a partir da extremidade inferior da geomembrana inferior, a não ser que a ligação entre as duas geomembranas seja deficiente e nesse caso reflectir-se-á a partir da extremidade inferior da geomembrana superior (Figura 11), o que levará metade do tempo, por o espaço a percorrer ser também metade.

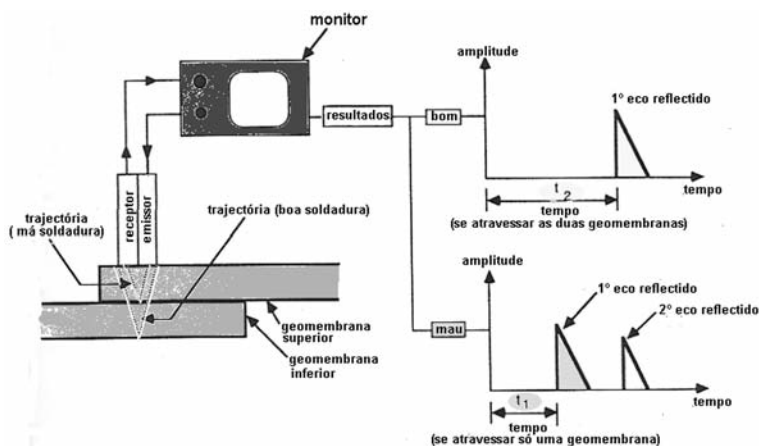


Fig. 11 – Ensaio por ultrasons: esquema do ensaio de vibração (koerner e Lord Jr, 1990).

O **ensaio da impedância plana** baseia-se no princípio da impedância acústica. Uma onda contínua de 160 a 185 kHz é enviada através de um transdutor para a zona de soldadura, visualizando-se no monitor a localização de um ponto característico. A distância do ponto ao centro é proporcional à falta de qualidade da soldadura (Figura 12).

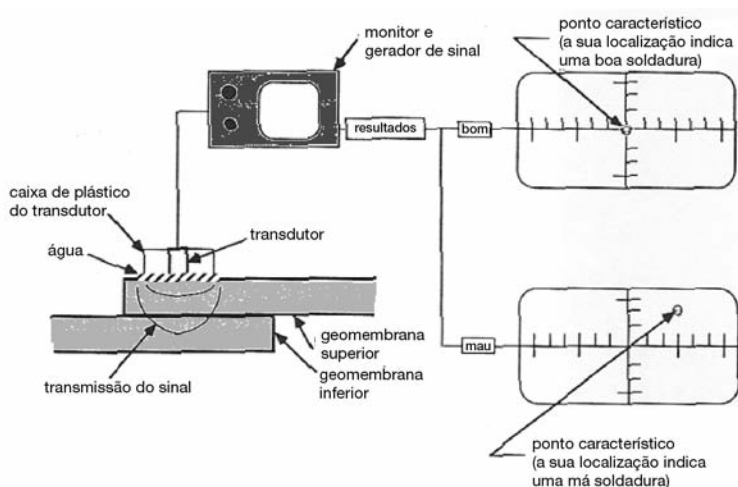


Fig. 12 – Ensaio por ultrasons: esquema do ensaio da impedância plana (Koerner e Lord Jr, 1990).

O **ensaio da sombra** consiste na emissão de um vibração durante algum tempo (50 – 100 ms) à geomembrana superior e a sua recepção através da geomembrana inferior, do outro lado da soldadura. No monitor pode visualizar-se a evolução da amplitude no tempo, estando indicado na Figura 13 os resultados obtidos para os casos de boas, questionáveis e más soldaduras.

Dos oito métodos apresentados, os mais utilizados para avaliar a continuidade/ estanqueidade das soldaduras das geomembranas em aterros de resíduos são os ensaios de pressão de ar e de vácuo, pela sua simplicidade de funcionamento e baixo custo. O ensaio do arame eléctrico é menos usado por o equipamento ser mais complexo, recorrendo-se a este ensaio só em locais onde os ensaios mais usuais não podem ser realizados, como por exemplo nos cantos, nas valas de drenagem

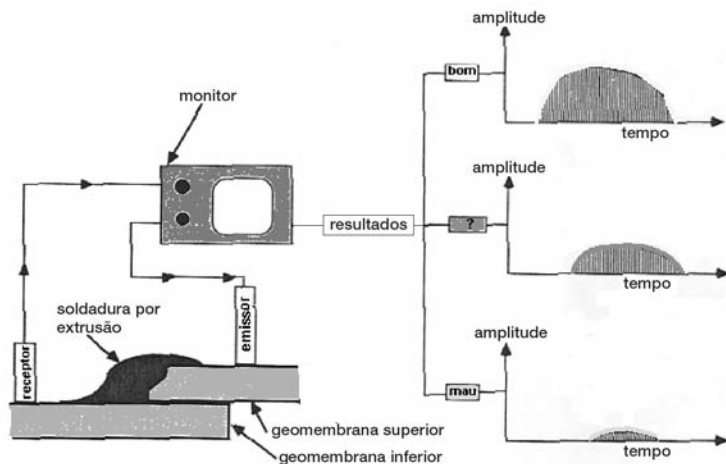


Fig. 13 – Ensaio por ultrasons: esquema do ensaio da sombra (Koerner e Lord Jr, 1990).

ou nas ligações das geomembranas a tubos . O ensaio da haste metálica é só usado para pequenos comprimentos de soldadura pela sua morosidade. Os ensaios por ultrasons não são muito usados, pois para além do equipamento ser complexo, também é necessário recorrer a técnicos mais especializados.

Mas como já se mostrou (Figura 2 a), relativamente aos danos ocorridos durante a colocação da geomembrana, para além dos danos nas soldaduras existem também cerca de 17% de danos devido a punçoamentos por pedras existentes no solo subjacente. Assim, para além dos ensaios de verificação da integridade das soldaduras, houve que desenvolver ensaios para detecção de orifícios nos próprios painéis das geomembranas. Na verdade, alguns dos ensaios usados para testar as soldaduras também podem servir para os painéis da geomembrana. No entanto, dada a morosidade que implicaria a sua implementação em grandes áreas, foram desenvolvidos ensaios específicos para detecção de orifícios quando toda a área é suposta já se encontrar completamente impermeabilizada, ensaios que serão objecto da secção seguinte.

5.2.2 – Ensaios de verificação da estanqueidade da geomembrana a realizar após a colocação e ligação dos painéis de geomembrana

Os métodos de ensaio (não-destrutivos) desenvolvidos para verificar a estanqueidade da geomembrana, após a colocação e ligação dos painéis de geomembrana, destinam-se só a detectar defeitos (resultantes das operações de construção) que impliquem a subsequente fuga de fluidos, ou seja, aqueles que afectam a geomembrana em toda a sua espessura. Os métodos foram divididos em dois grupos consoante a geomembrana já se encontra ou não coberta pelas camadas sobrejacentes (Tabela 10).

5.2.2.1 – Ensaios de verificação da estanqueidade da geomembrana a realizar antes da sua cobertura (ensaios não-destrutivos)

Um dos ensaios de verificação da estanqueidade da geomembrana a realizar exclusivamente antes da sua cobertura é o **do jacto ou da poça de água**. Para este ensaio 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 entra 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 14).

Tabela 10 – Métodos de ensaios de verificação da estanqueidade da geomembrana após a sua colocação e ligação dos painéis, em aterros de resíduos.

Métodos de Ensaio (exemplos mais comuns)	Geomembrana não-coberta	Geomembrana coberta	Observações
ensaio do jacto (ou da poça) de água (the water puddle and water lance method)	sim	não	<ul style="list-style-type: none"> – só para geomembranas não condutoras – os materiais em contacto com a superfície inferior da geomembrana têm de ser condutores – velocidade de prospecção 200 a 300 m²/ h/ operador – detecção de defeitos da ordem do milímetro
ensaio da faísca eléctrica (the holiday detector)	sim	não	<ul style="list-style-type: none"> – só para geomembranas não condutoras – os materiais em contacto com a superfície inferior da geomembrana têm de ser condutores – velocidade de prospecção 5000 a 8000 m²/dia/máq/ operador – detecção de defeitos da ordem do milímetro
ensaio com sistema fixo de detecção e localização de orifícios (the grid method)	sim	sim	<ul style="list-style-type: none"> – necessidade de colocação prévia de sensores no solo de suporte – só para geomembranas não condutoras – os materiais em contacto com as superfícies inferior e superior da geomembrana têm de ser condutores – tempo de medida: 5 a 12 min (área máxima de prospecção 10 000m²)
ensaio da geomembrana condutora (electrically conductive geomembrane method)	sim	sim ^(*)	<ul style="list-style-type: none"> – necessidade de geomembrana condutora – a geomembrana deve estar seca – velocidade de prospecção 6000 a 8000 m²/dia/máq/ 2 operadores – detecção de defeitos da ordem do milímetro
ensaio da sonda eléctrica móvel (the water and soil covered geomembrane method)	não	sim ^(*)	<ul style="list-style-type: none"> – só para geomembranas não condutoras – os materiais em contacto com as superfícies inferior e superior da geomembrana têm de ser condutores – velocidade de prospecção 150 a 250 m²/ h/ operador – detecção de defeitos de menos de 1 mm

(*) desde que a geomembrana se mantenha seca

A velocidade de prospecção é da ordem dos 200 a 300 m²/hora/operador, podendo detectar-se orifícios da ordem do milímetro. Este ensaio 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 as medições.

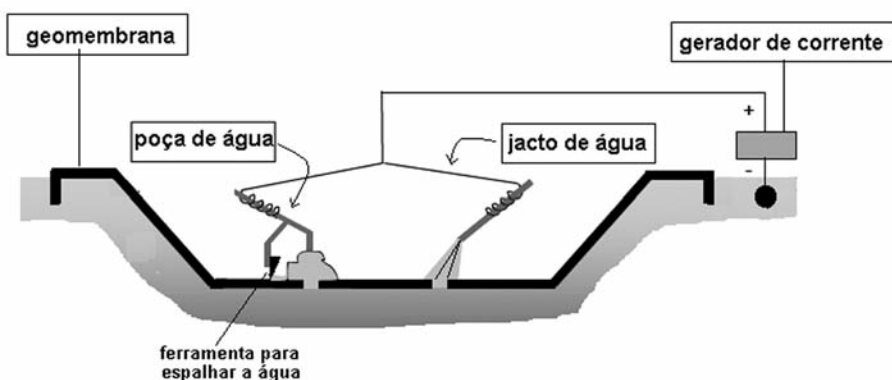


Fig. 14 – Esquema do ensaio do jacto ou da poça de água (CFGG, 2003).

Outro ensaio de verificação da estanqueidade da geomembrana a realizar antes da sua cobertura é o da faísca eléctrica. Para este ensaio usa-se um equipamento constituído por um gerador de baixa corrente eléctrica e alta tensão, podendo esta variar entre 20 a 100 kV, consoante a espessura da geomembrana a ensaiar. Ao gerador estão ligados dois eléctrodos, um passivo ligado ao subsolo, e outro ligado a uma haste com uma escova ou barra metálica na ponta, que o operador faz passar lentamente pela superfície superior da geomembrana. A geomembrana (não condutora) funciona como isolante entre o solo e a haste metálica e qualquer descontinuidade será detectada por uma faísca, acompanhada de um aviso sonoro (Figura 15).

A velocidade de prospecção é da ordem dos 5000 a 8000 m²/dia/máq/operador, podendo detectar-se orifícios da ordem do milímetro. Este ensaio pode ser realizado em geomembranas não cobertas e desde que o material em contacto com a sua superfície inferior seja condutor.

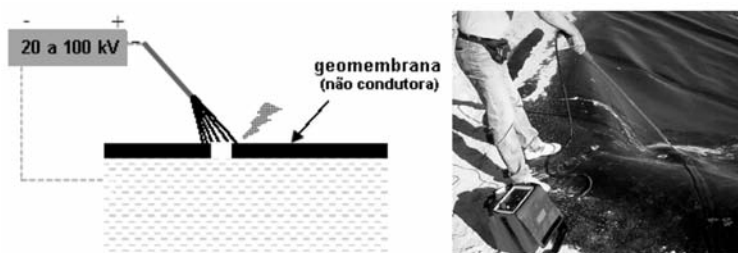


Fig. 15 – Esquema do ensaio da faísca eléctrica.

5.2.2.2 – Ensaio de verificação da estanqueidade da geomembrana a realizar antes e/ou depois da sua cobertura (**ensaio não-destrutivo**)

O ensaio com sistema fixo de detecção e localização de orifícios e o ensaio da geomembrana condutora permitem verificar a estanqueidade da geomembrana antes e/ou depois da sua cobertura, embora com algumas limitações de aplicação que adiante se indicam.

Para o ensaio com sistema fixo de detecção e localização de orifícios, antes da colocação da geomembrana, 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, situada na proximidade da obra (Figura 16).

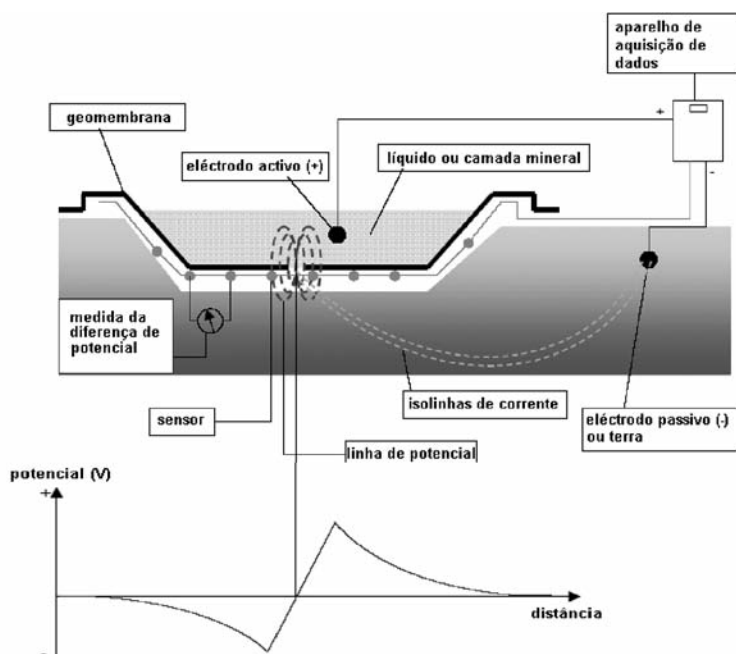


Fig. 16 – Esquema do ensaio com sistema fixo de detecção e localização de orifícios (CFGG, 2003).

Depois da colocação da geomembrana (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 geomembrana e outro (o eléctrodo terra) colocado no solo de fundação. Quando uma corrente eléctrica 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 eléctrica. 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 1m. 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 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 geomembrana condutora** é necessário utilizar uma geomembrana com uma camada inferior coextrudida condutora fina (com cerca de 0,1 mm). 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 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 eléctrica faz-se a prospecção da superfície superior não condutora da geomembrana. Quando existe um orifício estabelece-se uma corrente, gerando uma faísca e/ou um sinal sonoro (Figura 17). 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. 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.

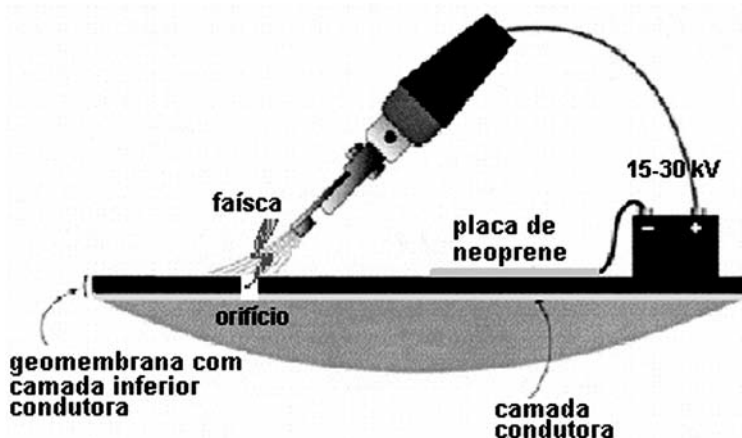


Fig. 17 – Esquema do ensaio da geomembrana condutora (adaptado de ASTM D 6747 (2002)).

5.2.2.3 – Ensaios de verificação da estanqueidade da geomembrana após a sua cobertura (*ensaios não-destrutivos*)

Tendo-se mostrado (Figura 1) que a maior percentagem de danos em geomembranas aplicadas em aterros de resíduos é devida à colocação menos cuidada da camada drenante suprajacente (Figura 18) e que estes não são facilmente reparáveis pela dificuldade que há na sua detecção, é particularmente importante generalizar a utilização de métodos de detecção de orifícios na geomembrana após a sua cobertura. Apesar dos custos elevados, a sua utilização será sempre mais eficaz e conduzirá a soluções mais económicas que quaisquer medidas correctivas a realizar, quando, através da monitorização das águas subterrâneas, se concluir haver fugas de lixiviado.

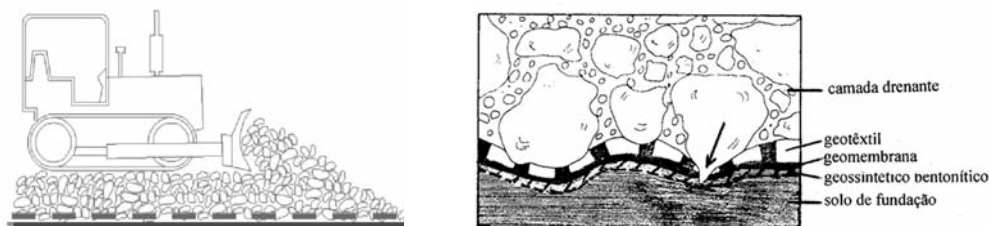


Fig. 18 – O risco de punção da geomembrana durante a colocação da camada drenante.

Embora alguns métodos utilizados para geomembranas não cobertas possam ser também aplicados após a sua cobertura (ver 5.2.2.2), existem alguns métodos que só se aplicam quando a geomembrana estiver coberta. É o caso do ensaio da sonda eléctrica móvel. Neste ensaio utilizam-se dois eléctrodos, um colocado no solo de suporte e outro, colocado no material que cobre a superfície superior da geomembrana, 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 19).

Com a ajuda de uma sonda eléctrica móvel efectuem-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 e Peggs (2001)). 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 geomembrana 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 geomembrana, da geometria do local e das condições meteorológicas, variando entre 150 a 250 m²/hora/operador.

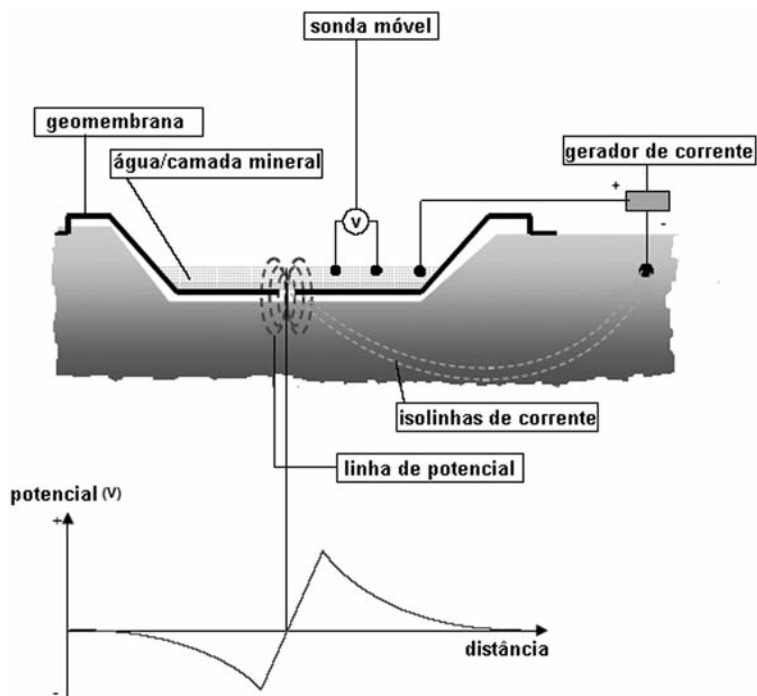


Fig. 19 – Esquema do ensaio da sonda eléctrica móvel (CFGG, 2003).

6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objectivo deste artigo foi o de mostrar as causas e localizações mais frequentes dos orifícios das geomembranas utilizadas no confinamento de aterros de resíduos e fazer uma análise dos métodos que possibilitam a detecção daqueles orifícios, para subsequente reparação (com o propósito de reduzir o risco de perda de estanqueidade da geomembrana, e consequentemente minimizar a fuga dos lixiviados e contaminação dos solos e água subterrânea).

A partir dos resultados apresentados 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. Destes 25% ocorrem durante a colocação da geomembrana e ligação dos painéis e 73% durante a colocação da camada drenante sobrejacente à geomembrana. Os danos mais recorrentes são as soldaduras defeituosas e o punçoamento da geomembrana devido a pedras angulosas.

Tendo em consideração o tipo de operações passíveis de induzir danos nas geomembranas, durante o período de construção do confinamento dos aterros de resíduos, desenvolveram-se métodos de ensaio para verificação da integridade, não só das soldaduras, mas também dos próprios painéis das geomembranas.

Para verificar a integridade das soldaduras efectuam-se dois tipos de ensaios, um para avaliar a resistência ao arranque e corte e outro para averiguar a perda de continuidade/estanqueidade. Os primeiros são realizados sobre amostras cortadas nas soldaduras existentes, razão pela qual estes ensaios são classificados como ensaios destrutivos. Os segundos são realizados ao longo de todo o comprimento da soldadura e para todas as soldaduras (ensaios não-destrutivos). Para os painéis das geomembranas é usual verificar-se apenas a sua estanqueidade.

Foi efectuada uma análise dos diferentes métodos para avaliação da integridade das geomembranas e suas soldaduras, tendo-se apresentado para além do princípio de funcionamento e tipo de resultados, as respectivas condições de aplicação em função do tipo de geomembrana e/ou soldadura. Na Tabela 11 apresenta-se uma síntese da aplicabilidade dos diferentes métodos analisados, para soldaduras ou painéis da geomembrana, para o caso de esta se encontrar ou não coberta e localizada na base e taludes ou cobertura do aterro.

Tabela 11 – Aplicabilidade dos diferentes métodos de verificação de integridade de geomembranas.

Métodos de ensaio		Zona do painel	Zona da soldadura	Geomembrana coberta	Geomembrana não coberta	Base e taludes	Cobertura
ensaios de resistência		—	*	—	*	*	*
ensaios de estanqueidade	ensaio do jacto de ar ⁽¹⁾	—	* ⁽¹⁾	—	*	*	*
	ensaio da haste metálica	—	*	—	*	*	*
	ensaio de pressão de ar ⁽²⁾	—	*	—	*	*	*
	ensaio de vácuo	—	*	—	*	*	*
	ensaio do arame eléctrico	—	* ⁽²⁾	—	*	*	—
	ensaios por ultrasons	—	*	—	*	*	*
	ensaio do jacto (ou da poça) de água	* + *		—	*	—	
	ensaio da faísca eléctrica	* +/ou *		—	*	*	—
	ensaio com sistema fixo de detecção e localização de orifícios	* + *		*	*	*	*
	ensaio da geomembrana condutora ⁽⁴⁾	* + *		* ⁽⁵⁾	*	*	—
	ensaio da sonda eléctrica móvel	* + *		*	—	*	*

(1) não é válido para geomembranas de PEAD e só é válido para soldaduras químicas e por colagem.

(2) só é válido para soldaduras de termofusão duplas.

(3) necessidade de introdução de um arame durante a soldadura.

(4) só é válido para geomembranas condutoras.

(5) desde que a geomembrana se mantenha seca.

7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASTM D 4437 (1999) – “Standard practice for determining the integrity of field seams used in joining flexible polymeric sheet geomembranes”, American Society of Testing Materials, USA.
- ASTM D 6392 (1999) – “Standard test method for determining the integrity of nonreinforced geomembrane seams produced using thermo-fusion methods”, American Society of Testing Materials, USA.
- ASTM D 6747 (2002) – “Standard guide for selection of techniques for electrical detection of potential leak paths in geomembranes”, American Society of Testing Materials, USA.
- Bouzza A., Zornberg J. G., Adam D. (2002) – “Geosynthetics in waste containment facilities: recent advances”, 7th International Conference on Geosynthetics, Nice, France, 21 to 23 September, pp 445-507.
- CFGG, (2003) – “Présentation de méthodes de détection et de localisation de défauts dans les dispositifs d'étanchéité par géomembranes”, Comité Français Géosynthétiques, France.
- David E. Daniel, Robert M. Koerner, (1995) – “Waste containment facilities. Guidance for construction, quality assurance and quality control of liner and cover systems”, American Society of Civil Engineering Press, New York.
- GRI GM14 (1998) – “Standard Guide for Selecting Variable Intervals for Taking Geomembrane Destructive Seam Samples Using the Method of Attributes”, Geosynthetic Research Institute, Drexel University, USA.
- GRI GM19 (2002) – “Standard Specification for Seam Strength and Related Properties of Thermally Bonded Polyolefin Geomembranes”, Geosynthetic Research Institute, Drexel University, USA. (Revista em 2003).
- GRI GM20 (2002) – “Standard Guide for Selecting Variable Intervals for Taking Geomembrane Destructive Seam Samples Using control Charts”, Geosynthetic Research Institute, Drexel University, USA.
- Haxo H., Kamp L. (1990) – “Destructive Testing of Geomembranes Seams: Shear and Peel Testing of Seam Strength”, Geotextiles and Geomembranes n° 9, pp 369-404.
- Koerner R. M. (1998) – “Designing with Geosynthetics”, Fourth Edition. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey.
- McQuade S. J., Needham A.D (1999) – “Geomembrane liner defects-causes, frequency and avoidance”, Geotechnical Engineering n° 137 pp 203-213.
- Nosko V., Andrezal T., Gregor T., Ganier, P. (1996) – “SENSOR damage detection system (DDS)- the unique geomembrane testing method”. Proceedings of 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 2nd European Geosynthetics Conference, Bologna, vol 2, pp 557-560.
- Phaneuf R., Peggs I. D. (2001) – “Landfill construction quality, lessons learned from electrical resistivity testing of geomembrane liners”. Geotechnical Fabrics Report, April 2001, pp 28-35.
- 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* n°9 (4), pp 405-414.
- Robert M. Koerner, Arthur E. Lord Jr (1990) – “Nondestructive evaluation of geomembrane seams: methods in development”, *Geotextiles and Geomembranes* n° 9 (4) pp 431-443.
- Rowe, R. K. (1998) – “Geosynthetics and the minimization of contaminant migration through barrier systems beneath solid waste”, *Proceedings of 6th International Conference on Geosynthetics*, Atlanta, vol. 1, pp 27-102.
- 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>
- Timothy D. Stark, John Heap, Stuart Lange, Dave Mc Laury, Standford Slifer (2005) – “Air – chanel testing landfill geomembrane seams. Results from a recent workshop help minimize destructive testing”, *GFR magazine*, Geosynthetics Material Association, volume 23, n° 2, 4 pp.