

COMISSÃO DE COORDENAÇÃO
DA REGIÃO CENTRO

**CONTRIBUTOS PARA A GESTÃO
DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS
NA REGIÃO CENTRO**

Luis Leal Lemos
(coordenador)

António Pais Antunes
Madalena Pereira Barroso

SÉRIE

**MONOGRAFIAS
TÉCNICAS**

5

Coimbra
1997

FICHA TÉCNICA**CONTRIBUTOS
PARA A GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS
URBANOS NA REGIÃO CENTRO***MONOGRAFIAS TÉCNICAS Nº 5*

Responsável pela edição Dra. Ana Maria Satumino
Composição Vítor Duarte
Offset : *Montagem* – Adelino Bandeira
Impressão – Henrique Taborda

ISSN 0871-5149
Depósito Legal 101534/96

Edição e Distribuição CCRC – COMISSÃO DE COORDENAÇÃO DA REGIÃO CENTRO
Rua Bernardim Ribeiro, 80
3000 COIMBRA
Telefone: (039) 400198/9
Fax: (039) 701657

Tiragem 750 exemplares

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

**CONTRIBUTOS
PARA A GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS
URBANOS NA REGIÃO CENTRO (*)**

LUÍS LEAL LEMOS ¹
(coordenador)

ANTÓNIO PAIS ANTUNES ²
MADALENA PEREIRA BARROSO ³

COIMBRA • 1994

(*) Relatório elaborado no quadro do acordo de Cooperação elaborado entre a Universidade de Coimbra e a Comissão de Coordenação da Região Centro sobre "Análise Sistémica de Soluções Regionais de Saneamento Básico".

¹ Professor Associado do Departamento de Engenharia Civil – Universidade de Coimbra.

² Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil – Universidade de Coimbra.

³ Engenheira Civil – Departamento de Engenharia Civil – Universidade de Coimbra.

ÍNDICE

1.	INTRODUÇÃO	7
2.	PREOCUPAÇÃO AMBIENTAL.....	10
3.	PLANEAMENTO	12
3.1.	Mapas de Registo.....	12
3.2.	Responsabilidade	12
3.3.	Custos	13
4.	GESTÃO INTEGRADA.....	14
4.1.	Minimização de Resíduos	15
4.2.	Recuperação de Materiais	15
4.3.	Compostagem	17
4.4.	Incineração.....	18
5.	DEPOSIÇÃO EM ATERRO CONTROLADO.....	20
5.1.	Introdução.....	20
5.2.	Tipos de resíduos e classes de aterro	20
5.3.	Aspectos gerais da técnica de deposição em aterro controlado	21
5.3.1.	Escolha do local.....	22
5.3.2.	Preparação do local.....	22
5.3.3.	Dimensionamento e operação.....	25
5.3.3.1.	Generalidades	25
5.3.3.2.	Equipamento	26
5.3.3.3.	Métodos de operação	30
5.3.3.4.	Sequência de deposição	32
5.3.4.	Encerramento e reabilitação do local.....	34
5.3.4.1.	Construção sobre aterros controlados encerrados	35
5.3.5.	Algumas considerações ao projecto de um aterro controlado	36
5.3.5.1.	Generalidades	36
5.3.5.2.	Tempo de vida útil.....	38
5.4.	Comentários finais.....	39
6.	IMPACTE AMBIENTAL.....	40
6.1.	Introdução.....	40
6.2.	Avaliação do impacte ambiental.....	40
6.2.1.	Legislação relativa à avaliação do impacte ambiental	40

6.2.2.	Estudos de impacte ambiental	41
6.2.3.	Opinião pública.....	42
6.2.4.	Métodos gerais de avaliação do impacte ambiental	43
6.2.4.1.	Sobreposição de mapas.....	43
6.2.4.2.	Listas de questões e de controle	43
6.2.4.3.	Redes de interacção	44
6.2.4.4.	Matrizes	44
6.2.4.5.	Técnicas específicas	45
6.3.	Impactes ambientais gerados pelos aterros controlados	45
6.3.1.	Gás	46
6.3.1.1.	Formação e composição do gás	46
6.3.1.2.	Migração do gás.....	49
6.3.1.3.	Controlo da movimentação gasosa	51
6.3.1.4.	Monitorização do gás	55
6.3.2.	Lixiviados.....	56
6.3.2.1.	Medição da poluição.....	57
6.3.2.2.	Composição dos lixiviados.....	58
6.3.2.3.	Migração dos lixiviados	60
6.3.2.4.	Atenuação	61
6.3.2.5.	Balanco hidrológico do aterro	62
6.3.2.6.	Controlo e remoção dos lixiviados	65
6.3.2.7.	Tratamento dos lixiviados.....	71
6.3.2.8.	Monitorização da contaminação com lixiviados.....	74
6.3.3.	Odores e focos de incêndio	75
6.3.4.	Factores estéticos	75
6.3.5.	Formação de poeiras	75
7.	CONSIDERAÇÕES GEOLÓGICO-GEOTÉCNICAS	76
7.1.	Introdução	76
7.2.	Condução do estudo geológico-geotécnico	76
7.3.	Aspectos geológicos-geotécnicos relativos à adequabilidade do local..	78
7.3.1.	Acerca das características hidrogeológicas	78
7.3.2.	Acerca das características geológicas	83
7.3.2.1.	Barreira geológica.....	83
7.3.2.2.	Classificação dos locais.....	84
7.3.2.3.	Instalação de aterros controlados em pedreiras abandonadas	86
7.4.	Estudo dos materiais naturais de impermeabilização e cobertura.....	87
	BIBLIOGRAFIA	91

1. INTRODUÇÃO

Os Resíduos sólidos urbanos (R.S.U), formam parte da realidade diária, e a sua recolha e eliminação são dos principais problemas que os Municípios enfrentam. Os principais factos que conduzem a este problema são:

- O rápido crescimento demográfico.
- A concentração da população em centros urbanos.
- A utilização de bens materiais de rápido "envelhecimento".
- O uso cada vez mais generalizado de vazelhame sem retorno, e fabricações em materiais pouco ou nada degradáveis.

Estas circunstâncias põem os R.S.U. na lista dos agressores do meio ambiente, pressionando para a necessidade de adoptar medidas de tratamento que eliminem o seu impacto negativo.

A quantidade de R.S.U produzidos durante os últimos anos tem verificado um crescimento constante, e que previsivelmente se manterá no futuro devido fundamentalmente aos seguintes factores:

- Crescimento demográfico
- Crescimento da razão kg. de R.S.U / habitante / dia, como consequência do aumento do nível de vida, a alteração dos hábitos de consumo, e melhoria dos serviços de recolha.

Capitação diária

País	Capitação kg/hab/Dia
Alemanha	0.871
Bélgica	0.956
Espanha	0.792
Grécia	0.860
Irlanda	0.852
Portugal	0.663

Os métodos mais utilizados para a gestão, tratamento e eliminação dos resíduos sólidos urbanos são:

1) Reciclagem

É um processo de separação de diversas fracções, que podem ser rentabilizadas no ciclo de produção-consumo. Este processo é muito importante pois não só pode apresentar uma redução apreciável da ocupação do aterro mas também representa um ganho apreciável de recursos energéticos.

A implementação de reciclagem de produtos (vidro, papel, cartão, plásticos e materiais ferrosos e não ferrosos.) necessita de um bom planeamento, e estudo do mercado para a colocação destes produtos.

II) Compostagem

Este método consiste na separação prévia da matéria orgânica, a qual é transformada através de processos aeróbicos em composto para a agricultura.

O ponto forte deste processo é que valoriza uma fracção importante (cerca de 45%) dos resíduos sólidos urbanos.

Este método tem de ser visto como complementar da solução final de incineração ou aterro controlado. É um método de valorização de uma parte importante de resíduos, com a vantagem de reduzir de forma significativa os resíduos a colocar no aterro sanitário ou incinerador.

A qualidade do composto depende da contaminação que a matéria prima (matéria orgânica) pode ter, tornando-o num produto de difícil venda. A matéria orgânica a utilizar para compostagem deveria ter colheita selectiva.

III) Aterro controlado

Este método consiste em colocar os resíduos em células os quais são cobertos com materiais de aterro "in situ" ou transportados de outros locais.

Este método apresenta os seguintes pontos desfavoráveis.

- risco de contaminação dos aquíferos por percolação dos lixiviados.
- riscos de migração dos gases produzidos pela fermentação dos resíduos enterrados
- necessidade de grandes superfícies;
- tempo limitado pela capacidade do local, o que obriga à busca de novas soluções.

IV) Incineração

A incineração é um procedimento de eliminação dos R.S.U através da sua combustão.

Os pontos fracos deste método são:

1. Grandes investimentos iniciais. Necessita de uma economia de escala para a manutenção.
2. Necessita de um aterro controlado, adequado para "resíduos perigosos" para colocar os resíduos resultantes de queima e das partículas em suspensão nos fumos.

3. Grande investimento no sistema de limpeza dos gases. (Actualmente estes investimentos representam pelo menos metade dos custos totais do estabelecimento de um incinerador). Estes custos podem aumentar no futuro caso as exigências governamentais aumentem.

2. "PREOCUPAÇÃO" AMBIENTAL

Se ao nível da recolha de resíduos sólidos da competência dos Municípios, a situação em Portugal é satisfatória, ao nível da sua eliminação surgem graves problemas, já que, na sua maioria, são simplesmente depositados em lixeiras.

Em Portugal, o lixo é depositado directamente no solo em "lixeiros", e por vezes queimado. Esta solução é poluente, pois contamina as águas superficiais e subterrâneas e os gases libertados directamente para a atmosfera ou podem migrar para bolsas podendo provocar explosões. Consequentemente, os centros de decisão tem que operar num ambiente de crescente preocupação ambiental das populações. A maior parte dos aterros terão que ser fechados e a abertura de novos é cada vez mais difícil devido à oposição pública, e a abertura de novos, devido às normas mais severas que têm que obedecer, são mais caros.

A não existência em geral de uma gestão adequada dos Resíduos sólidos, deram origem a impactos negativos no meio ambiente, os quais estão associados com as formas de deposição dos resíduos. Aterros não devidamente controlados deram origem à contaminação do solo e água superficial e subterrânea. O controle insuficiente da emissão dos incineradores tem conduzido à poluição do ar.

A população está cada vez mais alertada para os problemas ambientais, pelo que um dos factores a considerar será a opinião pública relativamente à instalação de novas instalações de eliminação de resíduos. A experiência na Região Centro neste campo é fortemente negativa, pois os locais utilizados para eliminação dos R.S.U tem sido feito em "lixeiros" sem nenhum controle, com o conseqüente prejuízo das populações vizinhas (maus cheiros, ruído, tráfego e poeiras) e conseqüentes impactos negativos para o ambiente (poluição das águas superficiais e subterrâneas, migração do biogás com possibilidade de explosões ou libertação do metano para a atmosfera.

Qualidade dos locais de eliminação dos resíduos %

Regiões	Bom	Regular	Mau	Observações
Norte	7.6	50.0	42.4	
Centro	17.9	44.9	37.2	Em nenhum dos locais de deposição foram observadas as boas técnicas de construção de aterros.
Lisboa e Vale do Tejo	23.0	52.5	24.5	
Alentejo	8.5	54.2	37.3	
Algarve	26.7	40.0	33.3	
Continente	15.0	49.5	35.5	

A opinião pública relativamente a este assunto é negativa, devido principalmente à sua má experiência e falta de informação sobre a eficácia das novas soluções. Devido à oposição pública a todas as novas instalações de eliminação de resíduos, a selecção do local tornou-se uma questão particularmente difícil e delicada. Tem que ter em conta não só questões técnicas como a hidrologia e a geologia e as questões comerciais, tais como a localização e acesso, como também o seu impacto mais geral no ambiente e na população local em particular.

É especialmente importante distinguir entre a abordagem das antigas "lixeiros" e os novos "aterros controlados" a fim de corrigir ideias erradas sobre o que está envolvido, e o impacto que terá. Além disso, é de maneira geral verdade que será mais fácil conquistar aceitação para uma nova instalação num local já existente do que num local completamente novo, porque haverá uma melhoria demonstrável nos padrões ambientais e/ou potencial de poluição no local existente.

Deveria ser iniciada uma campanha de informação promovida e planeada pelo governo envolvendo todos os restantes intervenientes nesta matéria (autarquias, juntas de freguesia, órgãos de informação, escolas e associações ambientais). Os residentes locais veem os veículos de recolha (e os que os operam) quase diariamente, mas podem nunca ver o aterro (ou incineradora) para o qual os resíduos são levados. A sua percepção da eficiência global da operação de gestão de resíduos será portanto condicionada pelo que veem do serviço de recolha. Veículos limpos e pessoal eficiente ajudarão a criar uma imagem favorável, que pode ajudar a municipalidade quando chegar a altura de obter autorização para um novo local de deposição.

A gestão integrada dos resíduos sólidos urbanos deve considerar todas as opções disponíveis, que podem ser divididas em categorias em termos de uma hierarquia de actividades que reflectam a política ambiental e de gestão de resíduos de C.E. Esta hierarquia seria por ordem de prioridade:

- Minimização de resíduos na fonte
- Recuperação de materiais, que inclui a reutilização de produtos e também a reciclagem e recuperação de materiais.
- Recuperação energética a partir de operações de eliminação de resíduos de uma forma que coloque riscos mínimos para as pessoas e ambiente.

3. PLANEAMENTO

3.1. MAPAS DE REGISTO – Caracterização – R.S.U.

O Planeamento de qualquer solução para os resíduos sólidos urbanos (R.S.U), necessita de primeiro conhecer quantidade e características dos R.S.U.. É importante conhecer as características actuais do R.S.U. assim como a sua evolução no passado recente e a sua projecção no futuro. A adopção de medidas concretas para a valorização de resíduos requer uma caracterização correcta e qualificada.

A portaria 768/88 atribuiu às Câmaras Municipais a responsabilidade de recolha anual de informação relativa aos resíduos urbanos recolhidos através do preenchimento do mapa de registos. Todavia, a maioria das câmaras não recolhe este tipo de informação. O planeamento de uma solução integrada dos R.S.U é altamente dependente da qualidade dos dados de caracterização dos resíduos (quantidade, peso volúmico, teor em água e composição), pelo que seria essencial que as Câmaras fizessem o preenchimento do "mapa de registos".

3.2. RESPONSABILIDADE

A causa principal do dilema dos resíduos sólidos deve-se ao facto de todos os níveis sociais minimizarem o significado de uma gestão dos R.S.U adequada. Nós somos todos responsáveis pelo dilema dos Resíduos sólidos.

- O governo e as autarquias tem minimizado a importância de fornecerem uma gestão dos resíduos efectiva e segura.
- A indústria alimentar tem projectado, produzido e embalado os produtos sem considerar a forma como estes serão posteriormente eliminados no futuro.
- Os individuos consomem os produtos e produzem resíduos (cerca de 0.7-1.0 kg/Dia/Pessoa.) com pequena ou nenhuma preocupação sobre a sua eliminação.
- Os donos dos locais para depósito e os seus operadores têm esquecido o seu impacto no meio ambiente.

NÓS SOMOS TODOS RESPONSÁVEIS PELO PROBLEMA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS E CONSEQUENTEMENTE NÓS SOMOS TODOS PARTE DA SOLUÇÃO.

Embora todos nós participemos na solução do dilema resíduos sólidos, é o poder autárquico que se encontra melhor posicionado para a gerir. Evidentemente que, o sucesso global da gestão dos R.S.U dependerá do apoio do governo Central, do envolvimento e participação popular e das iniciativas e cooperação do sector privado. No entanto é do poder local que irá depender a boa gestão dos resíduos. A sua responsabilidade está em determinar como é que o serviço é fornecido, quem é que o fornece, e as condições em que este se irá processar.

3.3. CUSTOS

O princípio cada vez mais aceite do poluidor pagador tem que ser implementado na solução da eliminação dos R.S.U.. Todos nós somos consumidores e produzimos resíduos, pelo que temos que participar na procura de soluções efectivas, seguras e económicas.

Embora haja economias de escala significativas para locais maiores, estas raramente se aplicam às comunidades mais pequenas, que procuram satisfazer as suas próprias necessidades de deposição. Um aterro pequeno (0.5 milhões de metros cúbicos) que satisfaria as necessidades de uma comunidade de 50 000 pessoas durante 10 anos, poderia custar cerca de meio a um milhão de contos a adquirir e a construir, resultando em custos líquidos de deposição de 4000\$00 a 5000\$00 por tonelada de lixo depositado.

As centrais de incineração com recuperação de energia podem ter capacidades que vão das 200 às 2000 toneladas/dia, capazes de tratar resíduos para uma população compreendida entre 0.25 e 2.5 milhões de habitantes com investimentos entre de 4 e 50 milhões de contos. Os sistemas de limpeza de gases representam pelo menos metade dos custos totais do estabelecimento de um incinerador (para as actuais normas), este valor pode aumentar no futuro se os limites nas emissões forem mais severas no futuro. Os custos por tonelada de resíduos dependem de muitos factores específicos do local, mas são tipicamente da ordem de 5 000\$00 a 15 000\$00 por tonelada.

Qualquer solução necessita de um aterro controlado, os resíduos provenientes de uma incineradora, cerca de 10% a 30% dos resíduos queimados, tem que ser depositados num aterro sanitário que observe as normas exigidas para resíduos tóxicos perigosos.

A recolha dos resíduos pode representar metade dos custos totais da gestão de resíduos, mesmo tomando em conta a necessidade de operar instalações de alto nível.

4. GESTÃO INTEGRADA

A gestão integrada de resíduos sólidos urbanos envolve o uso de uma combinação de técnicas e programas de forma a gerir o fluxo dos resíduos municipais. Baseia-se no facto dos resíduos sólidos serem compostos de partes distintas que podem ser geridos ou depositados separadamente. Um sistema de gestão integrada deve ser projectado por forma a considerar uma dada composição específica do local e deve ser operado levando em conta os recursos, os meios e os impactos ambientais no local.

A ideia fundamental da gestão integrada dos R.S.U. é uma combinação de aproximações que podem tratar metas pré-estabelecidas do fluxo de resíduos. Em vez de projectar um programa sofisticado, ou predefenindo valores não realistas de componentes a serem reciclados, os centros de decisão devem implementar uma série de programas em que, cada um destes é projecto para complementar os restantes. Redução na fonte, reciclagem, compostagem, combustagem e aterros podem ter um impacto positivo no problema da gestão dos R.S.U. A política de gestão de resíduos, deve basear-se numa hierarquia estrita. e esta hierarquia é, por ordem de prioridade:

- *Minimização de Resíduos*: redução na fonte da quantidade de resíduos produzidos, quer mediante as acções de gestão dos produtores individuais dos resíduos ou através do investimento em tecnologias limpas ou outras técnicas de redução de resíduos
- *Recuperação de Materiais*: Acrescentar valor aos resíduos, reutilizando-os no mesmo local, reciclando-os e transformando-os em materiais similares, recuperação de materiais para processamento e transformação noutros produtos.
- *Recuperação de Energia*: por exemplo, através da recuperação de calor ou produção eléctrica de um incinerador, do fabrico de combustíveis derivados de lixos ou da utilização do biogás do aterro para produção de calor ou energia.
- *Eliminação de Resíduos*: para um volume mínimo de resíduos, de uma forma que minimize a ameaça à saúde pública e ao meio ambiente, quer através de aterros, incineração ou algum processo alternativo.

4.1. MINIMIZAÇÃO DE RESÍDUOS

A redução na fonte não é uma forma de gestão dos resíduos, no entanto esta pode ter um impacto positivo nos sistemas de gestão integrada dos resíduos sólidos urbanos. A redução na fonte pode ser desenvolvida através da alteração dos processos de fabrico por forma a reduzir a quantidade de embalagens em geral e da embalagem secundária em particular, garantir a possibilidade de reutilização ou reciclagem do material de embalagem, redução do volume dos produtos, redução da toxicidade, aumento da duração dos produtos e diminuição do consumo.

A implementação de um programa de redução na fonte necessita de medidas de educação, desenvolvimento através da investigação, incentivos financeiros e desincentivos através da implementação de normas penalizadoras.

A redução na fonte não é um conceito extensivamente usado, pelo que é difícil estimar o seu impacto real na geração de resíduos. Apesar da dificuldade de quantificar exactamente os benefícios de uma redução na fonte estes benefícios são conceptualmente claras. A implementação de programas de redução na fonte, aumentam a capacidade dos aterros, conservam os recursos naturais, diminui a energia necessária na produção e diminui a poluição do ar, água e solo.

Uma política nacional de redução na fonte necessita da cooperação dos comerciantes, dos industriais, dos consumidores, e dos governos nacional e locais.

Os incentivos financeiros são projectados para estimular a redução na fonte através da ligação de um benefício económico com a implementação de actividades de redução na fonte. Os desincentivos financeiros são planeados por forma a adicionar custos às actividades de produção de resíduos que poderiam ser evitadas através de actividades de redução na fonte. Estes incentivos e desincentivos podem ser direccionados para os consumidores e indústria.

4.2. RECUPERAÇÃO DE MATERIAIS

A separação na origem é um pré-requisito essencial, para as acções de recuperação / reciclagem. Os resíduos que são separados na origem pelo produtor de resíduos podem incluir componentes perigosos, materiais de embalagem (papel, vidro, plásticos,, etc.) e materiais biodegradáveis. O ponto chave é que praticamente todos estes materiais são muito mais fáceis de separar na fonte da que após entrarem no fluxo geral de R.S.U. Contudo, os sistemas de separação na origem dependem da participação dos residentes e não serão eficazmente utilizados a não ser que o sistema seja simples e os seus requisitos (vantagens) sejam claramente explicados.

A experiência indica que os residentes individuais não operam um sistema complexo de contentores de lixo múltiplos eficazmente e isto leva à contaminação entre os vários tipos de resíduos.

A separação dos resíduos nos locais onde são produzidos tem vários benefícios potenciais, tais como:

- I) Remover os componentes indesejáveis dos R.S.U; tais como: medicamentos, óleo de motor, baterias de automóveis e pilhas, etc.
- II) Facilitar a reciclagem / recuperação ou reutilização benéfica de componentes como o vidro, papel, plásticos e outros. É geralmente muito mais barato separar estes materiais de um fluxo "combinado" de resíduos e reduz também a possibilidade de contaminação entre os materiais, o que pode reduzir drasticamente o valor dos materiais recuperados.
- III) A compostagem na fonte de materiais biodegradáveis. Os resíduos podem ser colocados numa "pilha de compostagem" tradicional de um jardim ou numa unidade de compostagem separada, que pode ser fornecida, gratuitamente ou a baixo custo, pela municipalidade. O material composto perde o seu valor comercial e aceitação se estiver contaminado com outros materiais, assim numa estação de compostagem central poderiam ser utilizados materiais resultantes de uma recolha selectiva dos materiais de jardins, restaurantes, hotéis e mercados municipais.

Numa forma geral a recolha de materiais para recuperação / reciclagem resume-se ao vidro, pelo que deveriam ser implementados de forma sistemática centros de recolta. ("Ecocentrum"). Estes são normalmente locais possuídos pela autarquia nos quais os membros do público podem depositar resíduos. Estão abertas às horas anunciadas, são supervisionadas pelo pessoal da autarquia e podem ser bons locais para os sistemas de "entrega", de esclarecimento e educação ambiental. Pode também haver instalações para aceitar uma gama mais vasta de resíduos diversos, incluindo resíduos perigosos e volumosos.

Os centros de recolta podem ser instalados junto às estações de transferência, aterros sanitários ou estações de incineração.

Os programas de reciclagem variam nos graus de agressividade, alguns podem ser simplesmente, centros de depósito de baixa tecnologia, enquanto que outros podem envolver programas elaborados de separação na origem e colheita selectiva ou tecnologias complexas de separação nos centros de recolta. Devido ao facto da reciclagem poder diminuir significativamente a quantidade dos materiais para

deposição final, deve ser por norma uma das primeiras opções escolhidas pela comunidade por forma a aumentar a capacidade dos aterros.

O impacto da reciclagem pode também ter grandes benefícios na opção de incineração dos resíduos:

- Programas de reciclagem diminui a quantidade de materiais a serem incinerados, sendo assim necessárias instalações de combustagem mais pequenas.
- A reciclagem pode retirar materiais, que não são combustíveis, como o vidro ou metais, ou fontes de contaminação das cinzas (e.g. chumbo e cádio de tintas e baterias).
- Atitudes públicas mais positivas podem ter resultado se se utilizar uma central de incineração com recuperação de energia paralelamente com programas de reciclagem.

Apesar do benefícios óbvios que podem ser produzidos com a combinação de programas de reciclagem e combustão, há uma tensão histórica entre os apoiantes de cada uma destas medidas. Esta tensão resulta no controle de fluxo de resíduos e que parâmetros de projecto são garantidos para resíduos que são enviados para o incinerador (os incineradores são projectados para uma determinada capacidade a qual é sensível à quantidade de resíduos que entra). O controle de fluxo, pode ser, no entanto projectado por forma a fornecer materiais tanto para os programas de reciclagem como para as estações de incineração. Para o planeamento de programas de reciclagem e de estações de incineração é necessário conhecer a quantidade e a composição dos resíduos e a sua evolução com o tempo assim como dos mercados existentes e a sua evolução com o tempo.

Programas de reciclagem para além de terem um impacto positivo nos aterros e incinerador têm também um impacto positivo na melhoria do composto produzido em operações de compostagem. Muitos dos materiais reciclados (e.g. vidro, alumínio, ferrosos, plásticos) não são facilmente compostos, e são em geral considerados materiais contaminantes no composto final. De forma semelhante podem ser retirados materiais tóxicos. (eg. chumbo e cádio das tintas e baterias) do fluxo de resíduos diminuindo a poluição das emissões dos aterros e incineradoras.

4.3. COMPOSTAGEM

Existem uma variedade de formas de compostagem, variando desde os sistemas simples de pilhas ao ar livre a sistemas técnicos tais como os da digestão aeróbica e anaeróbica. A escala pode também variar entre sistemas de "balde" adequados a uma só propriedade até instalações complexas, capazes de lidar com 50 a 150

toneladas / dia. Foram tentados novos processos, para resolver os problemas associados de ampliação de escada e processamento de resíduos (a maioria dos sistemas de compostagem são processos por lotes com tempos de duração que variam entre algumas horas a várias semanas).

A compostagem pode reduzir de forma significativa a quantidade de resíduos a serem depositados ou incinerados. Assim, programas de compostagem podem ter um desempenho fundamental na gestão do espaço disponível para a deposição final.

A compostagem individualizada é muitas vezes classificada como uma actividade de redução na fonte, pois os resíduos tratados desta forma não aparecem no fluxo de resíduos a serem colhidos pela municipalidade.

A separação eficaz dos resíduos antes da compostagem é essencial. O processo só aceita resíduos biodegradáveis e mesmo os materiais inertes podem reduzir a eficiência do processo, ocupando espaço no digestor sem contribuir para o processo de digestão. Alguns resíduos menos inertes têm também o potencial para matar os micróbios de que o processo depende e devem, pois ser evitados a todo o custo.

O acesso a um mercado para o composto é um factor chave, pelo menos em termos económicos. Pode ser utilizado para fins agrícolas, ou, de uma maneira geral, para melhorar a qualidade dos solos mais áridos. Deste ponto de vista, a compostagem pode contribuir significativamente para o ambiente.

O preço de mercado depende não só do valor de composto, (i.e. o custo do fertilizante químico que o substitui) como também do equilíbrio entre a oferta e a procura na área em questão.

A compostagem dos resíduos sólidos municipais é uma tecnologia em franco desenvolvimento. Os processos de compostagem reduzem significativamente a quantidade de resíduos a serem tratados ou depositados. A qualidade do composto, não contaminado com outros produtos e libertos de substâncias tóxicas é essencial para uma boa aceitação no mercado. O melhor composto é aquele que é produzido através de uma recolha selectiva.

4.4. INCINERAÇÃO

A incineração, com, ou sem recuperação de energia, está já a ser largamente utilizada para a eliminação dos resíduos urbanos e industriais. A incineração tem várias vantagens, comparada com outras vias de eliminação, particularmente em termos da sua capacidade de lidar com uma vasta gama de resíduos. Sofre, contudo, de várias desvantagens, incluindo os elevados custos e o facto da via de deposição em aterro continuar a ser necessária para os resíduos finais. As centrais de incineração com recuperação de energia podem ter capacidades que vão das 200

às 2000 toneladas / dia, com investimentos entre 4 e 50 milhões de contos. Os custos por tonelada dependem de muitos factores específicos do local, principalmente os ligados ao efeito de escala. Os obstáculos técnicos e económicos, em conjugação com o elevado grau de oposição pública, significam que esta via de eliminação dificilmente será uma via de eliminação atractiva para uma municipalidade pequena e isolada. Poderá haver mais justificação para a via de incineração de R.S.U. nos casos em que várias municipalidades desenvolvam uma instalação conjunta em grande escala.

A redução da quantidade de resíduos e da sua toxicidade através de programas de redução na fonte, reciclagem e compostagem podem diminuir os custos e melhorar a operacionalidade de centrais de incineração no futuro. A combustagem tem uma importância significativa pois não só reduz o volume de materiais que necessitam de ser depositados. (uma redução a cerca de 10 a 30% do peso dos resíduos incinerados) como também podem produzir energia.

5. DEPOSIÇÃO EM ATERRO CONTROLADO

5.1. INTRODUÇÃO

Um aterro controlado é um método controlado para deposição dos resíduos no solo que obedece a um conjunto de regras técnicas, sendo projectado e executado por forma a tornar mínimo o impacte ambiental. Distingue-se da lixeira por nesta os resíduos serem colocados no solo sem controlo. O aterro controlado pode ser encarado, quer como solução inicial, quer como complemento para deposição dos produtos resultantes de outros métodos de tratamento, tais como a compostagem ou a incineração.

O presente capítulo inicia-se com a descrição dos tipos e classes de aterro. De seguida, focam-se os aspectos mais relevantes relacionados com a técnica de deposição dos resíduos em aterro controlado, nomeadamente os aspectos associados à escolha e preparação do local e à operação, encerramento e reabilitação do aterro.

Tecem-se, por último, algumas considerações acerca do projecto de um aterro controlado.

5.2. TIPOS DE RESÍDUOS E CLASSES DE ATERRO

De acordo com a proposta de directiva COM (91), relativa à deposição de resíduos em aterros controlados apresentada pela Comissão das Comunidades Europeias (1991), os resíduos classificam-se segundo a sua origem em urbanos e industriais, e segundo as suas características em perigosos e inertes.

A mesma fonte faz também a distinção entre as diferentes classes de aterros, com base no tipo de resíduos que cada um recebe. Assim, temos:

- Classe I - aterros para resíduos perigosos
- Classe II - aterros para resíduos inertes
- Classe III - aterros para resíduos sólidos urbanos

Torna-se, então, evidente a necessidade de proceder à especificação dos diferentes resíduos de forma a aferir qual o melhor destino a atribuir-lhe. Os resíduos admitidos em aterro devem, por isso, ser objecto de controlo no que se refere à sua origem, tipo, quantidade e características (em peso ou volume).

Um aterro poderá ter uma classificação múltipla desde que as operações de deposição dos resíduos se realizem em zonas distintas do aterro e cada uma dessas

zonas respeite os requisitos específicos estipulados, para a classe de aterro considerada. Definem-se, assim, os seguintes tipos de aterro (Tchobanoglous et al., 1993; proposta de directiva COM (91); HMSO, 1986):

- *deposição conjunta*: caracteriza-se, tal como o nome indica, pela deposição conjunta de resíduos de diferentes origens e características. São aceites para deposição essencialmente resíduos sólidos urbanos, resíduos industriais não perigosos e outros compatíveis com estes;
- *monoaterro*: constitui uma solução específica para a deposição de tipos especiais de resíduos tais como cinzas resultantes de centrais térmicas, abestos e outros resíduos similares ficando estes isolados dos materiais depositados nos aterros convencionais;
- *multideposição*: é um processo no qual se utilizam, no mesmo aterro, áreas distintas para a deposição de diferentes tipos de resíduos.

Modernamente verifica-se tendência para colocar no aterro os resíduos triturados (*shredded*) e/ou compactados (*baled*). A trituração aumenta a densidade dos resíduos (permitindo uma deposição com uma densidade cerca de 35% superior), prolongando o tempo de vida do aterro (Tchobanoglous et al., 1993). Apresenta, ainda, como vantagens a redução dos requisitos em solo de cobertura, um aceleração da decomposição dos resíduos e a diminuição do tempo de dispersão e compactação (Antunes Pereira et al., 1989). Apresenta, porém, o inconveniente de necessitar equipamento adicional de trituração.

Saliente-se, por fim, que nem todos os resíduos são aceites em aterro controlado. Com efeito, de acordo com a proposta de directiva COM (91), os resíduos líquidos, à excepção dos compatíveis com outros resíduos ou com os processos de exploração do aterro, os resíduos oxidantes, explosivos ou inflamáveis, os resíduos infecciosos provenientes de estabelecimentos médicos e, de um modo geral, os resíduos que não satisfaçam os critérios de deposição, não são aceites em aterro controlado. Tal facto prende-se com os potenciais problemas que o seu manuseamento podem provocar, tanto no próprio aterro como na região adjacente.

5.3. ASPECTOS GERAIS DA TÉCNICA DE DEPOSIÇÃO EM ATERRO CONTROLADO

De um modo geral, as fases associadas à técnica de deposição dos resíduos em aterro controlado são:

- escolha do local;
- preparação do local;
- operação do aterro;
- encerramento e reabilitação do local.

5.3.1. Escolha do local

A escolha do local constitui o primeiro passo da execução de um aterro controlado. Para além dos aspectos de natureza geológica-geotécnica focados na secção 7, é indispensável que na escolha do local sejam levados em consideração os aspectos que garantam uma deposição controlada dos resíduos, sem inconvenientes para o ambiente e saúde pública.

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

- (1) ser geológica e hidrogeologicamente aceitável, isto é, que não constitua um risco de contaminação das águas (subterrâneas ou superficiais) e terrenos adjacentes (recomendável um coeficiente de permeabilidade do solo inferior a 10^{-9} m/s).
- (2) situar-se de modo a conjugar os melhores acessos com os menores percursos (maiores distâncias implicam maiores custos de transporte);
- (3) não afectar locais habitados relativamente ao arrastamento de cheiros e materiais pelo vento devendo preferencialmente encontrar-se afastado um mínimo, de 250 metros de qualquer habitação isolada e 400 metros de qualquer aglomerado populacional;
- (4) garantir a existência de grandes quantidades de solo apropriado para cobertura diária e recobrimento final dos resíduos;
- (5) estar afastado no mínimo 100 metros de captações de água subterrânea;
- (6) não constituir risco de incêndio (ou outros) para as zonas envolventes;
- (7) possuir facilidade para a instalação de electricidade e água;
- (8) não ocupar terrenos afectos à zona agrícola ou à reserva ecológica nacional;
- (9) permitir uma boa inserção na paisagem tanto durante a exploração como após o encerramento.

5.3.2. Preparação do local

Os trabalhos de preparação do local dependem das características da região e incidem geralmente sobre duas componentes. A primeira relaciona-se com a instalação das infraestruturas que permitem uma eficaz exploração e manutenção do

aterro e a segunda com os aspectos técnicos que tornam o local operacional (Crawford e Smith, 1985). De entre os diversos trabalhos envolvidos na preparação do local refiram-se os seguintes:

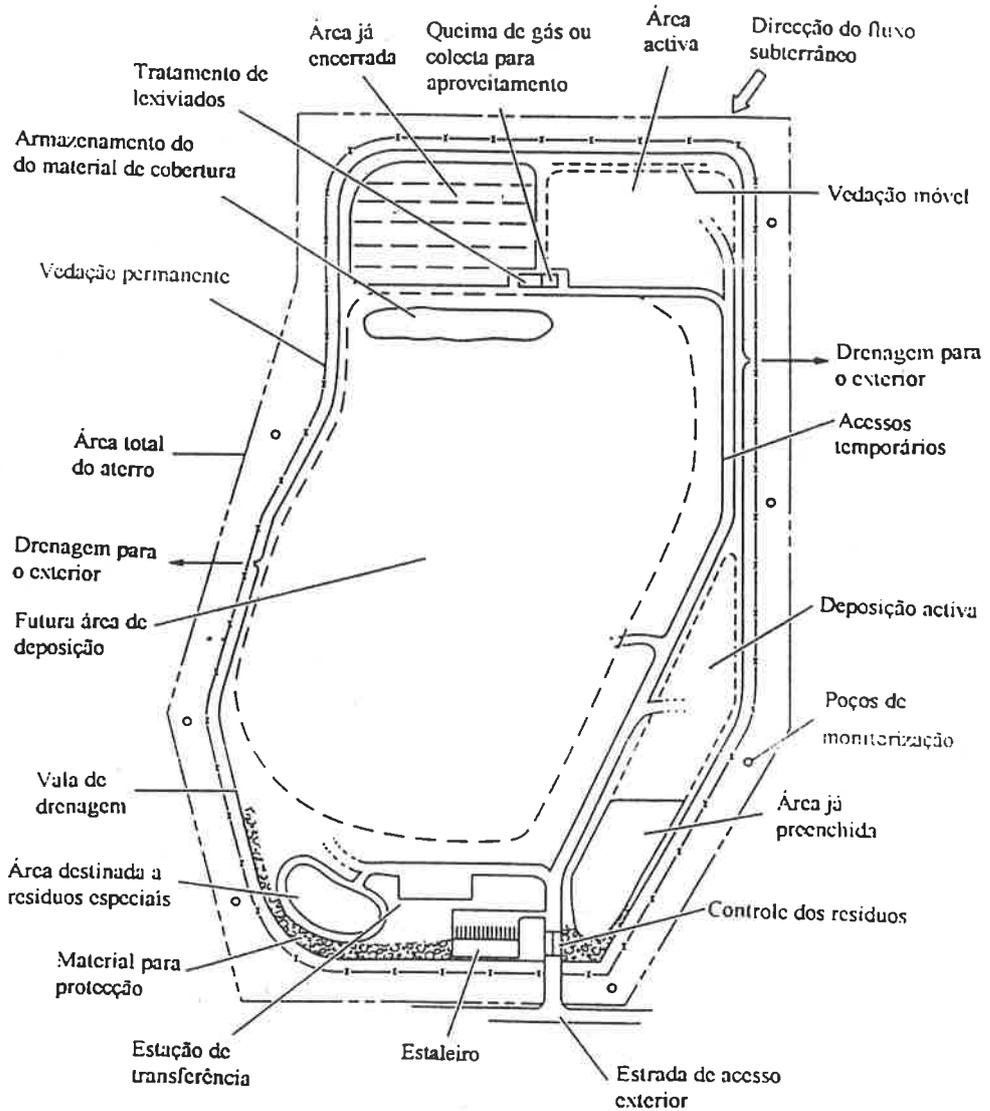
- *acessos*: a construção de estradas de acesso e arruamentos interiores que possibilitem um transporte rápido e eficiente ao aterro é indispensável, além de que torna o processo de deposição dos resíduos bastante mais económico e rápido;
- *desvio das águas*: a protecção das reservas de água pode efectuar-se alterando simplesmente os seus percursos por forma a que não interceptem a área do aterro. No caso das águas superficiais estes trabalhos passam pela construção de valas de drenagem ao longo do perímetro do aterro, enquanto que o contacto das águas subterrâneas com o aterro é evitado através da colocação de dispositivos que garantam o seu confinamento hidrológico;
- *vedações*: a colocação de vedações no aterro visa a segurança impedindo o acesso de pessoas ou animais e ajudando a definir os seus limites físicos. Podem, também, instalar-se vedações adicionais de natureza móvel com o objectivo de reter os objectos facilmente levados pelo vento;
- *lavagem de rodados*: a lavagem de rodados tem por finalidade evitar que os veículos deixem o aterro com as rodas carregadas de resíduos e lamas e os transportem para as vias públicas, com todas consequências negativas daí decorrentes. A sua localização deve fazer-se tanto quanto possível perto da saída do aterro;
- *estaleiros*: torna-se necessário a instalação de estaleiros que contemplem escritórios, electricidade, água potável, telefone, redes de esgotos, dispositivos de ataque a incêndio, etc. O projecto deve, ainda, prever a existência de áreas para armazenagem dos solos, equipamento e combustíveis e eventualmente a instalação de oficinas, básculas e locais destinados ao controle dos resíduos admitidos;
- *controlo dos lixiviados e gás*: a descrição dos sistemas de controlo do gás e dos lixiviados foi já efectuada respectivamente nas secções 6.3.1.3 e 6.3.2.6.

Saliente-se, por fim, que a localização das diversas infraestruturas deve ficar definida desde logo na fase de projecto.

A fim de ilustrar uma possível localização das diversas infraestruturas apresenta-se na figura 5.1 a planta geral de um aterro controlado. Porém, e porque cada plano é específico para cada caso, este esquema deve ser encarado apenas como exemplo possível.

Figura 5.1

Planta esquemática de um aterro controlado (Tchobanoglous et al., 1993)



5.3.3. Dimensionamento e operação

5.3.3.1 Generalidades

A colocação dos resíduos no aterro inicia-se com o despejo, espalhamento e compactação em camadas seguida de respectiva cobertura diária com solos adequados.

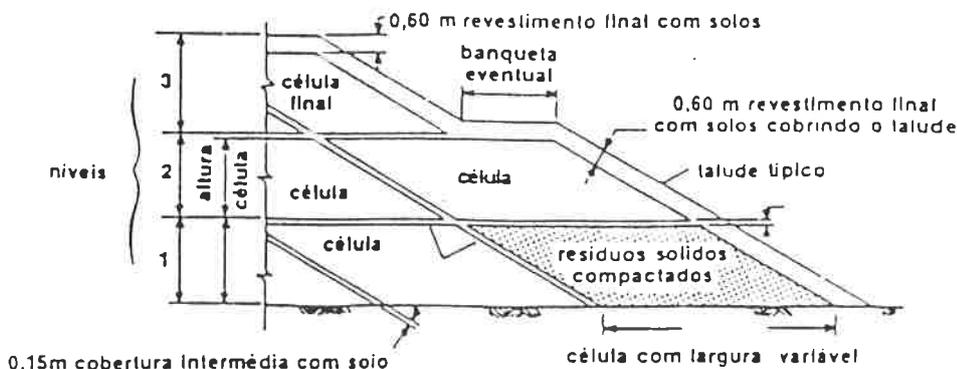
De acordo com o referido por diversos autores entre os quais Antunes Pereira et al. (1989); Tchobanoglous et al. (1993), Tocha Santos e Briz (1985), os resíduos sólidos correspondentes a um determinado período de operação, geralmente 1 dia, formam uma célula. As células têm geralmente a disposição indicada na figura 5.2 e possuem espessuras de 1,5 a 3 metros, com camadas intermédias de material de cobertura com 15 a 20 cm de espessura (solo, resíduos de construção civil, escórias, materiais sintéticos, etc.). O objectivo das camadas intermédias é acima de tudo impedir a infiltração das águas da chuvas. Evitam, ainda, a formação de odores, proliferação de insectos e roedores e retêm os objectos facilmente transportados pelo vento.

Ao conjunto de células adjacentes colocadas numa mesma camada chama-se nível. Sobre o último nível aplica-se uma camada de cobertura final, com espessura da ordem dos 0,6 a 1,2 metros e com inclinações da ordem dos 3 a 6% (Tchobanoglous et al., 1993). A sua função é impedir a entrada e acumulação de águas da chuva, facilitar o escoamento superficial e fornecer um suporte material para as raízes da vegetação, tal como foi já referido (veja-se secção 6.3.2.6-b).

Sempre que necessário pode construir-se uma banqueteta, que para além de ajudar na estabilização do aterro, permite a instalação de drenos e dos tubos para a condução do gás.

Figura 5.2

Perfil esquemático de um aterro controlado (referido por Tocha Santos e Briz, 1985)

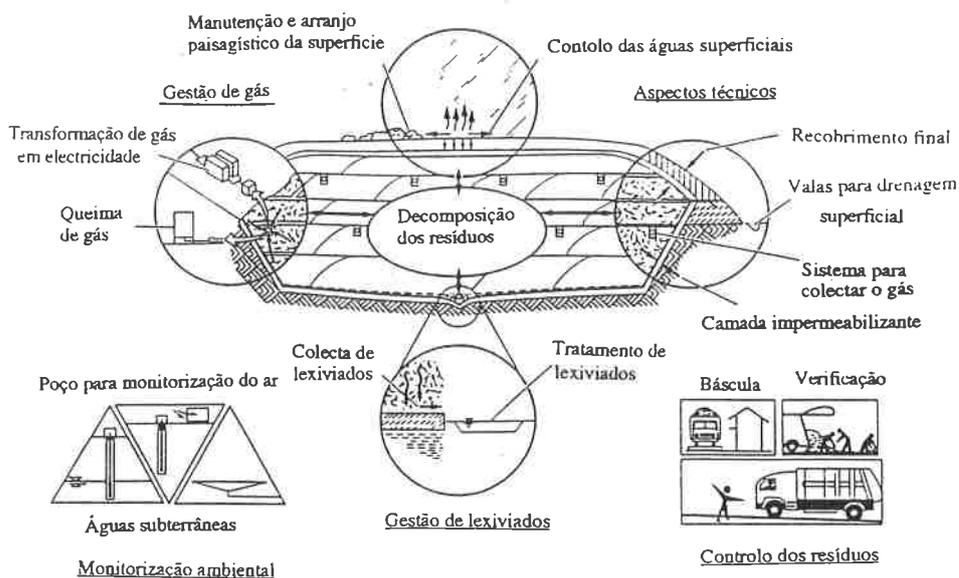


A operação do aterro contempla, ainda, a instalação dos sistemas de controlo e monitorização dos produtos resultantes da degradação dos resíduos (gases e lixiviados) e a especificação do resíduos a admitir. Na figura 5.3 ilustram-se os principais elementos envolvidos na operação de um aterro controlado.

Figura 5.3

Elementos presentes na operação de um aterro controlado

(Tchobanoglous et al., 1993)



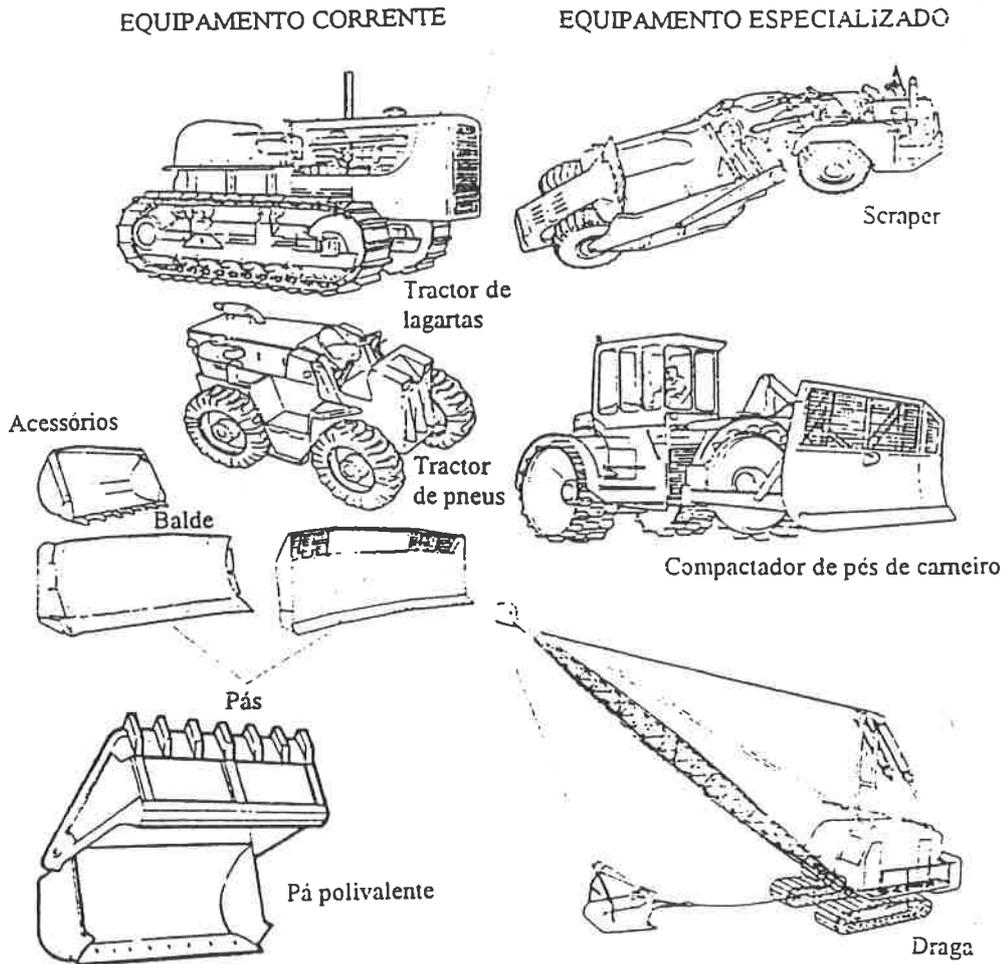
5.3.3.2. Equipamento

O equipamento utilizado no aterro (tipo, número e desempenho) depende das características do local, da quantidade, natureza e tipo de resíduos recebidos e, ainda, de factores económicos. O equipamento é utilizado para espalhar, compactar e colocar o material de cobertura sobre os resíduos, sendo muitas vezes usado igualmente nos trabalhos de preparação e restauração do aterro. Este inclui compactadores de pés de carneiro, tractores de lagartas (crawler tractor) ou pneus, scraper, dragas (draglines) e motoniveladoras (motogrades), tal como ilustrado na figura 5.4. Contudo, podem utilizar-se tractores devidamente apetrechados com acessórios (pás e baldes) na execução de tarefas especiais como, por exemplo, a aplicação de água

com o objectivo de reduzir as poeiras, formadas devido à compactação ou à escavação e reboque.

Figura 5.4

Algum equipamento utilizado na operação de um aterro controlado
(Sorg et al., 1970, citado por Stone et al., 1977)



Os quadros 5.1, 5.2 e 5.3 mostram por sua vez qual o equipamento necessário ao aterro controlado, o vulgarmente usado e as características apresentadas no desempenho (performance) das diversas funções.

Quadro 5.1

*Equipamento necessário para a operação de aterros
(Brunner et al., 1971, citado por Stone et al., 1977)*

Resíduos sólidos operados (ton/8hr)	"Crawler Load"		"Crawler Dozer"		Tractor de pneus	
	Potência (HP)	Peso* (ton)	Potência (HP)	Peso* (ton)	Potência (HP)	Peso* (ton)
0-20	< 70	9,1	80	6,8	100	9,1
20-50	70 a 100	9,1 a 11,3	80 a 110	6,8 a 9,1	100 a 120	9,1 a 10,2
50-130	100 a 130	11,3 a 14,7	110 a 130	9,1 a 11,3	120 a 150	10,2 a 12,5
130-250	150 a 190	14,7 a 20,4	150 a 180	13,6 a 15,9	150 a 190	12,5 a 15,9
250-500	combinação de máquinas		250 a 280	21.5 a 23.5	combinação de máquinas	
mais de 500	combinação de máquinas					

Nota: Baseado na capacidade de uma máquina espalhar, compactar e cobrir numa face de trabalho de 91 m.

(*) Peso inicial, sem considerar nenhuma pá, ou outro acessório.

Quadro 5.2

*Equipamento vulgarmente usado na operação de um aterro controlado
(Sorg et al., 1970, citado por Stone et al., 1977)*

População	Tonelagem diária	Equipamento			Acessórios (c)
		Nº	Tipo	Peso (ton.)	
0 a 20 000	0 a 50	1	Tractor de lagartas ou pneus	5 a 14	Vários tipos de pá (0,9 a 1,8m)
20 000 a 50 000	50 a 150	1 1 1 1	Tractor de lagartas ou pneus Scraper, Draga Autotanque	14 a 30	Vários tipos de pá (1,8 a 3,7m) Pá polivalente
50 000 a 100 000	150 a 300	1 ou 2 1 1	Tractor de lagartas ou pneus Scraper, Draga,	14+	Vários tipos de pá (1,8 a 4,6m) Pá polivalente
> 100 000	300 + (a)	1 ou 2 1 1 1	Tractor de lagartas ou pneus Draga (b), Compac. de pés de carneiro Autotanque	20 +	Vários tipos de pá Pá polivalente

(a) Para cada 500 toneladas adicionadas é necessária mais um peça de equipamento;

(b) A escolha entre scraper ou grua de pá de arraste depende das condições locais;

(c) Opcional, dependendo das necessidades individuais.

Quadro 5.3

*Características de performance do equipamento de um aterro
(Brunner et al., 1972, citado por Stone et al., 1977)*

Equipamento*	Resíduos sólidos		Material de Cobertura			
	Espalhar	Compactar	Escavar	Espalhar	Compactar	Rebocar
"Crawler dozer"	Excelente	Boa	Excelente	Excelente	Boa	Não aplicável
"Crawler loader"	Boa	Boa	Excelente	Boa	Boa	Não aplicável
Tractor de pneus "dozer"	Excelente	Boa	Razoável	Boa	Boa	Não aplicável
Tractor de pneus "loader"	Boa	Boa	Razoável	Boa	Boa	Não aplicável
Compactador	Excelente	Excelente	Má	Boa	Excelente	Não aplicável
"Scraper"	Não aplicável	Não aplicável	Boa	Excelente	Não aplicável	Excelente
Grua de pá de arrasto	Não aplicável	Não aplicável	Excelente	Razoável	Não aplicável	Não aplicável

(*) Com base em: solo facilmente trabalhável e material de cobertura a uma distância superior a 300m.

Características do equipamento

- *Compactador de pés de carneiro*: estes compactadores possuem rodas "dentadas" que são de extraordinária utilidade para triturar e compactar os resíduos. Nos aterros que recebem pequenas quantidades de resíduos este tipo de compactador pode revelar-se suficiente para espalhar, compactar e colocar a cobertura sobre os resíduos (HMSO, 1986). Note-se, porém, que os compactadores de pés de carneiro não foram projectados para o desempenho de múltiplas funções e, por isso, é sempre recomendável a utilização do equipamento apropriado a cada função.
Os operadores do equipamento devem ser orientados no sentido de compactarem os resíduos em camadas finas por forma a conferir elevadas densidades aos resíduos depositados.
- *Tractores (compactadores) de lagartas e pneus*: estas máquinas são extremamente versáteis e permitem a instalação de acessórios suplementares a fim de executarem funções específicas (HMSO, 1986). Assim, se for necessário manusear grandes quantidades de resíduos deve optar-se por uma

pá como acessório enquanto que, se se pretender espalhar o material de cobertura a escolha do acessório deve recair sobre um balde.

O equipamento de lagartas é mais indicado nos aterros instalados em materiais pouco resistentes dado que transmitem ao solos pequenas tensões, contudo, apresentam a desvantagem de serem pouco eficientes na compactação dos resíduos (HMSO, 1986).

Este tipo de equipamento encontra-se disponível no mercado em diversos tamanhos.

- *Scrapers*: são utilizados, essencialmente, na escavação e transporte do material de cobertura, sendo também utilizados na preparação e restauração do local.

O grau de compactação alcançado pelos resíduos é de fundamental importância pois os assentamentos diferenciais ocorrentes no aterro controlado são condicionados por este. Os compactadores de pés de carneiro constituem o equipamento que permite obter as maiores densidades e de forma mais rápida (HMSO, 1986). O grau de compactação dos resíduos pode variar desde aproximadamente 5 kN/m³ quando se usam veículos de lagartas, a valores superiores a 10 kN/m³ quando se compactam os resíduos, em camadas finas, com compactadores de pés de carneiro (Crawford e Smith, 1985).

5.3.3.3. Métodos de operação

Distinguem-se, quanto aos métodos de operação, os aterros em trincheira, em extensão e em depressões.

a) *Aterro controlado em trincheiras/células ou profundidade*

Os resíduos sólidos são colocados em trincheiras ou células, escavadas no terreno. O solo escavado é armazenado e utilizado nas coberturas diárias e final (figura 5.5a). As trincheiras (ou células) escavadas são geralmente impermeabilizadas com solos argilosos, geomembranas ou uma combinação de ambos. A sua finalidade é limitar a movimentação de gás e lixiviados para o exterior do aterro.

As células distinguem-se das trincheiras unicamente pelas suas dimensões. Assim as células são geralmente quadradas com aproximadamente 300 metros de lado e taludes laterais inclinados de 1,5:1 (H:V) a 2:1 (H:V), enquanto que as dimensões das trincheiras variam de 60 a 300 metros em comprimento, 1 a 3 metros em profundidade e 5 a 15 metros em largura (Tchobanoglous et al., 1993).

É o tipo de aterro recomendado para locais onde exista grande quantidade de solo disponível para cobertura dos resíduos, onde o solo seja facilmente escavável e onde o nível freático se encontre a grandes profundidades. Desde que se tomem medidas por forma a evitar que as águas subterrâneas penetrem no aterro e se contaminem, é possível utilizar este método mesmo quando o nível freático se encontra à superfície (Stone et al., 1977; Tchobanoglous et al., 1993).

b) Aterro controlado em extensão ou superfície

Neste método, o processo inicia-se com a construção de um talude de encontro ao qual são colocados os resíduos (figura 5.5b). Estes são espalhados em faixas longas, com largura da ordem dos 3 a 6 metros e em camadas de 0,4 a 0,8 metros de espessura, sendo seguidamente compactados (Tocha Santos e Briz, 1985). A altura das várias camadas, por cada dia de operação, não deverá exceder os três metros de altura. Os resíduos são diariamente cobertos com solo apropriado.

É o tipo de aterro utilizado quando o nível freático se encontre perto da superfície e em zonas topograficamente planas e baixas, não favorecendo a escavação em trincheira (Tchobanoglous et al., 1993).

A construção de aterros em que se combine as características de ambos os métodos anteriormente descritos é possível, recebendo neste caso o nome de aterro em rampa (Pavoni et al., 1975). Inicia-se com uma pequena escavação em frente a um talude já existente, para onde os resíduos são despejados, espalhados e compactados tal como no aterro em extensão, mas agora formando uma rampa. Estes são depois recobertos por solo natural, disponível no local, ou por solo vindo doutro local. Neste último caso o método pode tornar-se bastante dispendioso, se considerarmos os custos adicionais de transporte (Tocha Santos e Briz, 1985).

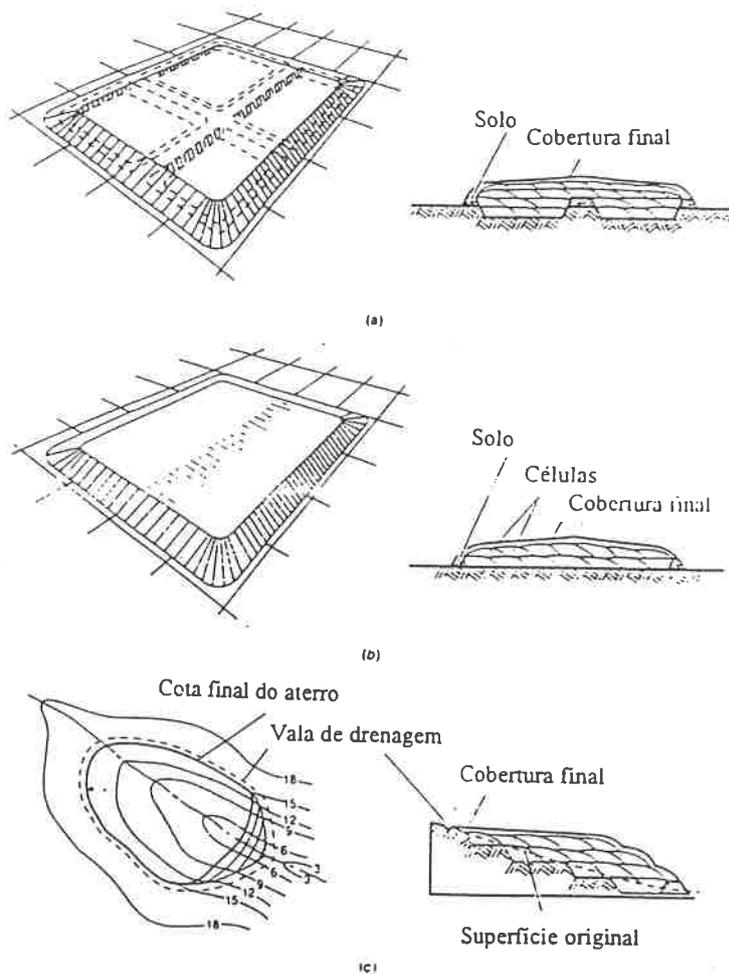
c) Aterro em depressões

Se atendermos às características geomorfológicas do terreno da região outros tipos intermédios de aterros podem ser projectados. É o que acontece em locais onde ocorrem depressões naturais (vales, ravinas, etc) ou artificiais (pedreiras, saibreiras, areiros abandonados, etc). O tipo de operação varia conforme as características geométricas das depressões, materiais de cobertura, hidrologia, geologia e acessos (Antunes Pereira et al., 1985).

O controle da drenagem superficial é frequentemente o factor mais crítico no desenvolvimento de aterros em depressões. O sucesso deste método passa pela existência de solos de cobertura adequados, quer para utilizar na individualização dos níveis quer para o recobrimento final.

Figura 5.5

Métodos de operação: (a) aterro controlado em trincheira; (b) aterro controlado em extensão; (c) aterro em depressões
(Tchobanoglous et al., 1993)



5.3.3.4. Sequência de deposição

A sequência específica de colocação dos resíduos no aterro controlado depende das características do local, especialmente da quantidade de material de cobertura disponível, da topografia, hidrologia e geologia da região.

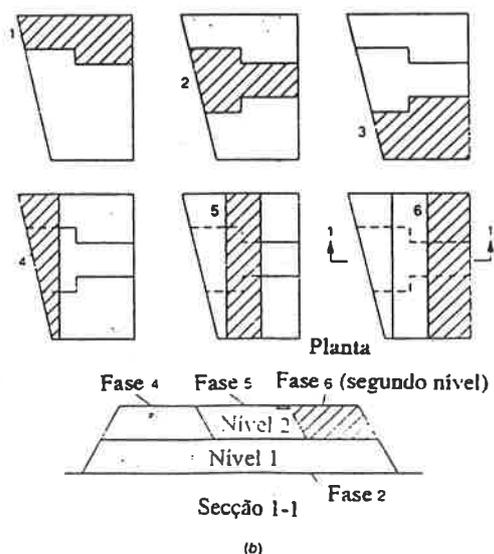
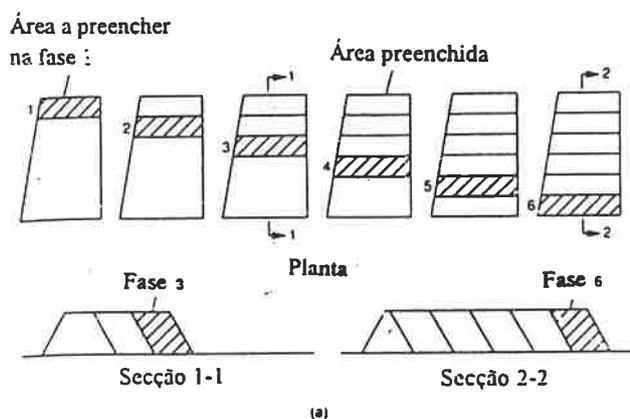
O preenchimento do aterro faz-se por fases sendo os resíduos depositados em áreas previamente individualizadas. A utilização de uma nova zona deve processar-se apenas quando a anterior tiver atingido a sua capacidade máxima. Na figura 5.6 estão ilustrados os esquemas típicos de preenchimento do aterro controlado, por fases.

Figura 5.6

Exemplos de esquemas típicos da sequência de preenchimento do aterro controlado:

(a) aterro constituído por um nível; (b) aterro constituído por vários níveis

(Tchobanoglous et al., 1993)



5.3.4. Encerramento e reabilitação do local

O encerramento do aterro controlado deve processar-se logo que a sua capacidade máxima tenha sido atingida, isto é, logo que a altura de resíduos depositados tenha atingido a altura definida no projecto. Um aterro encerrado deve possuir enquadramento paisagístico que permita a sua integração no meio ambiente que o rodeia e futura utilização social do local. Deve, ainda, ser objecto de vigilância e manutenção após o encerramento por um período de 10 anos de modo a garantir que o aterro se mantém seguro. Segundo a proposta de directiva COM (91) poderá ser por um período menor se as autoridades competentes assim o autorizarem, embora as normas Americanas recomendam períodos de 30 a 50 anos.

A vigilância e manutenção do aterro compreende inspecções periódicas realizadas por peritos, a fim de verificar tanto a operacionalidade dos seus componentes, assim como, se as condições existentes se encontram dentro dos limites de segurança previstos.

Um plano que defina claramente a estratégia a adoptar quando o aterro atingir a fase de encerramento e futura utilização a dar ao local, deve ser elaborado ainda na fase de projecto.

A reabilitação do local exige cooperação multidisciplinar entre engenheiros, arquitectos paisagísticos e botânicos a fim de analisar os seguintes factores (Crawford e Smith, 1985):

- a restituição da fertilidade e paisagem natural ao local ;
- uma reabilitação que permita, no futuro, flexibilidade na utilização do terreno e possibilite a instalação de projectos específicos tais como campos desportivos, parques de estacionamento, áreas de recreio, edifícios;
- integração paisagística na área adjacente;
- proporcione condições favoráveis ao restabelecimento da fauna e flora características do ecossistema.

Existem diversos factores que influenciam a considerar para a reabilitação do local após o encerramento do aterro. Refiram-se, pela sua importância, os factores técnicos e os factores estéticos.

Os factores de ordem técnica que influenciam na restauração do aterro prendem-se com os assentamentos, drenagem de gás e lixiviados e recobrimento final do aterro.

Os assentamentos sofridos por um aterro dependem em larga medida do grau de compactação dos resíduos, da perda de massa (sofrida ao longo do tempo em consequência da decomposição que a matéria orgânica), da consolidação devida ao peso próprio dos resíduos e da sobrecarga correspondente à cobertura final do

aterro (Wilson e Thomas, 1991). A maior parte do assentamento ocorre nos 10 primeiros anos após deposição dos resíduos, no entanto, períodos superiores aos 30 anos podem não ser suficientes para a sua finalização (HMSO, 1986; Crawford e Smith, 1985).

A fim de ilustrar a influência que a densidade com que os resíduos são compactados tem no valor do assentamento, refira-se que enquanto para densidades da ordem dos $0,6\text{kN/m}^3$ foram registados assentamentos superiores a 20% da espessura total dos resíduos depositados, atingido mesmo, em alguns casos, os 35% (Cheyney, 1983, citado por Wilson e Thomas, 1991), para densidades de 12kN/m^3 se obtiveram assentamentos da ordem dos 10% (Wilson e Thomas, 1991).

O controlo das águas superficiais é uma medida preventiva na formação dos lixiviados sendo, por isso, imprescindível a construção de valas superficiais que conduzam as águas chegadas à superfície do aterro (veja-se secção 6.3.2.6-b). A instalação de sistemas para colectar os lixiviados deve ser feita na fase de operação do aterro e após a conclusão deste.

Os problemas provocados pelo gás após o encerramento do aterro relacionam-se, por sua vez, com a sua possível migração lateral a que está associado o perigo de explosão, tal como foi já referido (secção 6.3.1). À semelhança do que acontece com os lixiviados, o controlo do gás deve efectuar-se através da instalação de sistemas colectores durante e após operação do aterro.

No processo de encerramento de um aterro não deverá ser esquecida a componente paisagística devendo o aterro estar completamente integrado na paisagem envolvente de modo a não causar impactes visuais negativos. Deste modo, assim que o aterro controlado atinja a cota final de deposição deve ser instalada sobre a sua superfície uma camada final de solo de cobertura que, para além de impedir a infiltração das águas da chuva, possibilite a colocação de vegetação. A vegetação é esteticamente recomendável e além disso evita a erosão superficial. A escolha das espécies vegetais a colocar sobre o aterro deve levar em consideração o tipo de vegetação característica da região, as condições climáticas e a espessura de solo disponível para o crescimento das raízes.

5.3.4.1. Construção sobre aterros controlados encerrados

A construção sobre aterros controlados encerrados é uma prática pouco frequente, em grande parte devido aos cuidados adicionais que a utilização de tais locais compreende. A decisão de construir sobre aterros encerrados deve contemplar, para além dos aspectos geológico-geotécnicos dos terrenos subjacentes, as características e composição dos resíduos, gás e lixiviados (Matsufuji et al., 1991).

De um modo geral, os problemas com que a construção sobre aterros encerrados se defronta prendem-se com os assentamentos diferenciais, possibilidade de acumulação de gás com riscos de explosão e a potencial corrosão dos materiais da fundação (Emberton e Parker, 1991). A fim de minimizar estes problemas sugerem-se, de seguida, algumas soluções a adoptar.

(i) Assentamentos diferenciais

A construção sobre aterros encerrados deve, sempre que possível, utilizar fundações indirectas. Alternativamente, pode recorrer-se a técnicas de consolidação dinâmica ou a vibroflutuação com vista a aumentar a densidade dos resíduos depositados. Porém, a utilização destas técnicas só é apropriada em aterros cujos resíduos se encontrem em avançado estado de decomposição e não se encontrem saturados em lixiviados (HMSO, 1986).

Não se recomenda em hipótese alguma a construção sobre aterros recentemente encerrados devido aos elevados assentamentos diferenciais ocorrentes nestes.

(ii) Problemas de corrosão

Os problemas resultantes do ataque químico aos materiais da fundação, em resultado do seu contacto com os lixiviados e gases, podem ser evitados se forem apenas utilizados materiais anti-corrosão (Matsufuji et al., 1991).

(iii) Gás

A acumulação de gás na fundação pode ser evitada à custa de ventilação. Em casos de elevada emissão de gás pode eventualmente instalar-se na fundação um sistema de vácuo que permita a sua extracção (Emberton e Parker, 1991; Matsufuji et al., 1991).

5.3.5. Algumas considerações ao projecto de um aterro controlado

5.3.5.1. Generalidades

Para além dos aspectos de ordem técnica que se encontram resumidos no quadro 5.4 a elaboração do projecto de um aterro exige uma correcta avaliação da situação existente na região. Dever-se-á dar atenção ao crescimento natural das populações abrangidas, ao desenvolvimento e ordenamento dos aglomerados populacionais e às actividades económicas praticadas na região, pois estas constituem um bom indicador do crescimento das populações. Deverão igualmente atender-se aos fenómenos migratórios, nomeadamente a existência de populações flutuantes em resultado, por exemplo, do turismo sazonal (Ré et al., 1990).

Quadro 5.4

*Aspectos a considerar no projecto de um aterro controlado
(adaptado de Tchobanoglous et al., 1993)*

COMPONENTES DO ATERRO	ASPECTOS A CONSIDERAR
Acessos	Pavimentação de todos os acessos do aterro, inclusive os temporários usados para a descarga de resíduos.
Área útil	A área do aterro deve ser suficiente para receber os resíduos por períodos mínimos de 5 anos mas preferencialmente entre 10 a 25 anos.
Técnica construtiva	A técnica construtiva depende das condições topográficas e da disponibilidade de materiais de cobertura. Os métodos mais usados são o aterro em extensão, em superfície ou em depressões.
Características finais do aterro	A inclinação dos taludes laterais do aterro deve ser de 3:1 (H:V) e a camada de cobertura final deve ter uma inclinação compreendida entre os 3 a 6%.
Cobertura intermédia	Os solos para a cobertura dos resíduos devem ser, sempre que possível, provenientes do local. É, porém, eventualmente possível utilizar outros materiais tais como cinzas ou rejeitados da construção civil. A espessura destas camadas deve ser da ordem dos 15 cm.
Cobertura final	Sobre o último nível de resíduos deve ser colocada uma camada impermeabilizante preferencialmente pela combinação de geossintéticos e solos argilosos.
Sistema de impermeabilização	Instalados na base e taludes laterais, podem ser constituídos por argilas (0,6 a 1,2m), geomembranas ou geocompósitos (geossintéticos + solos).
Construção das células	Os resíduos colocados no aterro em um dia de operação formam uma célula. São depois cobertos com solo de cobertura (15 cm). As suas dimensões variam entre os 3 a 9 m de largura, alturas de 3 a 4 m (incluindo o material de cobertura). A inclinação das suas faces é de 2:1 (H:V) a 3:1 (H:V).
Protecção das águas subterrâneas	A protecção das águas subterrâneas inclui a instalação de drenos ao longo do perímetro do aterro, desviando as águas provenientes de captações e valas superficiais para condução das águas da chuva.
Controlo do gás do aterro	O controlo do gás do aterro faz-se através da implementação de um sistema de trincheiras e poços porosos a partir dos quais o gás é libertado e queimado. Pode ser igualmente extraído através da instalação sistemas de vacum e ser aproveitado para reconversão de energia.
Sistemas colectores de lixiviados	Os tubos para colectar os lixiviados instalam-se na base dos aterros e devem ser dimensionados de forma a suportar as pressões estáticas a que vão estar sujeitos (correspondentes à altura máxima do aterro). A determinação da quantidade de lixiviados produzidos faz-se com base no balanço hidrológico.
Tratamento de lixiviados	O método de tratamento dos lixiviados é seleccionado com base na quantidade de lixiviados esperada e nas condições ambientais existentes.
Monitorização	Instalação de sistemas de monitorização na zona não saturada e saturada do subsolo para aferir a qualidade das reservas de água. A recolha de amostras de ar em estações de monitorização para controlo de qualidade é igualmente indispensável.
Equipamento	O número, tipo e performance do equipamento necessário varia de acordo com o tipo e capacidade do aterro controlado
Prevenção contra incêndio	A existência de água disponível no aterro é indispensável como medida de segurança a usar em caso de incêndio. A individualização das células, com solo, previne a propagação de fogos.

5.3.5.2. Tempo de vida útil

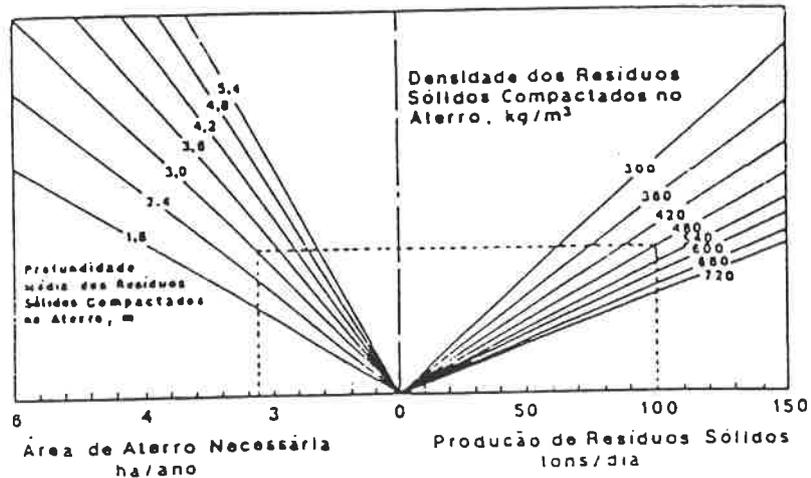
A área útil do aterro deve ser suficientemente grande para poder receber resíduos por períodos mínimos de 5 anos embora seja preferível por períodos de 10 a 25 anos.

A determinação da área necessária para implementação do aterro controlado depende da técnica construtiva utilizada, horizonte de projecto e altura máxima do aterro consentida por razões técnicas ou de integração paisagística. A área útil do terreno deve, ainda, ter em consideração os volumes diários esperados.

A figura 5.7 (Branco e Shau, 1986, referido por Antunes Pereira et al., 1989) permite determinar duma forma expedita a área necessária para um aterro controlado em função da taxa de produção, peso específico e profundidade dos resíduos compactados.

Figura 5.7

Área do aterro necessária em função da produção de resíduos sólidos, densidade e profundidade dos resíduos compactados
(Branco et Shau, 1986, referido por Antunes Pereira et al., 1989)



O tempo de vida útil do aterro, para uma dada área na qual este se pretende desenvolver, pode ser estimado a partir da capacidade do aterro.

A capacidade do aterro está directamente relacionada com o volume de resíduos que o aterro pode receber o que, por sua vez, depende do grau de compactação conferido aos resíduos, da quantidade e proveniência do material de cobertura e, ainda, da perda de massa sofrida pelos resíduos à medida que a sua degradação se vai processando.

Uma primeira estimativa da capacidade do aterro pode, porém, efectuar-se com base na carta topográfica do local onde se pretende instalar o aterro. Para o efeito, calcula-se em primeiro lugar a área média existente entre duas curvas de nível sucessivas. Seguidamente, multiplica-se a referida área pela altura prevista para o nível (geralmente 3m), de modo a obter-se o volume de resíduos correspondentes a cada nível. Por fim, faz-se o somatório dos volumes parciais anteriormente calculados e obtem-se o volume total do aterro. A capacidade do aterro é igual ao volume total do aterro, excepto se o material de cobertura for importado, caso em que se torna necessário subtrair ao volume total do aterro o volume de material de cobertura.

Uma vez estimada a capacidade do aterro faz-se a comparação entre o valor obtido e o valor de resíduos previstos ao longo do tempo (calculados a partir de dados estatísticos relativos à projecção da população e respectivas capitacões) e obtem-se o tempo de vida útil do aterro.

5.4. COMENTÁRIOS FINAIS

Convém salientar que a construção de aterros controlados é uma técnica que se reveste de vantagens e inconvenientes e, portanto, a opção pela deposição dos resíduos em aterro controlado requer uma consciente ponderação de todos os factores, entre os quais destacamos a protecção do meio ambiente.

Apresentam-se, para terminar, as principais vantagens e inconvenientes associadas à deposição de resíduos em aterro controlado (quadro 5.5).

Quadro 5.5

Síntese das vantagens e inconvenientes associados aos aterros controlados (adaptado de Tocha Santos e Briz, 1985)

VANTAGENS	DESvantagens
<ul style="list-style-type: none"> • Sempre que tecnicamente viável é o método mais económico e o que exige menores investimentos iniciais. • É um método no qual não é necessária outra fase subsequente. Trata-se do destino final dos resíduos e portanto está sempre presente, qualquer que seja o método utilizado para eliminação (incineração ou compostagem). • Um aterro controlado consegue dar resposta a volumes anormais de resíduos com um simples esforço de pessoal e equipamento • Os terrenos marginalizados podem, após o encerramento do aterro, ser aproveitados para campos desportivos, parques, etc. • Utiliza equipamento vulgar de terraplanagem. 	<ul style="list-style-type: none"> • Em zonas densamente povoadas podem não existir locais apropriados, situados a distâncias que tornem economicamente viável o transporte, dos centros produtores de resíduos. • Os aterros controlados oferecem uma forte oposição pública à sua instalação, sobretudo na proximidades de áreas urbanas. • Exige uma manutenção periódica dado que pode sofrer assentamentos. • Exige uma cuidadosa protecção das águas subterráneas contra a possível contaminação pelos lixiviados. • Os gases produzidos pela decomposição dos resíduos podem provocar acidentes. • Não permite a futura recuperação e reciclagem dos componentes dos resíduos.

6. IMPACTE AMBIENTAL

6.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo inicia-se com a descrição sumária dos aspectos relativos à avaliação do impacte ambiental, bem como os métodos gerais utilizados para a sua avaliação. Apresentam-se, também, os impactes ambientais produzidos pelos aterros controlados e os processos de os minimizar.

6.2. AVALIAÇÃO DO IMPACTE AMBIENTAL

O termo impacte ambiental é genericamente usado para definir as alterações produzidas no ambiente em consequência da realização de um projecto (empreendimento), entendendo-se por ambiente, "o conjunto dos sistemas físicos, químicos, biológicos e suas relações e dos factores económicos, sociais e culturais com efeito directo ou indirecto, mediato ou imediato, sobre os seres vivos e a qualidade de vida do Homem", de acordo com o definido na lei de Bases do Ambiente (1987)

A Avaliação do Impacte Ambiental (AIA) é processo preventivo cujo objectivo visa a minimização dos danos que a realização de qualquer projecto exerça sobre o ambiente. Fundamenta-se na recolha de informação relativa à actividade a desenvolver, concretamente o projecto proposto, a partir do qual se deduz sobre a sua capacidade de gerar impactes. Considera, ainda, opções alternativas previamente analisadas na sua máxima amplitude.

A AIA é constituída pela avaliação técnica do Estudo de Impacte Ambiental (EIA) e pela consulta ao público. O EIA procura identificar, descrever e valorizar as alterações que a realização de um projecto provocarão sobre o meio ambiente e estabelecer medidas correctivas. A consulta ao público permite ao cidadão participar e influenciar na decisão sobre os projectos que envolvam a transformação do ambiente.

6.2.1. Legislação relativa à avaliação do Impacte ambiental

Os Estados Unidos da América foram o primeiro país a introduzir na sua legislação a avaliação do Impacte ambiental em 1969, seguida de posterior actualização entre 1980 e 1982 (Andreottola et al., 1977).

Na Europa, os pioneiros a adoptar leis relativas à AIA, foram os Franceses em 1976. A lei Francesa refere a necessidade de elaborar estudos de Impacte ambiental sempre que os projectos sejam passíveis de gerar alterações no ambiente tornando-se mais tarde, em 1977, estes estudos obrigatórios (Andreottola et al., 1977).

Na Holanda foi introduzida, em 1977, uma regulamentação que conferia às autoridades administrativas poder ilimitado para exigirem estudos de Impacte ambiental para os projectos que, na sua opinião, pudessem causar poluição. Em 1986 foi aprovado uma lei relativa à AIA tendo como ponto de partida a legislação Americana.

Na Inglaterra a avaliação dos efeitos produzidos no ambiente e território, pela actividade humana, é parte integrante do processo de análise e decisão que determina se os projectos são ou não executáveis (Attewell, 1993).

No Luxemburgo uma lei de 1978 referente à protecção ambiental, torna obrigatório a preparação de estudos de Impacte associados a projectos, sempre que seja previsível a existência de efeitos negativos para o ambiente.

Em Portugal a primeira legislação elaborada foi a Lei de Bases do Ambiente em 1987 (lei nº 11/87, de 7 de Abril), a qual refere que os planos, projectos, trabalhos e acções que possam afectar o ambiente, o território e a qualidade de vida do Homem têm que ser acompanhados de Estudos de Impacte Ambiental. Foram mais tarde, em 1990, transcritos para a legislação Portuguesa (a partir das normas constantes na Directiva 85/337/CEE, de 27 de Junho) dois Decretos lei aplicáveis à avaliação do impacte ambiental (Decreto lei nº 186/90, de 6 de Junho e Decreto regulamentar nº 38/90, de 27 de Novembro). Esta legislação possui, no entanto, pontos críticos nomeadamente indefinições no campo de aplicação, lacunas e deficiências de conteúdo.

Saliente-se, por fim, que a legislação Portuguesa não contempla o caso particular dos aterros controlados e, portanto, não existe nenhuma lei de índole ambiental que regulamente a exploração e abandono dos mesmos nem, tão pouco, que garanta que as recomendações da AIA são cumpridas.

6.2.2. Estudos de Impacte Ambiental

A elaboração de um Estudo de Impacte Ambiental (EIA) deve considerar um conjunto de operações e que a seguir se descrevem (MOPT, 1992):

- (1) descrição do projecto, suas acções e sua localização. Descrição de acções susceptíveis de produzir impactes e dos recursos naturais a utilizar. Tipo, quantidade e composição dos resíduos;
- (2) consideração das alternativas tecnicamente viáveis e a justificação da

- solução proposta;
- (3) inventário ambiental. Descrição do meio físico com os seus elementos bióticos e abióticos. Estudo do meio sócio-económico;
 - (4) valorização dos elementos mais significativos do meio, em função de determinados critérios, tais como a diversidade, raridade, natureza e a singularidade;
 - (5) identificação dos impactes. Características específicas dos aspectos ambientais afectados;
 - (6) valorização de impactes. Hierarquização dos impactes ambientais, sua identificação e referência de que se tratam de impactes positivos ou negativos. Avaliação global que resuma a incidência que o projecto tem no ambiente;
 - (7) exposição de metodologias e processos de cálculo utilizados na avaliação e valorização dos impactes ambientais e o conhecimento do grau de aceitação social que a actividade possui;
 - (8) comparação e selecção de alternativas, quando aplicável;
 - (9) proposta de medidas protectoras e correctivas. Realce de impactes residuais. Possíveis estudos de pormenor;
 - (10) programa de acompanhamento ambiental;
 - (11) informação final. Documento síntese.

6.2.3. Opinião pública

A aceitação pública sobre a localização do aterro controlado é um factor fundamental dado que reacções negativas podem conduzir à inviabilização do projecto. A oposição do público à implementação do aterro pode ser devida, tal como refere Stone et al. (1977), a vários motivos entre os quais preocupações ambientais, razões políticas, oposição por parte dos proprietários face à desvalorização futura dos terrenos adjacentes.

O principal obstáculo à aceitação pública de aterros controlados é a deficiente formação e informação das populações. Nesta perspectiva o projecto do aterro controlado deve ser acompanhado de medidas que procurem esclarecer e informar correctamente as populações. Os órgãos de comunicação social podem e devem ser usados para combater as preocupações de elevado número de cidadãos. Outras medidas que devem ser tomadas visam a regulamentação de parâmetros relativos ao tráfego (velocidade, carga, ruído, cheiro) fixando limites que não devem ser ultrapassados.

6.2.4. Métodos gerais de avaliação do impacte ambiental

A avaliação do impacte ambiental provocado por qualquer actividade obriga ao cumprimento de uma série de etapas que passam pela identificação dos impactes, a previsão e avaliação dos mesmos e, por fim, a elaboração de um relatório no qual constem as conclusões obtidas.

A previsão das alterações provocadas pela execução de qualquer projecto tem associada uma dose de incerteza. Com efeito, de um ponto de vista ambiental, carece-se de informação detalhada sobre alguns dos componentes importantes do projecto, para além de as suas características poderem ser modificadas com o decorrer da obra. A resposta dos ecossistemas a um estímulo é também, pouco previsível, dado que existem mecanismos homeostáticos e respostas não lineares que tornam difícil modelar quantitativamente e por vezes mesmo qualitativamente o seu comportamento (MOPT, 1992).

Por tudo isto, estimar o impacte ambiental é uma tarefa difícil e que não deixa de ser imprecisa pois embora alguns dos impactes sejam claros e previsíveis, existem efeitos secundários cuja estimativa não é simples.

Existem diversas metodologias para identificação dos impactes ambientais que vão desde as mais simples, onde não se pretende avaliar numericamente o impacte global produzido (apenas se enumeram os principais impactes), a outras mais complexas que recorrem a processos de ponderação para obter uma visão global da magnitude do impacte.

Descrevem-se sumariamente cinco métodos geralmente usados na avaliação do impacte ambiental (MOPT, 1992; Andreottola et al., 1987). Estes métodos procuram mostrar os prós e os contra do projecto e em que medida a sua realização é prejudicial ou benéfica para a comunidade.

6.2.4.1. Sobreposição de mapas

Este método consiste em sobrepor, sobre um mapa da área em estudo, transparências coloridas a que correspondam diferentes graus de Impacte que os determinados factores provocam. Apresenta como vantagem o facto de permitir a representação espacial dos impactes.

6.2.4.2. Listas de questões e de controle

Trata-se de extensas listas nas quais se procura identificar acções do projecto que potencialmente provocam alterações nos factores do meio ambiente.

As listas de questões e de controlo por muito completas que sejam, contêm sempre lacunas não considerando possíveis impactes que podem ser importantes. Trata-se, porém, de um método bastante simples e, por isso, recomendável para estudos preliminares.

6.2.4.3. Redes de interacção

Com este método pretende-se, através da identificação das relações entre as acções do projecto e os factores do meio ambiente alterados, relacionar as causas dos impactes com as suas consequências.

É uma técnica útil dado que evidencia a interacção entre os diferentes componentes. Não é, contudo, recomendável para grandes projectos pois estes podem tornar-se excessivamente complexos e de difícil visualização.

6.2.4.4. Matrizes

As matrizes de causa-efeito constituem uma forma bidimensional de avaliar o impacto ambiental produzido por um projecto. Consistem numa tabela de dupla entrada na qual um dos eixos é relativo às acções do projecto que podem causar alterações no meio ambiente, e o outro é referente aos factores ambientais potencialmente alteráveis pelas referidas acções do projecto.

A avaliação dos impactes (Leopold, 1971, referido em MOPT, 1992) contempla: (1) a identificação das acções do projecto intervenientes e os componentes do meio físico por elas afectado; (2) a estimativa subjectiva da magnitude do impacto materializada numa escala de 1 a 10, em que o impacto positivo é assinalado com o sinal "+" enquanto o negativo o é com o "-". A magnitude do impacto reflecte a sua extensão (Gómez Orea, 1988, citado em MOPT, 1992); (3) a avaliação subjectiva da importância, entendendo-se esta como a intensidade do impacto, igualmente avaliada numa escala de 1 a 10.

Quando uma determinada acção produz uma alteração num factor do meio ambiente, assinala-se no ponto de intersecção entre a linha e a coluna da matriz, procedendo-se então a uma análise pormenorizado do impacto. A matriz apresenta, assim, uma perspectiva geral de todas as interacções.

Este método tem o inconveniente de generalizar demasiado, pelo que, por vezes, não permite individualizar com o pormenor suficiente a problemática da actividade que interessa em determinado ambiente. Originalmente não reflecte a sequência cronológica dos impactes mas este facto pode ser contornado construindo uma série de matrizes ordenados no tempo.

6.2.4.5. Técnicas específicas

As técnicas específicas compreendem actividades como a extrapolação de impactes por comparação com outras actividades similares, ou a análise do projecto por um conjunto de peritos que procuram avaliar as consequências que advêm da sua realização.

Qualquer dos métodos anteriormente descritos pode ser utilizado para avaliar o impacte ambiental produzido pelos aterros controlados. Saliente-se, que à partida é difícil saber qual o método mais indicado devendo, como tal, cada situação ser analisada pormenorizadamente.

Na avaliação do impacte ambiental associado ao projecto de um aterro controlado devem ser considerados, entre outros, os seguintes aspectos (Crawford e Smith, 1985):

- (1) análise da necessidade de executar um aterro controlado;
- (2) pormenores das acções propostas;
- (3) efeitos que a sua construção provocará na paisagem e ecologia da região;
- (4) efeitos que a operação do aterro terá na área adjacente (poeiras, animais e insectos indesejados, cheiros, etc.);
- (5) poluição das água subterrâneas e superficiais e do terreno adjacente;
- (6) utilização a dar ao local após o encerramento do aterro;
- (7) comparação de custos entre locais e métodos alternativos ao local e ao método escolhido.

6.3. IMPACTES AMBIENTAIS GERADOS PELOS ATERROS CONTROLADOS

A execução de um aterro controlado altera obviamente as condições do meio e portanto, gera impactes ambientais. Os mais graves problemas ambientais relacionados com os aterros controlados, prendem-se com a formação e migração de gases e lixiviados, resultantes das transformações que os resíduos sofrem após confinamento. Outros aspectos também preocupantes são a formação de odores desagradáveis, tráfego excessivo, poeiras, possíveis focos de incêndio e a proliferação de insectos e roedores, etc.

Importa, porém, referir que é sempre mais vantajoso a prevenção dos impactes negativos do que a aplicação de medidas correctivas. Efectivamente, estas, para além de pressuporem sempre custos adicionais, na maioria dos casos resolvem apenas problemas parciais. A eficácia das medidas correctivas depende do modo como são aplicadas, devendo processar-se simultaneamente ou imediatamente após a conclusão da obra. As medidas correctivas visam a redução do impacte limitando a

intensidade da acção que o provoca e a alteração da condição de impacte, ou seja, actuam de modo a que os processos de regeneração natural diminuam a duração dos efeitos e compensem os danos provocados, desde que o impacte seja recuperável.

Os impactes ambientais produzidos pelos aterros controlados e as formas de os minimizar são analisados de seguida.

6.3.1. Gás

Um aterro controlado pode ser comparado a um reactor bioquímico no qual os resíduos sólidos e a água constituem as entradas e o gás e os lixiviados as saídas. A produção de gás num aterro biologicamente activo pode dar origem a vários problemas caso este não seja devidamente controlado. Com efeito, o gás pode concentrar-se em bolsas no interior do aterro ou migrar lateralmente para zonas residenciais próximas e provocar acidentes por explosão (HMIP, 1989).

O gás produzido é libertado para a atmosfera onde pode ser queimado, sob condições controladas ou aproveitado para produção de energia.

6.3.1.1. Formação e composição do gás

O gás formado no aterro controlado é constituído por componentes principais e por componentes traço. Entre os gases maioritariamente presentes contam-se o metano, o dióxido de carbono, o monóxido de carbono, o hidrogénio, a amónia, o azoto e oxigénio (quadro 6.1), enquanto os componentes traço são essencialmente constituídos por ácidos orgânicos voláteis, tendo já sido identificados mais de uma centena.

Quadro 6.1

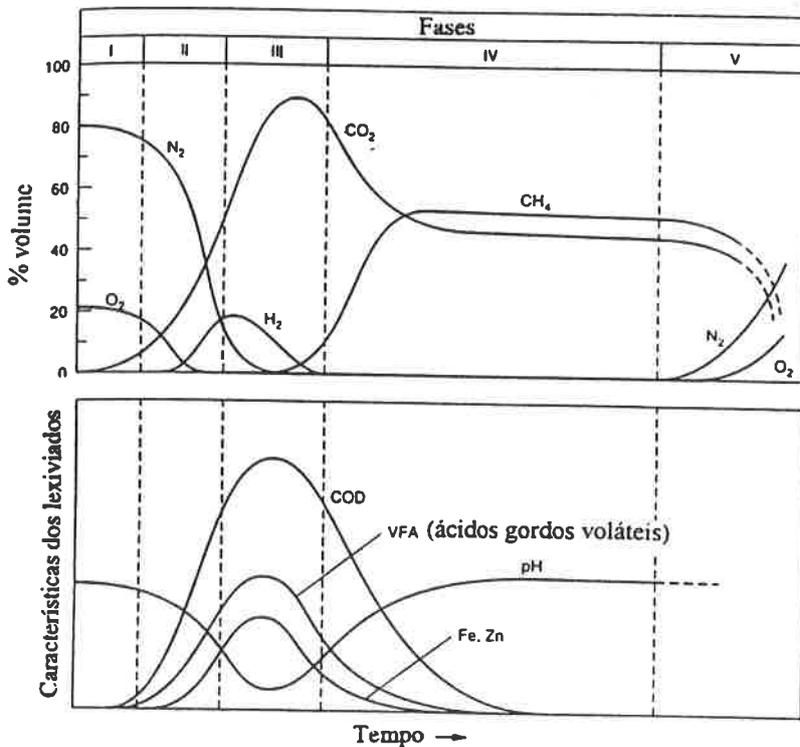
Composições típicas do gás do aterro (% em volume)

Componente	Valores típicos (HMIP, 1989)	Valores típicos (Tchobanoglous et al., 1993)
Metano	63,8	45 - 60
Dióxido de carbono	33,6	40 - 60
Azoto	2,4	2 - 5
Oxigénio	0,16	0,1 - 1,0
Hidrogénio	0,05	0 - 0,2
Monóxido de carbono	0,001	0 - 0,2
Amónia	-	0,1 - 1,0
Ácido sulfídrico	0,00002	0 - 1,0
Alcóis	0,00001	-
Compostos traço	0,00005	0,01 - 0,6

O esquema de produção de gás num aterro controlado foi pela primeira vez descrito pelos investigadores Farquar e Rovers (1973). Demonstraram, então, que a formação do passa por cinco fases distintas, tal como se pode observar na figura 6.1. Na figura, ilustra-se também, as alterações sofridas pelos lixiviados ao longo do tempo e à qual se fará referência posteriormente.

Figura 6.1

Fases da produção de gás e lixiviados (Farquar e Rovers, 1973 modificado por Rees et al., 1980; extraído de Tchobanoglous et al., 1993)



De um modo geral, as diferentes fases da produção de gás caracterizam-se por (referido por Rushbrook, 1991):

fase I ou ajustamento inicial – nesta fase os componentes orgânicos biodegradáveis presentes nos resíduos são aeróbicamente decompostos pelos microrganismos dependentes do oxigénio;

fase II ou transição – o oxigénio que resta da fase anterior é consumido pelos microrganismos e, dado que não é repostado devido à presença de solos de cobertura, desenvolvem-se condições anaérobicas, às quais está associado o aparecimento de um ambiente redutor. Este provoca a redução de iões como o nitrato ou o sulfato, originando o azoto e ácido sulfídrico. O surgimento do ambiente redutor pode ser detectado através da medição do potencial de oxidação-redução dos resíduos. Refira-se, a título de exemplo, que redução dos iões nitrato e sulfatos processa-se para valores da ordem dos -50 a -100 mV, enquanto a produção de metano surge apenas quando este potencial atinge os -150 a 300 mV. O valor do potencial de oxidação-redução continua a descer e os microrganismos, responsáveis pela conversão da matéria orgânica em metano e dióxido de carbono, transformam-na em ácidos orgânicos complexos e outros produtos intermédios;

fase III ou ácida – a actividade dos microrganismos anteriormente iniciada é agora acelerada provocando um aumento na produção de ácidos orgânicos voláteis e um decréscimo na produção de hidrogénio. À formação de ácidos está associada por um lado a hidrólise de moléculas orgânicas complexas (lípidos, polisacarídeos, proteínas e ácidos nucleicos) e por outro à acidogénese, isto é, à transformação dos produtos formados em ácido acético, pequenas quantidades de ácidos flúvicos e outros; O principal gás formado nesta fase é o dióxido de carbono ainda que sejam encontradas pequenas quantidades de hidrogénio. Os microrganismos são não-metanogénicos aos quais se chama vulgarmente produtores de ácido;

fase IV ou fermentação de metano – nesta fase um outro grupo de microrganismos, presentes no aterro, transforma o ácido acético e hidrogénio em metano e dióxido de carbono. Estes microrganismos são estritamente anaérobicos e são geralmente conhecidos na literatura como produtores de metano. Pensa-se que esta fase representa o período mais estável da decomposição dos resíduos e atribui-se-lhe um tempo de duração de 15 a 20 anos (em climas temperados);

fase V ou maturação – a produção de gás diminui nesta fase pois a maioria dos nutrientes já foram removidos pelos lixiviados e os materiais orgânicos que permanecem no aterro são lentamente biodegradados. Os principais gases envolvidos nesta fase continuam a ser o metano e o dióxido de carbono e, dependendo das condições existentes no aterro, podem ser encontradas pequenas quantidades de azoto e oxigénio.

O tempo necessário ao desenrolar destas fases depende da distribuição dos componentes orgânicos no aterro, teor em água dos resíduos, tipo e quantidade de resíduos depositados, pH, temperatura e grau de compactação.

6.3.1.2. Migração do gás

Uma vez formado, o gás tende a migrar no aterro deslocando-se lateralmente de acordo com diferenças de pressão. No interior do aterro controlado a pressão do gás é maior devido fundamentalmente a dois factores. O primeiro relaciona-se com o grau de compactação a que os resíduos foram sujeitos e o segundo deve-se à existência de solos de cobertura, de baixa permeabilidade, que impedem a livre circulação do gás (Campbell, 1987).

Em climas secos o gás pode, ainda, escapar através de fendas formadas nas camadas de cobertura em resultado da retracção dos solos argilosos.

O gás migra sempre através do caminho que oferecer a menor resistência à sua passagem, podendo deslocar-se no interior do próprio aterro ou para o exterior. Esta segunda hipótese é condicionada pelas características geológicas dos terrenos adjacentes e da intervenção humana.

Os processos naturais relacionam-se com rochas permeáveis, falhas, fracturas, planos de estratificação e cavidades, como as existentes em zonas calcárias e que constituem caminhos preferenciais de migração gasosa (figura 6.2). Por sua vez, a acção do Homem influencia com a construção de obras, como condutas para água, electricidade, telefone, TV por cabo, etc. (HIMP, 1989).

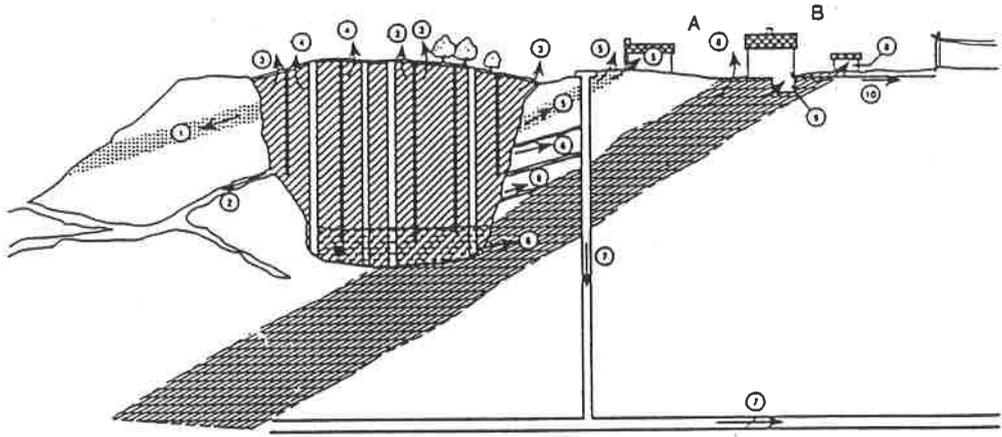
O metano presente no gás do aterro torna-o combustível, explosivo, e se presente em elevadas concentrações, asfixiante. O dióxido de carbono pode igualmente ser nocivo para a saúde se a sua concentração for superior a 0,5% em volume (Attewell, 1992). A figura 6.3 mostra quais as percentagens que tornam estes gases explosivos no ar.

O gás pode, ainda, ser responsável pela morte da vegetação adjacente ao aterro pois priva as suas raízes de oxigénio (Campbell, 1987).

Os odores nauseabundos associados ao gás produzido no aterro controlado resultam da presença de compostos traço, tais como o ácido sulfídrico ou compostos orgânicos voláteis, uma vez que os principais componentes (CH_4 e o CO_2) são ambos gases inodoros.

Figura 6.2

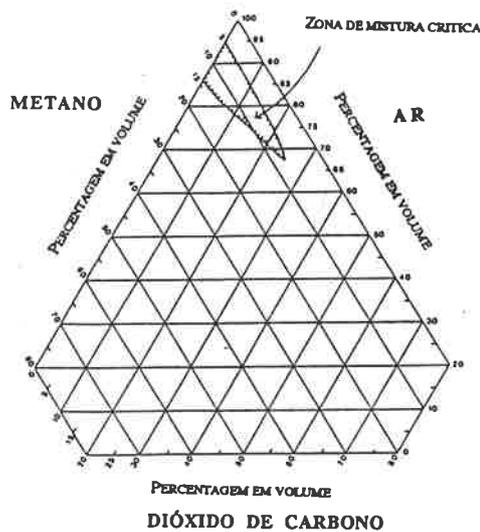
Potenciais caminhos de migração do gás num aterro encerrado



(1) migração descendente através de camadas geológicas de elevada permeabilidade; (2) migração através de cavidades; (3) migração através de fendas formadas na camada superficial; (4) migração através de caminhos verticais formados em consequência da instalação de poços; (5) migração ascendente através de estratos de elevada permeabilidade para a atmosfera ou para a casa A; (6) migração através de fendas causadas por explosivos; (7) migração ao longo de condutas feitas pelo homem; (8) migração através de camadas geológicas extremamente fraturadas atingindo a casa B; (9) e (10) migração através das fundações (HMIP, 1989).

Figura 6.3

Limites de explosividade do metano quando em mistura com dióxido de carbono e o ar (Willumsen, 1991)



6.3.1.3. Controlo da movimentação gasosa

Os sistemas de controlo visam impedir o movimento indesejado do gás e podem classificar-se genericamente em activos e passivos. No controlo passivo o gás é naturalmente conduzido para a atmosfera, enquanto que no controlo activo o gás é extraído do aterro através de um sistema de bombagem por vácuo (HMIP, 1989; Attewell, 1992; Tchobanoglous et al., 1993, Campbell, 1987, entre outros).

Cada aterro poderá possuir um sistema de controlo específico cujas características dependem da natureza geológica dos terrenos adjacentes e da técnica construtiva utilizada (HMIP, 1989).

a) Controlo passivo

Ventilação do gás Instalam-se ventiladores no aterro a partir da camada de cobertura final, aos quais o gás aflui, provocando a diminuição da pressão existente no interior do aterro e consequentemente inibindo a sua migração lateral (figura 6.4). Se a concentração de metano for elevada instalam-se vários ventiladores ligados de modo a conduzir o gás para um ponto de recolha na superfície, onde é queimado (Antunes Pereira et al., 1989). O queimador pode ser iniciado à mão ou conter uma chama piloto (figura 6.5). A supressão de odores desagradáveis pode ser simplesmente efectuada através da queima do gás.

Figura 6.4

Ventiladores típicos usados na superfície do aterro controlado: (a) para aterros cuja camada de cobertura não contém geossintéticos; (b) para aterros cuja camada de cobertura contém geossintéticos (Tchobanoglous et al., 1993)

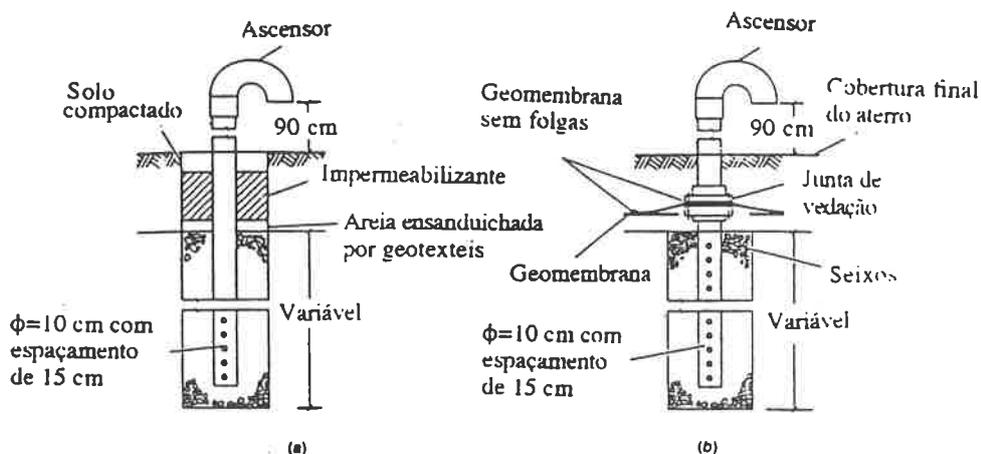
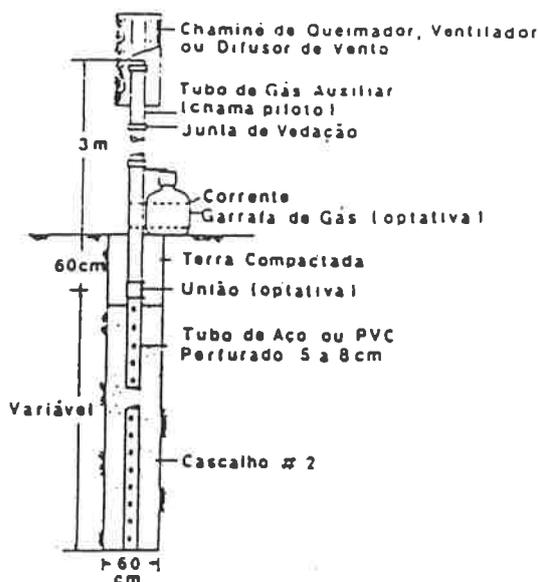


Figura 6.5

Poço típico com queimador de gás usado no aterro controlado
(modificado por EPA, citado por Pavoni et al., 1975)



Trincheiras porosas – São trincheiras, localizadas ao longo do perímetro do aterro, no interior das quais são colocados tubos perfurados para onde o gás naturalmente se desloca (figura 6.6a). Estes tubos são cobertos por seixos e estão ligados a ascensores verticais que conduzem o gás para a atmosfera (HMIP, 1989).

Este é um método que envolve baixos custos de construção, manutenção e operação sendo recomendável para aterros pouco profundos. Devem, porém, ser tomadas medidas preventivas que impeçam a colmatação dos vazios ao longo do tempo, o que a acontecer iria tornar as trincheiras inoperativas (Campbell, 1987).

Barreiras Impermeáveis – Neste método a migração do gás é impedida através da construção de barreiras preenchidas por materiais impermeáveis (HMIP, 1989; Campbell, 1987), sendo a condução do gás para a atmosfera feita através de ascensores instalados adjacente à barreira (figura 6.6b).

Sistemas de impermeabilização – Em aterros pouco profundos a migração do gás pode ser impedida através da instalação de sistemas impermeabilizantes (figura 6.6c). Esta técnica deve ser aplicada em conjunto com outros métodos e não como solução única. É igualmente utilizada no controlo dos lixiviados e será descrita na secção 6.3.2.6.

b) *Controle Activo*

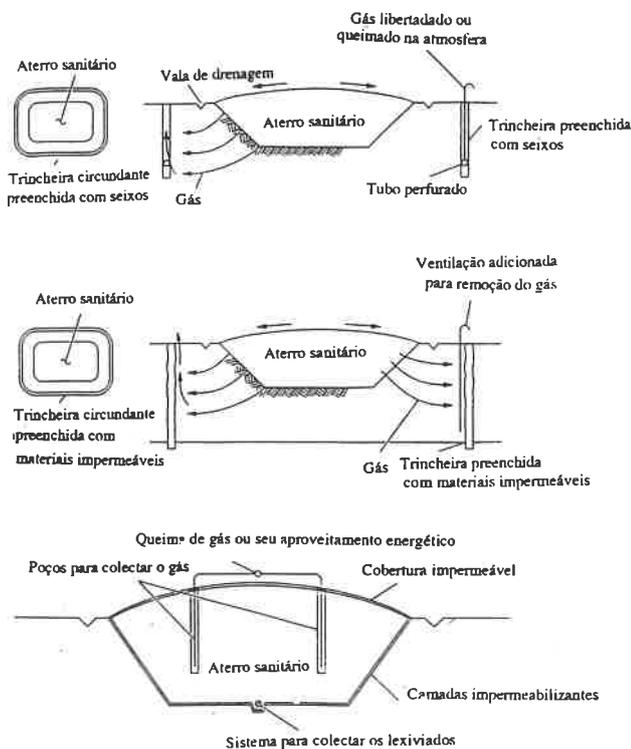
À semelhança do controlo passivo a migração do gás é impedida através da instalação de poços e trincheiras, colocados ao longo do perímetro do aterro mas a partir das quais o gás é extraído por um sistema de vácuo. A ideia base consiste em criar no interior do aterro uma pressão de sucção por forma a provocar o movimento do gás em direcção aos poços ou barreiras de extracção (Tchobanoglous et al., 1993).

Após extracção o gás é alternativamente queimado, afim de controlar as emissões de metano e compostos orgânicos voláteis ou usado para produção de energia. O valor energético do gás do aterro é geralmente cerca de 16 000 a 20 000 KJ/m³, ou seja, cerca de metade do valor energético do gás natural. Tal facto resulta de o gás do aterro ser apenas constituído por cerca de 55% de metano (Crawford e Smith, 1985).

De acordo com a proposta de directiva COM (91) o aproveitamento do gás torna-se obrigatório em aterros com actividade biológica que recebem ou tenham recebido mais de 10 000 toneladas métricas de resíduos por ano.

Figura 6.6

Métodos de controlo passivo do gás: (a) trincheiras porosas; (b) barreiras impermeáveis; (c) sistemas impermeabilizantes (Tchobanoglous et al., 1993)



Poços de extracção – Os poços de extracção de gás são usados em aterros que atingem profundidades mínimas de 8 metros (HMIP, 1989), nos quais a distância entre os limites físicos do aterro e a frente de operação é pequena. Consistem numa série de poços verticais (figura 6.7a) ligados a um tubo colector principal, que se encontra também ligado a um sistema de vácuo. Este gera uma pressão de sucção (pressão negativa) que é transmitida aos poços, obrigando o gás a deslocar-se na sua direcção (Tchobanoglous et al., 1993).

O gás extraído é geralmente conduzido à estação de ventilação e é queimado, em condições controladas. Pode também, e tal como foi já referido, ser utilizado para conversão em energia. A figura 6.8 mostra um diagrama de instalação de uma central de extracção de metano num aterro mostrando também um poço típico para a extracção do gás.

Dependendo da profundidade do aterro e das condições locais o espaçamento entre poços varia entre 8 a 15 metros, ainda que, se possam utilizar espaçamentos maiores desde que o raio de influencia entre poços adjacentes se sobreponham a fim de garantir a eficiência do sistema (Tchobanoglous et al., 1993).

Trincheiras de extracção – Instalam-se nas formações geológicas adjacente ao aterro e são geralmente utilizadas para aterros pouco profundos, geralmente menores 8 metros (HMIP, 1989). No seu interior são colocados tubos perfurados que se encontram ligados, quer a um tubo colector principal quer ao sistema de vácuo (figura 6.7b). A pressão de sucção é transmitida às trincheiras provocando um fluxo de gás na sua direcção. O gás é depois conduzido para a superfície e é queimado, sob condições controladas.

Uma técnica recentemente desenvolvida nos Estados Unidos da América contempla a utilização de trincheiras horizontais usadas simultaneamente com os poços verticais anteriormente descritos (ver figura 6.5). As trincheiras horizontais, ao contrário do que acontece com os poços verticais, são colocadas no aterro durante a fase de operação do aterro sendo escavadas sobre os resíduos após a construção de dois ou mais níveis estar já concluída (Tchobanoglous et al., 1993).

6.3.1.4. Monitorização do gás

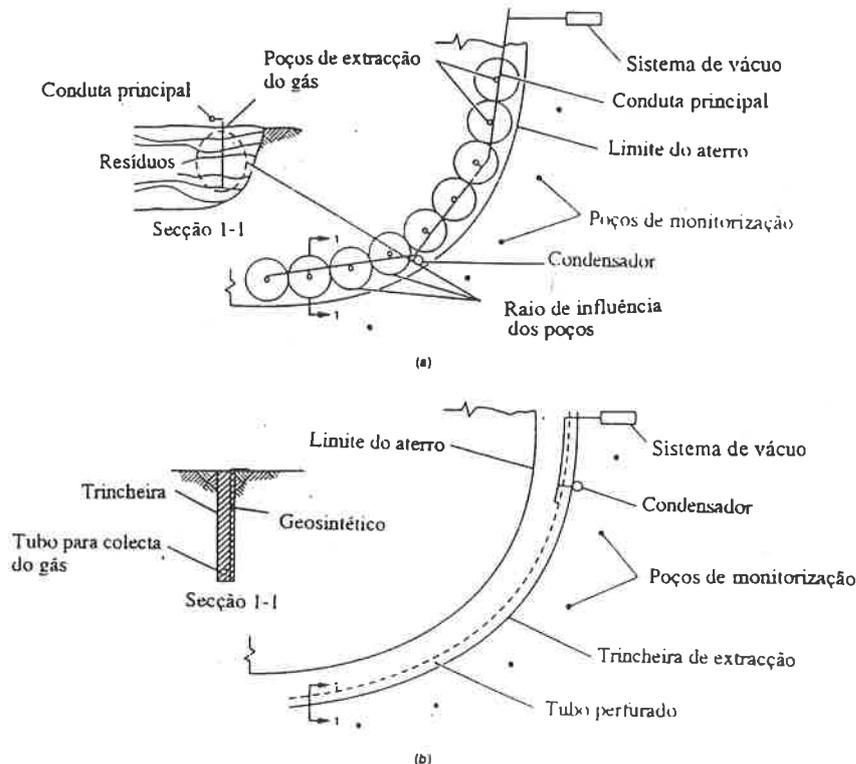
O gás produzido nos aterros controlados, pelos problemas ambientais que pode levantar, exige uma cuidada monitorização que permita uma rápida actuação em caso de perigo. A presença de gás pode ser detectada através de termografia, fotografia de infravermelhos ou mais vulgarmente através da recolha e análise de amostras de ar realizada em poços instrumentados (Attewell, 1992). Os poços devem instalar-se quer no interior do aterro quer na área adjacente, de modo a assegurar uma eficiente monitorização do gás. O número de poços instrumentados depende das condições geológicas do terreno adjacente (natureza do terreno, permeabilidade, fracturação, etc).

Relativamente à frequência de observação esta deve ser tanto maior quanto mais próximo de zonas residenciais se situar o aterro controlado.

Existe a tendência para utilizar os poços simultaneamente para monitorização de gás e de lixiviados, contudo, esta prática reveste-se de especiais cuidados tendo obrigatoriamente de se garantir a compatibilidade entre os equipamentos usados (HMIP, 1989).

Figura 6.7

Métodos de controlo activo do gás: (a) poços de extracção; (b) trincheiras de extracção (Tchobanoglous et al., 1993)



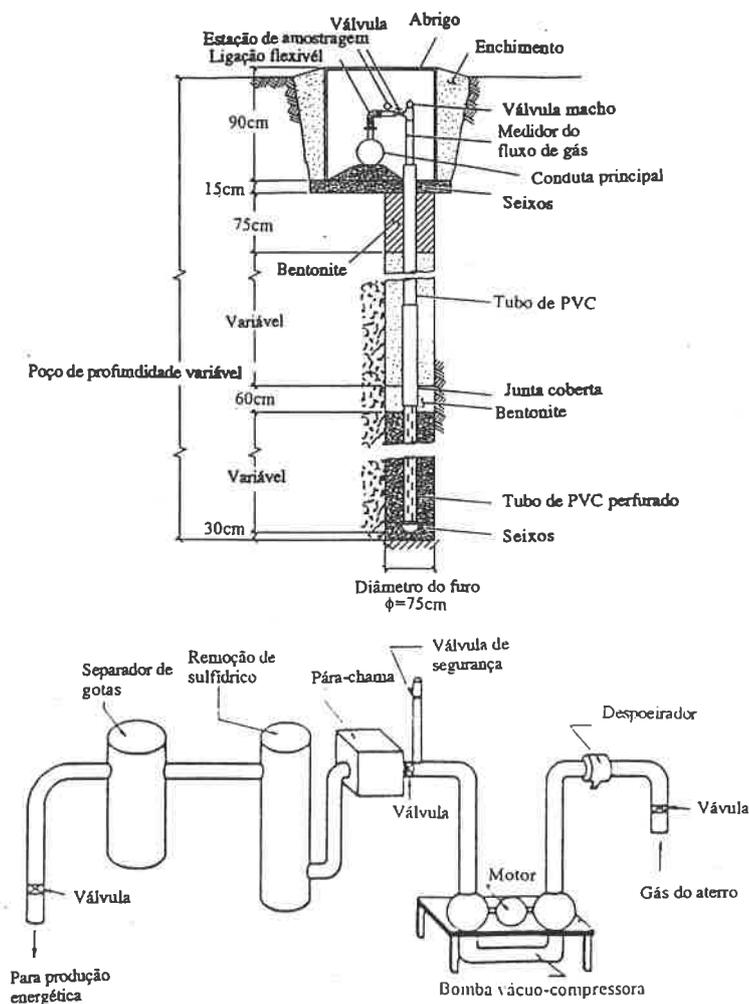
6.3.2. Lixiviados

Os lixiviados são líquidos poluentes que se formam no interior do aterro em consequência quer da infiltração das águas da chuva quer da degradação física e bioquímica dos resíduos depositados. Os potenciais problemas associados aos lixiviados relacionam-se com a sua migração, a qual pode provocar a contaminação das reservas de água e dos solos.

Figura 6.8

Diagrama de uma instalação de extracção do gás:

(a) poço típico para extracção de gás; (b) instalação completa
(adaptado de Courtesy of California Integrated Waste Management Board, citado por Tchobanoglous et al., 1993, e de Antunes Pereira et al., 1989)



6.3.2.1. Medição da poluição

A fim de avaliar a natureza poluente dos lixiviados procede-se à análise das suas características físicas, químicas (orgânicas e inorgânicas) e a toxicidade, tal como a seguir se descreve (Crawford e Smith, 1985).

A determinação da poluição de origem física relaciona-se com a quantidade de sólidos dissolvidos, em suspensão, temperatura, cor, etc. e a sua determinação efectua-se directamente.

A poluição de origem química de carácter inorgânico relaciona-se com a quantidade de químicos inorgânicos presentes nos lixiviados e a sua determinação é igualmente feita através de medições directas. Já a poluição química de carácter orgânico é mais difícil sendo efectuada com base na "carência de oxigénio" dos lixiviados.

As técnicas usadas na medição da carência de oxigénio podem ser de natureza bioquímica, química e instrumental. Nas técnicas bioquímicas realizam-se testes para medir a perda de oxigénio devida à actividade das bactérias responsáveis pela oxidação da matéria orgânica. O teste mais conhecido é o BOD sendo geralmente adoptado como método padrão na medição da carência bioquímica de oxigénio. Realiza-se numa amostra de lixiviado (ou uma diluição desta) colocada numa incubadora a 20°C durante 5 dias (BOD₅), ao longo dos quais se vai medindo a perda de oxigénio dissolvido. O resultado deste teste traduz a quantidade de oxigénio, em mg, necessário para oxidar a matéria orgânica presente em 1 litro de amostra.

As técnicas químicas recorrem à utilização de agentes químicos para proceder à oxidação da matéria orgânica, sendo a carência de oxigénio igual à diferença entre a concentração inicial e final dos agentes oxidantes. O método mais comum (COD) consiste na adição à amostra, de uma mistura constituída por ácido sulfúrico concentrado + dicromato de potássio + sulfato de prata, que é depois fervida durante 2 horas. Adiciona-se ainda sulfato de mercúrio com o objectivo de impedir a precipitação da prata.

Os valores de COD são normalmente superiores aos de BOD, pois é mais fácil promover a oxidação através de agentes químicos do que oxidar o material biodegradável. Uma relação baixa nos lixiviados de (BOD/COD), isto é, de 0,1 pode significar a presença de materiais orgânicos dificilmente biodegradáveis ou a existência de materiais tóxicos que inibem o resultado do BOD.

As técnicas instrumentais medem a quantidade de gás resultante da oxidação térmica do material orgânico. A medição de carbono orgânico total (TOC) é o método mais divulgado e consiste em injectar uma amostra líquida num fluxo de ar que provoca a vaporização da água e a conversão da matéria orgânica oxidada em dióxido de carbono. A concentração deste é medida através de um dispositivo de infravermelhos.

A poluição causada pelos compostos tóxicos é geralmente expressa pela concentração necessária para matar 50% dos organismos presentes numa amostra por um período de 48 a 96 horas. Estes valor é conhecido como 50% da dose letal (LD_{50}) ou limite médio de tolerância (TL_m). O resultado do testes depende, porém, do tipo de organismos usados (normalmente diferentes espécies de peixes), do pH dos lixiviados e da temperatura.

6.3.2.2. Composição dos Lixiviados

Os principais componentes presentes nos lixiviados agrupam-se em quatro categorias (Christensen et al., 1987):

- (1) catiões e aniões inorgânicos cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}), sódio (Na^+), potássio (K^+), amoníaco (NH_4^+), ferro (Fe^{2+}), manganês (Mn^{2+}), carbonatos (CO_3^{2-}), sulfatos (SO_4^{2-}), cloreto (Cl^-) e hidrogeno-carbonatos (HCO_3^-);
- (2) metais pesados – cadmio (Cd), zinco (Zn), chumbo (Pb), níquel (Ni), e cobalto (Co);
- (3) matéria orgânica expressa em carência química de oxigénio (COD), carência bioquímica de oxigénio (BOD), carbono orgânico total (TOC) e ácidos gordos;

- (4) complexos orgânicos específicos, presentes em reduzidas concentrações, tais como hidrocarbonetos aromáticos e fenois.

A composição dos lixiviados é, todavia, complexa dependendo do tipo e idade dos resíduos depositados, hidrogeologia da região, clima e do teor em água. No quadro 6.2 mostra-se os valores típicos dos diferentes componentes dos lixiviados.

Foi já ilustrado na figura 6.1 o paralelismo entre as alterações sofridas ao longo do tempo pela composição do gás e dos lixiviados (veja-se item 6.3.1.1). De um modo geral, a evolução da composição dos lixiviados procede-se como a seguir se descreve (Tchobanoglous et al., 1993).

Na fase inicial o pH dos lixiviados permanece constante, sendo seguida de uma redução devido à presença de elevadas concentrações de ácidos orgânicos e dióxido de carbono. A esta diminuição do pH está associado um aumento da BOD₅ e COD em resultado da dissolução dos ácidos orgânicos dos lixiviados. Valores de pH baixos provocam a solubilização de diversos compostos inorgânicos, em especial dos metais pesados.

Quadro 6.2

Valores típicos dos diferentes componentes dos lixiviados, em mg/l
(EPA, 1975 adaptado por Yong et al., 1992)

Constituinte	EPA, 1973	Steiner et al., 1971	Genetelli e Cirello, 1976	Ham, 1975
BOD ₅	9 - 54610	-	7500-10000	-
COD	0 - 89520	100 - 51000	16000 - 22000	500 - 1000
TDS	0 - 42276	-	10000 - 14000	-
TSS	6 - 2685	-	100 - 700	-
Total de N	0 - 1416	20 - 500	-	-
pH	3,7 - 8,5	4,0 - 8,5	5,2 - 6,4	6,3 - 7,0
Alcalinidade (CaCO ₃)	0 - 20850	-	800 - 4000	630 - 1730
Dureza (CaCO ₃)	0 - 20800	200 - 5250	3500 - 5000	390 - 800
Cd	-	-	0,4	-
Ca	5 - 4080	-	900 - 1700	111 - 245
Cloretos	34 - 2800	100 - 24000	600 - 800	100 - 400
Cu	0 - 9,9	-	0,5	< 0,04 - 0,11
Fe	0,2 - 5500	200 - 1700	210 - 325	20 - 60
Pb	0 - 5,0	-	1,6	-
Mg	16,5 - 15600	-	160 - 250	22 - 62
Mn	0,6 - 1400	-	75 - 125	1,02 - 1,25
P	0 - 154	5 - 130	-	21 - 46
K	2,8 - 3770	-	295 - 310	107 - 242
Na	0 - 7700	100 - 3800	450 - 500	106 - 357
SO ₄	1 - 1826	25 - 500	400 - 650	13 - 84
Zn	0 - 1000	1 - 135	10 - 30	< 0,04 - 0,47

No entanto, com o decorrer do tempo enquanto os valores da BOD₅ e COD começam a diminuir e o pH aumenta, provocando a lavagem dos constituintes inorgânicos. Em solução ficam apenas alguns metais pesados.

Na fase final da evolução do aterro controlado os lixiviados são caracterizados pela predominância de ácidos flúvicos e húmicos.

6.3.2.3. Migração dos lixiviados

A migração de lixiviados para o exterior do aterro é responsável pela contaminação das águas superficiais e subterrâneas e é um risco presente, inclusive nos aterros controlados correctamente construídos.

Os mecanismos responsáveis pela migração dos lixiviados para o exterior do aterro são basicamente os seguintes (Crawford e Smith, 1985):

- (1) a dissolução dos materiais solúveis, nomeadamente sais e compostos orgânicos existentes nos resíduos, à qual está associada uma lixiviação primária.
- (2) a biodegradação dos materiais orgânicos, inicialmente pouco solúveis, provoca o aparecimento de ácidos orgânicos e álcoois. Estes, por sua vez, são objecto de novas reacções de natureza bioquímica das quais resulta a formação de gases;
- (3) o aparecimento do ambiente redutor, em consequência dos processos da decomposição anaeróbica que se instalam no aterro, é responsável pela redução de diversas substâncias, entre as quais o ião férrico que passa a ferroso, que é mais solúvel e, por isso, é removido do aterro controlado;
- (4) a lavagem de finos e colóides fornece aos lixiviados os sólidos que permanecem em suspensão.

a) *Efeito da migração dos lixiviados nas águas superficiais*

A adição de lixiviados, ricos em compostos orgânicos e soluções inorgânicas de iões metálicos em reduzidos estados de oxidação, nos cursos de água provoca uma diminuição do teor em oxigénio na água e consequentemente a extinção das formas de vida dependentes do oxigénio. Este fenómeno torna-se mais grave quando os lixiviados são ricos em compostos orgânicos não biodegradáveis.

A assimilação dos compostos presentes nos lixiviados pelas cadeias alimentares afecta todas as espécies aquáticas e, consequentemente, o Homem (HMSO, 1986).

Alterações da temperatura, pH e concentração de oxigénio dissolvido no seu conjunto influenciam a intensidade com que os efeitos tóxicos são sentidos pelas espécies aquáticas.

b) *Efeito da migração dos lixiviados nas águas subterrâneas*

A poluição das águas subterrâneas pelos lixiviados torna o seu aproveitamento e consumo perigoso, face ao potencial risco para a saúde pública.

Contrariamente às águas superficiais, a contaminação das águas subterrâneas persiste por longos períodos, devido quer às diminutas quantidades de oxigénio dissolvido na água quer à reduzida taxa de dispersão que caracteriza estas águas (HMSO, 1986). Tal comportamento dificulta a sua despoluição e exige longos períodos para repor o equilíbrio perdido.

A extensão espacial da poluição é muito difícil de avaliar pois é controlada pela natureza geológica do terreno e pelo regime de fluxo subterrâneo.

6.3.2.4. Atenuação

À migração dos lixiviados através do aterro e terrenos subjacente estão associadas diversas interações de natureza física, química e biológica que atenuam o seu carácter poluente (HMSO, 1986).

Os processos físicos estão associados a absorção, adsorção, filtração, diluição e dispersão. Os fenómenos de absorção e adsorção são importantes pois os resíduos depositados no aterro podem, eles próprios, absorver os lixiviados retardando a sua migração e possibilitando a atenuação. Os processos físicos actuam lentamente e, por isso, os locais onde existe uma rápida migração dos lixiviados não permitem o desenrolar destes fenómenos. A migração dos lixiviados é, também, afectada por factores como a quantidade e solubilidade dos resíduos.

Os processos químicos relacionam-se, por sua vez, com reacções do tipo ácido-base, oxidação-redução, precipitações, trocas catiónicas e complexação de iões metálicos. A atenuação de origem química conduz a uma imobilização das espécies poluentes, sabendo-se que a solubilidade destas tende a aumentar com a diminuição do pH. Reacções de oxidação-redução podem, também, contribuir para a diminuição da mobilidade dos potenciais poluentes.

Por último, os processos biológicos, ainda não completamente explicados, desempenham um papel importante na degradação aeróbica e anaeróbica dos resíduos.

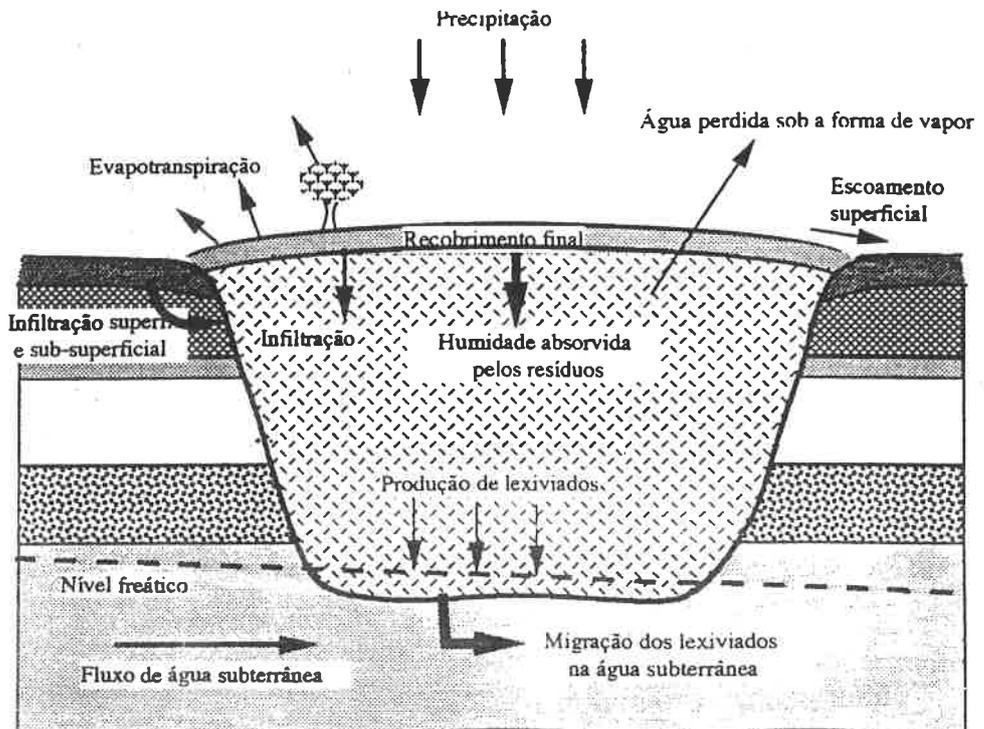
6.3.2.5 Balanço hidrológico do aterro

Verifica-se, de um modo geral, que a protecção das reservas de água está directamente relacionada com o controlo dos lixiviados o qual está, por sua vez, relacionado com o balanço hidrológico do aterro.

O balanço hidrogeológico do aterro (figura 6.9) permite estimar a quantidade de lixiviados produzidos no aterro e, com base nesse valor, dimensionar os sistemas de controlo e remoção dos mesmos.

Figura 6.9

Balanço hidrológico anual do aterro controlado (HMSO, 1986)



A estimativa da quantidade de lixiviados produzidos por ano num aterro controlado é efectuada a partir da seguinte equação:

$$L_0 = I - E - aW$$

em que:

- L_0 = lixiviados livres retidos no aterro (igual aos lixiviados produzidos menos os lixiviados que efluem do aterro), em m^3/ano ;
- I = entrada total de líquido (precipitação + resíduos líquidos + eventuais infiltrações de água superficiais), em m^3/ano ;
- E = evapotranspiração (evaporação + transpiração mínima), em m^3/ano ;
- a = capacidade absorvente dos resíduos, em m^3/ano (dos resíduos admitidos);
- W = massa de resíduos depositados, em ton/ano.

De acordo com a proposta de directiva COM (91), a eficiência dos mecanismos atenuadores na diminuição para níveis aceitáveis da potencial poluição das águas subterrâneas e terrenos subjacentes implica, teoricamente, que o aterro seja explorado de modo a que L_0 seja nulo ou menor que zero, uma vez que um valor positivo significa que existe formação de lixiviados no aterro.

(i) *Entrada total de líquido (I)*

A maior parte da água entrada no aterro provém da chuva pelo que o conhecimento do valor médio da pluviosidade da região é de extrema importância para o cálculo do balanço hidrológico.

Face às características climáticas de Portugal, com precipitações caracterizadas por grandes assimetrias sazonais, sugere-se que os cálculos referentes ao balanço hidrológico sejam efectuados sazonalmente.

(ii) *Evapotranspiração (E)*

A evapotranspiração traduz o fenómeno complexo que resulta quer da transpiração das plantas quer da evaporação do meio circundante (Lencastre e Franco, 1984).

O valor da evapotranspiração é influenciado por diversos factores tais como o vento, a temperatura, a humidade e a pressão atmosférica. A vegetação existente no aterro, especialmente a aí colocada após o seu encerramento, desempenha, também, um papel importante na medida em que conduz a um aumento da evapotranspiração e a uma diminuição da infiltração.

O valor da evapotranspiração pode ser determinado directamente através de tinas evaporimétricas, lisímetros, estudos de campo ou através de fórmulas empíricas tais como as de Penman, Thornthwaite, Kimbal, Blaney-Cridle, etc. (Crawford e Smith, 1985; Lencastre e Franco, 1984).

(iii) *Capacidade absorvente dos resíduos (a)*

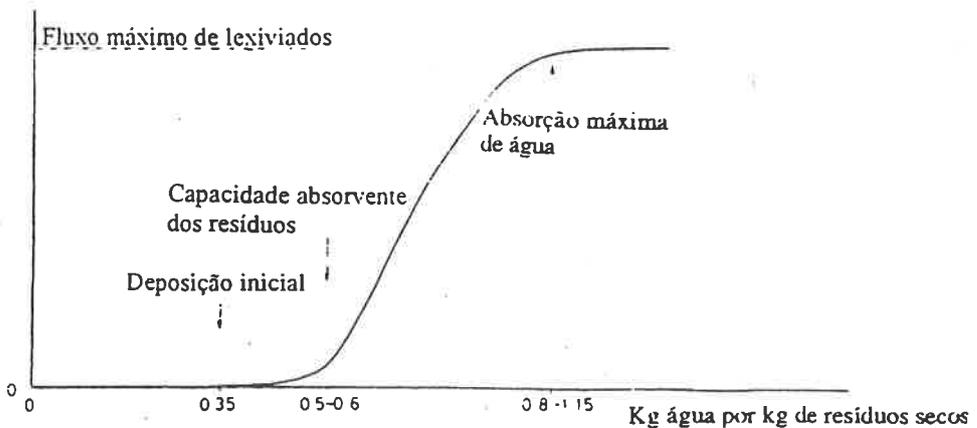
A absorção de água pelos resíduos constitui um aspecto que não pode não ser ignorado no cálculo do balanço hidrológico do aterro pois, esta, condiciona a quantidade de lixiviados produzidos.

A absorção de água pelos resíduos processa-se fundamentalmente de duas formas, ou água fica absorvida microestrutura dos resíduos por capilaridade, isto é, contrariando as forças da gravidade ou fica armazenada nos vazios existentes entre os resíduos. De um modo geral, a quantidade de água absorvida pelos resíduos depende da sua idade e seu grau de compactação, no entanto, o valor típico, para os resíduos sólidos urbanos, ronda os 0,35 kg de água por kg de resíduos secos (Crawford e Smith, 1985).

Os lixiviados começam a surgir no aterro quando a capacidade absorvente dos resíduos é excedida, o que segundo Crawford e Smith (1985) acontece para valores da ordem dos 0,5 a 0,6 kg de água por kg de resíduos secos (figura 6.10). Porém, na realidade esta situação não é verificada devido à heterogeneidade dos resíduos depositados, verificando-se sim uma percolação de água no sentido descendente antes da capacidade absorvente dos resíduos tenha sido alcançada. Tal comportamento deve-se à existência de vazios interligados que formam verdadeiros canais por onde a água migra.

Figura 6.10

Exemplo ilustrativo da produção de lixiviados em função do teor em água dos resíduos (Crawford e Smith, 1985)



Saliente-se, ainda, que de acordo com a figura 6.10 é possível adicionar cerca de 0,35kg de água a 1kg de resíduos secos sem que a produção de lixiviados se inicie. Por outro lado, a produção máxima de lixiviados ocorre quando o aterro atinge a saturação, o que acontece para valores de 0,8 a 1,15kg de água/kg de resíduos secos (Crawford e Smith, 1985).

Importa referir, também, que os sucessivos níveis de resíduos vão provocar uma compactação adicional nos resíduos sobre os quais vão sendo colocados, o que provoca uma redução na sua capacidade absorvente. Regra geral, quanto maior a compactação dos resíduos menor a sua capacidade absorvente.

(iv) *Massa de resíduos depositados (W)*

Por fim, a massa de resíduos depositados, cujo valor é indispensável para o cálculo do balanço hidrológico do aterro controlado. De um modo geral, quanto maior a quantidade de resíduos depositados durante a operação do aterro menor será a quantidade de lixiviados gerados (HMSO, 1986).

6.3.2.6. Controlo e remoção dos lixiviados

O controlo e remoção dos lixiviados visa a protecção das águas subterrâneas e terrenos subjacentes. Compreende, de um ponto de vista de projecto, os sistemas de impermeabilização da base e taludes laterais do aterro e o controlo das águas superficiais.

a) *Sistemas de impermeabilização*

Os sistemas de impermeabilização são constituídos quer pelas camadas de impermeabilização quer pelos sistemas de drenagem e colecta de lixiviados. Os sistemas de impermeabilização podem, para além de limitar ou eliminar o movimento dos lixiviados, ser igualmente úteis no controlo da movimentação gasosa, tal como foi já referido.

(i) *Camadas de impermeabilização*

As camadas de impermeabilização podem ser constituídas por materiais naturais de carácter argiloso ou por geomembranas. Ambos apresentam vantagens e inconvenientes pelo que, para cada aterro, deve ser utilizado o material que estabeleça o melhor compromisso.

Refira-se, então, que os solos argilosos apresentam propriedades plásticas que possibilitam a absorção dos assentamentos diferenciais ocorrentes no aterro

controlado, possuem capacidades de atenuação e, contrariamente às geomembranas, têm uma longevidade assegurada. Porém, são mais permeáveis do que as geomembranas, requerem a existência de elevadas quantidades de solo e o seu dimensionamento, de acordo com os critérios de permeabilidade exigidos, é mais difícil. As geomembranas apresentam, por sua vez, espessuras muito reduzidas o que as torna bastante vulneráveis ao rasgamento e punçamento (Daniel e Shackford, 1987).

(ii) *Drenagem e colecta de lixiviados*

Uma correcta impermeabilização do aterro é fundamental para assegurar o confinamento dos resíduos. Todavia, se a impermeabilização não for complementada com a instalação de um sistema de drenagem e colecta de lixiviados, torna-se ineficiente. A inexistência de um sistema de drenagem e colecta de lixiviados pode, ainda, conduzir a problemas de estabilidade que resultam por vezes catastróficos.

Os sistemas de drenagem e colecta de lixiviados são constituídos pelas camadas drenantes (formadas por solos naturais ou por geossintéticos) e pelos tubos colectores.

Descrevem-se de seguida dois dos métodos que podem ser utilizados a fim de promover a drenagem e colecta dos lixiviados (Tchobanoglous et al., 1993).

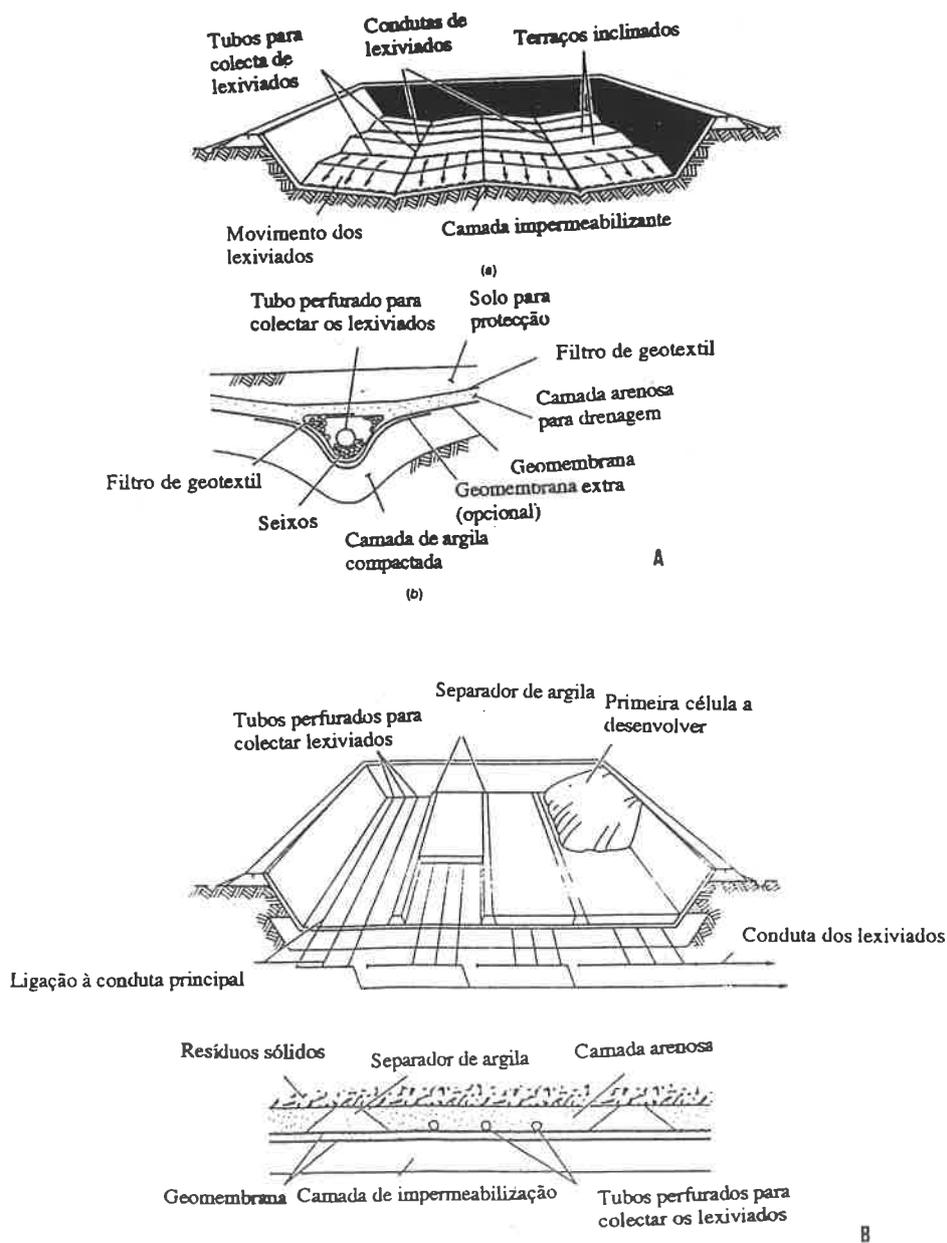
Terraços inclinados – A acumulação de lixiviados no aterro pode ser evitada construindo a sua base sob a forma de terraços inclinados como está ilustrado na figura 6.11(A). Os terraços dispõem-se de tal forma que os lixiviados afluem naturalmente a canais colectores que os conduzem a pontos centrais de onde são removidos para tratamento. Cada um destes canais possui no seu interior tubos perfurados para facilitar o escoamento dos lixiviados. O dimensionamento dos tubos efectua-se com base na quantidade de lixiviados previstos calculados a partir do balanço hidrológico do aterro (ver item 6.3.2.5).

Regra geral, os terraços são constituídos com inclinações da ordem dos 1 a 5% e os canais colectores com inclinações de 0,5 a 1 %.

Sistema de tubos colectores – Neste método, a base do aterro é dividida em faixas rectangulares separadas por barreiras argilosas tal como se pode observar na figura 6.11(B). A largura de cada faixa corresponde a uma célula. A drenagem processa-se através de tubos perfurados sobre a camada de impermeabilização de cada célula, estando inseridos numa camada de solos granulares (e.g. areia) que asseguram a sua protecção. Os lixiviados colectados são conduzidos a um tubo principal disposto perpendicularmente aos primeiros que os conduz para o exterior do aterro. A drenagem processa-se de modo mais eficiente se a base do aterro for construída com inclinações da ordem dos 1,2 a 1,8 %.

Figura 6.11

Métodos utilizados para promover a drenagem e colecta dos lixiviados: (A) terraços inclinados; (a) aspecto global, (b) pormenor do dreno; (B) tubos colectores. (Tchobanoglous et al., 1993)



Cuidados especiais devem ser tomados para garantir a operacionalidade dos sistemas de drenagem que doutra forma resultariam inúteis. Com efeito, deve sempre proceder-se à protecção das camadas drenantes através de filtros que evitem a colmatção dos vazios devido ao arrastamento de partículas finas presentes nos lixiviados (Ramke, 1987).

Os critérios de dimensionamento dos filtros e drenos estão descritos em diversos livros de Mecânica dos Solos pelo que não serão aqui apresentados.

Recentemente, tem-se verificado que a conjugação de geossintéticos com solos naturais constitui a solução mais eficaz. Desenvolveram-se, assim, os sistemas de impermeabilização mistos também chamados de geocompósitos, os quais são formados simultaneamente por geossintéticos (geomembranas, geotêxteis, geogrelhas e georredes) e por solos naturais.

Cada material presente num geocompósito possui uma função específica que no seu conjunto se complementam tornando mais eficientes as camadas de impermeabilização.

As principais funções dos quatro tipos de geosintéticos mais utilizados nos aterros controlados são (Chouery-Curtis e Butchko, 1991):

- (1) geomembranas – utilizadas para impermeabilização;
- (2) geotêxteis – essencialmente utilizados na filtragem podendo, ainda, desempenhar as funções separação ou de drenagem;
- (3) georredes – usadas para drenagem;
- (4) geogrelhas – especialmente usadas para reforço, sendo essencialmente recomendadas para os casos de aterros localizados em zonas potencialmente sujeitas a subsidência, zonas cársticas, zonas sísmicas, zonas fracturadas ou quando as fundações são compressíveis.

Contudo, a utilização de materiais sintéticos, em geral, só é eficiente se estes forem duráveis e apresentarem elevada resistência à degradação física, biológica e química, nomeadamente a proveniente dos lixiviados e gases.

Estudos conduzidos por Scheu (1991) em geomembranas fabricadas com HDPE (polietileno de elevada densidade) provaram a sua eficiência ao longo do tempo e revelaram ser quimicamente compatíveis com os lixiviados.

Especial atenção deve, ainda, ser dada ao modo de efectuar as ligações entre os diferentes geossintéticos (Attewell, 1992). Refira-se, a título de exemplo, que uma incorrecta colocação das geomembranas pode ser a responsável pelo mau funcionamento dos sistemas de impermeabilização com todas as consequências negativas daí decorrentes. Entre as técnicas geralmente utilizadas para efectuar as ligações incluem-se a ligação térmica, mecânica (cosimento, entrelaçamento no caso das georredes e geogrelhas), grameamento, sobreposição ou ligações químicas através de resinas (Ingold e Miller, 1988).

Tipos de sistemas de impermeabilização

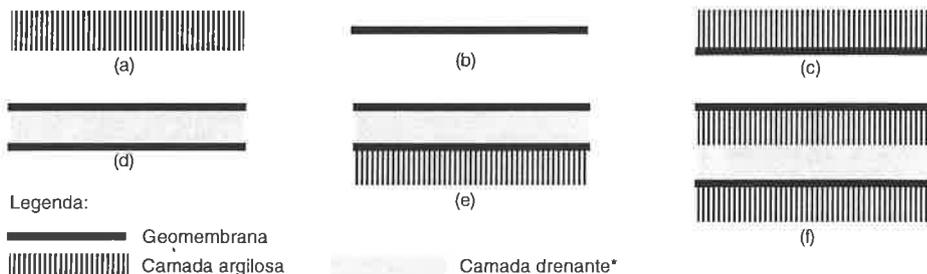
Existem diversas formas de combinar os materiais para formação de um sistema de impermeabilização. Descrevem-se seguidamente cinco sistemas de impermeabilização de entre os possíveis (Fluet, 1990 referido por Deardorff, 1991):

- (1) *sistema simples* – a impermeabilização é realizada à custa de apenas um tipo de material, argila ou geomembrana, tal como pode observar-se na figura 6.12(a) e (b). Os dispositivos de drenagem e colecta dos lixiviados (e.g. tubos perfurados) são colocado directamente sobre o material de impermeabilização;
- (2) *sistema geocompósito simples* – é constituído por uma camada de argila e uma geomembrana, figura 6.12(c). A drenagem e colecta dos lixiviados é efectuada através de dispositivos colocados acima da geomembrana;
- (3) *sistema duplo* – é formado por duas geomembranas separadas por uma camada drenante de elevada permeabilidade, figura 6.12(d),
- (4) *sistema geocompósito duplo* – este sistema é idêntico ao anterior excepto que possui uma camada adicional de argila na base, figura 6.12(e),
- (5) *duplo sistema de geocompósitos* – compreende dois geocompósitos, constituídos por uma geomembrana e uma camada de solo argiloso, separados por uma camada drenante, figura 6.12(f).

O tipo de sistema de impermeabilização a colocar no aterro depende das características geológicas e hidrogeológicas do terreno de fundação. Regra geral, quanto mais permeáveis são as formações geológicas da fundação mais complexo deve ser o sistema utilizado. Por questões de segurança, contudo, recomenda-se sempre a instalação de sistemas de impermeabilização em todos os aterros controlado inclusive nos locais de elevado confinamento geológico.

Figura 6.12

Tipos de sistemas de impermeabilização: (a) sistema simples formado por argila; (b) sistema simples formado por geomembrana; (c) sistema simples com geocompósito; (d) sistema duplo; (e) sistema geocompósito duplo; (f) duplo sistema de geocompósitos (adaptado Wallance e Akgun, 1991)

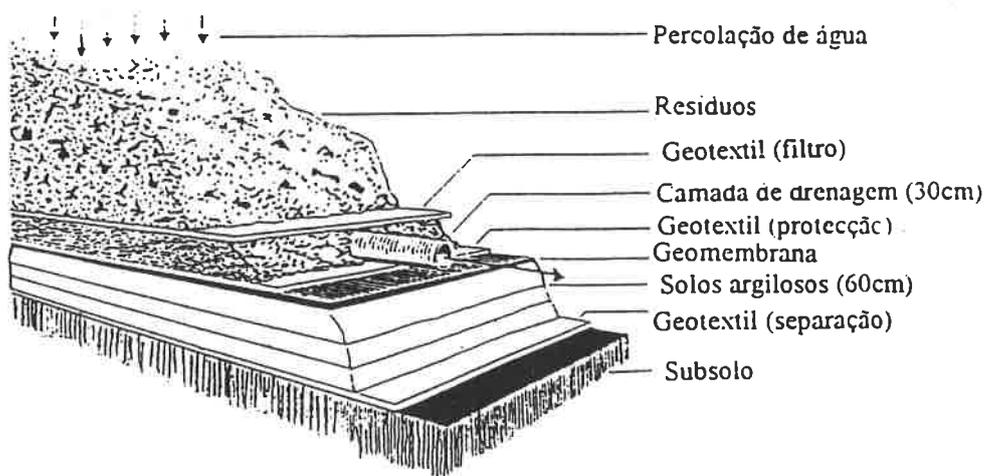


* A camada drenante pode ser constituída quer por solos naturais que por geosintéticos.

Na figura 6.13 apresenta-se um exemplo típico de um sistema de impermeabilização no qual se mostram as funções que cada componente desempenha.

Figura 6.13

Exemplo típico de um possível sistema de impermeabilização da base e taludes do aterro (Scheu et al., 1991)



b) *Controlo das águas superficiais*

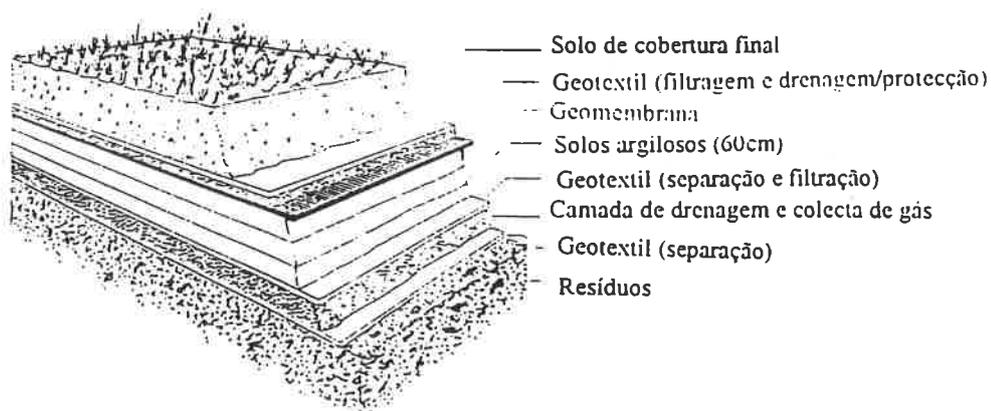
A forma mais eficiente de controlar os lixiviados consiste em evitar a sua formação, o que pode ser conseguido, em grande parte, impedindo que as águas superficiais penetrem no aterro controlado (Crawford e Smith, 1985). O controlo das águas superficiais pode ser feito através das camadas de cobertura, em especial pela cobertura final, e através da execução de valas de drenagem superficial, localizadas lateralmente ao aterro, que desviem as águas da chuva.

A camada de cobertura final é colocada sobre o último nível de resíduos depositados e destina-se a minimizar a infiltração das águas da chuva, impedir a libertação de gás, reduzir os odores, impedir a formação de fogos e a fornecer um suporte à vegetação (Attewell, 1992). É constituída, à semelhança do que acontece com os sistemas de impermeabilização da base e taludes laterais do aterro, por geocompósitos nos quais cada camada apresenta uma função específica.

Na figura 6.14 apresenta-se um exemplo típico de uma camada de cobertura final na qual estão também referenciados os diferentes componentes e o papel por eles desempenhado.

Figura 6.14

Exemplo típico de um possível sistema de cobertura final (Scheu et al., 1991)



6.3.2.7. Tratamento dos lixiviados

O tratamento dos lixiviados tem por objectivo torna-los inertes de modo a permitir o seu lançamento no meio externo. De entre os métodos para tratamento dos lixiviados refiram-se os seguintes (IPT, 1992):

reciclagem: consiste em fazer passar os lixiviados recolhidos através dos resíduos depositados no aterro, tirando-se partido de diversas interações que ocorrem entre os lixiviados e os resíduos depositados, e, que actuam no sentido de atenuar a sua natureza poluente (veja-se item 6.3.2.4).

A aplicação deste método provoca um aumento na taxa de produção de gás no aterro, tornando, como tal, necessário a existência de um sistema de recolha do gás a fim de evitar a sua libertação incontrolada. Esta característica pode, contudo, ser útil no caso de se pretender aproveitar o valor energético do biogás;

evaporação dos lixiviados: constroem-se "tanques" para onde os lixiviados são conduzidos e a partir dos quais evaporam. A parte remanescente dos lixiviados (não evaporada) é espalhada sobre as porções de aterro já concluídas.

Em locais que apresentem elevadas precipitações é necessário colocar sobre os tanques uma cobertura que impeça a entrada das águas da chuva;

tratamento em lagoas de estabilização: baseia-se na biodegradação da matéria orgânica presente nos lixiviados por acção de bactérias. O tempo de tratamento varia sensivelmente de 5 a 50 dias, sendo necessária uma lagoa com capacidade suficiente para manter os lixiviados no seu interior, durante o tempo de estabilização;

tratamento por ataque químico: os lixiviados são tratados por processos que envolvem reacções químicas tais como, por exemplo, a hidrólise enzimática e a hidrólise ácida. A adopção deste método exige a delimitação de uma área onde são colocados os equipamentos necessários à ocorrência das reacções químicas;

tratamento através de filtros biológicos: procede-se à descarga, continua ou intermitente, de despejos poluentes através de um meio biológico activado. Os filtros classificam-se, segundo a sua actividade biológica, em aérobicos ou anaérobicos. A instalação destes filtros torna necessário a individualização de uma área onde são construídos os tanques pelos quais os lixiviados circulam e onde se desenvolve a actividade biológica;

tratamento por processos fotossintéticos: estes processos utilizam certas espécies vegetais (e.g. *Eichlornia crassips*) para absorver os nutrientes, metais e compostos orgânicos traço presentes nos lixiviados. Para o efeito, constroem-se lagoas amplas onde a vegetação se desenvolve e os lixiviados circulam;

A selecção do tipo de tratamento deve levar em consideração a constituição dos lixiviados, especialmente os valores de TDS, COD, SO_4^{2-} , metais pesados e compostos tóxicos. Regra geral, lixiviados que contenham elevadas concentrações de TDS ($> 50\,000$ mg/l) não devem ser tratados através de processos biológicos. Lixiviados que apresentem elevados valores de COD devem, pelo contrário, ser tratados através de processos biológicos, embora, de natureza anaeróbica pois os processos aeróbicos tornam-se extremamente dispendiosos. Os processos biológicos de carácter anaeróbico não são, todavia, recomendáveis para os lixiviados que apresentem elevadas concentrações de sulfatos ou quando estes contêm metais pesados de natureza tóxica (Tchobanoglous et al., 1993).

No quadro 6.3 faz-se uma síntese dos principais tipos de tratamento a que os lixiviados podem ser submetidos.

Quadro 6.3

*Tipos de tratamento dos lixiviados
(adaptado de Pohland, 1991 e Tchobanoglous et al., 1993)*

TIPOS DE TRATAMENTO	APLICAÇÃO	COMENTÁRIOS
<i>Processos biológicos</i>		
Lamas activas	Remoção do material orgânico	Pode ser necessário a utilização de aditivos para impedir a formação de espuma
Lagoas de estabilização	Remoção do material orgânico	São extremamente simples mas pouco versáteis; exigem elevados custos iniciais
Filtros aeróbicos	Remoção do material orgânico	Necessita grandes áreas de terreno
Filtros anaeróbicos	Remoção do material em suspensão	Necessitam de calor; mais lentos do que os processos aeróbicos
Nitrificação/desnitrificação	Remoção do azoto	Pode também ser acompanhado pela remoção do material orgânico
<i>Processos químicos</i>		
Neutralização	Controlo de pH	Aplicação limitada
Precipitação	Remoção de metais e alguns aniões	Produz lama de características tóxicas, exigindo cuidados especiais na sua deposição
Oxidação	Remoção do material orgânico; Remoção de compostos inorgânicos tóxicos	Funciona melhor em resíduos líquidos diluídos
<i>Processos físicos</i>		
Sedimentação/decantação	Remoção do material em suspensão	Tem uma aplicação limitada como método único devendo ser utilizado em conjunto com outros processos de tratamento
Filtração	Remoção do material em suspensão	Útil apenas nas primeiras etapas
Remoção através do ar	Remoção de NH ₃ e compostos orgânicos voláteis	Pode exigir a colocação de equipamento para controlo da poluição atmosférica
Remoção através de vapor	Remoção de compostos orgânicos voláteis	Elevados custos de energia; o vapor condensado necessita de posterior tratamento
Adsorção	Remoção do material orgânico	Custos variáveis em função dos lixiviados
Trocas iónicas	Remoção de compostos inorgânicos dissolvidos	Útil apenas nas primeiras etapas
Ultrafiltração	Remoção de bactérias e compostos orgânicos de elevado peso molecular	Sujeito a falha; aplicação limitada
Osmose inversa	Diluição de soluções inorgânicas	Custos elevados; necessita pré-tratamento
Evaporação	Onde a descarga dos lixiviados não é permitida	Produz lama de características tóxicas; pode tornar-se demasiado dispendioso

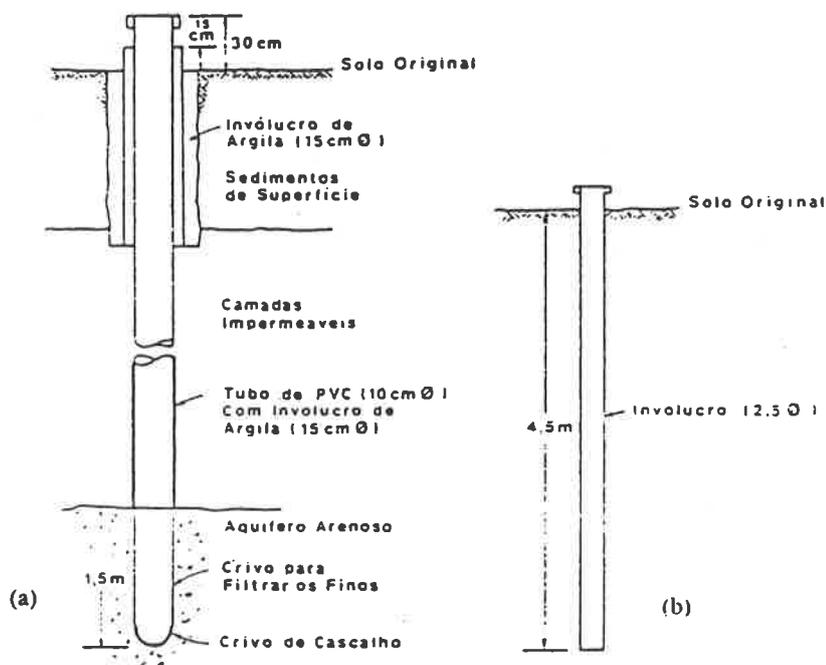
6.3.2.8. Monitorização da contaminação com lixiviados

A monitorização das águas subterrâneas faz-se através de poços (figura 6.15), num mínimo de quatro localizados, um a montante e três a jusante do aterro. A monitorização das águas superficiais faz-se através de análises efectuadas em águas recolhidas a montante e a jusante do aterro controlado (Antunes Pereira et al., 1989). A monitorização da contaminação é indispensável pois permite averiguar sobre uma possível alteração da qualidade das águas. A monitorização das águas subterrâneas deve contemplar, não só, a área correspondente ao aterro como também os terrenos adjacentes.

Refira-se, ainda, que os poços destinados à monitorização não devem situar-se nas imediações dos sistemas colectores de lixiviados pois, estes, podem tornar-se caminhos preferenciais para a migração dos lixiviados e provocar a contaminação local das águas, o que, a acontecer, produziria resultados incorrectos.

Figura 6.15

Constituição típica de poços para monitorização de lixiviados:
(a) Poço utilizado em aquíferos profundos; (b) poço de gás e água utilizado em aquíferos pouco profundos (referido por Stone et al., 1977)



6.3.3. Odores e focos de incêndio

Os problemas relacionados com os odores e focos de incêndio podem ser minimizados através da cobertura diária dos resíduos, devendo esta, ser feita com solos apropriados. Estes, para além de evitarem a formação e propagação de fogos, são também eficientes na eliminação dos cheiros provenientes da degradação da matéria orgânica. São também importantes para impedir o afluxo de animais e a proliferação de roedores e de insectos (Stone et al., 1977).

6.3.4. Factores estéticos

A operação de um aterro controlado causa inevitavelmente Impactes visuais negativos pelo que, a sua localização deve fazer-se tanto quanto possível longe de centros populacionais, escolhendo-se criteriosamente os acessos, construindo-se taludes, redes de protecção e plantando árvores e arbustos que ajudem a melhorar a sua estética.

6.3.5. Formação de poeiras

A formação de poeiras pode ser diminuída pela lavagem periódica, por "chuveiro", das estradas de acesso e dos veículos. A erosão dos solos de cobertura provocada pelo vento contribui também para a formação de poeiras e degradação do aterro pelo que se recomenda a colocação de vegetação a fim de contrariar esta tendência (Stone et al., 1977).

7. CONSIDERAÇÕES GEOLÓGICO-GEOTÉCNICAS

7.1. INTRODUÇÃO

O presente capítulo contempla alguns dos aspectos geológico-geotécnicos mais importantes para a execução de um aterro controlado.

Apresenta-se, assim, um possível procedimento a adoptar na condução do estudo geológico-geotécnico de um aterro controlado. Descrevem-se as condições hidrogeológicas e geológicas mais adequadas à instalação de aterros controlados e, por fim, referem-se alguns aspectos relativos à caracterização dos materiais naturais de impermeabilização e cobertura.

7.2. CONDUÇÃO DO ESTUDO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO

À semelhança do que acontece na realização de outros empreendimentos, a construção de um aterro controlado deve ser acompanhada por estudos geológico-geotécnicos com o objectivo de conhecer e compreender as características do terreno por forma a garantir que o projecto, construção e operação do aterro se efectue com o máximo de economia e segurança.

Na construção de um aterro controlado os aspectos geológico-geotécnicos mais relevantes relacionam-se com as características hidrogeológicas das formações interessadas, com a disponibilidade e características dos materiais de cobertura e impermeabilização e com as características mecânicas dos terrenos de fundação.

O estudo geológico-geotécnico deve ser conduzido por fases por forma a que cada uma delas responda às questões levantadas nas diferentes fases do empreendimento.

De uma forma geral, o trabalho inicia-se pela pesquisa de potenciais locais para instalação do aterro controlado, em função da localização óptima e disponibilidade de terreno (Miller e Alexander, 1981). A primeira fase constitui o estudo de viabilidade e consiste na análise de vários elementos (e.g. topográficos, hidrogeológicos, geológicos, sismológicos) com base em documentos existentes. Deve, ainda, contemplar um reconhecimento geológico de superfície e eventualmente a interpretação de fotografia aérea, não se recorrendo de um modo geral a trabalhos de prospecção mecânica nesta fase.

Indicações sobre as características hidrogeológicas da região podem ser obtidas através da inventariação das captações, das linhas de água e das medições de níveis piezométricos.

A partir da informação recolhida torna-se possível elaborar um esboço geológico, a uma escala adequada (e.g. 1:25000), de uma área centrada no provável local de instalação do aterro controlado com um raio da ordem dos 5 Km (Urbini, 1987) no qual se referem os aspectos mais relevantes para o projecto.

Após a escolha do local para a implantação do aterro procede-se à preparação de um programa de prospecção mecânica e ensaios à escala mais conveniente (preferencialmente maior do que 1:5000).

Um conhecimento mais profundo das condições hidrogeológicas do local pode ser conseguido através da instalação de piezómetros ou da execução de poços de monitorização.

Os métodos de prospecção geofísica devem, igualmente, ser utilizados para se obter uma avaliação geral da estrutura do maciço de fundação devendo a sua interpretação ser confirmada pela prospecção directa.

A informação geral obtida durante a fase de anteprojecto pode ser utilizada para se proceder a um primeiro zonamento geotécnico da área em estudo.

Na fase de projecto há que obter elementos de pormenor. O zonamento geotécnico, iniciado na fase anterior, é complementado sobretudo à custa da realização de ensaios de permeabilidade (*in situ* e laboratoriais) e a caracterização de zonas não anteriormente contempladas pelos trabalhos de prospecção mas que, devido à evolução das soluções de projecto, assumiram um papel importante no contexto do empreendimento.

Os resultados obtidos durante o decorrer do estudo geológico-geotécnico devem ser analisados no contexto global do projecto e do relatório final devem fazer parte, entre outros, os seguintes aspectos (HMSO, 1986):

- cartografia geológica de pormenor;
- descrição dos materiais apropriados à utilização como barreiras à percolação do gás e lixiviados;
- descrição do regime hidrológico subterrâneo e da permeabilidade do terreno adjacente ao aterro controlado;
- estudos de estabilidade de taludes;
- determinação das características mecânicas da fundação (capacidade de carga e deformabilidade);
- informação precisa sobre a possível existência de falhas activas, subsidência, risco de colapso, risco sísmico, etc.

Devem, ainda, fazer parte deste relatório a localização das zonas de empréstimo e as características dos materiais a utilizar.

Na fase de construção procede-se à continuação da caracterização das propriedades exibidas pelas formações geológicas, com base em dados obtidos nas escavações. É, ainda, efectuada uma aferição dos parâmetros de projecto proporcionando as intervenções e os ajustes que sejam considerados necessários.

A fase de exploração do aterro deve contemplar a observação dos principais componentes do projecto com vista a assegurar a funcionalidade do aterro dentro dos padrões de segurança adequados.

Por fim, na fase de abandono, após o encerramento do aterro controlado deve procedêr-se, entre outros, ao estudo do comportamento dos materiais utilizados, em especial modificações de permeabilidade dos solos, assentamentos diferenciais e fendilhação da camada de cobertura final.

No quadro 7.1 apresenta-se uma síntese das principais actividades que é possível desenvolver durante o estudo geológico-geotécnico de um aterro controlado.

7.3. ASPECTOS GEOLÓGICOS-GEOTÉCNICOS RELATIVOS À ADEQUABILIDADE DO LOCAL

As características geológicas e hidrogeológicas do local condicionam significativamente a construção de um aterro controlado, pelo que, se abordam de seguida alguns aspectos a ter em consideração aquando da sua construção.

7.3.1. Acerca das características hidrogeológicas

Se tivermos em consideração que cerca de 66% de toda a água doce não gelada existente no planeta está contida na zona saturada das camadas geológicas da crosta terrestre (Lencastre e Franco, 1984), constituindo em muitos locais a principal fonte de abastecimento da população, facilmente se compreenderá a premente necessidade de proceder à sua protecção.

A instalação de aterros controlados não é, então, recomendada em todas as formações geológicas devendo-se, de um modo geral, evitar aquelas que podem ser utilizadas para o aproveitamento da água.

De um ponto de vista hidrogeológico as formações geológicas podem classificar-se em aquíferos, aquíclodos, aquí tardos e aquí fugos, de acordo com o seu conteúdo em água e a capacidade de a transmitir (Lencastre e Franco, 1984; Marques da Silva, 1990, entre outros).

O aquífero é toda a formação geológica que permite o armazenamento e circulação de água pelos seus poros ou fracturas possibilitando o aproveitamento daquele líquido pelo Homem em quantidades economicamente apreciáveis. Citem-se, como exemplos característicos de aquíferos, as formações geológicas constituídas por areias e seixos de rios, calcáreos muito fissurados, arenitos porosos entre outras.

Quadro 7.1

*Principais actividades desenvolvidas nas diferentes fases do empreendimento
(adaptado de Quinta Ferreira, 1990)*

Fases do empreendimento	Actividades possíveis de desenvolver no âmbito da geotécnica	Tipo de documento
Estudo de viabilidade	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Análise dos elementos existentes (hidrogeológicos, geológicos, topográficos, sísmológicos, etc). ▪ Interpretação de fotografia aérea. ▪ Reconhecimento geológico de superfície. ▪ Perfis geológicos. 	Relatório preliminar
Anteprojecto	<ul style="list-style-type: none"> • Reconhecimento geológico de superfície. • Avaliação das condições hidrogeológicas. • Prospecção geofísica e mecânica. • Ensaios laboratoriais e <i>in situ</i>. • Caracterização expedita dos materiais a utilizar nas camadas de impermeabilização e de cobertura. • Zonamento geotécnico e preparação do programa de prospecção complementar. 	Relatório provisório
Projecto	<ul style="list-style-type: none"> • Cartografia geológica de síntese. • Sondagens mecânicas (continuação). • Ensaio de aquífero e sua modelação. • Ensaios laboratoriais complementares. • Estudo pormenorizado dos materiais de impermeabilização. • Zonamento geotécnico pormenorizado. 	Relatório final
Construção	<ul style="list-style-type: none"> • Aferição dos parâmetros de projecto. • Acompanhamento dos trabalhos de escavação e impermeabilização. 	Relatório suplementar
Operação	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Observação dos diferentes componentes do aterro (fundações, sistemas de impermeabilização, sistemas de colecta e condução do gás e lixiviados, cobertura final). 	—
Abandono	<ul style="list-style-type: none"> • Estudo de possíveis modificações no comportamento dos materiais utilizados (permeabilidade, assentamentos diferenciais, fendilhação dos solos argilosos, etc). 	—

Designa-se por aquícludo toda a formação geológica que, embora contendo água no seu interior, por vezes até à saturação, não a transmite e, por isso não torna possível a sua exploração. São exemplos típicos de aquícludos as argilas ou e certos lodos de origem deltaica ou de estuário.

Entende-se por aquítardo toda a formação geológica que contém apreciável quantidade de água mas a transmite de uma forma extremamente lenta sendo, portanto impossível a sua exploração. Níveis de argilas siltosas podem comportar-se como aquítardos quando situados acima ou abaixo de um aquífero ao qual podem ceder água ou drena-lo.

O termo aquífugo denomina as formações geológicas que nem contêm água nem a podem transmitir, tais como maciços graníticos não alterados, rochas metamórficas não fissuradas nem alteradas ou, ainda, calcareos e mármore sem fracturas ou diaclasamento.

Do exposto conclui-se que os aquícludos e os aquítardos constituem as formações geológicas mais favoráveis para a instalação de aterros controlados, contrariamente aos aquíferos que requerem uma cuidadosa protecção. Os aquíferos devem, como tal, ser objecto de um conhecimento mais aprofundado de modo a mais facilmente se proceder à sua protecção.

No aquífero os parâmetros que permitem quantificar a água disponível numa formação geológica e a sua facilidade de circulação são respectivamente a porosidade eficaz e a permeabilidade (Lencastre e Franco, 1984). O conhecimento destes parâmetros permite fazer uma previsão das características hidrogeológicas com relevância para o projecto de um aterro controlado.

Numa formação geológica existem, para além de poros interligados que possibilitam a circulação da água, poros fechados ou semi-fechados que tornam a circulação da mesma muito lenta ou mesmo impossível. Denomina-se de porosidade efectiva (n_e) a relação entre o volume de vazios ocupáveis pela água que circula devido à acção da gravidade e o volume total (Lencastre e Franco, 1984), veja-se quadro 7.2. Factores como o empacotamento dos grãos e a presença de argilas influenciam a porosidade efectiva.

As rochas contêm fracturas, descontinuidades e heterogeneidade que tornam a determinação da permeabilidade extremamente difícil. O grau de alteração das rochas é também um factor determinante na permeabilidade. Veja-se, por exemplo, o caso dos dolomitos que quando alterados podem alcançar valores de permeabilidade até 10 m/dia, enquanto que o seu valor médio se situa abaixo dos 10^{-1} m/dia (Custódio e Llamas, 1976).

Os argilitos e xistos compactos apresentam valores ligeiramente superiores a 10^{-6} m/dia, embora, quando alterados e diaclasados possam atingir valores de 1 m/dia (Davis, 1969, referido por Custódio e Llamas, 1976).

A maioria das rochas vulcânicas possuem permeabilidades entre os 10^{-2} e os 10^{-5} m/dia, valores apresentados inclusive por materiais muito porosos. A alteração das rochas vulcânicas pode, contudo, produzir solos com permeabilidades bastante superiores (até 1 m/dia). Basaltos e rochas afins apresentam frequentemente zonas muito diaclasadas, intercaladas com vários tipos de sedimentos permeáveis, zonas de escóreas, etc., podendo localmente obter-se permeabilidades da ordem dos 100 m/dia (Davis, 1969, referido por Custódio e Llamas, 1976). Note-se, porém, que de um modo geral a permeabilidade dos basaltos diminui com a sua idade, pelo que se torna extremamente difícil prever um valor médio.

Nas areias a permeabilidade diminui de uma forma significativa com a diminuição da porosidade, podendo oscilar entre os 3 a 0,001 m/dia com valores extremos bastante mais dispersos.

No quadro 7.2 apresentam-se os valores da porosidade e da permeabilidade das formações geológicas mais frequentes e procura estabelecer-se uma relação com a adequabilidade hidrológica para a instalação de aterros controlados. Refira-se, porém, que este quadro deve ser encarado apenas como uma orientação uma vez que, como já foi referido, os valores da permeabilidade podem apresentar dispersões muito grandes em função das características dos maciços rochosos. A situação correcta consiste, pois, na determinação da permeabilidade *in situ* recorrendo, para o efeito, a ensaios de campo.

Quadro 7.2

Adequabilidade das formações geológicas para a instalação de aterros controlados de acordo com critérios hidrogeológicos ()*

Formação geológica		Porosidade efectiva (%)	Permeabilidade (m/s)	Adequabilidade para instalação de aterros controlados
Rochas Ígneas	Granitos	0 - 0,5 (a)	(e)	Favorável (f)
	Piroclastos e tufos	0 - 20 (c)	(e)	Desfavorável
	Escórias	1 - 50 (c),	(e)	Desfavorável
	Basaltos	0,1 - 10 (a),(c)	(e)	Favorável(f)
R. Metamórficas	Xistos	-	(e)	Favorável(f)
	Gnaisses	0 - 2 (a)	(e)	Favorável(f)
	Mármore	0 - 2 (a)	(e)	Pouco favorável
R. Sedimentares	Cré	0,2 - 5 (b)	(e)	Pouco favorável
	Dolomito	0 - 1 (b)	(e)	Pouco favorável
	Calcáreo	0 - 10 (b)	(e)	Pouco favorável
	Arenito	0 - 20 (d)	(e)	Desfavorável
	Argilito	0 - 5	(e)	Muito favorável
Solos	Seixo limpo	12 - 35	> 2	Desfavorável
	Areia grossa limpa	20 - 40	10^{-4} a 10^{-2}	Desfavorável
	Areia fina	10 - 28	10^{-5} a 5×10^{-4}	Desfavorável
	Areia silto sas	-	10^{-6} a 2×10^{-5}	Favorável
	Silte	2 - 20	10^{-8} a 10^{-5}	Muito favorável
	Argila	0 - 10	$< 10^{-8}$	Muito favorável

Notas: (*) baseado em Jonson et al.; Silin-Bekchurin, referidos por Custódio e Llamas, 1976 e o próprio Custódio e Llamas, 1976;

- (a) aumenta com a meteorização;
- (b) aumenta devido a fenómenos de dissolução;
- (c) diminuem com o tempo;
- (d) variável segundo o grau de comentação e solubilização;
- (e) a permeabilidade das rochas *in situ* não é referida dado que ela depende fundamentalmente da fracturação e da alteração dos maciços rochosos (ver texto para mais pormenores);
- (f) desde que não se encontrem fracturadas ou alteradas.

7.3.2. Acerca das características geológicas

7.3.2.1. Barreira Geológica

O termo barreira geológica é usado para descrever a capacidade que determinadas formações geológicas têm para reter os poluentes. O subsolo natural, abaixo da base do aterro pode actuar como uma barreira à migração dos poluentes. Contudo, para ser eficiente, tem que possuir baixa permeabilidade, elevada espessura, elevada capacidade de absorção de contaminantes e ser resistente à erosão (Dörhöfer, 1993).

As propriedades físicas, químicas, os aspectos biológicos e suas interações podem ter diferentes efeitos na eficácia da barreira. Podem funcionar como barreira geológica as formações naturais ocorrentes imediatamente abaixo da base do aterro e taludes laterais, estendendo-se, também, pela área adjacente. Solos e rochas de carácter argiloso satisfazem geralmente as condições de barreira.

A eficácia das camadas barreira na protecção das águas subterrâneas pode ser avaliada através do tempo que os lixiviados demoram a atravessá-las. De um modo geral, a percolação dos lixiviados através das camadas geológicas subjacentes ao aterro pode ser estimada através da lei de Darcy, a qual se exprime da seguinte forma:

$$v = K i, \text{ ou } Q = K A i$$

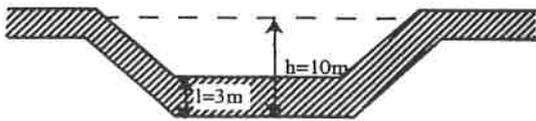
onde,

- v = velocidade de percolação vertical do lixiviado através da base do aterro, em m/s;
- i = h/l é o gradiente hidráulico, onde h a altura de líquido acima da base no aterro e l a espessura da camada impermeabilizante;
- K = coeficiente de permeabilidade, em m/s;
- Q = caudal de percolação através da base do aterro.

Na figura 7.1 mostra-se a influência que a permeabilidade do terreno (K), a sua espessura (l) e o controle adequado da quantidade dos lixiviados (h) têm no tempo que os lixiviados demoram a atravessar as camadas da base do aterro e, consequentemente, a sua importância na protecção das águas subterrâneas.

Figura 7.1

Movimento dos lixiviados através das camadas da base de um aterro controlado com $K=1,0 \times 10^{-9}$ m/s (modificado de Attewell, 1992)



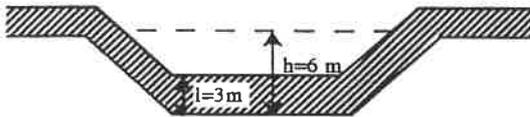
7 m de lixiviado acima da base do aterro

Para $K=1,0 \times 10^{-9}$ m/s

$V=Ki$

$V=1 \times 10^{-9} \times (10/3)=0.104$ m/ano, ou seja

28.8 anos a atravessar a base do aterro



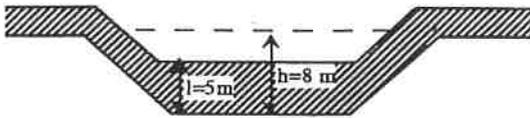
3 m de lixiviado acima da base do aterro

Para $K=1,0 \times 10^{-9}$ m/s

$V=Ki$

$V=1 \times 10^{-9} \times (6/3)=0.062$ m/ano, ou seja

48.3 anos a atravessar a base do aterro



3 m de lixiviado acima da base do aterro

Para $K=1,0 \times 10^{-9}$ m/s

$V=Ki$

$V=1 \times 10^{-9} \times (8/5)=0.050$ m/ano, ou seja

99.1 anos a atravessar a base do aterro

7.3.2.2. Classificação dos locais

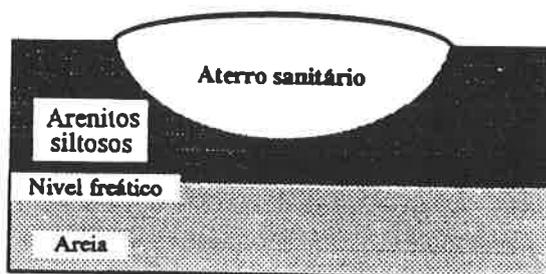
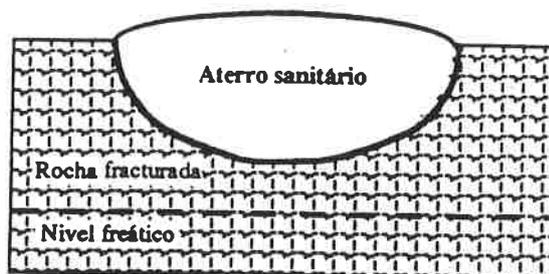
Segundo Crawford e Smith (1985) as formações geológicas receptoras de aterros controlados podem, de um modo geral, agrupar-se em três classes (fig. 7.2), em função do grau de confinamento que conferem aos lixiviados.

Na Classe 1 os aterros controlados ficam confinados em camadas geológicas de baixa permeabilidade (i.e. $K < 10^{-9}$ m/s ou 0,1 mm/dia) tais como argilas, xistos argilosos, margas, etc. Tira-se partido da reduzida permeabilidade das formações geológicas para impedir a migração dos lixiviados através da base e taludes laterais do aterro (Ministère de L'Environnement et du Cadre de Vie, 1981).

Se as características das formações geológicas subjacentes não permitirem o confinamento natural do aterro pode proceder-se à sua impermeabilização artificialmente, utilizando, para o efeito, solos argilosos e/ou geomembranas (veja-se secção 6.3.2.6), colocados ao longo da base e taludes laterais do aterro controlado.

Figura 7.2

Classificação geológica dos locais para implantação de aterros controlados
(Crawford e Smith, 1985)

**Classe 1 - Locais confinantes****Classe 2 - Locais atenuadores****Classe 3- Locais de rápida migração**

A classe 2 corresponde a um aterro no qual o processo dominante é a atenuação e dispersão dos lixiviados. A instalação do aterro controlado processa-se numa camada geológica semi-permeável (i.e. $10^{-6}\text{m/s} < K < 10^{-9}\text{m/s}$ ou $0,1\text{mm}$ a 10cm/dia) como, por exemplo, solos areno-argilosos ou areneno-siltosos, através da qual os lixiviados formados migram lentamente em direcção ao nível freático (Ministère de L'Environnement et du Cadre de Vie, 1981). Ao longo deste percurso os lixiviados vão sendo atenuados através de mecanismos que incluem a diluição e dispersão, minimizando os efeitos negativos que os lixiviados podem causar na qualidade das águas subterrâneas (veja-se secção 6.3.2.4).

A distância entre o nível freático e a base do aterro desempenha neste tipo de locais um papel importante, sendo a atenuação e dispersão tanto mais eficientes quanto maior for essa distância.

Identificam-se com a classe 3 os locais caracterizados por elevadas permeabilidades (i.e. $K > 10^{-6}\text{m/s}$ ou 10cm/dia), onde existe uma rápida migração dos lixiviados através das formações geológicas da fundação sendo, portanto, aqueles que representam o maior perigo de contaminação das águas subterrâneas, devendo como tal ser evitados (Crawford e Smith, 1985). Seixos e rochas fracturadas constituem exemplos típicos destes locais.

7.3.2.3. Instalação de aterros controlados em pedreiras abandonadas

Os espaços resultantes da exploração de pedreiras outrora em actividade torna estes locais indicados para a instalação de aterros controlados, nomeadamente quando a quantidade de solo disponível para impermeabilização da base do aterro e/ou cobertura diária dos resíduos é elevada (Attewell, 1992). O aproveitamento de tais locais apresenta a vantagem adicional de facilitar a sua recuperação paisagística, após encerramento do aterro.

Porém, a utilização de pedreiras abandonadas para instalação de um aterro controlado pode conduzir a graves problemas ambientais caso não sejam respeitados os critérios técnicos que tornam este empreendimento seguro. Com efeito, tal como refere Costa (1988) a degeneração de um aterro controlado em lixeira pode ser problemática, em especial no caso de pedreiras de calcáreo onde os fenómenos de dissolução aliados à vulnerabilidade dos aquíferos pode conduzir à contaminação das águas subterrâneas e indirectamente colocar em risco a saúde pública. A perigosidade dos "falsos aterros" não é, todavia, exclusiva dos maciços calcáreos, podendo igualmente tornar-se preocupante em antigas pedreiras de granito, saibreiras ou, de uma forma geral, em formações geológicas que apresentem elevada

permeabilidade, quer esta seja uma propriedade intrínseca do material geológico quer resulte de fracturação.

O aproveitamento de antigas pedreiras está directamente relacionado com as características geológica-geotécnicas das mesmas, destacando-se pela sua importância os seguintes aspectos, cujo estudo é sempre necessário:

- (1) características hidrogeológicas do maciço (Costa, 1988);
- (2) a estabilidade dos taludes resultantes da escavação da pedreira (Wilson e Thomas, 1991; Costa, 1988);
- (3) fracturação do maciço, na medida em que condiciona a sua permeabilidade (Attewell, 1992).

Segundo Costa (1988) de um ponto de vista geológico-geotécnico uma pedreira abandonada é, de um modo geral, adequada para instalação de um aterro controlado se satisfizer os seguintes critérios:

- (1) permitir o confinamento do aterro ainda que obtido através de trabalhos, não demasiado dispendiosos, de impermeabilização, drenagem e colecta de lixiviados e gás;
- (2) se não se situar em zonas de recarga ou infiltração significativas associadas a aquíferos vulneráveis ou em zonas de descarga ligadas a meios húmidos como sejam, por exemplo, linhas de água ou bacias endorreicas;
- (3) se o nível freático se localizar preferencialmente abaixo do fundo da pedreira;
- (4) se os taludes da antiga pedreira não forem passíveis de deslizamentos.

7.4. ESTUDO DOS MATERIAIS NATURAIS DE IMPERMEABILIZAÇÃO E COBERTURA

Enquanto que para a cobertura diária dos resíduos o aspecto mais importante se prende com a quantidade de solo disponível, já para a impermeabilização do aterro são as características dos materiais o factor determinante, uma vez que estes necessitam respeitar rigorosos critérios de adequabilidade. Assim, a presente secção contempla essencialmente o estudo das características dos materiais naturais destinados à impermeabilização do aterro.

A avaliação das características dos materiais da fundação no que respeita à sua adequabilidade como impermeabilizantes compreende, para além dos ensaios de

permeabilidade *in situ*, a realização de ensaios laboratoriais. Compreende, ainda, a obtenção dos parâmetros necessários à preparação dos materiais de modo a funcionarem como impermeabilizantes.

O número de amostras a ensaiar em laboratório deve ser determinado em função da homogeneidade dos materiais e ser o mais possível representativo das condições existentes no local.

Dos ensaios laboratoriais mais importantes refiram-se os seguintes:

- granulometria;
- limites de Atterberg;
- compactação;
- permeabilidade;
- teor em matéria orgânica;
- resistência ao corte.

Contrariamente à distribuição granulométrica que não permite uma avaliação das propriedades dos solos, a contribuição dos limites de Atterberg na determinação da adequabilidade como impermeabilizante é significativa. Regra geral, quanto maior a plasticidade do solo maior a sua apetência como impermeabilizante (Otto, 1987). Os valores ideais do Limite de Liquidez e do Índice de Plasticidade situam-se, segundo Attewell (1992), abaixo dos 90% e 65%, respectivamente.

Os ensaios de permeabilidade são dos mais importantes efectuados em laboratório. De acordo com a proposta de directiva COM (91) deve usar-se, como valor de referência, um coeficiente de permeabilidade (K) inferior a 10^{-9} m/s para espessuras de subsolo de 3 metros .

Note-se, porém, que os valores de permeabilidade obtidos em laboratório são geralmente inferiores aos obtidos *in situ*, devido à existência de vazios interligados ou, no caso dos solos argilosos, devido à possível formação de fendas resultantes de processos de dissecação.

Com os ensaios de compactação pretende-se obter o teor em água óptimo ($\omega_{\text{ópt.}}$) versus baridade seca máxima ($\gamma_{\text{dmáx.}}$) do solo. O valor do $\omega_{\text{ópt.}}$ deve ser utilizado como referência aquando da preparação dos solos a colocar nas camadas impermeabilizantes.

Recomenda-se que os solos sejam compactados com teores em água ligeiramente superiores ao óptimo pois produzem menores permeabilidades.

A realização de ensaios triaxiais visa a obtenção dos parâmetros de resistência ao corte que permitem estudar a estabilidade de taludes e a capacidade de carga dos materiais. A menosprezação destes estudos conduz frequentemente a deslizamentos e roturas na fundação com os consequentes efeitos negativos daí decorrentes.

No quadro 7.3 faz-se uma síntese dos principais ensaios referidos e resumem-se os seus aspectos mais importantes.

Quadro 7.3

Principais ensaios a realizar para o estudo dos materiais naturais de impermeabilização

Ensaio	Parâmetros obtidos	Observações
Granulometria	Dist. granulométrica (% de argila, silte, areia e seixo).	Identificação do solo.
Limites de Atterberg	LL, LP, IP	Regra geral, quanto maior a plasticidade do solo maior é a sua adequabilidade como impermeabilizante (Otto, 1987). Os valores do LL e do IP não devem, contudo, ultrapassar respectivamente os 90% e os 65% (Attewell, 1992).
Permeabilidade	Coefficiente de permeabilidade (K)	A proposta de directiva COM (91) sugere como critério de referência valores de $K < 10^{-9}$ m/s para espessuras de subsolo de 3m.
Compactação	$\gamma_{dm\acute{a}x.}$ e $\omega_{\acute{o}pt.}$	Recomenda-se que os solos argilosos sejam compactados, em camadas finas, com teores em água ligeiramente superior ao $\omega_{\acute{o}pt.}$
Ensaio triaxiais	c_u, ϕ_u e c', ϕ'	Necessários para os estudos de estabilidade de taludes e de determinação da capacidade de carga do terreno de fundação (Attewell, 1992; HMSO, 1986).
Determinação da matéria orgânica	% de matéria orgânica	A quantidade de matéria orgânica não deve ultrapassar os 5% (Otto, 1987).

BIBLIOGRAFIA

- ANDREOTOLA, G.; COSSU, R. e SERRA (1987) – "A Method for the assessment of environment impact of sanitary landfill". Sardinia 87, 1st International Landfill Symposium Proceedings, 19-23 October 1987, Cagliari, Italy, Vol.2, pp. XXXIII-1 a XXXIII-17.
- ANTUNES PEREIRA, F. J.M, GOMES, A. P. e MATOS, M.A. (1989) – "Técnicas de tratamento de resíduos sólidos". Departamento do Ambiente e Ordenamento do Território da Universidade de Aveiro.
- ATTWELL, P (1992) – "Notes on waste management". Palestra integrada no curso de Projecto, Construção e Impacto de Obras de Terra, realizado no Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.
- ATTWELL, P (1992) – "Poluted and Contaminant Land". Palestra integrada no curso de Projecto, Construção e Impacto de Obras de Terra, realizado no Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.
- ATTWELL, P (1993) – "Ground pollution environmental, geology engineering and law". SPON0419 183205
- CAMPBELL, D. (1987) – "Landfill gas migration, effects and control". Sardinia 87, 1st International landfill Symposium Proceedings, 19-23 October 1987, Cagliari, Italy, Vol.2, pp. XXXV-1 a XXXV-27.
- CHOUERY -CURTIS, V. E. e BUTCHKO, S. T. (1991) – "Inovative use of structural geogrids in waste containment applications". Sardinia 91, 3rd International Landfill Symposium Proceedings, 14-18 October 1991, Cagliari, Italy, Vol. 1, pp. 548-561.
- CHRISTENSEN, T. H.; KJELDEN, P.; LYNGKILDE, J. E TJELL, J.C. (1987) – "Behaviour of leachate pollutants in groundwater". Sardinia 87, 1st International Landfill Symposium Proceedings, Cagliari, Italy, 19-23 October 1987, Vol. 2, 2, pp.XXXVIII2.
- COSTA, N.C. (1988) – "Acerca da adequabilidade de antigas pedreiras para a instalação de aterros sanitários". Geotécnico nº4, pp. 33-43.
- CRAWFORD, J. F. e SMITH, P. G. (1985) – "Landfill technology". Butterworths. Borough Green, Sevenoaks, Kent, TN 158 PH, England.

- CUSTÓDIO, E. e LLAMAS, M. R. (1976) – "Hidrologia subterrânea". Barcelona, Ediciones Omega, S.A.
- DANIEL, E. D. e SHACKELFORD (1987) – "Containment of landfill leachate with clay liners". Sardinia 87, 1st International Landfill Symposium Proceedings, Cagliari, Italy, 19-23 October 1987, Vol. 2, pp. XXVII -1 a XXVII-24.
- DEARDORFF, G.B. (1991) – "Construction inspection of municipal landfill lining systems: a U:S:A perspective". Sardinia 91, 3th international Landfill Symposium Proceedings, 14-18 October 19891, Cagliari, Italy, Vol. 1, pp. 741-751.
- DGQA (1990/1991) – "Qualidade do ambiente". Direcção Geral da Qualidade do Ambiente.
- DIRECTIVA 85/337/CEE 27 de Junho.
- DÖRHÖFER (1993) – "The role of natural geological barriers for the siting of landfill in Germaiy". Geoconfine 93, pp. 39-45, Montpellier 8-11 Juin/June 1993, France.
- EMBERTON, J. R. e PARKER, A. (1991) – "Problemas associados à construção sobre lixeiras antigas". Ingenium Revista da Ordem dos Engenheiros, Novembro de 1991.
- EPA (1975) – " DECISION-MAKERS GUIDE TO SOLID WASTE MANAGEMENT", United Environment Protection Agency.
- HMIP (1989) . "The control of landfill gas". Waste management paper nº 27, Department of Environment, London.
- HMSO (1986) – "Landfilling wastes". Waste management paper nº 26, Department of Environment, London.
- INGOLD, T. S. e MILLER, K.S. (1988) – "Geotextiles handbook". Thomas Telford, London.
- IPT (1992 – " Alterações no meio físico decorrentes de obras de engenharia". Instituto de Pesquisas Tecnológicas. Boltim 61, pp. 139.
- LEI nº 11/87 – "Lei de Bases do Ambiente". Diário da República, I série, nº 81, pp. 1387 -1395, 7 de Abril de 1987.
- LENCASTRE, A. e FRANCO, F. M (1984) – "Lições de hidrologia". Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

- MANUAL DE GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS – ENVIREG. Manual elaborado no âmbito do Programa AMBER. Comissão das Comunidades Europeias, Direcção Geral das Políticas Regionais, Direcção Geral do Ambiente.
- MARQUES DA SILVA (1990) – "Sebenta de hidrogeologia aplicada". Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro.
- MATSUFUJI, Y., HAMASHIMA, M e GOTOH, S (1991) – "Construction of school buildings at an old landfill". Sardinia 91, 3rd International Landfill Symposium Proceedings, 14 – 18 October 1991, Cagliari, Italy thesis, University of Durham.
- MILLER JR. D. G. e ALEXANDER, W. J. (1981) – "Geological aspects of Waste disposal site evaluations". Bull. of the Ass. of Eng. Geol., Vol. XVIII, nº 3.
- MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT ET DU CADRE DE VIE (1981) – "La décharge contrôlée de résidus urbains". Cahiers Techniques de la direction de la prévention des pollutions.
- MOPT, (1992) – "Guías metodológicas para la elaboración de estudios de impacto ambiental – grandes presas". Monografías de la Secretaria de Estado para las Políticas del Agua y Medio Z+Ambiente. Ministério de Obras Públicas y Transportes. Vol. 2.
- OTTO (1987) – "Natural lining materials" – sardinia 87. 1st International landfill Symposium Proceedings, Cagliari, Italy, 19-23 October 1987, Vol. 2, pp.XXVI-1 a XXVI-7.
- PAVONI, J. L.; HEER, J. E., JR. e HAGERTY, J. (1975) – "Handbook of Solid Waste Disposal – Materials and Energy Recovery". Cap. 4, pp. 169 – 201.
- PEREIRA BARROSO, M. C. (1994) – "Dimensionamento e Impacte Ambiental de Aterros Sanitários" Dissertação de Mestrado apresentada no Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.
- PROPOSTA DE DIRECTIVA COM (91) – "Deposição de resíduos em aterros controlados Comissão das Comunidades Europeias, 1991.
- QUINTA FERREIRA, M. O. (1990) – "Aplicação da geologia de engenharia ao estudo de barragens de enrocamento". tese apresentada à universidade de Coimbra para obtenção do grau de Doutor.

- RAMKE, H. G. (1987) – "Leachate collection systems os sanitary landfills". First International landfill Symposium Proceedings, 19-23 October, srdinia, Italy.
- RÉ, M.; CRUZ, M; QUINTANEIRO, I.; RUA, J. e BORREGO C. (1990) – "O aterro sanitário em engenharia municipal e a sua inserção no Plano-Ria". Simpósio Recolha, Tratamento e Destino Final de Resíduos sólidos Urbanos. Auditório da Reitoria da Universidade de Coimbra, 10 e 11 Dezembro, 1990.
- RUSHBROOK, P. E. (1991) – "Co-deposição de lixos industriais e urbanos". Ingenium Revista da Ordem dos Engenheiros, Novembro de 1991.
- STONE, R. et al. (1977) – "handbook of solid waste management". cap. 8, pp.226-263.
- TOCHA SANTOS, J. L. e BRITZ, L. (1985) – "notas sobre aterros sanitários". 1º Encontro Nacional de Geotecnia, lisboa, LNEC; vol. 1 pp. III-39 a III-63.
- TCHOBANOGLIOUS, G.; THEISEN, H e VIGIL, S. (1993) – "Integrated solid waste management – engineering principles and management issues". cap. 11, pp. 361-539. McGraw-Hill, Inc.
- URBINI, G. (1987)- "Design and management outlines of sanitary landfill in Italy". Sardinia 87, 1st International Landfill Symposium Proceedings, 19-23 October 1987, cagliari, Italy.
- WILSON, G. E THOMAS, R. (1991) – "Leakage in double lined systems. The containmetno objective". sardinia 91, 3rd International landfill Symposium Proceeedings, 14-18 October 1991, Cagliari, Italy Vol 2, pp. 1171-1178.
- WALLANCE, R. B. e AKGUN, H. (1991) – "Leakage in double lined systems: the containment objective". Sardinia 91, 3rd international Landfill symposium Proceedings, 14-18 October 1991, Cagiay, Italy, Vol.1, pp. 731 – 740.
- WILLUMSEN, H. C. (1991) – "The problematic of landfill gas technology". Sardinia 91, 3rd International Landfill Symposium Proceedings, 14-18 October 1991, Cagliari, Italy, Vol. 1, pp.86.
- YONG, R. N.; MOHAMED, A. M. O. e WARKENTIN, B. P. (1992) – "Principles of Contaminant Transport in Soils". Elsevier.

VOLUMES PUBLICADOS
NA SÉRIE
MONOGRAFIAS TÉCNICAS

- Nº 1 **DIMENSIONAMENTO DE CONDUTAS ELEVATÓRIAS EM SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA – Aspectos Económicos**
Armando Silva Afonso
- Nº 2 **O CÁLCULO AUTOMÁTICO NO PROJECTO DE COMPOSIÇÃO DE BETÕES (Métodos de Bolomey e de Faury)**
Jorge Lourenço M José Coutinho
- Nº 3 **ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUAIS PARA AGLOMERADOS COM MENOS DE 5000 HABITANTES**
António Machado Relvão; António da Costa Ribeiro
- Nº 4 **CARTOGRAFIA DA REN (Reserva Ecológica Nacional)**
Manuel Cerveira

À venda no

CENTRO DE DOCUMENTAÇÃO E INFORMAÇÃO DA
COMISSÃO DE COORDENAÇÃO DA REGIÃO CENTRO
Rua Bernardim Ribeiro, 80 – 3000 COIMBRA
Telefones: 039.400198/9 Fax: 039.701657

