

Considerações geológico-geotécnicas acerca dos aterros sanitários

Barroso, M. C. P.*

**Laboratório Nacional de Engenharia Civil*

Quinta Ferreira, M. O. e Lemos, L. J. L.**

***Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra*

SUMÁRIO

Os aterros sanitários são uma obra de engenharia que interfere a diversos níveis com o meio natural. Para um adequado projecto e dimensionamento é fundamental conhecer as características geológicas e geotécnicas dos terrenos onde se instalam.

Os principais tipos de trabalhos de reconhecimento, prospecção e ensaios são apresentados, de acordo com o desenrolar das diversas fases do empreendimento. São também abordados alguns aspectos construtivos, nomeadamente no que se refere ao controlo de gás e lixiviados.

1 - INTRODUÇÃO

A deposição de resíduos no terreno tem sido prática corrente ao longo dos tempos. Actualmente, as grandes quantidades de resíduos produzidos e os problemas ambientais que a sua eliminação levanta tornam necessário a escolha de métodos que, por um lado, não ponham em risco a saúde pública nem poluam o ambiente e, por outro, sejam economicamente viáveis.

Em Portugal, a correcta eliminação dos resíduos é uma tarefa por vezes ignorada verificando-se, na maioria dos casos, a sua acumulação no solo sem quaisquer tipos de cuidados no sentido de se evitarem problemas de ordem ambiental.

Neste contexto, o conceito de aterro sanitário como método controlado para deposição de resíduos tem suscitado um crescente interesse, não só porque obedece a um conjunto de regras e técnicas bem definidas que tornam mínimo o impacte ambiental (negativo), mas também porque se trata de um método sempre necessário,

quer como solução única, quer para colocação dos refugos resultantes da aplicação de técnicas como a incineração ou a compostagem.

À semelhança do que acontece na realização de outros empreendimentos na construção de um aterro sanitário, os aspectos geológico-geotécnicos desempenham um importante papel no sentido de se conhecer e compreender as características do terreno por forma a garantir que o seu projecto, construção e operação se efectue com o máximo de economia e segurança.

2 - CONDUÇÃO DO ESTUDO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO

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

Os estudos geológicos e geotécnicos devem ser conduzidos por fases recorrendo-se a métodos de reconhecimento sucessivamente mais sofisticados, de modo a obter-se um conhecimento progressivamente mais profundo das formações geológicas interessadas pela obra. Tais estudos devem responder às questões levantadas nas diferentes fases do empreendimento e devem ser dados por concluídos logo que seja recolhida a informação requerida.

No quadro I apresenta-se uma síntese das principais actividades que é possível desenvolver ao longo das diferentes fases do estudo geológico-geotécnico de um aterro sanitário.

De um modo geral, o trabalho inicia-se pela pesquisa dos potenciais locais para a instalação do aterro sanitário, em função da localização óptima e disponibilidade de solo. Esta fase constitui o estudo de viabilidade e consiste fundamentalmente na análise de vários elementos (topográficos, hidrogeológicos, geológicos, sismológicos, geomorfológicos, estudos geotécnicos anteriores, etc.) com base em documentos existentes. Este estudo é geralmente complementado pelo reconhecimento geológico de superfície e pela interpretação de fotografia aérea não se recorrendo, regra geral, a trabalhos de prospecção mecânica.

Quadro I - Principais actividades a desenvolver nas diferentes fases do estudo geológico-geotécnico de um aterro sanitário (modificado de Quinta Ferreira, 1990).

Fases do empreendimento	Possíveis actividades a desenvolver	Tipo de documento
Estudo de viabilidade	<ul style="list-style-type: none"> •Análise dos elementos existentes (hidrogeológicos, geológicos, topográficos, sismológicos, etc) •Reconhecimento geológico de superfície •Interpretação de fotografia aérea •Perfis geológicos 	Relatório preliminar
Anteprojecto	<ul style="list-style-type: none"> •Estudos hidrogeológicos gerais •Prospecção geofísica •Prospecção mecânica •Ensaio laboratoriais e <i>in situ</i> •Caracterização expedita dos materiais de impermeabilização e cobertura 	Relatório provisório
Projecto	<ul style="list-style-type: none"> •Estudos hidrogeológicos de pormenor (piezómetros, poços experimentais, diagrfias, ensaios de permeabilidade <i>in situ</i>, etc.) •Prospecção mecânica (continuação) •Ensaio laboratoriais complementares •Estudo pormenorizado dos materiais de impermeabilização 	Relatório final
Construção	<ul style="list-style-type: none"> • Ensaio suplementares •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.) 	-

Indicações sobre as características hidrogeológicas da região podem ser obtidas através da localização e análise dos aquíferos mais importantes (estimativa das suas dimensões, parâmetros hidráulicos, zonas recarga e descarga e qualidade das suas águas).

A fase de anteprojecto poderá iniciar-se com a utilização de métodos geofísicos de modo a obter-se uma avaliação geral, tanto das características hidrogeológicas como da estrutura do maciço de fundação. A sua interpretação deve ser confirmada pela prospecção directa procedendo-se, geralmente, à execução de um programa de prospecção mecânica e ensaios.

Um conhecimento mais profundo das condições hidrogeológicas do local é obtido através do estudo mais pormenorizado dos aquíferos definidos na fase de reconhecimento anterior, contemplando já indicações sobre a espessura das formações aquíferas, profundidades, oscilações dos níveis aquíferos, etc. Nesta fase é essencial proceder-se à inventariação dos pontos de água (captações, poços, nascentes, etc.). Pode igualmente justificar-se a execução de sondagens mecânicas, ensaios de bombagem ou ensaios específicos.

A informação obtida durante esta fase de reconhecimento é utilizada para se proceder a um zonamento geotécnico preliminar da área em estudo. Genericamente pode dizer-se que esta fase termina com a escolha da solução técnica mais adequada e com o pré-dimensionamento do aterro sanitário.

Na fase de projecto o zonamento geotécnico iniciado na fase anterior é complementado sobretudo à custa da realização de ensaios de permeabilidade complementares (*in situ* e laboratoriais) e pela 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 global do empreendimento.

As conclusões obtidas durante o decorrer do estudo geológico-geotécnico servem de base à elaboração do relatório final, o qual, deve no mínimo abordar os seguintes aspectos (HMSO, 1986):

- descrição e representação das estruturas geológicas;
- presença de formações geológicas de baixa permeabilidade (profundidade, espessura, continuidade horizontal, capacidade de adsorção, etc.);

- descrição do regime hidrológico subterrâneo e permeabilidade do terreno adjacente ao aterro sanitário;
- características mecânicas da fundação; 6
- adequabilidade do subsolo como barreira natural à percolação do gás e lixiviados;
- estabilidade dos taludes (naturais ou artificiais); 6
- possível existência de falhas activas, subsidência, risco de colapso, risco sísmico e outros fenómenos perigosos;
- localização de possíveis zonas de empréstimo;

Na fase de construção é por vezes necessário proceder à realização de estudos suplementares que respondam a dificuldades imprevistas entretanto surgidas. São, então, efectuadas aferições dos parâmetros de projecto e realizados os ajustes considerados necessários.

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

Por fim, na fase de abandono, após a selagem do aterro sanitário deve proceder-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.

3 - ASPECTOS GEOLÓGICO-GEOTÉCNICOS

3.1 - Adequabilidade do local

A adequabilidade de um local para instalação de um aterro sanitário é fortemente condicionada pelas suas características geológicas e hidrogeológicas. De um modo geral, as formações geológicas podem agrupar-se em três classes principais de acordo com o grau de adequabilidade que apresentam (Crawford e Smith, 1985).

Na Classe I os aterros sanitários ficam confinados em camadas geológicas de baixa permeabilidade (i.e. $K < 10^{-9} \text{m/s}$ ou $0,1 \text{mm/dia}$) 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). Os locais incluídos nesta classe são os mais indicados à construção de aterros sanitários.

A classe II corresponde a um aterro no qual o processo dominante é a atenuação e dispersão dos lixiviados. A instalação do aterro sanitário 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 areno-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-se, assim, os efeitos negativos que podem causar nas águas subterrâneas e terrenos adjacentes. 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. Esta classe de locais pode também alojar aterros sanitários devendo, neste caso, ser tomadas medidas que garantam que o aterro não vai causar problemas de ordem ambiental.

Identificam-se com a classe III 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.

3.2 - Caracterização dos materiais naturais

Foi já referido em secção anterior que as características das formações geológicas são fundamentais no processo de selecção do local, pelo que no quadro II se apresenta uma síntese dos principais ensaios a realizar em laboratório, a fim de avaliar a adequabilidade do subsolo como barreira natural à percolação de gases e lixiviados.

Quadro II - Principais ensaios a realizar para a caracterização dos materiais naturais de impermeabilização (Barroso, 1994).

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 3 metros.
Capacidade de troca cationica	C.E.C. (Meq/100g)	Quanto maior a capacidade de troca cationica do solo mais favorável ele é como barreira à percolação do gás e lixiviados.
Compactação	γ_d máx. e ω ópt.	Recomenda-se que os solos argilosos sejam compactados, em camadas finas, com teores em água ligeiramente superior ao ω ópt.
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).

4 - ASPECTOS CONSTRUTIVOS

A execução de um aterro sanitário altera obviamente as condições do meio e consequentemente gera impactes ambientais. Os problemas mais importantes prendem-se com a formação e migração de gases e lixiviados resultantes das transformações que os resíduos sofrem após confinamento.

Na construção de um aterro sanitário, a preocupação principal deve ser, por isso, a protecção do ambiente contra qualquer tipo de agressão resultante da deposição de resíduos. Nesta perspectiva, torna-se imprescindível proceder ao controlo dos gases e lixiviados, quer no que diz respeito a evitar a sua infiltração e percolação através da base e taludes do aterro, quer na necessidade de proceder à sua captação e drenagem para posterior tratamento.

4.1 - Controlo do gás e lixiviados

Os sistemas de controlo visam impedir o movimento indesejado do gás e podem classificar-se genericamente em activos e passivos. No controle 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). A descrição dos sistemas de controlo de gás não será aqui efectuada por sair do âmbito do presente artigo.

O controlo e remoção dos lixiviados visa a protecção das águas subterrâneas e terrenos subjacentes. Compreende, de um ponto de vista construtivo, os sistemas de impermeabilização da base e taludes laterais do aterro e os sistemas de drenagem (de fundo e superficial).

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, colocados ao longo da base e taludes laterais do aterro sanitário. Tanto os solos argilosos como as geomembranas apresentam vantagens e inconvenientes pelo que, para cada aterro, deve ser utilizado o material que estabeleça o melhor compromisso. Refira-se que os solos argilosos apresentam propriedades plásticas que possibilitam a absorção dos assentamentos diferenciais ocorrentes no aterro sanitário, possuem capacidades de atenuação e 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 que as torna vulneráveis ao rasgamento e punçoamento (Daniel e Shacklford, 1987). Saliente-

-se a especial atenção que, no caso das geomembranas, deve ser dada ao modo de efectuar as ligações entre as diferentes telas (juntas), pois a não estanqueidade destas pode ser a responsável pelo mau funcionamento dos sistemas de impermeabilização com todas as consequências negativas daí decorrentes (Attewell, 1992).

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.

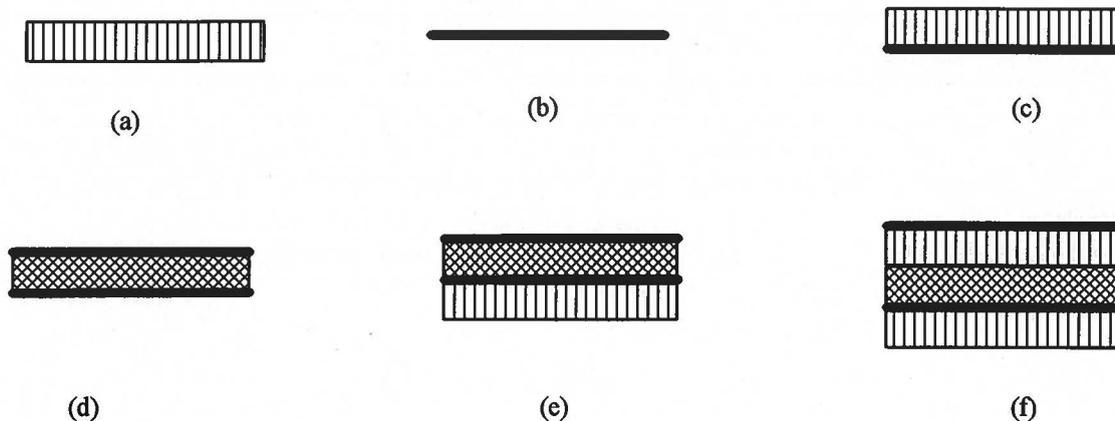
Recentemente, tem-se verificado que a conjugação de geossintéticos com solos naturais constitui a solução mais eficaz. Desenvolveram-se, assim, os sistemas de impermeabilização-drenagem mistos, também chamados de geocompósitos, os quais são formados simultaneamente por geossintéticos (geomembranas, geotêxteis,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

Cada material presente num geocompósito possui uma função específica que no seu conjunto se complementam. As principais funções dos quatro tipos de geossintéticos mais utilizados nos aterros sanitários são (Chouery-Curtis e Butchko, 1991):

- geomembranas: utilizadas para impermeabilização;
- geotêxteis: essencialmente utilizados na filtragem podendo, ainda, desempenhar as funções de separação ou de drenagem;
- georredes: usadas para drenagem;
- geogrelhas: especialmente usadas para reforço, sendo fundamentalmente 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.

De entre as diversas formas de combinar os materiais para formação de sistemas de impermeabilização-drenagem apresentam-se alguns exemplos na figura I.

utilizados na base e taludes laterais do aterro.



Legenda

Geomembrana



Camada argilosa



Camada drenante*



* A camada drenante pode ser constituída tanto por solos naturais como por geossintéticos.

Fig. I - Tipos de sistemas de impermeabilização-drenagem: (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 de Wallance e Akgun, 1991).

6 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em Portugal existe ainda muito a fazer no sentido de conferir aos resíduos produzidos um destino final adequado, em especial a necessidade de se utilizarem métodos que sejam simultaneamente aceites pelas populações e se mostrem economicamente válidos.

Ao longo do presente artigo abordaram-se fundamentalmente os aspectos geológicos e geotécnicos de uma das soluções possíveis para a eliminação dos resíduos - o aterro sanitário. Procurou-se desta forma chamar a atenção para o importante papel que desempenham na construção de um aterro sanitário controlado.

7 - BIBLIOGRAFIA

- ATTEWELL, P. (1992) - "Notes on waste management". Palestra integrada no curso *aterros sobre solos moles* realizado no Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.
- BARROSO, M. C. P. (1994) - "Dimensionamento e impacte ambiental de aterros sanitários". Tese apresentada à Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra para obtenção do grau de Mestre.
- CHOUERY-CURTIS, V. E. e BUTCHKO, S. T. (1991) - "Innovative use of structural geogrids in waste containment applications". Third International Landfill Symposium Proceedings, 14-18 October 1991, Cagliari, Italy, Vol.1, pp.548-561.
- CRAWFORD, J. F. e SMITH, P.G. (1985) - "Landfill technology". Butterworths. Borough Green, Sevenoaks, Kent, TN 158 PH, England.
- DANIEL, E. D. e SHACKELFORD (1987) - "Containment of landfill leachate with clay liners". First International Landfill Symposium Proceedings, Cagliari, Italy, 19-23 October 1987, Vol. 2, pp. XXVII-1 a XXVII-24.
- HMSO (1986) - "Landfilling wastes". Waste management paper n° 26, Department of Environment, London.
- MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT RT DU CADRE DE VIE (1981) - "La décharge contrôlée de résidus urbains". Cahiers Techniques de la direction de la prévention des pollutions.
- OTTO (1987) - "Natural lining materials" - First International Landfill Symposium Proceedings, Cagliari, Italy, 19-23 October 1987, Vol. 2, pp.XXVI-1 a XXVI-7.
- 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 Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra para obtenção do grau de Doutor.
- WALLANCE, R. B. e AKGUN, H. (1991) - "Leakage in double lined systems: The containment objective". Third International Landfill Symposium Proceedings, 14-18 October 1991, Cagliari, Italy, Vol.1, pp. 731 - 740.