

# O ATERRO SANITÁRIO COMO BIO-REACTOR: DESAFIOS GEOTÉCNICOS

## Bioreactor landfills: geotechnical challenges

Maria da Graça Alfaro Lopes\*

Maria do Carmo Conde\*\*

**RESUMO** – Em Portugal, no âmbito da gestão dos resíduos sólidos urbanos e face à situação existente no ano de 1996, os aterros sanitários foram então encarados como a solução privilegiada para a resolução do passivo ambiental. Face à preocupação de contaminação dos solos e das águas subterrâneas, estes aterros foram projectados com um sistema de confinamento de fundo para isolar os resíduos do exterior, um sistema de cobertura para minimizar a entrada da água das chuvas e consequentemente a produção dos lixiviados, um sistema de drenagem, captação e tratamento de lixiviados e um sistema de drenagem, captação e tratamento de biogás.

Um outro tipo de abordagem, que ultimamente tem vindo a ganhar adeptos, recorre à técnica da recirculação dos lixiviados ou da injeção de outros líquidos, ou até de ar, na massa de resíduos depositados, em condições controladas, utilizando o aterro como um reactor biológico. Esta tecnologia implica uma mudança de perspectiva sobre o objectivo do aterro, que deixa de ser um mero depósito de resíduos para passar a ser também um local de tratamento de resíduos.

Este artigo tem por objectivo, por um lado, mostrar as diferentes técnicas operacionais empregues num aterro bio-reactor e as respectivas vantagens e desvantagens relativamente ao aterro dito “convencional”. Pretende, também, chamar a atenção para os problemas geotécnicos que podem surgir com o emprego desta nova tecnologia e indicar algumas recomendações para os obviar.

**SYNOPSIS** – In Portugal the predominant municipal solid waste disposal option in use today is the sanitary landfill. Normally in these landfills the waste is isolated from the ground water by a liner system, and rain water is prevented from entering the waste by a landfill cap, the liquid wastes were banned from landfills and leachate management systems were required to collect and remove liquids from the waste.

This method minimizes the potential environmental impact of the leachate by reducing the generation of leachate and containing the leachate within the landfill.

Another approach, the bioreactor landfill, has received increasing attention over the last several years. A bioreactor landfill changes the goal of landfilling from the storage of waste to the treatment of waste by the controlled addition of non-hazardous liquid wastes or water which accelerates the decomposition of waste and landfill gas generation.

This paper presents an overview of the main types of bioreactor landfill designs and the advantages and disadvantages of this innovative technology over conventional landfills. The issues and/or geotechnical concerns and the recommendations for its application are also presented.

**PALAVRAS CHAVE** – Aterros de resíduos sólidos urbanos, aterros bio-reactores, digestão aeróbica e anaeróbica, recirculação de lixiviado.

## 1 – INTRODUÇÃO

A consciencialização da necessidade de preservar a saúde pública e a qualidade do meio ambiente e de proteger os solos e os recursos hídricos, tem implicado nas últimas décadas uma grande evolução na gestão dos resíduos.

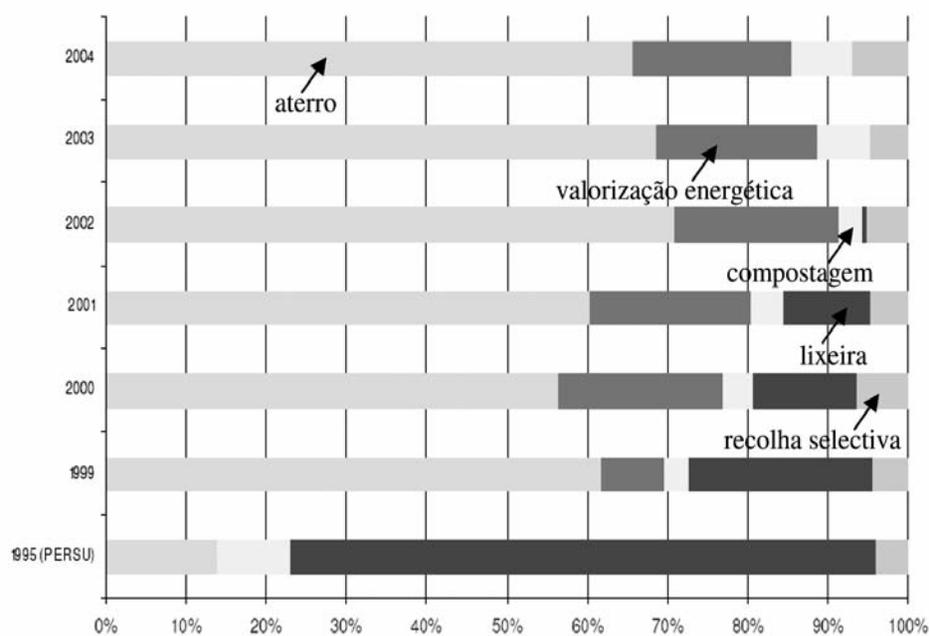
---

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

\*\* Equiparada a Assistente do 2º Triénio do ISEL. E-mail: mcarmo@dec.isel.ipl.pt

A partir de 1996, a gestão de resíduos em Portugal e nomeadamente a gestão dos resíduos sólidos urbanos (RSU) teve um grande impulso e desenvolvimento, sobretudo a partir da aprovação, em Novembro de 1997, do Plano Estratégico de Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos (PERSU). Os resultados das acções desenvolvidas são bem visíveis na Figura 1 onde se compara a situação existente em Portugal em 1995 e 2004.

No âmbito da gestão dos RSU e face à situação existente no ano de 1995, os aterros sanitários foram então encarados como a solução privilegiada para a resolução do passivo ambiental. Estes aterros ditos “convencionais” foram projectados com um sistema de confinamento de fundo para isolar os resíduos do exterior e um sistema de cobertura para minimizar a entrada da água das chuvas e consequentemente a produção dos lixiviados, um sistema de drenagem, captação e tratamento de lixiviados e um sistema de drenagem, captação e tratamento de biogás. Face à preocupação da contaminação das águas subterrâneas, nos aterros convencionais procurou-se minimizar a produção de lixiviados através da minimização da entrada de água, o que tem como contrapartida uma inibição da biodegradação dos resíduos, que continuam intactos durante largos períodos de tempo (de 30 a 50 anos, ou mais) (Richard *et al.*, 2000). Esta medida pode implicar não só a restrição da utilização desse local durante anos, mas também a necessidade de uma contínua manutenção até à sua estabilização. E, se estabilização for atingida num tempo superior ao tempo de vida útil dos materiais sintéticos de confinamento, como é o caso das geomembranas, o seu mau funcionamento pode ter consequências graves na contaminação dos solos e das águas superficiais e subterrâneas.



	1995 (PERSU)	1999	2000	2001	2002	2003	2004
Recolha Selectiva	133600	192609	284878	25413	235032	21505	302456
Lixeira	2438200	992554	590320	476614	27766	0	0
Compostagem	300600	139119	168199	189711	134714	286234	340773
Valorização Energética	0	349085	929635	898183	943928	891905	876753
Aterro	467600	2690285	2558200	2720826	3276257	3031535	2909890

**Fig. 1** – Evolução do destino final dos RSU em Portugal (1995-2004), Fonte: INR.

Com o objectivo de obviar este tipo de problemas nos aterros convencionais, outras abordagens têm surgido. Uma que tem vindo a ganhar adeptos, tem por objectivo acelerar a degradação biológica dos resíduos e estabilizar o processo num período bem mais curto (entre 5 e 10 anos). Esta abordagem implica uma mudança de perspectiva sobre a finalidade do aterro convencional, que deixa de ser um mero depósito de resíduos para passar a ser também um local de tratamento de resíduos, funcionando o aterro nestas condições como um reactor biológico (bio-reactor).

Em face das apreensões que subsistem sobre as possibilidades de um aterro de resíduos funcionar como um bio-reactor, neste artigo começa-se por apresentar e comparar os diferentes modos operacionais que têm sido empregues. Baseando-se esta tecnologia na aptidão de distribuir a humidade na massa de resíduos, julgou-se igualmente importante apresentar e comparar os diferentes métodos de recirculação dos lixiviados. Por fim, discute-se as vantagens e inconvenientes desta tecnologia, chama-se a atenção para os problemas geotécnicos que podem surgir e apresentam-se algumas recomendações para os obviar.

## 2 – DECOMPOSIÇÃO DOS RESÍDUOS NO ATERRO SANITÁRIO

Para se perceber os princípios subjacentes à operação de um aterro quando funciona como um bio-reactor é importante entender como se processa a decomposição dos resíduos num aterro sanitário. Esta decomposição passa por várias fases (Figura 2). Cada fase, caracterizada pela qualidade e quantidade de lixiviado e pelo gás produzido, marca uma mudança no processo microbiológico que se processa no aterro. Estas fases são comuns ao aterro sanitário convencional e ao aterro que funciona como bio-reactor, a diferença entre ambos está somente no tempo entre fases e no tempo para completar a degradação dos resíduos.

Na **fase I, Aeróbia**, a humidade começa a acumular-se e o oxigénio existente nos resíduos ainda recentes começa a ser consumido por bactérias aeróbias, verificando-se a decomposição biológica dos resíduos sob condições aeróbias. Esta fase é normalmente curta pois o seu factor determinante é o oxigénio que rapidamente se reduz.

Na **fase II, Transição**, com a redução drástica do oxigénio, começam a desenvolver-se condições anaeróbias, detectáveis pelo aumento da carência química de oxigénio (CQO) e de ácidos gordos voláteis (AGV). A matéria orgânica sólida (hidratos de carbono, proteínas e gorduras) é hidrolisada e transformada em ácidos gordos, álcoois e dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ).

Nesta fase entram em acção as bactérias fermentativas. A maior parte dos lixiviados produzidos nesta fase resultam da água libertada pelos resíduos durante a sua consolidação ou da ocorrência de precipitação.

A **fase III, Acidogénese**, inicia-se à medida que o oxigénio vai desaparecendo dos resíduos depositados. Os ácidos gordos e álcoois são transformados em ácido acético, hidrogénio ( $\text{H}_2$ ) e dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), devido às bactérias acidogénicas. Estas bactérias, predominantes nesta fase, conduzem a uma acumulação de ácido carboxílico e, conseqüentemente, ao abaixamento do pH. Os valores de carência bioquímica de oxigénio (CBO) e de carência química de oxigénio (CQO) atingem, nesta fase, os valores mais elevados, devido à dissolução dos ácidos orgânicos nos lixiviados. A razão CBO/CQO (biodegradabilidade) é máxima, atingindo valores superiores a 0,4. À medida que o pH baixa, os lixiviados tornam-se quimicamente agressivos (ácidos) e aumenta a solubilidade de numerosos compostos (ex.: metais e compostos inorgânicos).

Na **fase IV, Metanogénese**, os microrganismos metanogénicos tornam-se predominantes convertendo o ácido acético e o gás hidrogénio em metano ( $\text{CH}_4$ ) e dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). A formação de ácidos continua mas a um ritmo consideravelmente menor. Nesta fase, os valores de CBO e CQO começam a baixar (devido à presença de ácidos húmicos e fúlvicos) e o pH a aumentar à medida que os ácidos são consumidos, dando origem ao biogás. A produção de biogás atinge um

valor máximo, decrescendo depois à medida que os ácidos são consumidos. O aumento do pH (que gradualmente estabiliza em valores neutros ou ligeiramente alcalinos) provoca uma redução dos constituintes inorgânicos em solução, nomeadamente dos metais pesados.

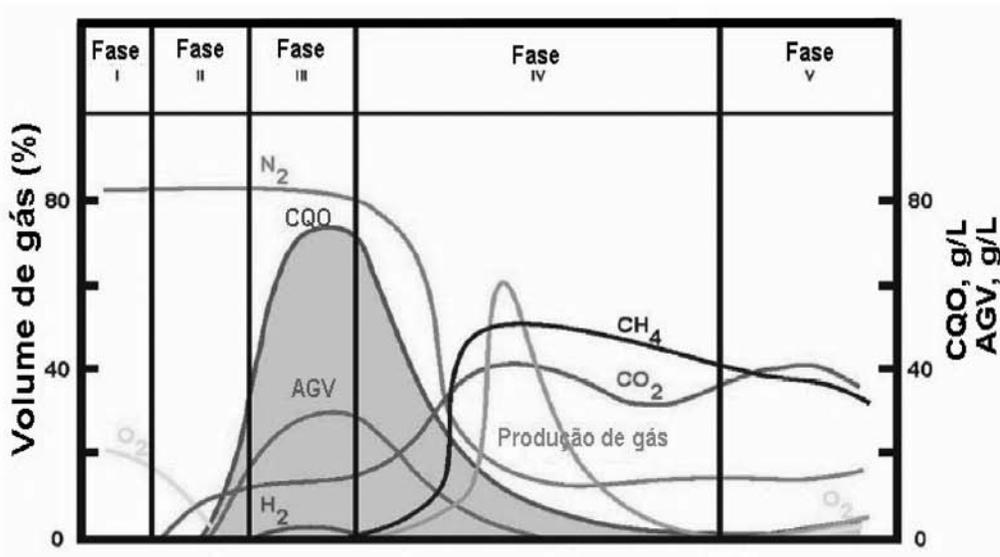
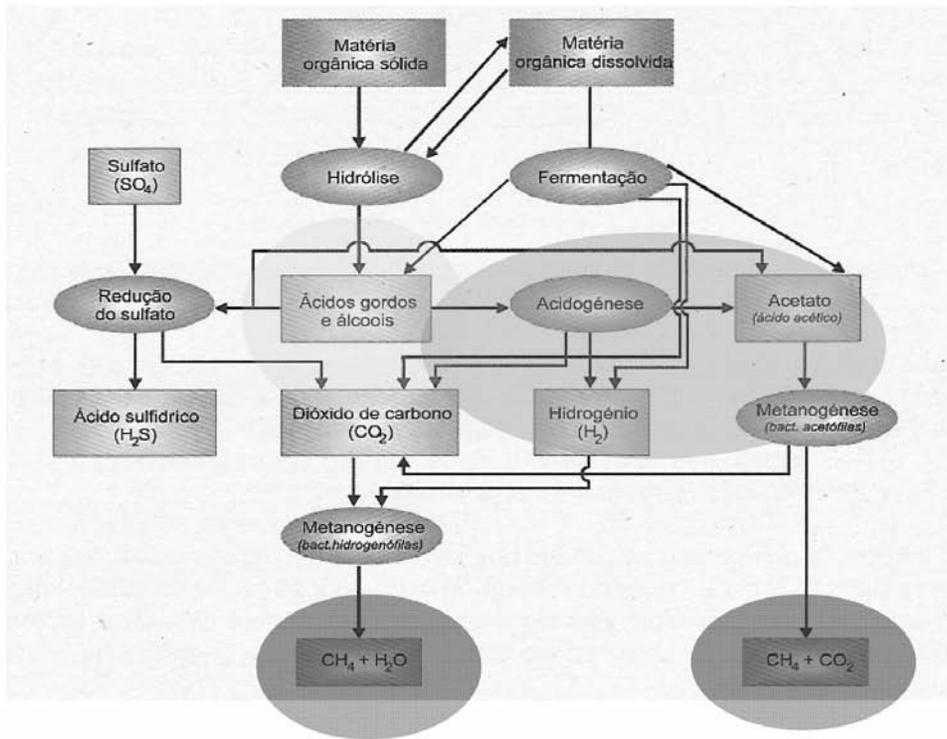


Fig. 2 – Fases de decomposição dos resíduos e produção de gás (Interstate Technology & Regulatory Council Alternative Landfill Technologies Team, 2006 e INR, 2002).

A **fase V, Estabilização**, ocorre após a conversão em CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> dos materiais orgânicos facilmente biodegradáveis. Esta fase é caracterizada por uma queda abrupta da produção de biogás, por concentrações estáveis dos constituintes do lixiviado e pela degradação, ainda que lenta, de materiais biodegradáveis mais recalcitrantes.

### 3 – MODOS DE OPERAÇÃO DE UM BIO-REACTOR

O termo “bio-reactor” é utilizado para um aterro de resíduos concebido para otimizar o processo microbiológico da decomposição orgânica dos resíduos e, relativamente a um aterro convencional, diminuir substancialmente o período de tempo necessário à sua estabilização. Para um aterro de resíduos funcionar como bio-reactor tem de possuir um sistema de confinamento para isolar os resíduos do exterior; para cumprir o objectivo de aumentar a velocidade de decomposição dos resíduos, deve conseguir promover a degradação de microrganismos, quer por adição de alguns elementos (nutrientes, oxigénio e/ou líquidos), quer controlando outros elementos (ex.: a temperatura e o pH).

Dependendo do tipo de construção e utilização prevista para o aterro sanitário após o encerramento, diferentes modos de operação serão empregues, podendo ser incluídos num dos três grupos a que correspondem as configurações indicadas na Figura 3a, 3b e 3c.

No modo de operação indicado na Figura 3a (bio-reactor aeróbio), o lixiviado que chega à base do aterro é recolhido num depósito para líquidos e posteriormente recirculado (muitas vezes com adição de água), de uma forma controlada, para o aterro. Simultaneamente é injectado ar (ou oxigénio) na massa de resíduos já que o objectivo é promover a actividade aeróbia para acelerar a decomposição e estabilização dos resíduos. A degradação dos resíduos em meio aeróbio é muito mais rápida que em meio anaeróbio, mas necessita de grandes quantidades de líquido e desenvolve-se a uma temperatura muito elevada. O dióxido de carbono e a água são os produtos finais resultantes deste processo.

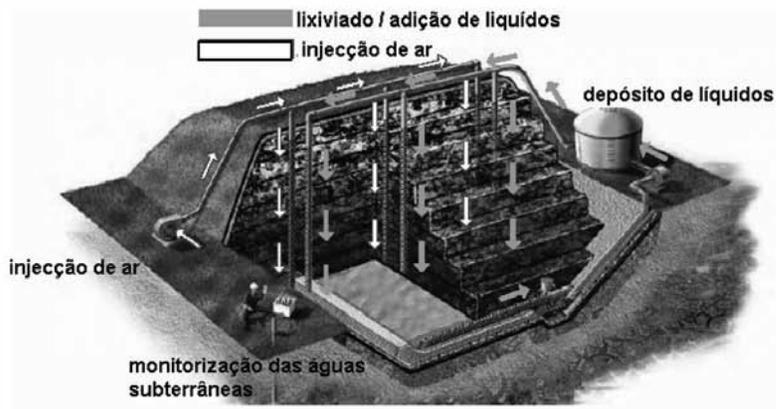
No modo de operação indicado na Figura 3b (bio-reactor anaeróbio), o lixiviado que chega à base do aterro é recolhido num depósito para líquidos e posteriormente recirculado (muitas vezes com adição de água, já que para o processo de degradação são necessárias quantidades significativas de líquido), com o objectivo de se obter o teor em humidade óptimo. O lixiviado pode ser tratado antes da recirculação para remover inibidores, como por exemplo altas concentrações de amónia. Não se injecta ar porque o objectivo é promover um ambiente anaeróbio, ou seja, pretende-se que a biodegradação ocorra na ausência de oxigénio com conseqüente produção de dióxido de carbono e metano, que sendo encaminhado até ao topo do aterro pode ser aproveitado para produção de energia eléctrica, minimizando-se dessa forma a emissão de gases para a atmosfera com efeito de estufa.

No modo de operação indicado na Figura 3c, a aceleração da degradação da massa de resíduos é conseguida à custa de uma sequência de tratamento aeróbio e anaeróbio, para mais rapidamente degradar a matéria orgânica nas camadas superiores do aterro e colectar o gás das camadas inferiores (bio-reactor híbrido). Este modo de operação combina a simplicidade de operação do modo anaeróbio, com a eficácia do tratamento do modo de operação aeróbio.

#### 3.1 – Vantagens de um aterro sanitário funcionar como um bio-reactor

Pelo facto da estabilização da degradação dos resíduos ser mais rápida num aterro sanitário que funciona como um bio-reactor do que num aterro convencional existem várias vantagens, nomeadamente no que respeita aos assentamentos, lixiviado e biogás.

A degradação mais rápida dos resíduos implica, por um lado, um processamento mais rápido dos seus assentamentos, parte dos quais durante a vida activa do aterro, o que deixa espaço livre



a) bio-reactor aeróbio



c) bio-reactor híbrido

Fig. 3 – Diferentes modos de operação de um aterro a funcionar como um bio-reactor (Waste Management Bioreactor Program, 2004).

para a deposição de mais resíduos, aumentando assim a capacidade de armazenamento; por outro lado, sendo o período de estabilização mais rápido, os cuidados de gestão pós-encerramento em termos de actividades e de tempo são mais reduzidos.

No caso de se processar de modo anaeróbio, a degradação mais rápida dos resíduos também implica uma mais rápida produção de biogás, para além de aumentar a quantidade total produzida, num período de tempo mais curto, o que rentabiliza a produção de energia eléctrica, caso se pretenda aproveitar para esse fim, minimizando-se dessa forma a emissão de gases com efeito de estufa.

A recirculação do lixiviado com o objectivo de aumentar o teor de humidade nos resíduos, para acelerar a sua degradação, reduzindo a sua toxicidade, é também uma forma de diminuir a necessidade do seu tratamento.

### **3.2 – Inconvenientes de um aterro sanitário funcionar como um bio-reactor**

Para além das vantagens atrás indicadas, existem também algumas desvantagens. Como já foi referido, no caso da degradação dos resíduos se processar em modo anaeróbio, por haver uma maior e mais rápida decomposição dos resíduos relativamente ao aterro convencional, a produção de biogás é maior, inicia-se mais cedo e processa-se num período de tempo mais curto, pelo que se torna necessário ampliar o sistema de drenagem e captação tendo em consideração esses aspectos, sob pena de haver problemas com a migração de biogás. Maiores taxas de produção de biogás implicam ainda odores mais acentuados se não forem tomadas medidas para os combater. O aproveitamento do biogás pode ajudar, mas não elimina os odores, pelo que outras medidas devem ser implementadas, incluindo, por exemplo, a cobertura com geossintéticos e a utilização de biofiltros.

Para assegurar o nível adequado de humidade nos resíduos e, assim, acelerar o processo de decomposição são produzidas maiores quantidades de lixiviado do que no aterro convencional, pelo que se torna necessário ampliar o sistema de drenagem e recolha de lixiviados, para poder escoar essa quantidade de líquido. A existência de maior quantidade de líquido nos resíduos contribui ainda para diminuir a sua resistência ao corte, aumentando consequentemente a possibilidade de escorregamentos.

A operação em modo aeróbio processa-se normalmente a temperaturas mais elevadas, existindo um acréscimo do risco de incêndio, associado à injeção de ar ou oxigénio na massa de resíduos. As elevadas temperaturas podem ainda pôr em risco o desempenho do sistema de confinamento (sobretudo da geomembrana) e dos sistema de colecta de lixiviados e biogás.

Existe uma maior complexidade de operações num aterro sanitário a funcionar como um bio-reactor relativamente a um aterro convencional, o que implica não só instalações adicionais (ex.: um sistema para injeção de líquidos e/ou ar e um sistema para recirculação de lixiviados) e mais complexas, como também um maior número de operações e maiores exigências de manutenção e controlo. As exigências de monitorização são também maiores, tanto em número de parâmetros como em frequência de medidas, particularmente no que respeita ao lixiviado. Relativamente ao aterro convencional, a curto prazo os custos são superiores, pelo menos até alguns dos benefícios associados a este tipo de instalação serem conseguidos (produção de biogás, aumento da capacidade do aterro, menores custos pós-encerramento, entre outros).

### **3.3 – Comparação da eficácia dos diferentes modos de operação**

Relativamente aos aspectos mais relevantes referidos em 3.1 e 3.2, na Tabela 1 faz-se a comparação da eficácia dos modos de operação de um aterro convencional e de um aterro a funcionar como um bio-reactor aeróbio e anaeróbio.

**Tabela 1** – Comparação dos modos de operação de um aterro convencional e de um aterro a funcionar como um bio-reactor aeróbio ou anaeróbio (Smart Storage (2007)).

Factores de Comparação	Modo de Operação		
	Anaeróbio	Aeróbio	Convencional
<b>Período de estabilização dos resíduos</b>	6 anos (valor estimado)	2 anos (valor estimado)	Estende-se por décadas
<b>Aumento da capacidade do aterro</b>	Sim	Sim	Não
<b>Redução da emissão de gases com efeito de estufa</b>	Não, se não for aproveitado o metano. O processo aumenta a produção de metano relativamente ao aterro convencional	Sim	Não, escapa-se para a atmosfera se não for aproveitado
<b>Redução da necessidade de tratamento do lixiviado</b>	Sim	Sim	Não
<b>Geração de energia</b>	Sim, concentrada durante a vida activa do aterro	Não, a produção de metano é muito reduzida	Sim, mas lenta e dispendiosa
<b>Redução de odores nocivos</b>	Não	Sim	Não
<b>Redução dos cuidados na gestão pós-encerramento</b>	Sim	Sim	Não, a velocidade de estabilização lenta aumenta o risco de fugas

Identificados o objectivo, vantagens, inconvenientes e modos de operação de um aterro sanitário a funcionar como bio-reactor, serão seguidamente indicados os problemas geotécnicos que podem surgir com o emprego desta nova tecnologia e indicar algumas recomendações para os obviar.

#### **4 – PROBLEMAS GEOTÉCNICOS NOS ATERROS SANITÁRIOS A FUNCIONAR COMO BIO-REACTOR E RECOMENDAÇÕES PARA OS OBVIAR**

Um aterro sanitário pode ser projectado desde o início para funcionar como um bio-reactor ou já estar em operação e ter de ser “adaptado” para poder funcionar como tal. O primeiro caso tem obviamente mais vantagens, que se traduzem quer na diminuição de custos, quer na economia de recursos, para além de uma melhor optimização dos resultados de operação. No entanto, dado o número de aterros já existentes, que podem melhorar o seu desempenho se funcionarem como um bio-reactor, também é necessário saber tratar estes casos, nomeadamente no que se refere às modificações a efectuar e aos elementos a adicionar para optimizar o uso dos recursos e a sua operacionalidade.

Num aterro convencional, o projecto inclui o dimensionamento do sistema de confinamento de fundo e de cobertura, do sistema de drenagem, captação e tratamento de lixiviados e do sistema de drenagem, captação e tratamento de biogás. Para evitar problemas geotécnicos de difícil solução, nos aterros sanitários a funcionar como bio-reactor, os sistemas referidos devem ser adaptados para se conseguir gerir, nomeadamente, um volume maior de lixiviado (incluindo a forma de injeção e circulação no aterro) e uma mais rápida e maior produção de biogás. Na Tabela 2 apresenta-se um resumo dos aspectos comuns e das diferenças mais significativas a ter em atenção no projecto e operação de um aterro sanitário convencional e de um aterro sanitário a funcionar como um bio-reactor.

**Tabela 2** – Aspectos comuns e diferentes no projecto e operação de um aterro convencional e de um aterro a funcionar como um bio-reactor.

Elementos de comparação		Aspectos comuns	Aspectos diferentes no aterro a funcionar como bio-reactor
Sistema de confinamento de fundo	geomembrana	estrutura	<ul style="list-style-type: none"> <li>• maiores precauções devido às elevadas temperaturas e mais rápidos e maiores assentamentos da massa de resíduos</li> </ul>
	sistema de drenagem e recolha de lixiviados		<ul style="list-style-type: none"> <li>• necessidade de aumentar a espessura e permeabilidade da camada de drenagem para fazer face ao aumento de volume de lixiviado</li> <li>• aumento da probabilidade de colmatção biológica</li> <li>• necessidade de ampliação do sistema de tubagem por os volumes de lixiviado serem maiores</li> </ul>
Sistema de cobertura	camada de baixa permeabilidade	– (filosofia diferente)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• materiais diferentes, por o objectivo não ser minimizar a entrada de água</li> </ul>
	sistema de drenagem e captação de biogás	estrutura	<ul style="list-style-type: none"> <li>• necessidade de ampliação por os volumes de biogás serem maiores e concentrados num período de tempo menor (no modo de operação anaeróbio)</li> </ul>
Sistema de circulação de líquidos (*)		–	<ul style="list-style-type: none"> <li>• existem várias técnicas, a melhor estratégia passa muitas vezes pela sua combinação (ver 4.1.3)</li> </ul>
Estabilidade e Assentamentos		métodos de análise	<ul style="list-style-type: none"> <li>• maiores riscos de instabilidade pelo aumento do peso volúmico dos resíduos e diminuição da sua resistência ao corte, maiores assentamentos e mais rápidos</li> </ul>
Gestão dos lixiviados		inexistentes, a filosofia é diferente	<ul style="list-style-type: none"> <li>• os lixiviados colectados são reinjectados na massa de resíduos</li> <li>• necessidade de sistemas de injeção e recirculação de lixiviados e/ou líquidos na massa de resíduos</li> </ul>
Gestão das dimensões das células		inexistentes, a filosofia é diferente	<ul style="list-style-type: none"> <li>• se o objectivo é fomentar a mais rápida produção de biogás as células devem ser em maior número e mais pequenas</li> <li>• se o objectivo é aumentar a capacidade de armazenamento então as células devem ser maiores</li> </ul>
Cobertura diária		a filosofia é diferente	<ul style="list-style-type: none"> <li>• preocupação com o tipo de material para não impedir a redistribuição do lixiviado na massa de resíduos</li> </ul>
Compactação da massa de resíduos		a mesma filosofia	<ul style="list-style-type: none"> <li>• o grau de compactação não deve ser muito elevado até estar garantida uma recirculação de fluidos homogénea na massa de resíduos</li> </ul>
Monitorização		a mesma filosofia	<ul style="list-style-type: none"> <li>• maiores cuidados durante a operação (maior número de parâmetros e maior frequência de medidas)</li> <li>• menores cuidados pós-encerramento</li> </ul>

(\*) inexistente no aterro convencional.

#### 4.1 – Problemas relativos ao sistema de confinamento de fundo

Sendo a legislação sobre resíduos diferente de país para país, os requisitos e estrutura do sistema de confinamento de fundo do aterro têm igualmente algumas diferenças. De uma forma geral, este é constituído por uma camada mineral de baixa permeabilidade, denominada “barreira passiva”, seguida de uma “barreira activa” constituída por um geossintético bentonítico e/ou uma geomembrana (ou duas geomembranas separadas por uma camada de detecção de fugas). A geo-

membrana é normalmente coberta com um solo ou um material geossintético para protecção contra possíveis danos físicos causados pela colocação subsequente da camada de drenagem dos lixiviados.

#### **4.1.1 – Geomembranas**

Relativamente ao aterro convencional, os problemas adicionais que a operação de um aterro a funcionar como bio-reactor implicam no que respeita às geomembranas do sistema basal e taludes, prendem-se com o facto de estas terem de resistir às temperaturas mais elevadas que se desenvolvem na massa de resíduos e, simultaneamente, às pressões mais elevadas provocadas pelos resíduos no movimento de descida ao longo dos taludes durante o seu assentamento, que se processa num intervalo de tempo menor devido à mais rápida degradação dos resíduos. Para evitar o problema referido nos taludes, pode optar-se por um de dois tipos de soluções: ou usar geomembranas reforçadas ou assegurar que o atrito na superfície na base da geomembrana seja superior ao existente no topo, o que pode ser conseguido com uma membrana texturada apenas na sua superfície inferior.

Nos aterros a funcionar como um bio-reactor é usual no confinamento basal e dos taludes dar-se preferência à utilização de geomembranas de polietileno de alta densidade (PEAD), pela sua resistência química, mecânica, durabilidade e por permitirem soldaduras resistentes do ponto de vista mecânico e hidráulico. Mas atingindo-se no interior destes aterros temperaturas muito elevadas, as geomembranas de PEAD devem ter resistência adequada (de pelo menos 500 horas) ao “stress-cracking” por as fissuras daí decorrentes aumentarem com a subida da temperatura. Outra hipótese é o emprego de geomembranas reforçadas de polipropileno que toleram melhor temperaturas elevadas e não são susceptíveis ao “stress-cracking”. Para as geomembranas de polietileno e polipropileno (e todas as poliolefinas) é ainda necessário tomar precauções no sentido de estarem devidamente protegidas com um antioxidante, contra a oxidação a temperaturas elevadas (sobretudo se o ambiente for aeróbio). Segundo Haxo (1988) deve ainda ser evitada a utilização de geomembranas de policloreto de vinila (PVC) quando existe recirculação do lixiviado, por este tipo de geomembrana perder a plasticidade com o tempo.

#### **4.1.2 – Sistema de drenagem e captação de lixiviados**

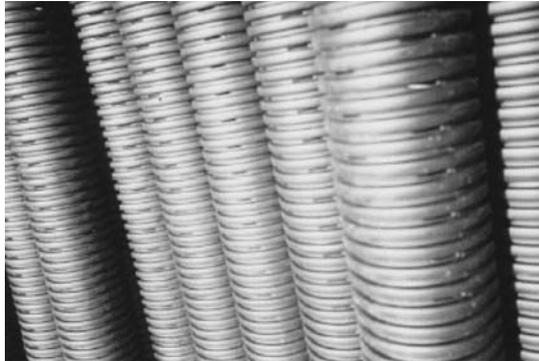
O principal objectivo do sistema de drenagem e captação dos lixiviados produzidos num aterro sanitário é controlar a altura de líquido (h) sobre o sistema de confinamento basal, para minimizar o risco de infiltração dos lixiviados no solo subjacente ao aterro, causada por uma carga hidráulica excessiva. A camada de drenagem de lixiviados colocada sobre a geomembrana (e a sua camada de protecção) tem como função promover o rápido encaminhamento dos lixiviados para a rede de colectores, a partir dos quais o lixiviado é recolhido e conduzido, geralmente por gravidade, para a estação de tratamento ou para tanques de recolha intermédios.

Num aterro a funcionar como bio-reactor existe um aumento significativo do volume de lixiviados, pelo que o material drenante deve ter uma capacidade de drenagem adequada para que a altura de lixiviado não exceda os valores regulamentares (em muitos casos  $h < 30$  cm). Nos aterros convencionais, a condutividade hidráulica mínima usualmente requerida para o material drenante é de 0,01 cm/s, mas quando há recirculação de líquidos este valor é manifestamente insuficiente de - vendo ser no mínimo de 1,0 cm/s.

Como nos aterros convencionais, em que se utilizaram geotêxteis como filtro (a envolver os tubos de drenagem) ou areia como material drenante, se verificou que durante a vida útil do aterro a condutividade hidráulica pode diminuir de uma a duas ordens de grandeza (Interstate Technology & Regulatory Council Alternative Landfill Technologies Team (2006)) e sendo expectável, para os aterros a funcionar como bio-reactor, um aumento significativo de matéria orgânica, haverá uma maior probabilidade de colmatção, pelo que neste tipo de aterros a areia deve ser substituída por

seixo e os tubos de drenagem não devem ser envoltos com geotêxtil. A utilização de seixo para o material drenante, implica a necessidade da geomembrana ser protegida por um material de resistência ao punçoamento adequada para evitar ser punçoada pelo seixo.

Relativamente à rede de colectores e, sendo em muitos casos usados tubos ondulados em polietileno de alta densidade com diâmetros entre 100 e 300 mm (Figura 4), é necessário ter em consideração no seu dimensionamento uma maior probabilidade de rotura por compressão devido ao aumento do peso volúmico da massa de resíduos (Qian et al., 2002) nos aterros que funcionam como bio-reactor. O número de ligações entre tubos deve também ser minimizado e deve assegurar-se que não sofrem deformações durante a compactação e o período de bioestabilização.



**Fig. 4** – Tubos em polietileno de alta densidade (Reinhart, 2005).

Nos aterros convencionais, sobre a camada drenante é usual a colocação de um filtro (de geotêxtil ou de areia, esta normalmente com cerca de 15 cm de espessura), seguido em muitos casos de uma camada de protecção com solo local (com 30 a 40 cm de espessura) sobre a qual são então colocados os resíduos. Nos aterros em que há recirculação de lixiviados não é aconselhada nem a camada de filtro nem a de protecção (Qian et al., 2002) devido ao maior potencial de colmatação pelos altos teores de sólidos suspensos totais ( $SST > 2500 \text{ mg/l}$ ) e de carência bioquímica de oxigénio ( $CBO > 2500 \text{ mg/l}$ ). Em substituição do filtro e camada de protecção devem colocar-se directamente os resíduos, que se devem seleccionar cuidadosamente, rejeitando-se objectos de grandes dimensões ou com protuberâncias e também material muito fino. A primeira camada de resíduo (cerca de 3 m de espessura) não deve ser compactada para além do efeito decorrente do peso do equipamento de transporte e espalhamento dos resíduos. As subsequentes camadas podem ser compactadas normalmente (Figura 5).



**Fig. 5** – Primeira camada de resíduos sobre o sistema de drenagem de lixiviados (Koerner, 2006).

### 4.1.3 – Sistema de recirculação de lixiviados

Contrariamente aos aterros convencionais, nos aterros a funcionar como bio-reactor tem de haver um sistema de circulação de líquidos e a forma como esses líquidos/lixiviados são introduzidos no aterro é de grande importância para o sucesso desta tecnologia. Existem actualmente cinco métodos disponíveis para a recirculação dos lixiviados, que podem ser combinados entre si, e que seguidamente se apresentam.

#### 4.1.3.1 – Irrigação por pulverização

Na irrigação por pulverização, o lixiviado é distribuído pela superfície da massa de resíduos através de camiões com aspersores, tubos ranhurados, entre outros dispositivos (Figura 6). As vantagens são a humedificação uniforme dos resíduos e o baixo custo operacional. Nesta técnica pode haver uma redução do volume de lixiviados (até 30%) através da evaporação, o que não é vantajoso quando o objectivo é injectar o lixiviado para aumentar o teor em humidade da massa de resíduos. As desvantagens mais significativas são os odores criados e os problemas ambientais e de saúde pública, não sendo ainda aconselhável fazer a aspersão em condições de muito vento.



Fig. 6 – Recirculação de lixiviados: método de irrigação por pulverização (Reinhart, 2005 e Koerner, 2006).

#### 4.1.3.2 – Lagoas de infiltração

Este método baseia-se na criação de lagoas temporárias de lixiviado (ex.: confinadas com geomembranas finas) no topo do aterro (Figura 7).

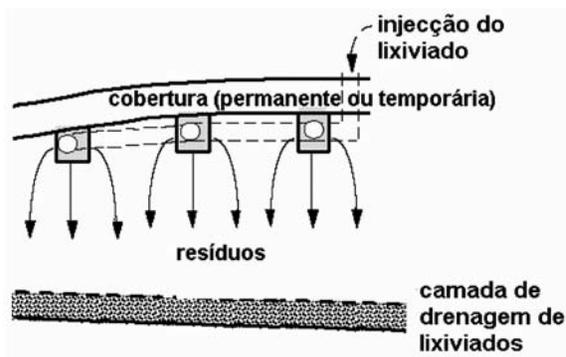


Fig. 7 – Recirculação de lixiviados: método de lagoas de infiltração (Reinhart, 2005 e Interstate Technology & Regulatory Council Alternative Landfill Technologies Team, 2006).

Esta técnica requer pouco esforço para operar e permite a distribuição de lixiviados numa vasta área, conseguindo-se bons resultados para as camadas superiores. Além das desvantagens típicas de um método de distribuição à superfície, já referidas, esta técnica depende muito das condições de operação, podendo haver problemas devido à chuva ou gelo, para além de se desconhecer como a distribuição do lixiviado se processa nas camadas mais inferiores do aterro.

#### 4.1.3.3 – Distribuição sob a cobertura

Neste método, os lixiviados são introduzido através de trincheiras ou tubos, situados no topo da massa de resíduos e sob o sistema de cobertura temporária ou permanente, evitando a exposição directa dos lixiviados à atmosfera e consequentemente os problemas ambientais dos métodos de recirculação à superfície (Figura 8).



**Fig. 8** – Recirculação de lixiviados: método de distribuição sob a cobertura (Koerner (2006)).

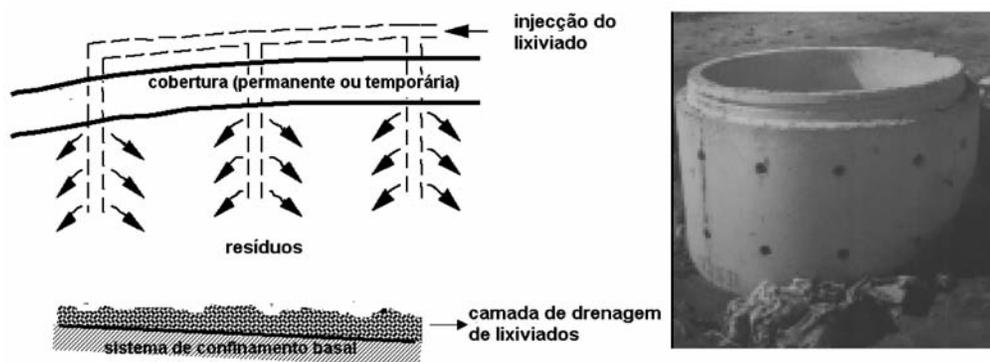
A principal desvantagem, para além dos custos iniciais serem elevados, é a velocidade de injeção ser limitada. Quando se utilizam trincheiras é usual serem preenchidas com material drenante, desaconselhando-se o uso de areia para evitar problemas de colmatção, usando-se por vezes, por razões económicas, tiras de pneus. Contudo, este material deve ser aplicado com precaução, pois em aterros de grande altura tem tendência a assentar sob o efeito da massa de resíduos, perdendo dessa forma a capacidade drenante inicial. Nesses casos pode ser substituído por lascas de madeira, vidro esmagado ou seixo (Figura 9).



**Fig. 9** – Recirculação de lixiviados: técnica das trincheiras (Reinhart, 2005 e Interstate Technology & Regulatory Council Alternative Landfill Technologies Team, 2006).

#### 4.1.3.4 – Poços de recarga

Os poços de recarga têm perfurações a diversos níveis para facilitar a distribuição dos lixiviados em altura (Figura 10). Dada a fraca aptidão destes poços para distribuírem os lixiviados lateralmente, as zonas mais interiores entre eles podem continuar secas. Para permitir a humidificação destas zonas, por vezes recorre-se ao estabelecimento de ligações horizontais entre os poços através de tubagens perfuradas.



**Fig. 10** – Recirculação de lixiviados: técnica dos poços de recarga (Reinhart, 2005 e Interstate Technology & Regulatory Council Alternative Landfill Technologies Team, 2006).

As grandes vantagens deste método são a sua simplicidade e o seu reduzido custo, pois poderão ser utilizados os poços de recolha de biogás. Os poços de recarga podem ser utilizados tanto durante o funcionamento do aterro como após o seu encerramento. As desvantagens são a necessidade de perfurar a camada de cobertura e a velocidade de injeção ser limitada. No caso dos poços serem profundos deve ter-se cuidado de não perfurarem a geomembrana, aquando da sua colocação.

## 4.2 – Problemas relativos ao sistema de cobertura

Tal como o sistema de confinamento de fundo, os requisitos e a estrutura do sistema de cobertura varia de país para país, consoante a legislação em vigor. De uma forma geral o sistema de cobertura para os aterros sanitários convencionais inclui uma camada de regularização que é directamente colocada sobre os resíduos e serve essencialmente de fundação para as camadas subsequentes da cobertura, uma camada de drenagem de biogás, uma camada (mineral ou sintética) de baixa permeabilidade, uma camada de drenagem de águas pluviais, uma camada de solo de cobertura e uma camada de solo vegetal. Esta estrutura para além de contribuir para a contenção e protecção dos resíduos, para a adequada integração paisagística e para evitar a migração não controlada do biogás, tem ainda como objectivo minimizar a infiltração das águas superficiais e consequentemente a produção de lixiviado, filosofia oposta à do aterro a funcionar como bio-reactor. Neste último caso e para aproveitar ao máximo o espaço deixado disponível pelos assentamentos que se verificam, devido à mais rápida degradação dos resíduos, a cobertura final só deve ser colocada quando a maior parte desses assentamentos se processarem, o que normalmente não ocorre antes de 5 anos. Entretanto é necessário providenciar uma cobertura provisória. Para esta cobertura, os materiais a utilizar dependem de vários factores: modo de operação, tipo de resíduo, condições ambientais do local, entre outros. Por exemplo, se os odores forem uma preocupação podem ser opções um geossintético bentonítico ou uma geomembrana, cujos painéis são apenas sobrepostos, mas devidamente carregados com sacos de areia ou pneus para evitar o seu levantamento e deslocação pela acção do vento (Figura 11).



a) Antes de se processarem os assentamentos



b) Após se processarem os assentamentos

**Fig. 11** – Cobertura provisória com geomembrana (Advanced Technology Environmental Education Center, 2005).

Se os odores não forem preocupação e se não houver problemas com a emissão de biogás pode optar-se simplesmente por uma camada de solo. A utilização de um solo relativamente permeável favorece a distribuição da água que se infiltra a partir da superfície da massa de resíduos. Este solo pode posteriormente ser reutilizado no sistema de cobertura definitiva.

Uma camada de solo vegetal pode ser suficiente para controlar a erosão e evitar a emissão de biogás, caso contrário tem de se prever uma camada para drenagem de biogás e/ou a colocação de uma geomembrana. Os principais problemas a ter em consideração com a camada de solo são as deformações devidas aos assentamentos e as fendas por dessecação devido aos ciclos secagem/molhagem. Relativamente à camada para drenagem de biogás e geomembrana, os principais problemas prendem-se com a insuficiência da espessura para drenar o fluxo de biogás e a consequente criação de “bolhas” na geomembrana (Figura 12).



**Fig. 12** – “Bolha” resultante da acumulação de gás na geomembrana (Gross, 2006).

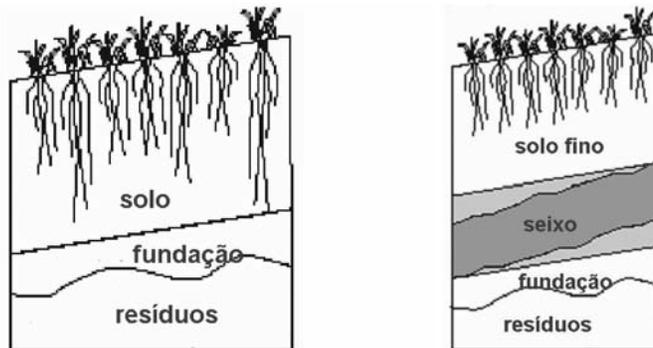
A solução ideal para o caso de se pretender evitar a saída do biogás e simultaneamente permitir a entrada de líquidos na massa de resíduos, para acelerar a sua degradação, é a utilização de um material sintético apropriado para esse efeito (Hullings e Swyka, 1999).

A construção da cobertura definitiva só após a estabilização do aterro tem a vantagem de haver muito menos preocupações com o controlo do biogás ou da infiltração da água ou ainda com a capacidade de tolerar deformações, havendo maior flexibilidade para a escolha de materiais e soluções alternativas.

Para o sistema de cobertura definitiva e em alternativa ao sistema convencional têm sido desenvolvidas várias soluções, sendo descritas a seguir as mais conhecidas (Interstate Technology & Regulatory Council Alternative Landfill Technologies Team, 2006):

- sistema de cobertura biológica permeável (*biological permeable cap*) é constituído por uma camada de cerca de 1m de composto que actua como uma camada de oxidação do metano;
- sistema de cobertura por evapotranspiração (*Evapotranspiration Cap System*) é constituído por uma camada espessa de solo com árvores e vegetação colocada logo após a camada de solo de fundação. Essa camada actua como uma esponja que armazena a água infiltrada. Esta água será absorvida pelas raízes da vegetação que através da evaporação e transpiração a transfere para a atmosfera antes de migrar para os resíduos (Figura 13a);
- sistema de cobertura por barreira capilar (*Capillary Barrier Cap System*) é constituído por uma camada de solo fino (um silte por exemplo) com vegetação, seguida de uma camada de solo permeável (de areia ou seixo) e por fim o solo de fundação (Figura 13b).

O princípio subjacente a esta técnica conta com a diferença de dimensões dos grãos das camadas de solo fino e de solo permeável para promover a retenção da água na camada de solo fino sob condições não saturadas, dada a diferença significativa das características de humidade e condutividade hidráulica dos dois solos. Nestas condições o solo mais grosseiro tende a ter um menor teor em água que o solo fino. A condutividade hidráulica de solos não saturados decresce exponencialmente com a diminuição do teor em água, pelo que o solo permeável, estando seco, será menos permeável à água que o solo fino húmido. Desde que os dois solos se mantenham não saturados, o solo fino tem tendência a reter a quase totalidade da água, servindo a camada de solo grosseiro subjacente como uma barreira dado ao seu estado seco. Só quando o solo fino atingir o estado de saturação será possível ver algum fluxo de água na camada de solo permeável.



a) cobertura por evapotranspiração

b) cobertura por barreira capilar

**Fig. 13** – Sistemas de cobertura alternativos.

### 4.3 – Problemas relativos à estabilidade e assentamentos

#### 4.3.1 – Estabilidade

A estabilidade da massa de resíduos é um problema crítico dos aterros de resíduos a funcionar como bio-reactor, uma vez que a adição significativa de líquido para aumentar a actividade biológica implica um aumento da massa total dos resíduos afectando as suas características estruturais. Na Figura 14 mostram-se alguns exemplos de roturas.

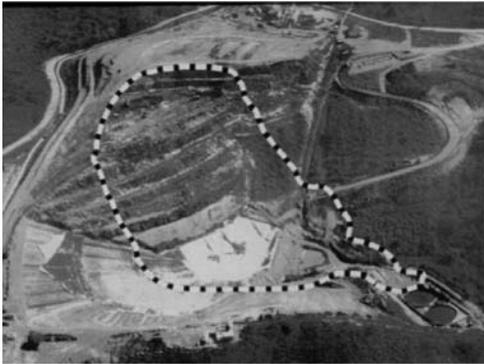
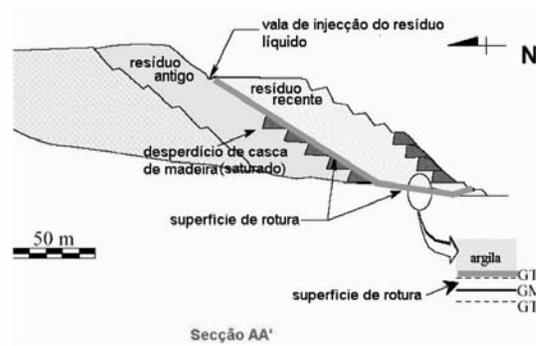
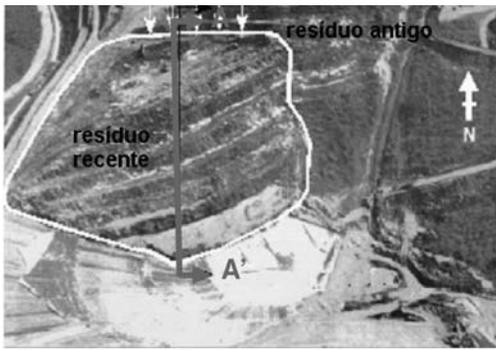
A recirculação de lixiviados no aterro pode levar a um incremento de 50% do peso volúmico total dos resíduos, aumentando com a altura destes, podendo mesmo duplicar nos primeiros 5 m (Interstate Technology & Regulatory Council Alternative Landfill Technologies Team, 2006). A adição de líquido, para além de provocar um aumento do peso volúmico dos resíduos, pode causar um aumento da pressão intersticial, que conduzindo a uma diminuição da resistência ao corte pode levar à instabilidade da massa de resíduos. O impacto do aumento do peso volúmico dos resíduos na estabilidade repercute-se desde a fundação à cobertura, podendo implicar por exemplo limitações na altura máxima do aterro, se a capacidade de suporte da fundação não for suficiente para suportar o excesso de carga. Os sistemas de drenagem e captação de lixiviados também podem sofrer roturas se não forem correctamente dimensionados para suportar o excesso de carga devido ao aumento do peso volúmico dos resíduos. Os problemas de estabilidade serão ainda maiores se o espaço deixado “livre”, pelo assentamento dos resíduos, for aproveitado para armazenar ainda mais resíduos.

Assim, a análise de estabilidade de um aterro a funcionar como bio-reactor deve ter em consideração, nomeadamente:

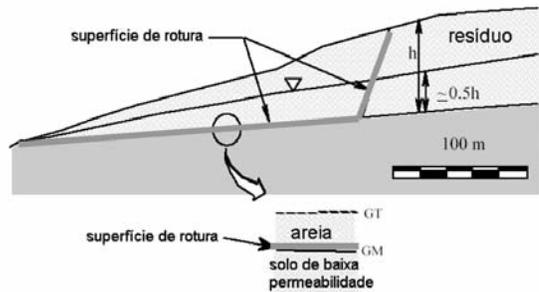
- o aumento do peso volúmico dos resíduos relativamente ao seu peso volúmico usual num aterro convencional e particularmente a sua variação por consolidação e assentamento;
- a afectação, na estabilidade, da colocação de mais resíduos no local deixado “livre” pelo assentamento dos resíduos mais antigos;
- as implicações da utilização de materiais de baixa permeabilidade na cobertura diária: possibilidade de retenção de líquidos em determinadas zonas, provocando um aumento da pressão intersticial em zonas “isoladas”, o que pode originar superfícies planares de escorregamento (Figuras 14b e 15);
- as repercussões na estabilidade devido à percolação de lixiviados ao longo do talude (Figura 15);
- o impacto do aumento do peso volúmico dos resíduos (relativamente ao aterro convencional) nos sistemas de impermeabilização e de drenagem e captação de lixiviados e ainda na fundação;
- o facto de, estando os resíduos saturados, o gás do aterro e também a injeção de ar poderem contribuir para o aumento da pressão intersticial e a injeção de ar também (Interstate Technology & Regulatory Council Alternative Landfill Technologies Team, 2006).

A análise de estabilidade (estática e aos sismos) de um aterro a funcionar como um bioreactor não é tarefa fácil, não só por os resíduos apresentarem diferentes graus de saturação, mas também por as propriedades dos resíduos dependerem da sua composição, que pode variar espacial e temporalmente.

Uma das maiores preocupações em aterros com taludes de inclinação superior a 1V:3H é a estabilidade. Nos aterros a funcionar como bio-reactor, o excesso de saturação dos resíduos é uma das causas principais da instabilidade dos taludes, pelo que para estes aterros as análises de estabilidade usualmente empregues para os aterros convencionais devem ser revistas no sentido de incluir o efeito que a reintrodução de fluidos tem na estabilidade. Poderá ser necessário efectuar análises que reflectam as condições existentes neste tipo de aterros ou para impor limitações à localização da circulação de fluidos relativamente aos taludes (Waste Management, 2000). Atenção especial também deve ser dada às operações de monitorização que permitem verificar se o nível de fluido existente nos resíduos é compatível com as condições de estabilidade. Deve ainda estabelecer-se um plano para reavaliação periódica da estabilidade do aterro durante as operações de enchimento, encerramento e pósencerramento (Interstate Technology & Regulatory Council Alternative Landfill Technologies Team, 2006).



a) Aterro de Mobezi, África do Sul: rotura na interface argila/geotêxtil



b) Aterro de Rumpke, Estados Unidos: rotura na interface areia/geomembrana

**Fig. 14** – Exemplos de roturas (Koerner, 2006).

#### 4.3.2 – Assentamentos

Num aterro de resíduos a funcionar como um bio-reactor, os assentamentos processam-se com maior rapidez do que num aterro convencional, devido ao aumento da velocidade de degradação de resíduos.

A análise dos assentamentos é muito importante, por um lado, por deles depender a previsão do tempo de vida útil do aterro e as condições de utilização do aterro pós-encerramento; por outro lado, não sendo os assentamentos uniformes, dadas as variações espaciais da composição dos resí-

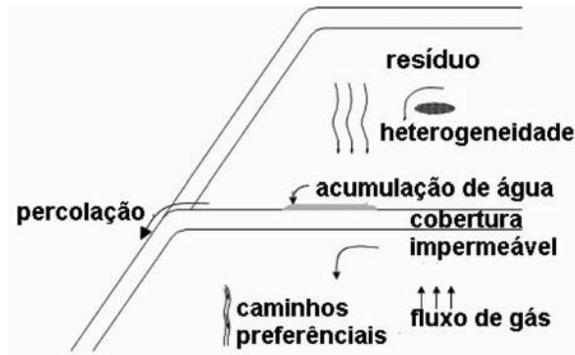


Fig. 15 – Potenciais causas de instabilidade.

duos e do processo de biodegradação, os assentamentos diferenciais podem ser muito prejudiciais para a integridade de qualquer sistema do aterro, sendo os problemas mais comuns o desenvolvimento de fissuras nas camadas da cobertura, incluindo o rasgamento da geomembrana e danos nos tubos dos sistemas de circulação de lixiviados e de drenagem e captação de biogás.

A velocidade com que se processam os assentamentos depende da composição dos resíduos, do modo de operação e dos factores que afectam a biodegradação, particularmente do teor em humidade (El Fadel, 1999).

A aptidão para prever os assentamentos é fundamental no dimensionamento e construção dos aterros. Os métodos para determinação dos assentamentos em aterros convencionais (método de Sowers, modelo de Gibson e Lo, etc.) (El Fadel *et al.* 1999) têm sido empregues para a determinação dos assentamentos em aterros a funcionar como bio reactor. Porém, estes métodos não providenciam os ajustes necessários para ter em consideração a recirculação de líquidos. Todavia podem ser utilizados desde que os dados introduzidos sejam “ajustados” para o teor em matéria orgânica, teor em humidade e para as condições de compactação existentes nos aterros a funcionar como um bio-reactor (Interstate Technology & Regulatory Council Alternative Landfill Technologies Team, 2006).

#### 4.4 – Problemas relativos à colocação dos resíduos

Nos aterros a funcionar como um bio-reactor, o objectivo é otimizar a recirculação de fluidos no aterro, pelo que existem diferenças significativas relativamente às práticas operativas dos aterros convencionais. Acresce ainda que o aterro pode ser projectado desde o início para funcionar como um bio-reactor ou já estar em operação e ter de ser “adaptado”, apresentando cada caso também as suas especificidades de operação.

Seguidamente, apresentam-se os aspectos geotécnicos mais relevantes a ter em consideração durante a operação para otimizar a eficácia de funcionamento deste tipo de aterros.

##### 4.4.1 – Dimensões das células e cobertura diária/intermédia

Por razões económicas, nos aterros convencionais é usual construírem-se células de grandes dimensões, pois dessa forma reduz-se substancialmente a quantidade de materiais para a cobertura diária, aumentando consequentemente a capacidade efectiva de armazenamento. Mas, como já foi referido, se o objectivo é fomentar a mais rápida produção de biogás, as células deverão ser mais pequenas, mas mais profundas e em maior número. Contudo, se a célula for muito profunda pode haver dificuldade na recirculação dos fluidos, pelo que, ou se limita a profundidade ou há necessidade de desenvolver uma adequada capacidade de gestão da drenagem interna dos lixiviados.

Uma outra preocupação prende-se com o tipo de materiais da cobertura diária/intermédia, pois para garantir uma efectiva distribuição da recirculação dos líquidos, não se pode optar por camadas de solo de baixa permeabilidade, usuais nos aterros convencionais. Este tipo de material, para além de poder levar à retenção dos líquidos em algumas zonas, provocando nessas zonas um aumento da pressão intersticial e consequentes problemas de estabilidade, pode provocar escorrências pelos taludes (Figura 16), resultantes da dificuldade da circulação do líquido para as camadas inferiores, prejudicando a humidificação homogénea dos resíduos, com consequências na eficácia do funcionamento do bio-reactor.



**Fig. 16** – Escorrências de lixiviado (The Canadian Society for Civil Engineering - Calgary Chapter, 2006).

Para evitar este tipo de problemas podem utilizar-se coberturas removíveis diariamente (Figura 17) ou materiais cuja condutividade hidráulica seja igual ou superior à da “matriz” dos resíduos, como é o caso da areia, misturas de composto com material granular, resíduos verdes, ou outros resíduos, como sejam os provenientes da reciclagem do aço ou de materiais não ferrosos ou resíduos de construção e de demolição.



**Fig. 17** – Cobertura diária removível (Envirozone, 2001).

Chama-se contudo a atenção que muitas destas coberturas diárias alternativas podem carecer de modificações na legislação ou de autorização da entidade reguladora. Ainda outra alternativa é a remoção da cobertura diária imediatamente antes da colocação de novos resíduos.

A escolha da solução a utilizar depende muito dos objectivos subjacentes (para além dos objectivos de evitar o espalhamento de detritos e o desenvolvimento de vectores (insectos, roedores e outros)), como sejam a possibilidade da existência de focos de incêndio, emanação de gases, infiltração de águas pluviais, aumento da capacidade efectiva de armazenagem, entre outros. Por exemplo, as coberturas amovíveis têm a vantagem de não retirarem capacidade efectiva de armazenamento de resíduos, de evitar os odores e a saída de gases para a atmosfera e de poderem permitir o controlo do excesso de água durante o Inverno. As coberturas constituídas por misturas de composto com material granular usam-se para controlar a emissão de metano durante a construção das células.

Em muitos casos, perto dos taludes, usa-se para cobertura diária uma mistura de solo argiloso, para evitar as escorrências de lixiviado ao longo dos taludes.

Nos aterros convencionais a inclinação da camada de cobertura diária ou é sub-horizontal ou tem uma reduzida inclinação de modo a que as águas pluviais sejam escoadas para fora do aterro. Nos aterros a funcionar como bio-reactor, a inclinação deve ser exactamente ao contrário ou seja de modo a escoar as águas pluviais para dentro do aterro, evitando-se simultaneamente escorrências indesejadas para fora deste.

Quando é necessário “adaptar” um aterro para funcionar como bio-reactor, havendo camadas de cobertura diária de baixa permeabilidade, a melhor abordagem para garantir a recirculação dos líquidos é a construção de poços verticais que atravessem essas camadas.

#### **4.4.2 – Compactação dos resíduos**

Nos aterros convencionais o grau de compactação habitualmente recomendado para os resíduos não é o aconselhável para os aterros a funcionar como bio-reactor, por dificultar a humedificação homogénea dos resíduos e consequentemente o processo da biodegradação. Para optimizar a eficácia da recirculação é preferível começar com um grau de compactação mais baixo e só o aumentar quando houver a garantia de uma correcta distribuição do líquido pelos resíduos. A aspersão dos resíduos com lixiviado ou água (Figura 18) antes da compactação, para além de a melhorar, contribui para o aumento do teor de humidade e para a diminuição de poeiras. Esta operação deve ser obviamente suspensa em dias de chuva.



**Fig. 18** – Adição de líquidos na frente de trabalho (Koerner, 2006).

Para além dos cuidados referidos em 4.1.2 relativamente à execução da primeira camada de resíduo, para melhorar a eficácia do processo de biodegradação, também os resíduos das restantes camadas devem, sempre que economicamente possível, ser pré-processados e serem espalhados em camadas finas, evitando-se a existência de quantidades apreciáveis de resíduos de grandes dimensões (pneus, troncos, etc.).

## 5 – A MONITORIZAÇÃO DOS ATERROS SANITÁRIOS A FUNCIONAR COMO BIO-REACTOR

O funcionamento de um aterro sanitário como bio-reactor, tratando-se de um sistema de tratamento de resíduos, requer maiores cuidados durante a operação do que um aterro convencional (tanto em número de parâmetros a controlar como na frequência de medidas). O seu sucesso está muito dependente do controlo e monitorização dos processos biológicos, químicos e hidráulicos que se processam no aterro. Na Tabela 3 são apresentados os principais parâmetros a serem monitorizados e os objectivos das medidas.

**Tabela 3** – Parâmetros a serem monitorizados nos aterros a funcionar como bio-reactor (Waste Management, 2000).

Parâmetro	Objectivo da medida
<b>Fluxos de lixiviado injectado</b>	As taxas e as localizações das injeções do lixiviado e de outros fluidos devem ser registadas para se determinar a relação entre os fluxos de entrada e os níveis de humidade in situ bem como as taxas de remoção do lixiviado
<b>Temperatura</b>	A variação da temperatura da massa de resíduos no tempo e a sua distribuição espacial dão indicações sobre a actividade biológica. No modo de operação aeróbio o controlo da temperatura é particularmente importante para evitar incêndios
<b>Humidade</b>	O teor de humidade e a sua distribuição espacial permitem inferir sobre a eficácia do sistema de injeção e sobre a quantidade de líquido que o resíduo consegue ainda absorver num determinado local
<b>Celulose e lignina</b>	Os resultados dos ensaios sobre amostras de resíduo podem providenciar informação sobre o nível de actividade biológica e a velocidade com que se processa
<b>Fluxo de lixiviado removido e sua qualidade</b>	A quantidade de lixiviado removida numa determinada área permite deduzir o grau de saturação dos resíduos. A qualidade do lixiviado permite indicar em que fase do processo de decomposição se encontram os resíduos e permite prever quando a actividade biológica estará completa
<b>Peso volúmico dos resíduos</b>	A medida do peso volúmico da massa de resíduos e a sua distribuição espacial é um bom indicador da saturação dos resíduos e do nível de tratamento
<b>Assentamentos</b>	Tal como o peso volúmico a medida do assentamento e a sua evolução no tempo é um indicador do progresso do tratamento biológico. Essas medidas permitem ainda indicar se o tratamento biológico está completo e são muito úteis para a previsão do espaço que resta para a colocação de novos resíduos
<b>Fluxo de gás e qualidade</b>	Tal como nas medições com o lixiviado, os resultados do fluxo de gás indicam o nível de actividade biológica e a sua evolução no tempo mostra a velocidade com que aquela se processa e permite prever quando se completa. Esta informação é importante para planear a expansão e modificação do sistema de gestão do biogás
<b>Nível piezométrico</b>	Os piezómetros colocados na massa de resíduos são úteis para monitorizar o nível de fluidos, permitindo mostrar as zonas em que existe concentração de fluidos ou para conhecer o nível junto aos taludes

## 6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

A possibilidade de um aterro sanitário poder funcionar como um bio-reactor é uma estratégia que pode permitir ter benefícios ambientais (a curto e longo prazo), financeiros e sociais. Esta tecnologia implica um novo paradigma e a existência de uma nova geração de aterros que providenciam maior

segurança do ponto de vista ambiental, pela promoção mais rápida da estabilização dos resíduos, através da otimização do processo microbiológico da decomposição orgânica dos resíduos.

A forma mais eficaz e prática para melhorar a biodegradação dos resíduos é através do controlo da sua humidificação, normalmente conseguida pela recirculação de lixiviado (ou outros líquidos), do controlo da temperatura, da adição de nutrientes e de ar (no modo aeróbio e híbrido).

As principais vantagens de um aterro funcionar como um bio-reactor relativamente a um aterro convencional são: (1) a contenção e tratamento do lixiviado, (2) a rápida recuperação de espaço para armazenar mais resíduos, (3) a aceleração da estabilização dos resíduos, evitando a necessidade de monitorização e manutenção a longo prazo do aterro, (4) no modo anaeróbio, o aumento e a rapidez de produção de metano pode significar benefícios económicos consideráveis. Os aterros a funcionar no modo aeróbio têm ainda mais três vantagens: (5) o processo de biodegradação dos resíduos é ainda mais rápido do que no processo anaeróbio, (6) há uma redução significativa do volume de lixiviado, (7) há uma redução significativa da produção de metano e consequentemente uma redução de odores.

Esta tecnologia tem contudo alguns inconvenientes, nomeadamente: (1) a recirculação de líquidos pode aumentar significativamente a carga hidráulica sobre a geomembrana de fundo, o que aumenta a possibilidade de fuga do lixiviado, (2) a adição de ar (no modo aeróbio) aumenta o risco de incêndio, (3) os aterros a funcionar como bio-reactor requerem maiores custos de construção e operação comparativamente com os aterros convencionais, (4) os aterros a funcionar como bio-reactor têm uma operação mais complexa e requerem maior controlo em termos de parâmetros e de frequência de medidas, (5) esta tecnologia embora possa ser utilizada em aterros inicialmente não previstos para funcionarem como um bio-reactor, não pode ser implementada em aterros sem impermeabilização de fundo e lateral.

Esta tecnologia implicando uma mudança na forma de operação do aterro de resíduos constitui um grande desafio não só do ponto de vista legislativo (coberturas alternativas permeáveis, recirculação de líquidos, recuperação de espaço para armazenagem), como operacional e de monitorização (heterogeneidade espacial e temporal do resíduo, problemas de estabilidade e assentamentos, condições corrosivas para os aparelhos de medida) e de longo prazo (até quando se deve “implementar” um bio-reactor?, qual o destino dos metais e outros resíduos inorgânicos recalcitrantes?, qual o custo/benefício da operação de um bio-reactor?).

## 7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Advanced Technology Environmental Education Center (2005). History of Incinerators”. Disponível em: [www.ateec.org/prof\\_dev/fellows/2005fellows/groups/group%204/wasteenergy.ppt](http://www.ateec.org/prof_dev/fellows/2005fellows/groups/group%204/wasteenergy.ppt). Acesso em 06 de Março de 2007..

The Canadian Society for Civil Engineering - Calgary Chapter (2006). “Bioreactor landfills”. Disponível em: [www.schulich.ucalgary.ca/Civil/csce\\_calgary/2006/Landfill-BioreactorLandfills.pdf](http://www.schulich.ucalgary.ca/Civil/csce_calgary/2006/Landfill-BioreactorLandfills.pdf). Acesso em 06 de Março de 2007.

El Fadel, M. (1999). “Leachate recirculation effects on settlement and biodegradation rates in MSW landfills”. *Environmental Technology*, vol. 20, nº 2, pp 121-133.

El Fadel, M., Shazbak, S., Saliby, E.& Leckie, J. (1999). “Comparative assessment of settlement models for municipal solid waste landfill applications”. *Waste Management and Research* vol. 17 nº 5, pp 347–368.

Envirozone (2001). “Alternate daily covers”. Disponível em: [www.envirozonellc.com/products.php?a=pl&plid=12](http://www.envirozonellc.com/products.php?a=pl&plid=12). Acesso em 06 de Março de 2007.

- Gross, B. A. (2006). "Landfill cover design and operation". Disponível em:  
[www.epa.gov/epaoswer/non-hw/muncpl/landfill/bio-work/gross.pdf](http://www.epa.gov/epaoswer/non-hw/muncpl/landfill/bio-work/gross.pdf). Acesso em 06 de Março de 2007.
- Haxo H. (1988). "Lining of Waste Containment and Other Impoundment Facilities", EPA/600/2-88/052.
- Hullings, D. E. & Swyka, M. A. (1999). "Geosynthetics in Bioreactor Designs", Proc.. GRI - 13 Conference, GSI, Folsom, PA, pp 254-262.
- Interstate Technology & Regulatory Council Alternative Landfill Technologies Team (2006). "Characterization, Design, Construction, and Monitoring of Bioreactor Landfills". Disponível em: [www.itrcweb.org/Documents/ALT-3.pdf](http://www.itrcweb.org/Documents/ALT-3.pdf). Acesso em 06 de Março de 2007.
- Koerner, M. R. (2006). "Leachate Recycling/Bioreactor Landfills for Rapid Degradation of MSW" Disponível em: [www.cticompanies.com/pdf/Koerner.pdf](http://www.cticompanies.com/pdf/Koerner.pdf). Acesso em 06 de Março de 2007.
- Qian, X., Koerner, R. M. & Gray, D. H. (2002). "Geotechnical aspects of landfill design and construction". Upper Saddle River : Prentice Hall.
- Reinhart, D. R. (2005). "Bioreactor Landfills: Issues and Implementation". Disponível em:  
[www.erefdn.org/rpts\\_summary\\_ordrs/LTWBioreactorIssuesandImplementation-Reinhart.pdf](http://www.erefdn.org/rpts_summary_ordrs/LTWBioreactorIssuesandImplementation-Reinhart.pdf). Acesso em 06 de Março de 2007.
- Richard, D., Zimmerman, A. R. & Grubb, B. (2000). "Leachate Recirculation or Clean-Water Addition: A Comparative Study". Disponível em:  
[http://www.gradingandexcavation.com/msw\\_0005\\_leachate.html](http://www.gradingandexcavation.com/msw_0005_leachate.html). Acesso em 06 de Março de 2007.
- Smart Storage (2007). "Benefits of Smart Storage". Disponível em:  
[www.wesd.lbl.gov/ECO/smart\\_store/benefits.html](http://www.wesd.lbl.gov/ECO/smart_store/benefits.html). Acesso em 06 de Março de 2007.
- INR (2002). "Concepção, construção e exploração de tecnossistemas. Projectos, metodologias e tecnologias aplicadas em Portugal no período de 1996 a 2001". Edição do Instituto de Resíduos.
- Waste Management Bioreactor Program (2004). "The bioreactor landfill: the Future of Landfill Management". Disponível em:  
[www.wm.com/WM/environmental/Bioreactor/bioreactorbrochure.pdf](http://www.wm.com/WM/environmental/Bioreactor/bioreactorbrochure.pdf). Acesso em 06 de Março de 2007.
- Waste Management (2000). "The bioreactor landfill" Disponível em:  
[www.wm.com/WM/environmental/Bioreactor/WMWhitePaper.pdf](http://www.wm.com/WM/environmental/Bioreactor/WMWhitePaper.pdf). Acesso em 06 de Março de 2007.