

ATERROS DE RESÍDUOS: ALGUNS ASPECTOS GEOTÉCNICOS

Waste landfills: Some geotechnical aspects

MARIA DA GRAÇA ALFARO LOPES *

RESUMO - Neste artigo pretendeu-se, por um lado, evidenciar os aspectos geotécnicos mais relevantes no projecto e construção de aterros de resíduos e por outro, chamar a atenção para a importância do controlo de qualidade de construção deste tipo de obras, mostrando o importante papel que o L.N.E.C. tem desempenhado.

Para finalizar é feito um desafio para o estudo de algumas das incógnitas que actualmente subsistem no domínio em questão.

SYNOPSIS - The purpose of this paper is to emphasise the most relevant geotechnical aspects in the design and construction of waste landfills. On the other hand, was drawn the attention to the importance of the control quality assurance for the construction of these kind of structures, showing the significant role performed by L.N.E.C.

Finally a challenge is made to study a variety of problems that are still open.

1 - INTRODUÇÃO

A revolução industrial introduziu grandes mudanças ao nível do comportamento da população, criando condições para o aparecimento de uma sociedade de consumo e consequente produção de grandes quantidades de resíduos. Até meados dos anos 70 foi prática corrente o simples despejo dos resíduos em depressões naturais ou artificiais. O despertar nas últimas décadas para os problemas ecológicos e a consciencialização da necessidade de preservar a saúde pública, qualidade do meio ambiente e de proteger os solos e recursos hídricos, implicaram num passado muito recente, a procura de soluções para o tratamento e destino final adequado dos resíduos, existindo principalmente os seguintes métodos: compostagem, incineração e deposição em aterro.

Embora actualmente a tendência para a deposição final em aterro não constitua o principal método de gestão de resíduos, pois as tecnologias mais recentes enfatizam sobretudo a redução na origem e reciclagem dos resíduos, importa referir que estes processos não eliminam totalmente a produção de resíduos e muitas vezes as próprias tecnologias de tratamento são também elas produtoras de resíduos. Por isso os aterros de resíduos continuam e continuarão a ser num futuro próximo uma componente necessária dos sistemas de gestão de resíduos.

A concepção e construção de aterros de resíduos tem evoluído significativamente nos últimos anos. Estes são, actualmente, obras de engenharia geotécnica estruturalmente complexas, onde coexistem materiais muito diferentes como solos, resíduos, geossintéticos e lixiviados. Este facto constitui uma inovação geotécnica, pois para o seu dimensionamento e construção deverão conhecer-se não só as propriedades e comportamentos dos solos, água e rochas, mas também as dos lixiviados, resíduos e geossintéticos e sobretudo a natureza das suas interações e evolução no tempo.

* Eng^a Civil, Investigadora Principal do Departamento de Geotecnia do LNEC

2 - O ATERRO DE RESÍDUOS

A Directiva COM (99) relativa à deposição de resíduos em aterro faz a distinção entre três classes de aterros, com base no tipo de resíduos que podem receber: perigosos, inertes e sólidos urbanos.

Embora existam diferenças significativas na constituição geral dos aterros das várias classes referidas, os conceitos e os materiais usados são os mesmos, pelo que não se fará distinção de classes nas considerações que se seguem sobre os aspectos geotécnicos do projecto e construção de aterros de resíduos.

De um modo geral a concepção e execução de um aterro de resíduos comporta as seguintes fases:

- Escolha do local
- Projecto
- Construção
- Operação
- Encerramento e reabilitação

QUADRO I – Síntese das principais actividades geotécnicas

Fases do Aterro de resíduos	Actividades a desenvolver no âmbito da Geotecnia
Escolha do local	<ul style="list-style-type: none">- Análise dos elementos hidrológicos, geológicos, topográficos, sismológicos, etc.- Interpretação de fotografia aérea- Reconhecimento geológico de superfície- Perfis geológicos- Avaliação das condições hidrogeológicas- Prospeção- Ensaios laboratoriais e <i>in situ</i>- Caracterização dos materiais a utilizar- zonamento geotécnico
Projecto	<ul style="list-style-type: none">- Cartografia geológica de síntese- Sondagens mecânicas (continuação)- Ensaios laboratoriais (continuação)- Estudo pormenorizado dos materiais a utilizar na impermeabilização/drenagem- Zonamento geotécnico pormenorizado- Análise de estabilidade global e local- Análise de assentamentos
Construção	<ul style="list-style-type: none">- Aferição dos parâmetros de projecto- Acompanhamento dos trabalhos de terraplenagem, impermeabilização e drenagem
Operação	<ul style="list-style-type: none">- Observação dos diferentes componentes do aterro (fundação, sistemas de impermeabilização, sistemas de colecta e condução do gás e lixiviados, etc.)
Encerramento	<ul style="list-style-type: none">- Estudo de possíveis alterações no comportamento dos vários componentes do aterro (riscos de explosão, assentamentos diferenciais, etc.)

2.1 - Escolha do local

Face às restrições ambientais, às pressões político-institucionais e à escassez de áreas apropriadas para a construção de aterros de resíduos, é de grande relevância a contribuição da Geotecnia na optimização das técnicas de construção e operação, por forma a conciliar os aspectos técnicos e ambientais envolvidos. Uma síntese das principais actividades a desenvolver no âmbito da Geotecnia é apresentada no Quadro I (Barroso, 1994).

A concepção de um aterro de resíduos depende sobretudo das características do local onde será implantado. Mas para além do estudo das condições hidrogeológicas e da caracterização geotécnica do solo de fundação e dos materiais a utilizar, é também indispensável uma análise de viabilidade técnica e económica, com vista a diminuir os impactes ambientais que a construção e operação deste tipo de empreendimento envolvem. Os maiores problemas ambientais relacionados com os aterros de resíduos são a formação e migração de gases e lixiviados, a formação de odores desagradáveis, tráfego intenso, poeiras, riscos de incêndio (ou de explosão) e a proliferação de insectos e roedores.

O estudo de impacte ambiental (com vista à minimização dos problemas referidos) e sobretudo uma boa formação e informação das populações, são da máxima importância para a aceitação pública da localização do aterro, sem a qual dificilmente se pode chegar à viabilização do empreendimento.

De um modo geral, o local deve satisfazer, tanto quanto possível, os critérios seguidamente apresentados (DGQA, 1990/91):

- ser hidrogeologicamente aceitável, isto é, que não constitua um risco de contaminação das águas (subterrâneas e superficiais) e solos adjacentes. Recomenda-se que o solo de confinamento tenha um coeficiente de permeabilidade inferior a 10^{-9} m/s. O estudo do local inicia-se com um reconhecimento geológico de superfície e com técnicas expeditas de prospecção (poços, amostragem, ensaios de identificação de solos). O reconhecimento em profundidade implica a execução de sondagens, complementados com ensaios *in situ* e em laboratório. O estudo das condições hidrológicas passa pela identificação dos aquíferos e suas relações com os sistemas superficial e atmosférico (zonas de recarga, carácter freático, confinamento, piezometria, etc);
- garantir a existência de quantidades de solo suficientes para a cobertura diária e recobrimento final;
- não afectar locais habitados, devendo estar afastados no mínimo 250 metros de qualquer habitação isolada ou 400 metros de aglomerados populacionais;
- estar afastado no mínimo 100 metros de captações de água subterrânea;
- não constituir risco de incêndio (ou outros) para as zonas envolventes;
- fácil instalação eléctrica e de água;
- não ocupar terrenos agrícolas ou considerados reserva ecológica nacional;
- permitir uma boa inserção na paisagem, tanto no período de operação como após o encerramento.

2.2 - Projecto

Esquemáticamente um aterro de resíduos tem a seguinte constituição geral (Figura 1):

- um sistema de confinamento ou de revestimento basal e lateral que o isola dos solos envolventes e cuja função é conter os lixiviados impedindo a sua migração e a contaminação das águas subterrâneas;
- um sistema de drenagem de lixiviados;

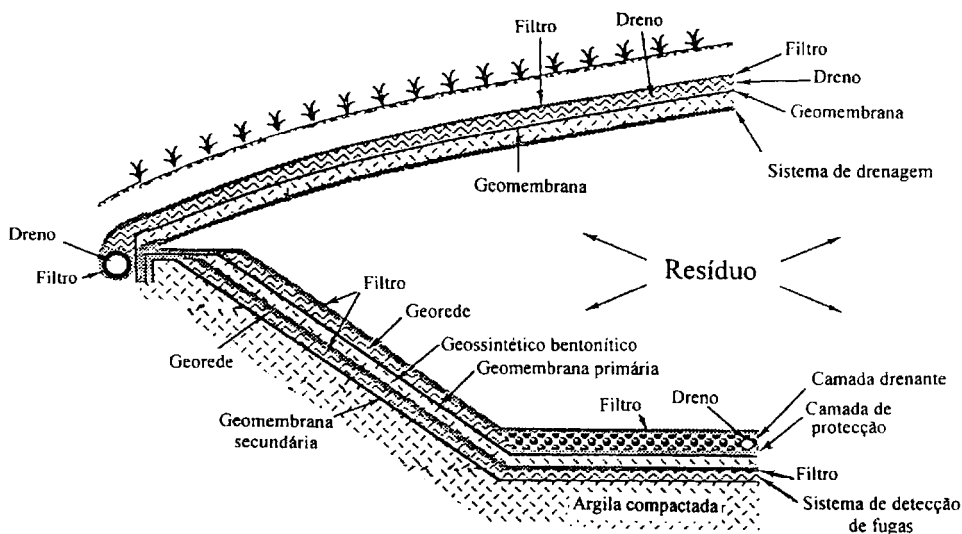


Figura 1 - Constituição geral de um aterro de resíduos

- um sistema de drenagem de gás (produzido pela decomposição da matéria orgânica, se existir);
- um sistema de drenagem superficial, com a função de controlar o escoamento superficial sobre o aterro, evitar a erosão da cobertura e controlar a drenagem superficial das áreas adjacentes;
- um sistema de confinamento de cobertura que controle a infiltração das águas superficiais e consequentemente a produção de lixiviado.

O dimensionamento da maior parte destes sistemas não constitui uma inovação do ponto de vista de engenharia, contudo é por vezes necessário proceder a algumas adaptações das técnicas existentes para o caso dos aterros de resíduos. Por exemplo, a construção frequente de aterros de resíduos em solos de baixa consistência, o interesse em maximizar a capacidade do aterro e a aplicação de materiais não tradicionais, nomeadamente materiais sintéticos, conduziu à ocorrência de casos de instabilização, provocados quer por roturas através das pilhas de resíduos e da fundação dos aterros, quer segundo as interfaces do sistema de revestimento, pondo em causa a impermeabilização do aterro. Por este motivo, a estabilidade passou naturalmente a constituir uma preocupação geotécnica muito significativa neste tipo de obras. Por outro lado, a utilização de materiais sintéticos (em substituição de materiais minerais) tornou-se uma constante neste tipo de obras e consequentemente imprescindível o conhecimento do seu comportamento nas diferentes funções em que são utilizados.

2.2.1 - Causas de instabilidade

São vários os tipos de instabilidade possíveis durante as fases de construção, operação e encerramento dos aterros de resíduos (Figura 2).

A rotura interna dos resíduos depende da sua resistência e da altura e inclinação do talude da pilha de resíduos. Esta análise pode ser efectuada pelos métodos tradicionais, a única dificuldade reside na determinação das propriedades dos resíduos. Para além de se dever ensaiar amostras suficientemente grandes, para os resultados serem representativos, acresce ainda o facto dos resíduos serem muito heterogêneos; a sua composição varia dentro do mesmo aterro de ponto para ponto (vertical e lateralmente) e as suas propriedades alteram-se no tempo, devido à sua decomposição e consolidação. Nestas circunstâncias é comum por exemplo

considerarem-se parâmetros de resistência ao corte reduzidos em cerca de 15 a 25% do valor obtido em laboratório (Bagchi, 1994).

A rotura da fundação pode ocorrer durante a construção (durante as operações de escavação). A verificação da estabilidade é efectuada pelos métodos tradicionais de estabilidade de taludes.

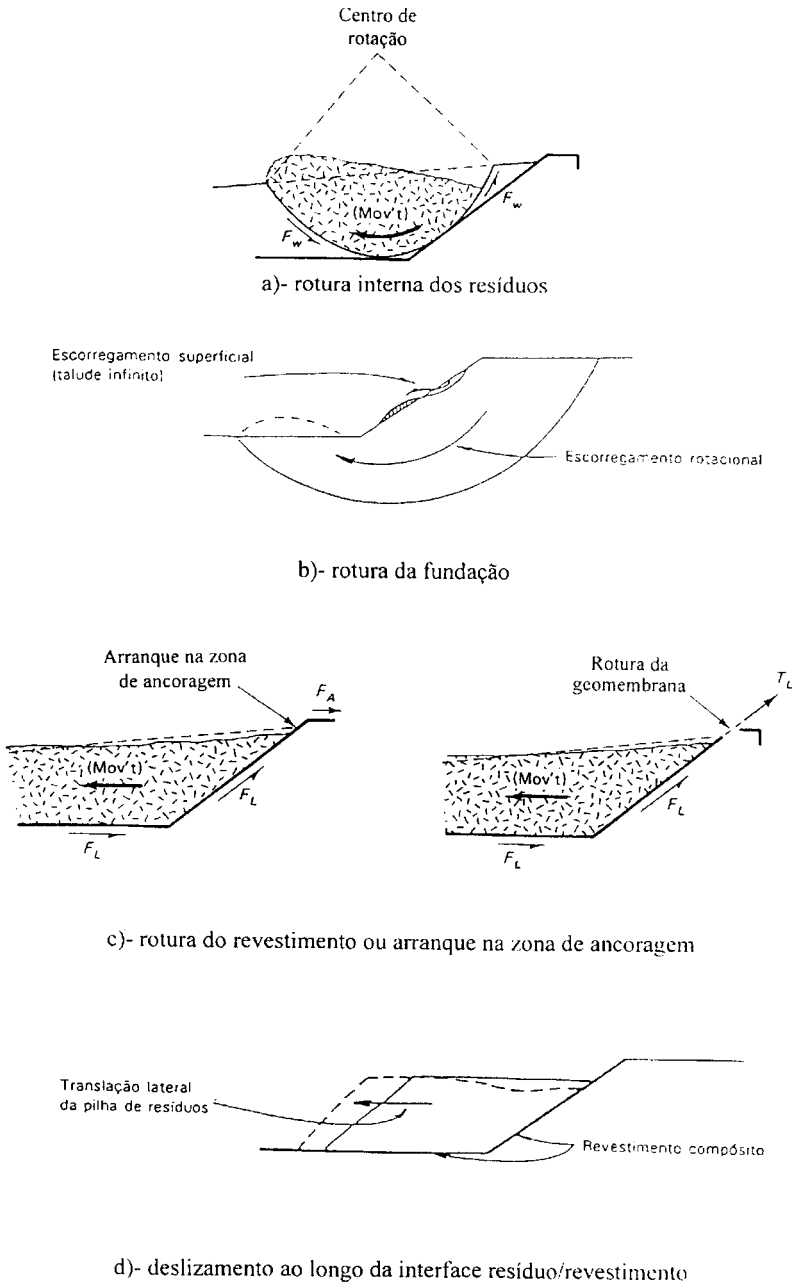


Figura 2 - Tipos de instabilidade

Nos taludes, a rotura do revestimento ou a sua deficiente ancoragem podem ocorrer tanto durante a construção como na fase de operação.

A resistência ao movimento do sistema de revestimento ao longo do talude depende do atrito entre aquele e as superfícies directamente em contacto, do atrito nas interfaces das camadas que constituem o revestimento e da resistência à tracção mobilizada na ancoragem (Figura 3):

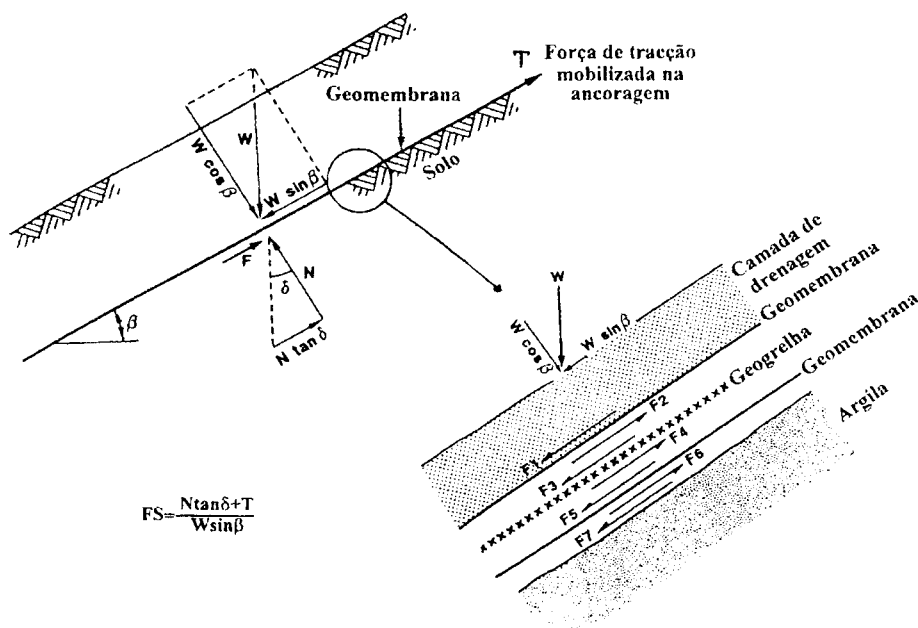


Figura 3 - Representação esquemática dos esforços agindo sobre o sistema de revestimento

Durante a operação pode igualmente verificar-se deslizamento ao longo da interface resíduo/sistema de revestimento, se a resistência ao corte entre ambos for muito baixa.

Durante e após o encerramento de um aterro, podem também existir problemas de instabilidade, nomeadamente por deslizamento ao longo das interfaces do sistema de revestimento de cobertura (por insuficiente resistência ao corte) ou por assentamento excessivo dos resíduos. Estes assentamentos resultam da decomposição dos resíduos e da sua consolidação sob o peso das camadas superiores bem como das camadas de fundação. Sendo as espessuras de resíduos no centro e bordos do aterro diferentes, vão existir assentamentos diferenciais que podem causar danos nos sistemas de drenagem e recolha de gás e lixiviados.

2.2.2 - Comportamento dos materiais sintéticos

Os materiais sintéticos são cada vez mais utilizados em aterros de resíduos, pois não só permitem aumentar a capacidade de armazenamento de resíduos (Figura 4) como também são mais homogêneos e de maior facilidade de colocação que os materiais minerais (sobretudo em taludes muito inclinados). Por outro lado quando se utilizam materiais sintéticos é mais fácil integrar os sistemas de monitorização.

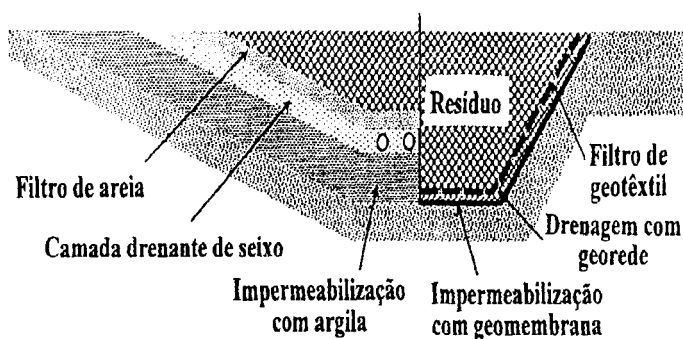


Figura 4 - Comparação entre um revestimento mineral e com materiais sintéticos

As funções dos materiais sintéticos quando utilizados em aterros de resíduos são análogas às de outras aplicações em obras geotécnicas: estanqueidade, protecção, drenagem, filtração, separação, reforço e resistência à erosão. No entanto, no caso particular dos aterros de resíduos, comparativamente com outras obras, as solicitações a que estes materiais são sujeitos estão ligadas sobretudo a agressões químicas, biológicas (lixiviados no fundo, biogás na cobertura) e mecânicas (punçoamento no fundo e nos taludes, assentamentos da cobertura), inerentes à presença dos resíduos (Quadro II).

Tem-se registado um apreciável desenvolvimento de técnicas de ensaio que, de uma forma geral, permitem conhecer com um grau de incerteza relativamente pequeno o comportamento dos materiais sintéticos face ao tipo de solicitações atrás referidas.

As características destes materiais dependem muito da qualidade da matéria prima e do processo de fabrico. Estes dois parâmetros podem facilmente ser alterados o que pode comprometer o comportamento dos geossintéticos. É por essa razão que ensaios de controlo de qualidade são recomendados para estes materiais. Este assunto será tratado com maior detalhe na fase de construção.

2.3 - Construção

O conceito de aterro de resíduos tem vindo a evoluir à medida que os conhecimentos sobre emissão de lixiviados, gases e seu impacte ambiental aumentam, e também à medida que aparecem novos materiais como as geomembranas, geocompósitos bentoníticos, geotêxteis, geogrelhas e georedes, que muito contribuíram para o desenvolvimento de novas metodologias de construção.

Sendo a legislação sobre resíduos diferente de país para país, as recomendações para a impermeabilização de fundo e taludes de aterros de resíduos também apresenta algumas diferenças, conforme se mostra na figura 5. Mas de uma forma geral pode dizer-se que na maior parte dos países a impermeabilização dos aterros de resíduos é garantida por uma "impermeabilização passiva", conferida por uma camada mineral de baixa permeabilidade ($k < 10^{-9}$ m/s), colocada imediatamente sobre o subsolo e por uma "impermeabilização activa", constituída por uma geomembrana. Para evitar danos por punçoamento na geomembrana, é aconselhável a colocação de uma camada de protecção, que pode ser um solo, um geossintético ou ambos. Finalmente, é prevista a existência duma camada

de drenagem dos lixiviados (para evitar a instalação de pressões hidráulicas sobre o sistema de impermeabilização de fundo). Deve também existir um filtro de transição, entre o dreno e os resíduos, para evitar a colmatção deste último.

Quadro II - Solicitações nos dispositivos de estanqueidade e drenagem com geossintéticos (CFGG, 1994)

Solicitações	Base	Taludes	Cobertura	
			Inclinação<5%	inclinação>5%
Química/Biológica	XXX	XX	XX	XX
Mecânica:				
Assentamentos diferenciais:				
a curto prazo	X	X		
a longo prazo	XX	XX	XXX	XX
Deslizamentos	X	XXX		XX
Punçoamentos				
a curto prazo	XXX	XXX		
a longo prazo	XXX	XX	XX	XX
Peso do resíduo	XX	XX		
Carga hidráulica	XX			
Altas temperaturas	XX	XX		
Gelo/Degelo	X	XX	XX	XX
Ultra-Violetas	X	XX	X	X
Sub-pressões (gás, líquido)	X	XX	XX	XX
Vandalismo, roedores	X	X	XX	XX
Vegetação			XX	XX
Condições atmosféricas	X (antes de armazenar)	X	XX	

Curto prazo < 6 meses, longo prazo > 6 meses
X=baixa, XX=média, XXX=alta

Uma vez atingida a cota máxima para o depósito de resíduos, deve realizar-se a sua cobertura final de modo a evitar a infiltração de água para o interior do aterro e permitir a sua recuperação paisagística. A figura 6 ilustra, para diferentes países, os sistemas de cobertura utilizados. Os geossintéticos utilizados são similares aos referidos no parágrafo anterior, com a particularidade de deverem ser mais deformáveis, para terem em consideração eventuais assentamentos diferenciais da massa de resíduos, e possuírem as características de estabilidade/anti-erosão adequadas ao seu emprego sob terra vegetal.

A construção de um aterro de resíduos é um trabalho que envolve simultaneamente, o manuseamento de materiais sensíveis a danos mecânicos, como os geossintéticos (de alguns centímetros de espessura) e por outro a utilização de máquinas pesadas, utilizadas na colocação dos solos. Estes factos implicam que a construção do sistema de impermeabilização do fundo

de um aterro de resíduos, deva ser realizada com grande cuidado, pois eventuais defeitos não detectados antes da fase de operação, serão praticamente irreparáveis, com os riscos potenciais que a fuga de lixiviados pode implicar, nomeadamente a poluição das águas subterrâneas, a perda de potabilidade, riscos para a saúde pública e prejuízos da fauna e flora.

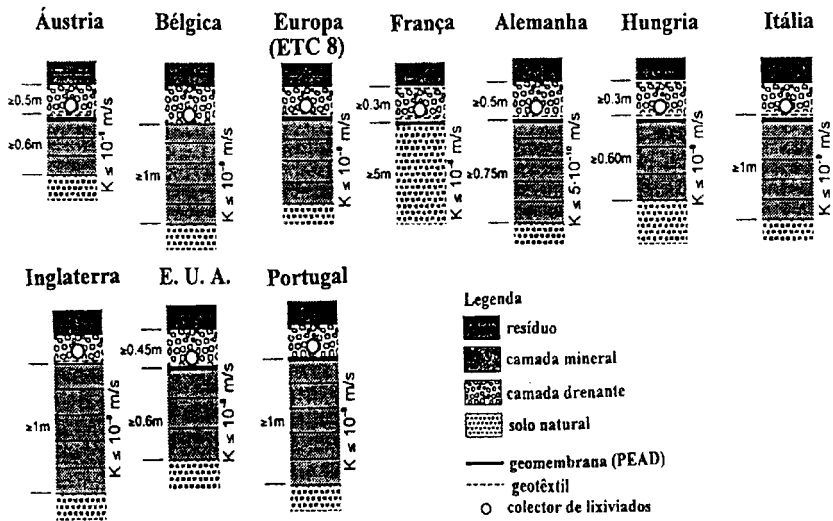


Figura.5 - Exemplos de sistemas de impermeabilização de fundo e taludes de aterros de resíduos (Manassero et al., 1996)

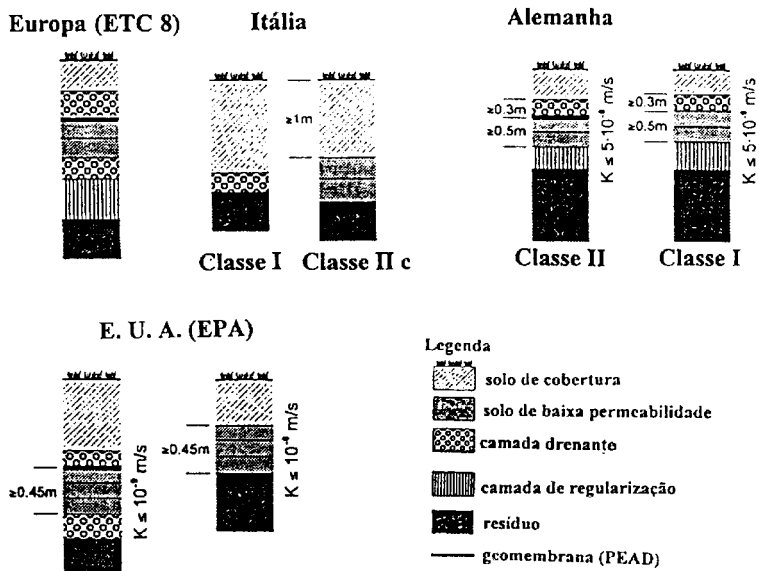


Figura 6 - Exemplos de sistemas de impermeabilização de cobertura de aterros de resíduos (Manassero et al., 1996)

Pelas razões referidas é muito importante neste tipo de obras um controlo de qualidade de construção, que através da aplicação de princípios científicos e técnicos, assegure que os materiais, solos e técnicas construtivas empregues cumprem o especificado no projecto e/ou as disposições ou especificações regulamentadas. Um plano de controlo de qualidade de construção é por isso concebido antes da construção do aterro incluindo nomeadamente:

- as responsabilidades e qualificações dos intervenientes;
- as actividades de avaliação de controlo de qualidade;
- os procedimentos de amostragem;
- o conteúdo dos relatórios das actividades de avaliação de controlo de qualidade.

As actividades de avaliação de controlo de qualidade consistem na observação e realização de ensaios por um inspector durante a construção dos seguintes componentes:

- fundação;
- sistema de impermeabilização e drenagem;
- sistema de recolha de lixiviados e seu tratamento;
- sistema de recolha de biogás e seu tratamento;
- selagem.

Um controlo inicial deve incluir:

- revisão dos desenhos de projecto e especificações dos diferentes componentes do sistema (se as previsões se afastarem muito da realidade tem que ser modificado o projecto);
- inspecção dos solos para aterro para se assegurar estarem de acordo com o projecto (a inspecção não é só visual, pode recorrer-se eventualmente a ensaios);
- realização de ensaios de conformidade sobre os materiais sintéticos (por um laboratório independente do produtor ou fabricante), revisão do plano de controle de fabrico, e avaliação da adequabilidade do equipamento de instalação e de realização de juntas;
- eventual construção de aterros experimentais para verificar a adequabilidade dos materiais, projecto, equipamentos e técnicas construtivas.

O controlo a efectuar-se durante a construção inclui nomeadamente:

- observação visual contínua em todas as fases de construção (práticas incorrectas ou materiais inadequados devem ser relatados para se poderem aplicar as medidas correctivas adequadas);
- ensaios de laboratório e *in situ*;
- nomeadamente devem ser inspeccionados os componentes indicados no Quadro III.

Neste quadro são ainda referidos os factores e métodos de inspecção para os materiais sintéticos, por ser um domínio mais específico.

O controlo de qualidade dos materiais sintéticos não se limita ao controlo de fabrico, mas também relativamente ao seu manuseamento, armazenamento e instalação. O fabricante deve providenciar a identificação individual de cada rolo de material, assim como um certificado com os respectivos resultados do controlo de qualidade de fabrico. A análise destes resultados, complementada por outros resultados de ensaio realizados num laboratório independente, permitirá à fiscalização decidir quanto à aceitação dos materiais.

O armazenamento e transporte de geossintéticos devem também ser devidamente controlados, pois alguns destes materiais são sensíveis a determinadas condições atmosféricas e facilmente punccionáveis.

Após concluídos os trabalhos referentes a um dado componente do sistema, e antes de se continuar os trabalhos sobre um outro componente, deve ser feita uma inspecção visual (e/ou ensaios) para garantir que foram realizados de acordo com o projecto. Por exemplo antes da colocação da geomembrana deve ser feita uma inspecção à fundação para averiguar nomeadamente a capacidade de suporte, o estado da superfície e a direcção/ sentido do fluxo de lixiviados. Deve ser realizado um relatório onde serão incluídas, em caso de defeitos, as medidas correctivas realizadas.

Quadro III - Factores a serem inspeccionados

Componentes		Factores	Método da inspecção
Geomembranas		<ul style="list-style-type: none"> • espessura • resistência à tracção • resistência ao rasgamento • transporte e armazenamento • materiais e equipamento para soldadura • soldaduras (i) • soldaduras(ii) • ancoragem • recobrimento (mais atenção à 1ª camada) 	<ul style="list-style-type: none"> - ensaio destrutivo - ensaio destrutivo - ensaio destrutivo - observação - certificado do produtor - ensaios destrutivos - ensaios não destrutivos - observação - observação
Drenos e filtros sintéticos		<ul style="list-style-type: none"> • tipo de material • transporte e armazenamento • recobrimento • sobreposições • ancoragem temporária • rugas / dobras • propriedades: resistência à tracção, ao punçoamento, ao rasgamento, aos agentes atmosféricos, resistência química (curto prazo), permeabilidade (k), porometria (O_{90}) 	<ul style="list-style-type: none"> - certificado do produtor - observação - observação - observação - observação - observação - ensaios destrutivos
Fundação (solo)			
Cobertura (solo)			
Diques			
Camada de solo impermeável			
Sistema de recolha de lixiviados	Camada drenante		
	Camada filtrante		
Sistema de recolha de gás	Camada drenante		
	Camada filtrante		
Tubos			
Estruturas de betão			
Equipamento eléctrico e mecânico			

A instalação das geomembranas deve obedecer a um plano previamente discutido, devendo evitar-se rugas ou dobras, pois a sua existência pode condicionar a rotura da geomembrana.

Em aterros de resíduos, sendo utilizadas quase exclusivamente geomembranas de polietileno de alta densidade, a união entre diferentes rolos de geomembranas é realizada por dupla soldadura de fusão, excepção feita aos locais onde as máquinas não conseguem passar, tendo de se efectuar nesse caso uniões por extrusão. No fundo, as uniões devem ser realizadas na direcção do fluxo do lixiviado e nos taludes ao longo da linha de maior declive.

Um controlo contínuo é exigido durante a realização das juntas, pois inúmeros factores atmosféricos como o sol, vento, chuva e humidade, e outros, como a temperatura, velocidade e pressão, associados ao equipamento utilizado para realizar as juntas, podem afectar substancialmente o seu comportamento. Ensaio não destrutivos têm de ser realizados em todas as juntas, sem excepção, pois o mau funcionamento de uma, pode comprometer a estanqueidade de todo o aterro. De referir que grande parte dos defeitos detectados durante o período de instalação são devidos a uma má soldadura.

Ensaio destrutivos devem igualmente ser preconizados para verificação do comportamento mecânico ao corte e arranque das juntas. Os resultados do controlo devem ser devidamente registados, pois são de importância fundamental para a decisão de aceitação ou rejeição de cada junta e para preconizar eventuais trabalhos de reparação, até à aceitação final da “camada geomembrana”.

Após a colocação da geomembrana, é da máxima importância a sua protecção mecânica com um geotêxtil de adequada resistência ao punçoamento, para que a camada drenante, a seguir colocada, não danifique a geomembrana. De referir que muitos dos danos da geomembrana são devidos à colocação menos cuidada da camada suprajacente, não sendo por isso facilmente detectáveis (e portanto irreparáveis) a não ser através da monitorização do sistema de impermeabilização.

Existem actualmente muitos métodos não destrutivos para detecção de danos na geomembrana. Podem dividir-se em duas categorias: móveis e fixos. Os primeiros conseguem localizar roturas inferiores a 5 mm de diâmetro, sob 3 a 4 m de resíduos. Os sistemas fixos podem ser de curta, média ou longa duração e permitem uma monitorização contínua do sistema de impermeabilização, sob 0,5 a 10 m de resíduos (Peggs, 1996). Contudo, a altura mais apropriada para a detecção e posterior reparação dos danos é quando a camada suprajacente atinge cerca de 0,5 m, pois ainda será fácil fazer as reparações necessárias e será mais difícil a rotura da geomembrana devida à colocação das camadas seguintes.

2.3.1 - Colaboração do LNEC no controlo de qualidade de construção

A intervenção do LNEC teve por objectivo colaborar no controle da qualidade da construção das infra-estruturas de nove aterros multimunicipais de resíduos sólidos urbanos, construídos entre 1997 e 1999, nomeadamente no que respeitou às acções e aos processos construtivos que envolveram a utilização de solos e de geossintéticos na construção do sistema de confinamento lateral e do fundo dos aterros e do sistema de drenagem interna.

No que respeita aos solos, a intervenção do LNEC teve por objectivo a garantia do controle da qualidade nas operações de modelação e preparação da fundação do aterro, selecção, colocação e compactação de solos de revestimento, bem como a selecção e colocação de solos em camadas com função drenante e/ou de transição na base do aterro.

No que respeita aos geossintéticos, a intervenção do LNEC teve por objectivo assegurar a qualidade nas operações de selecção, transporte, armazenamento e aplicação dos geossintéticos, bem como das suas eventuais reparações após aplicação. A concretização destes

objectivos compreendeu os trabalhos prévios de preparação do controle, a assistência em obra durante a construção e em laboratório tal como, a seguir, se descreve:

Acções prévias de preparação do controle

A execução do controle em obra pressupõe as seguintes acções preparatórias:

- elaboração de especificações e/ou de planos de controle da qualidade de construção, tendo em conta as especificações e as soluções construtivas constantes do projecto de execução de cada aterro, as características do sítio e os prazos de execução;
- definição das funções e da necessária articulação entre os diferentes intervenientes na obra (projectista, construtor, fiscalização, dono de obra. e LNEC) visando a implementação do plano de avaliação da qualidade da construção;
- realização de acções de sensibilização aos intervenientes na execução e no controle da qualidade da construção, nomeadamente no que se refere aos aspectos técnicos relativos à manipulação e integridade de materiais não tradicionais como os geossintéticos.

Assistência em obra

A assistência em obra, no que se refere aos geossintéticos, compreendeu a realização das seguintes acções:

- su pervisão dos procedimentos de transporte, armazenamento e colocação dos geossintéticos;
- realização de ensaios de controle destrutivos e não destrutivos:
- determinação da resistência das soldaduras das geomembranas (ensaios de arranque (*cf. peel test*) e ensaios de corte (*cf. shear test*));
- verificação *in situ* da estanqueidade das soldadura das geomembranas (ensaios de pressão (*cf. air pressure test*) e ensaios de vácuo (*cf. vacuum test*)).

2.4 - Operação

O bom funcionamento de um aterro depende em primeiro lugar de um projecto e uma construção adequados, mas é sem dúvida uma operação correcta que pode fazer a diferença entre uma “lixreira” e um aterro “controlado”.

Assim, é fundamental para além de uma manutenção correcta das instalações e equipamentos e do controlo analítico e quantitativo dos resíduos entrados, promover o enchimento do aterro de acordo com o plano de exploração concebido.

Os resíduos podem ser colocados em granel ou em fardo. No primeiro caso, os resíduos são espalhados e compactados em camadas sucessivas, seguindo-se então a colocação e compactação da cobertura diária com solos adequados. No segundo caso, a diferença é que os resíduos são previamente compactados e enfardados, sendo então os fardos colocados lado a lado no aterro.

A cobertura diária (normalmente com cerca de 0,15 m) contribui para impedir a infiltração da água da chuva, evitar a formação de odores, proliferação de insectos e roedores, risco de incêndio, etc.

A sequência específica de colocação dos resíduos depende das características do local (topografia e hidrogeologia) e da quantidade de material de cobertura disponível. O preenchimento do aterro faz-se normalmente por fases, como mostra a figura 7, sendo os resíduos depositados em áreas individualizadas. Sempre que um aterro tem uma altura superior a 9 m é aconselhável a colocação de uma camada intermédia, a cerca de 3 a 4,5 m da base, antes de passar ao nível superior. Atingido o nível máximo, é colocada uma camada de cobertura (de 0,6 a 1,2 m) cuja função é de impedir a acumulação da água das chuvas, facilitar o escoamento superficial e fornecer o suporte necessário para o desenvolvimento das raízes da vegetação.

Durante a operação deve ainda efectuar-se o controlo das águas superficiais e subterrâneas, bem como análises periódicas dos resíduos, lixiviados e gases, o que implica para os dois últimos a instalação prévia de sistemas de controlo/monitorização.

2.4.1 - Monitorização para controlo do biogás

Num aterro, a produção não controlada de gás pode dar origem a problemas, como sejam a sua concentração em bolsas no interior do aterro ou a sua migração para zonas inadequadas, podendo provocar acidentes por explosão.

Para o controlo do gás podem utilizar-se sistemas activos ou passivos, isto é, no primeiro caso o gás é extraído do aterro através de um sistema de bombagem por vácuo e poços de extracção; no segundo caso o gás é naturalmente conduzido para a atmosfera.

O gás produzido nos aterros exige uma monitorização cuidada, que permita uma actuação eficaz em caso de perigo. A presença de gás pode ser detectada recorrendo à termografia, fotografia de infra-vermelhos ou mais vulgarmente através da recolha e análises de amostras de ar em poços instrumentados (que devem instalar-se tanto no interior como na área adjacente ao aterro).

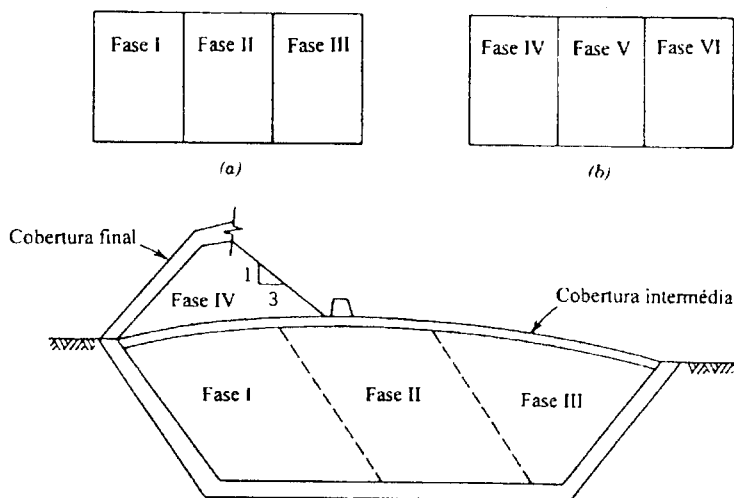


Figura 7 - Exemplo de sequência de preenchimento de um aterro de resíduos (Bagchi, 1994)

2.4.2 - Monitorização para controlo da contaminação com lixiviados

Os lixiviados são líquidos poluentes que se formam no interior do aterro devido à acção conjunta da degradação física e bioquímica dos resíduos e da infiltração das águas da chuva.

Os potenciais problemas associados aos lixiviados relacionam-se com a sua migração para o exterior do aterro, e consequente poluição das águas superficiais e subterrâneas. A adição de lixiviados, ricos em compostos orgânicos (alguns não biodegradáveis) e soluções inorgânicas de iões metálicos em reduzidos estados de oxidação, nos cursos de água provoca uma diminuição do teor em oxigénio e consequente extinção da fauna e flora aquática. A contaminação das águas subterrâneas por lixiviados torna o seu aproveitamento e consumo perigoso para a saúde pública com a agravante de persistir por longos períodos, devido quer às diminutas quantidades de oxigénio dissolvido na água quer à reduzida taxa de dispersão que caracteriza estas águas.

Pelas razões apontadas, o controle dos lixiviados é um dos aspectos importantes a ter em consideração durante o período de operação. Um sistema de impermeabilização-drenagem é fundamental para assegurar a colecta dos lixiviados para posterior tratamento (reciclagem, evaporação, tratamento biológico ou/e físico-químico, etc.). O objectivo do tratamento dos lixiviados é a sua inertização para poderem ser admitidos, sem riscos, no meio externo.

Quaisquer que sejam os materiais utilizados para a impermeabilização do aterro, é inevitável alguma migração de lixiviados e contaminantes através da base do aterro. Embora num aterro bem construído a migração de lixiviados deva ser muito reduzida e consequentemente os impactes ambientais a curto e a longo prazo sejam mínimos, é inegável a importância de uma monitorização eficaz de detecção de fugas de lixiviados.

Para a detecção de fugas de lixiviados podem utilizar-se duas técnicas distintas: a detecção directa e indirecta. A primeira é feita através de aparelhos (lisímetros) colocados por baixo da geomembrana e que permitem conhecer a qualidade e volume de fugas (Figura 8). Para a detecção indirecta foram desenvolvidos inúmeros aparelhos que de uma forma geral detectam as alterações do teor em água do solo ou as alterações de concentração química (salinidade).

Para averiguar a qualidade das águas subterrâneas nas áreas envolventes de aterros de resíduos é usual também proceder-se à sua monitorização. Esta é normalmente feita através de um conjunto de poços (num mínimo de quatro, localizados um a montante e três a jusante do aterro). O interesse dos poços a montante é somente o de representar a qualidade da água não afectada pelo aterro. As amostras de água recolhidas são posteriormente sujeitas a análises químicas para determinação de pH, conductividade eléctrica, oxigénio dissolvido, etc.

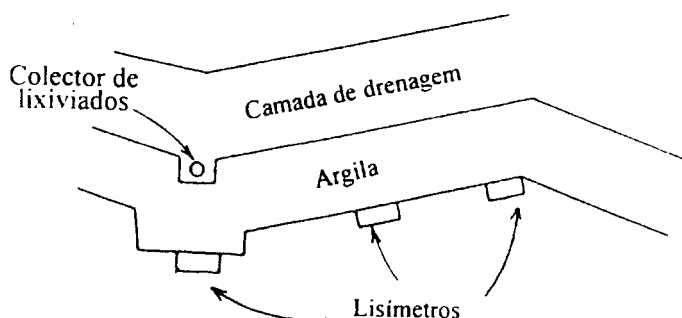


Figura 8 - Exemplo de localização de lisímetros na base de um aterro de resíduos

2.5 - Encerramento e reabilitação do local

Quando um aterro atinge a sua capacidade máxima deve providenciar-se a sua cobertura, sem descurar a integração no meio ambiente e futura utilização do local. Após o encerramento e durante um período não inferior a 10 anos deve providenciar-se uma vigilância e manutenção do aterro, por forma a verificar se a operacionalidade dos seus componentes está dentro dos limites de segurança previstos.

De modo geral, os problemas que podem comprometer a futura utilização do local são a existência de assentamentos diferenciais e subsidência, e os riscos de explosão devida à acumulação de gás. Na maior parte dos casos estes locais são reaproveitados para fins agrícolas, mas nos últimos anos tem vindo a aumentar a sua utilização para zonas de recreação: campos de jogos, parques, etc. A sua reutilização para zonas comerciais ou outras que impliquem a construção de edificações só é possível recorrendo a técnicas construtivas especiais para as fundações (por exemplo fundações indirectas) e a medidas de segurança adequadas.

3 - COMENTÁRIOS FINAIS

Uma maior consciencialização dos problemas ecológicos nos últimos anos implicou uma revolução da política da gestão dos resíduos e o aparecimento de uma legislação mais rigorosa no sentido de minimizar os riscos para o ambiente e saúde pública.

O método de destino final de resíduos através de deposição em aterro reveste-se de vantagens mas também de alguns inconvenientes: é económico, é indispensável em qualquer um dos outros processos de tratamento de resíduos, consegue “absorver” uma grande capacidade de resíduos, os equipamentos necessários para a operação são comuns e pode ser reutilizado o local após encerramento. Os inconvenientes estão sobretudo ligados à fuga de lixiviados e biogás, ou seja aos riscos de contaminação e explosão.

Com este artigo pretendeu-se sobretudo pôr em evidência o papel decisivo da geotecnia neste tipo de obras bem como a importância da garantia de qualidade de construção. Contudo, não gostaria de finalizar sem fazer um desafio para o estudo de algumas das muitas incógnitas que actualmente subsistem, nomeadamente:

- análise das “características geotécnicas” dos resíduos (parâmetros físicos, de resistência, de deformabilidade e de permeabilidade);
- análise da percolação no interior do aterro através do estudo da conductividade em meios porosos parcialmente saturados (por coexistir uma parte líquida, o lixiviado e uma gasosa, o gás produzido pela decomposição do resíduo);
- desenvolvimento de métodos de dimensionamento para os dispositivos de impermeabilização e drenagem, na sua maioria simbioses de materiais sintéticos e naturais;
- melhoramento dos métodos de análise de estabilidade global e interna dos taludes, tendo em consideração a baixa resistência ao corte de muitos dos geossintéticos empregues;
- previsão dos assentamentos dos resíduos (que coexistem em diferentes estados de decomposição) que condicionam a deformação da cobertura;
- análise dos problemas geotécnicos relacionados com a insuficiente capacidade de carga, fenómenos de subsidência, produção de gases e lixiviados etc, e estudo das soluções para a recuperação e futura reutilização segura do local.
- análise da evolução das reacções químicas e biológicas dos lixiviados e biogás, da forma como irão reagir os geossintéticos a essas agressões e as consequências na integridade do sistema de impermeabilização a longo prazo.

AGRADECIMENTOS

O autor gostaria de agradecer ao Programa Praxis do Ministério da Ciência e Tecnologia e ao FEDER, pelo financiamento no âmbito do Projecto 3/3.1/CEG/2598/95, para a compra dos equipamentos necessários à realização dos ensaios de controlo de qualidade realizados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BAGCHI, A. - *Design, construction and monitoring of landfills*, 2nd Ed. John Wiley & Sons, Inc. , 1994.
- BARROSO, M. - *Dimensionamento e impacte ambiental de aterros sanitários*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Coimbra, Portugal, 1994.
- CFGG - *Recommandations pour l'utilisation des geosynthetiques dans les centres de stockage de déchets*. França1994.
- DANIEL, D. E. - *Geotechnical Praticice for Waste Disposal*. Chapman & Hall, London, 1993.

- DANIEL, D. E.; KOERNER R. M. - *Waste Containment facilities: Guidance for construction, quality assurance and quality control of liner and cover systems*. ASCE Press, American Society of Civil Engineers, N. Y, 1995.
- DGQA - *Qualidade do ambiente*. Direcção Geral da Qualidade do Ambiente, 1990/1991.
- MANASSERO, M.; VAN IMPE, W. F.; BOUAZZA, A. - *Waste disposal and containment. Proc. of the 2nd International Congress on Environmental Geotechnics*. 5-8 de Nov., Japão, State of the art report, 1996.
- M.G. LOPES et al. 1996 *MSW issues in Portugal - The Seixal sanitary landfill* comunicação apresentada ao 1º Congresso Europeu sobre Geossintéticos, Maastricht, 30 de Setembro a 2 de Outubro, 1996.
- M.G. LOPES - *Utilização de geossintéticos em aterros de RSU: controlo de qualidade*. Comunicação apresentada ao 6º Congresso Nacional de Geotecnia, Lisboa, 15 a 18 de Setembro, 1997.
- M.G. LOPES - *Experiência no controlo de qualidade de construção de aterros de resíduos* Comunicação apresentada nas 2ª Jornadas Técnicas Internacionais de Resíduos, Lisboa, 13 a 15 de Outubro, 1999.
- MITCHELL, J. - *Geotechnics of soil-waste material interactions*. 2nd International Congress on Environmental Geotechnics, Osaka, Japão, de 5 a 8 de Novembro, 1996.
- MONJOIE, A.; RIGO, J. M.; CHIAPOLINI, Cl. - *Vademecum pour la réalisation des systèmes d'étanchéité drainage artificiels pour sites d'enfouissement technique en Wallonie*. Université de Liège, 1992.
- PEGGS, IAN D. - *Defect identification, leak location, and leak monitoring in geomembrane liners*. Proc. of the 1st European Geosynthetics Conference, 30 de Setembro a 2 de Outubro, Holanda, 1996.
- PEREIRA NETO, J. T. - *On the treatment of municipal refuse and sewage sludge using aerated static pile composting - a low cost technology approach*. Tese de doutoramento, Leeds University, Inglaterra, 1987.