

As camadas e componentes minerais dos aterros de resíduos sólidos urbanos e industriais

Mineral layers and components of municipal and industrial solid waste landfills

Fernando Pardo de Santayana*

RESUMO - Apresentam-se, neste artigo, as camadas e componentes minerais das infra-estruturas de confinamento dos resíduos sólidos urbanos e industriais. Descrevem-se os tipos de solos que se podem utilizar e as diversas funções que as componentes minerais cumprem nos aterros de resíduos: camadas de fundação, diques perimetrais e de separação de células, barreiras minerais nos sistemas de revestimento, camadas de drenagem, filtros, camadas de cobertura, camadas de protecção a geossintéticos, etc. Apresentam-se os requisitos técnicos exigidos normalmente para a construção destas componentes, fazendo referência à legislação em vigor. Referem-se, também, as actividades de garantia da qualidade da construção que dizem respeito aos solos, destacando especialmente as relativas às camadas de solos argilosos compactados.

SYNOPSIS – Mineral layers and components of the urban and industrial solid waste containment systems are presented in this paper. The natural soils used and the several tasks the mineral components perform in the landfills (foundation layers, boundary and internal berms, mineral barriers of containment systems, drainage layers, filters, cover layers, protection layers for geosynthetics, etc.) are also described. Technical specifications normally required for construction of these components are detailed, making reference to the applicable legislation. Finally, construction quality assurance activities regarding the natural soil components are briefly described, pointing up those related to compacted clay liners.

Dr. Eng. Civil, Investigador
Principal, LNEC, Lisboa,
Email: fpardo@lnec.pt

Palavras-chave – Aterro de resíduos; camada mineral; barreira mineral; argila compactada; garantia da qualidade da construção.

1 - INTRODUÇÃO

A instalação, a exploração, o encerramento e a manutenção pós-encerramento de aterros destinados a resíduos é regulada actualmente, no ordenamento jurídico português, pelo Decreto-Lei nº 152/2002, o qual transpõe a Directiva europeia nº 1999/31/CE. Este Decreto-Lei estabelece as características técnicas específicas para cada classe de aterros (para resíduos inertes; para resíduos não perigosos - resíduos sólidos urbanos e industriais banais; e para resíduos perigosos) e os requisitos gerais que devem ser observados na sua concepção, construção, exploração, encerramento e manutenção pós-encerramento. No Anexo II do mencionado diploma, referem-se as condições gerais e requisitos mínimos relativos ao sistema de protecção ambiental passiva e activa (na base e taludes interiores do aterro) e ao sistema de encerramento.

Na construção dos sistemas de confinamento dos aterros de resíduos utilizam-se camadas minerais e geossintéticos. A utilização destes últimos oferece, relativamente aos solos naturais, vantagens tais como facilidade e rapidez de colocação, homogeneidade do material e aumento da capacidade de armazenamento de resíduos. Porém, em relação às camadas de solos, os geossintéticos apresentam também desvantagens para determinadas aplicações, com frequência derivadas, precisamente, da sua reduzida espessura. Assim, em relação à constituição do sistema de segurança ambiental passiva, quando as condições naturais assim o requerem, as normas de diferentes países exigem um reforço formado por uma camada de solos argilosos compactados. Esta camada, comparada com um geossintético bentonítico, apresenta uma menor vulnerabilidade à danificação mecânica e uma maior capacidade de atenuação do transporte e da retenção de poluentes por difusão e absorção, nomeadamente a longo prazo. De salientar, também, que os geossintéticos bentoníticos podem apresentar problemas adicionais de estabilidade nos taludes dos aterros, devido à reduzida resistência da bentonite quando hidratada.

Entre as componentes das infra-estruturas de confinamento de resíduos constituídas por solos podem incluir-se: o terreno de fundação; os diques ou banquetas perimetrais e internos; as camadas de solos argilosos compactados dos sistemas de revestimento; as camadas granulares dos sistemas de drenagem; as camadas de pavimentação das rampas de acesso e das vias internas do aterro; e as camadas de solos de cobertura dos sistemas de encerramento. Analisam-se seguidamente as características destas componentes.

2 - O TERRENO DE FUNDAÇÃO

2.1 - Funções e requisitos

Nas infra-estruturas de confinamento de resíduos sólidos, o terreno de fundação desempenha funções mecânicas e de protecção ambiental.

Do ponto de vista mecânico, a estabilidade ao deslizamento deve ser assegurada nas diferentes fases da obra. Alguns casos de acidentes sérios por deslizamento neste tipo de obras ocorreram precisamente por ruptura do terreno de fundação. Em primeiro lugar, a fundação deve proporcionar uma superfície de apoio estruturalmente estável e um contacto satisfatório com as componentes do aterro sobrejacentes, nomeadamente com o revestimento de fundo. Deve suportar as cargas transmitidas pelo aterro e resíduos, e experimentando assentamentos e deslocamentos, totais e diferenciais, compatíveis com um correcto funcionamento do sistema de revestimento de fundo e das outras componentes. Em zonas sísmicas, a fundação deve ser capaz de resistir às acelerações horizontais e verticais dos sismos de projecto, e o risco de liquefacção deve, igualmente, ser analisado. As pressões intersticiais e o regime de infiltrações no terreno de fundação devem, também, ser tidos em conta, e, na fase de projecto, devem prever-se as medidas necessárias para o seu controlo.

Do ponto de vista da protecção ambiental, tanto na Directiva europeia, como no Decreto-Lei anteriormente referidos, nos aterros destinados a resíduos não perigosos, é exigida a existência duma barreira de segurança passiva na base e nos taludes interiores do aterro formada por uma camada mineral que satisfaça as condições de permeabilidade e espessura de efeito combinado, em termos de protecção do solo e das águas subterrâneas e de superfície, pelo menos equivalente à que resulta dum coeficiente de permeabilidade, k , menor ou igual que 1×10^{-9} m/s e espessura maior ou igual que 1 m (5 m, no caso de aterros para resíduos perigosos). Quando as características geológicas do terreno de fundação não oferecem naturalmente as condições atrás descritas, é necessário construir um reforço da barreira de protecção que assegure uma protecção equivalente, o que normalmente é efectuado por meio da construção de uma camada de solos adequados a este fim.

No que diz respeito à necessidade de um bom contacto mecânico entre o aterro e o terreno de fundação, nos casos em que resulta difícil obter uma superfície regular e homogénea de escavação no terreno natural, pode ser necessário colocar uma camada de regularização de solos compactados sobre a totalidade, sobre parte ou sobre determinados pontos concretos da área ocupada pelo leito do aterro de resíduos.

A superfície de apoio obtém-se, normalmente, por escavação do terreno natural, de forma a

eliminar, no mínimo, as camadas superficiais de terra vegetal e de baixa consistência até atingir uma profundidade de características satisfatórias. Em aterros de resíduos do tipo enterrados ou semienterrados, escava-se ainda mais, até à profundidade especificada no projecto para situar o leito do aterro (Figura 1), o que pode resultar do interesse em atingir uma determinada formação geológica de características adequadas para constituir a barreira de protecção ambiental passiva, ou para criar um gradiente hidráulico negativo, ou seja, dirigido do exterior para o interior do aterro.

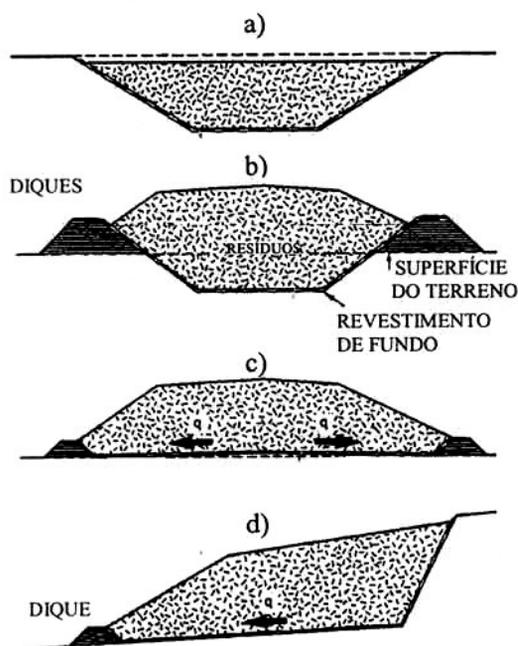


Fig. 1 - Tipologia de aterros de resíduos segundo a relação entre a base do aterro e a superfície do terreno: a) enterrado; b) semienterrado; c) não enterrado; d) em encosta.

2.2 - Reconhecimento do terreno de fundação

Para uma adequada elaboração do projecto, deve realizar-se um reconhecimento geotécnico específico da fundação, considerando a localização exacta do aterro de resíduos, a sua configuração e dimensões, as cotas de fundação, a posição relativa da cobertura final relativamente à superfície original do terreno, as cargas exercidas sobre a fundação, as tolerâncias preliminares de assentamentos e as alternativas de projecto para a fundação. O reconhecimento deve estabelecer as propriedades geotécnicas do terreno no local e as características geológicas, hidrogeológicas e sísmicas com influência significativa na função barreira, bem como na capacidade de suporte da fundação, na estabilidade dos taludes e nos assentamentos ou potenciais levantamentos do leito do aterro. A intensidade do reconhecimento depende das características e complexidade das condições geotécnicas locais.

2.3 - Análise da fundação

A estabilidade da fundação deve ser verificada nas diferentes fases de construção, exploração e pós-encerramento. As análises devem incluir o cálculo das tensões, deformações e assentamentos no terreno, a análise da capacidade de suporte da fundação, a verificação da estabilidade frente a potenciais superfícies de rotura através da fundação, e, em função das características específicas do local, outra série de análises tais como a avaliação do potencial de liquefacção do terreno de fundação, a análise das pressões intersticiais e das infiltrações, ou a possibilidade de subsidências, dissoluções e erosões internas. As análises devem basear-se nas condições do terreno, deduzidas a partir dos dados geológicos, geotécnicos, hidrogeológicos e sísmicos, e nas características de projecto do aterro, nomeadamente localização, topografia inicial e final, configuração, dimensões, cotas de fundação, cargas e sobrecargas, características e volumes dos resíduos e restantes constituintes.

2.4 - Assentamentos

Deve efectuar-se uma análise dos assentamentos totais e diferenciais previstos na fundação devidos às cargas máximas de projecto ou às situações menos favoráveis durante as diferentes fases. Os resultados desta análise servem para avaliar a capacidade dos sistemas de revestimento de fundo, e de drenagem e captação de lixiviados, para manter a sua integridade e funcionalidade. Na análise dos assentamentos devem ter-se em conta as cargas de todas as componentes do aterro de resíduos. A análise proporcionará uma previsão do assentamento total máximo. Os assentamentos diferenciais, mais difíceis de prever e mais críticos para os sistemas de revestimento de fundo e de drenagem de lixiviados, estimam-se, em geral, a partir dos assentamentos totais. No entanto, deve prestar-se especial atenção aos pontos singulares onde os assentamentos diferenciais possam ser particularmente significativos, devido a factores tais como presença de cargas singulares, fundações de poços de captação de lixiviados ou outras estruturas rígidas, ou à heterogeneidade significativa nas características ou no estado do terreno de fundação. Os assentamentos diferenciais devem comparar-se com as inclinações de projecto do sistema de drenagem e captação de lixiviados para garantir a sua funcionalidade. Assentamentos totais de certa importância em terrenos de características homogéneas podem não ser problemáticos para o sistema de revestimento de fundo, sempre que se distribuam uniformemente em toda a superfície da fundação, dando lugar a assentamentos diferenciais moderados; no entanto poderiam causar danos nas ligações ou nos elementos

dos sistemas de drenagem localizados no exterior da área de deposição de resíduos. A técnica de compensação de cargas, elaborando o projecto de tal maneira que o peso do terreno escavado se compense com as cargas do aterro, pode ser eficaz para minimizar assentamentos.

2.5 - Pressões hidrostáticas e infiltrações

A presença de heterogeneidades no terreno de fundação tais como: grandes fendas na superfície rochosa ou camadas e veios de areia nos depósitos de solos, pode ser motivo do aparecimento de caminhos preferenciais para a migração de lixiviados, no caso de rotura do revestimento de fundo, e pode causar problemas de erosão interna. Adicionalmente, a existência de zonas brandas na fundação criadas pela rede de filtração pode ocasionar assentamentos diferenciais, tensões inadmissíveis e fissuras no revestimento. A aparição de fendas pode dever-se, por sua vez, à existência de pressões hidrostáticas excessivas, superiores às pressões de confinamento. As soluções para estes problemas incluem diversos sistemas para reduzir as pressões hidrostáticas na fundação, tais como valas de drenagem, poços de bombagem, ou cortinas de estanqueidade. As infiltrações podem controlar-se mediante a injeção das fendas e fracturas com bentonite, ou mediante a selagem com camadas de argila compactada das zonas da fundação onde aparecem os veios ou lenticulas de solos permeáveis.

2.6 - Capacidade de suporte

A capacidade da fundação para suportar o peso, em conjunto, do aterro de resíduos na situação de carga máxima deve ser verificada. Esta comprovação é particularmente importante no caso de terrenos de fundação compostos por solos brandos com espessura significativa. Deve verificar-se, igualmente, a capacidade de suporte da fundação nas diferentes fases de exploração do aterro, nomeadamente nas situações correspondentes à finalização do enchimento de determinados alvéolos do aterro e antes de iniciar a exploração dos alvéolos contíguos. O projecto deve incluir o cálculo da capacidade de suporte das fundações de todas as estruturas singulares, tais como tanques, estações de elevação de lixiviados, etc. Uma vez verificada a capacidade de suporte, devem calcular-se os assentamentos previstos nas diferentes condições de carga, de forma a poder compará-los com os valores admissíveis.

2.7 - Escavações

Grande parte dos aterros de resíduos constroem-se, pelo menos parcialmente, abaixo da superfície inicial do terreno, e, portanto, a realização

de escavações é necessária para atingir as cotas de projecto do leito do aterro. A estabilidade destas escavações deve ser analisada e, se a altura total dos taludes de escavação superar os três metros, o projecto deve incluir uma análise da estabilidade dos mesmos.

2.8 - Construção

É importante que os projectos dos aterros de resíduos especifiquem as operações construtivas relativas à escavação e preparação do terreno de fundação para garantir o bom desempenho das suas funções. Devem, também, incluir as medidas a adoptar no caso em que os materiais que apareçam no leito de fundação apresentem propriedades inadequadas, bem como os critérios de aceitabilidade dos materiais. Em princípio, todo o material brando, orgânico ou indesejável que apareça no leito da escavação e que não satisfaça as condições de projecto para o material da fundação, deve ser eliminado. Por outro lado, deve prever-se a possível necessidade de recorrer a materiais de empréstimo para construir a superfície da fundação ou para regularizá-la mediante o preenchimento de fendas ou cavidades deixadas pela remoção dos materiais indesejáveis. Normalmente, os requisitos de projecto relativos a estes materiais de empréstimo e à sua colocação em obra são os mesmos que para os materiais utilizados na construção dos diques e banquetas.

3 - DIQUES

As estruturas de confinamento de resíduos incluem diques perimetrais e diques ou banquetas internas de separação de células. Com excepção das soluções inteiramente em escavação, o aterro de resíduos precisará de um dique de contenção perimetral que proporcione estabilidade aos taludes laterais, apoio estável para o sistema de revestimento lateral e ancoragem para determinados elementos dos sistemas de revestimento. Os diques internos, por outro lado, servem para dividir o aterro em várias células, alvéolos ou unidades de deposição. Esta divisão em células oferece vantagens práticas na fase de exploração e evita a exposição do sistema de revestimento de fundo às radiações solares e aos agentes atmosféricos durante prolongados períodos de tempo. Os diques dos aterros de resíduos devem ser cuidadosamente dimensionados para assegurar uma estabilidade suficiente nas situações mais desfavoráveis das fases de construção, exploração e pós-encerramento. Devem utilizar-se os perfis mais críticos, os quais devem ser identificados em função não só da maior altura e inclinação dos taludes, mas também das características do terreno de fundação, examinando aqueles locais onde a resistência dos

solos seja menor, ou onde as pressões hidrostáticas ou os gradientes hidráulicos sejam mais elevados.

Os requisitos relativos aos materiais e à construção dos diques são, em princípio, semelhantes aos de todos os aterros que se projectam para suportar cargas (aterros estruturais). Deve garantir-se o cumprimento das hipóteses adoptadas nas análises de estabilidade relativamente aos materiais, nomeadamente no que diz respeito à sua resistência ao corte e peso volúmico, e ao seu comportamento em termos de deformações. Em princípio, os materiais admissíveis para os diques são os solos naturais relativamente homogêneos, que estejam livres de grandes fragmentos de rocha, matéria orgânica, entulho ou outros objectos estranhos, e que pertençam aos tipos SP, SW, SM, SC, ML, CL, MH ou CH, de acordo com o Sistema Unificado de classificação de solos. Sempre que devidamente justificado, pode utilizar-se outro tipo de materiais, quer no caso de diques homogêneos, quer no caso de diques de estrutura zonada. Contudo, deve evitar-se, em geral, a utilização de solos muito plásticos, expansivos ou de natureza manifestamente evolutiva, particularmente nos taludes. Poderá ser necessário estabelecer uma limitação do tamanho máximo das partículas específica para a zona do dique mais próxima da superfície de contacto com o revestimento de fundo ou lateral, quando o tipo de revestimento assim o exigir.

4 - CAMADAS MINERAIS NO SISTEMA DE CONFINAMENTO DE FUNDO

Conforme referido anteriormente, no caso do terreno de fundação não oferecer naturalmente as condições previstas na legislação europeia e nacional, em termos de barreira de segurança passiva para a protecção do solo e das águas subterrâneas e de superfície, é necessário construir artificialmente um reforço da barreira passiva na base e nos taludes interiores do aterro que assegure uma protecção equivalente. Os componentes típicos desta barreira são as camadas de solos argilosos compactados e os geossintéticos bentoníticos. De acordo com a legislação em vigor, o reforço da barreira de segurança passiva não pode ser de espessura inferior a 0,5 m, tanto nos aterros para resíduos perigosos como para os não perigosos, o que obriga, na prática, à utilização de uma camada de solos argilosos compactados, complementada ou não com um geossintético bentonítico. Para além do sistema de protecção passiva, os aterros destinados a resíduos perigosos e não perigosos devem ser providos, de acordo com o Decreto-Lei nº152/2002, com um sistema de protecção ambiental activa, que inclui uma geomembrana e um sistema de drenagem e recolha de lixiviados. Este sistema deve incluir uma camada mineral drenante de espessura mínima de 0,5 m, com uma condutividade hidráulica de valor igual

ou superior a 10^{-4} m/s e isenta de material calcário. De modo a facilitar a drenagem dos lixiviados, o fundo do aterro deve ter uma inclinação mínima de 2 % em toda a área.

De referir que os sistemas de confinamento na base dos aterros de resíduos podem ser simples (Figura 2) ou duplos, com dois níveis de revestimento, primário e secundário, separados por uma camada de drenagem secundária (sistema de detecção de lixiviados) cuja função é o controlo dos lixiviados que atravessem o primeiro nível de revestimento (Figura 3). Estes revestimentos duplos, embora não exigidos pela legislação actual, resultam muito adequados nos aterros de resíduos perigosos.

5 - CAMADAS MINERAIS NO SISTEMA DE COBERTURA

O principal objectivo do sistema de encerramento ou de cobertura é controlar a infiltração das águas superficiais e consequentemente a produção de lixiviados. O sistema de cobertura deve ainda contribuir para uma contenção e protecção dos resíduos, uma adequada integração paisagística e ainda evitar a migração não controlada do biogás.

Essencialmente são utilizados dois tipos diferentes de sistemas de confinamento na cobertura: os sistemas cujo objectivo é minimizar a infiltração de água (e consequentemente minimizar a produção de lixiviados) e os sistemas que, embora limitem a infiltração de água, permitem o escoamento necessário para que se possa desenvolver a degradação anaeróbica dos resíduos. A escolha de um ou outro sistema depende da estratégia que se pretenda adoptar. O primeiro tipo é escolhido quando se pretende minimizar a quantidade de lixiviados e a produção de gás, ou quando se utiliza um sistema de recirculação de lixiviados. O segundo sistema pode ser preferível, no caso de não se utilizar um sistema de recirculação de lixiviados.

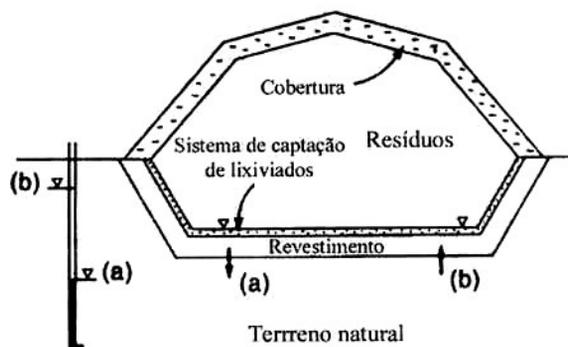


Fig. 2 - Sistema de confinamento de fundo; a) fluxo de advecção para o exterior do aterro; b) fluxo de advecção para o interior do aterro (Rowe *et al.*, 1995).

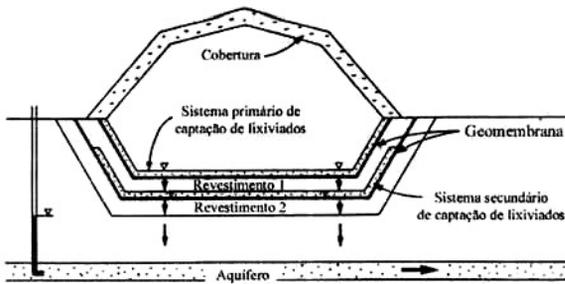


Fig. 3 - Aterro de resíduos com sistema duplo de revestimento de fundo (Rowe *et al.*, 1995).

O sistema de cobertura é constituído por uma combinação de camadas (Figura 4), de diferentes materiais, naturais ou sintéticos, cada uma das quais desempenhando as funções específicas seguintes:

- **camada de regularização:** directamente colocada sobre os resíduos, serve essencialmente de fundação para as camadas subjacentes do sistema de cobertura, protegendo-as das consequências directas dos assentamentos dos resíduos, redistribuindo as cargas e deformações impostas à cobertura;
- **camada de drenagem de biogás:** permite a evacuação do biogás para os pontos de recolha;
- **camada de baixa permeabilidade:** tem por objectivo controlar a infiltração de água nos resíduos;
- **camada de drenagem de água:** permite o escoamento da água infiltrada nas camadas subjacentes, minimizando a carga hidráulica sobre a camada de baixa permeabilidade, e contribuindo dessa forma para aumentar a estabilidade do sistema;
- **camada de filtro:** serve para evitar a colmatção da camada drenante, evitando a passagem de partículas finas das camadas de protecção e cobertura, arrastadas pela percolação da água;
- **camada de protecção vegetativa:** protege as camadas subjacentes da intrusão de animais, raízes de plantas, bem como da acção dos agentes atmosféricos (origem de problemas de secagem/molhagem, congelação, etc.);
- **camada de terras de cobertura:** protege as restantes camadas dos efeitos da erosão e serve para a implantação das raízes das plantas.

A legislação comunitária (Directiva nº 1999/31/CE) e o Decreto-Lei 152/2002, para o sistema de encerramento dos aterros de resíduos perigosos e não perigosos, requerem expressamente a utilização de várias camadas minerais, nomeadamente, uma camada mineral impermeável, uma camada de drenagem de 0,5 m de espessura

mínima e uma camada de cobertura final com materiais terrosos de 1 m de espessura mínima.

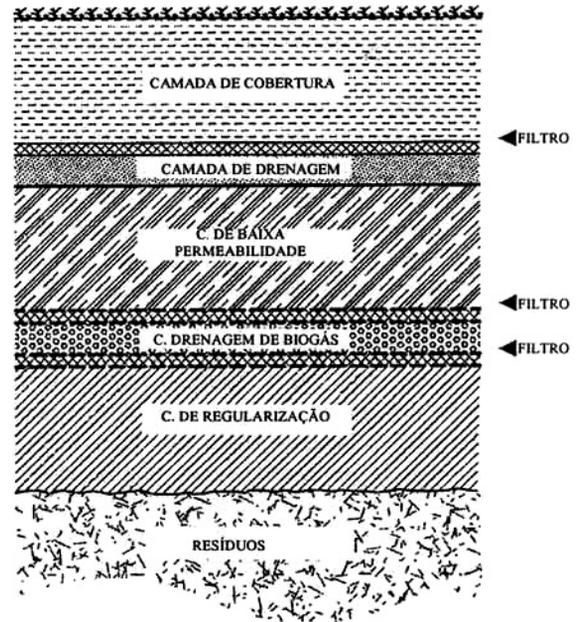


Fig. 4 - Exemplo de camadas de cobertura.

A composição das diferentes camadas do sistema de cobertura depende do tipo de materiais disponíveis, do tipo de resíduo e das condições ambientais locais, devendo ter-se ainda em atenção a minimização da sua manutenção a longo prazo e a futura reutilização do local.

A camada de regularização é normalmente constituída por solos de granulometria grosseira, e a sua espessura deve ser tal que garanta a correcta distribuição da carga e deformações impostas pela cobertura.

A camada de drenagem de biogás deve ter permeabilidade e espessura adequadas à evacuação do biogás. Quando constituídas por materiais minerais, utilizam-se normalmente areias.

Para a camada de baixa permeabilidade podem utilizar-se solos argilosos compactados, preferentemente em combinação com uma geomembrana. Segundo Bonaparte *et al.* (2002), não se deve utilizar um revestimento apenas com solos argilosos compactados no sistema de cobertura devido a que este elemento acaba frequentemente por apresentar danos por dessecação, por assentamentos diferenciais da cobertura, e, eventualmente, por intrusões de raízes e animais, sendo assim preferível, no sistema de cobertura, a utilização de geomembranas, geossintéticos bentoníticos ou combinações destes elementos com o revestimento mineral. As propriedades exigíveis à camada de solos argilosos compactados no sistema de cobertura são, em princípio, as mesmas que no revestimento de

fundo, devendo ter-se em consideração, fundamentalmente, a granulometria e limites de Atterberg, bem como a condutividade hidráulica (permeabilidade) do material compactado.

Para a camada de drenagem podem utilizar-se solos granulares (areias e seixos). De referir que, conforme comentado, segundo a legislação em vigor, a espessura desta camada deve ser superior a 0,5 m. O material da camada de filtro pode ser natural ou sintético.

As camadas de protecção vegetativa e de terras de cobertura devem ter uma espessura, inclinação e características edafológicas (pH, teor e m nutrientes, etc.) compatíveis com o tipo de vegetação e clima locais.

Sendo relativamente frequentes os problemas de deslizamentos nas camadas de cobertura dos aterros, deve prestar-se especial atenção, nos projectos, às análises de estabilidade do sistema de cobertura, tendo em consideração todas as potenciais forças instabilizadoras: peso das camadas, forças de percolação, cargas sísmicas, sobrecargas de equipamentos, etc., e seleccionado adequadamente os parâmetros resistentes dos materiais e das interfaces a partir de ensaios de laboratório, específicos para o projecto. Para garantir a estabilidade do sistema de cobertura, bem como para a sua compatibilidade mecânica com os outros constituintes do aterro de resíduos, é necessária a existência de uma adequada resistência ou atrito na interface entre elementos contíguos (resistência ao corte interfacial). São especialmente críticas as interfaces entre as geomembranas e outros elementos tais como as camadas de argila compactada húmida, os geotêxteis ou as georredes. O projecto deve ter em conta a necessidade de compatibilidade mecânica entre os ângulos de inclinação dos taludes e o atrito exigido nas interfaces entre os elementos dos sistemas de revestimento. Esta compatibilidade pode afectar a selecção do tipo de geomembranas (lisas ou rugosas) e outros materiais, ou obrigar à introdução de elementos de reforço ou à modificação da inclinação dos taludes. A selecção dos parâmetros de resistência ao corte interfacial deve basear-se em ensaios de laboratório (ensaios em caixa de corte directo, principalmente), tendo em conta as condições previstas no local (temperatura, tensões) e a possibilidade de modificações químicas a longo prazo. A título indicativo, apresentam-se, no Quadro 1, alguns valores típicos do ângulo de atrito entre solos e geossintéticos (Sharma e Sangeeta, 1994; Daniel, 1993).

Com particular cuidado deve-se, igualmente, estudar o funcionamento da drenagem na cobertura, bem como a protecção contra a erosão superficial. É recomendável, em todo o caso, prever a utilização de taludes suaves providos de banquetas intermédias.

Quadro 1 - Ângulos de atrito entre geossintéticos e solos

Geossintéticos	Ângulo de atrito	
	Areia	Argila
geomembrana PVC	20°-30°	6°-15°
geomembrana PEAD	17°-25°	5°-10°
geomembrana PEAD rugosa	30°-40°	9°-15°
geotêxtil	22°-40°	15°-26° ou parâmetros resistentes do solo

6 - SOLOS GRANULARES

Os solos granulares (de origem sedimentária ou produzidos por britagem) utilizam-se habitualmente nos aterros de resíduos para as seguintes funções:

- camada de drenagem do sistema de cobertura, para reduzir o potencial hidráulico sobre a barreira subjacente e reduzir as forças de infiltração sobre o sistema de cobertura;
- camada de recolha de gás no sistema de cobertura;
- camada de drenagem de lixiviados no sistema de confinamento basal, para recolher e conduzir os lixiviados para o tratamento, e para recolher as águas pluviais das células que ainda não entraram em exploração;
- camada de detecção de fugas e captação de lixiviados nos sistemas de revestimento duplos;
- valas de drenagem (por exemplo, no sistema de drenagem sub-superficial, no sistema de drenagem de águas pluviais periférico, ou no próprio sistema de drenagem de lixiviados).

Relativamente à camada de drenagem de lixiviados, de acordo com a legislação actual, no fundo do aterro, que deve ter uma inclinação mínima de 2 % em toda a área, deve utilizar-se uma camada de solos granulares de espessura mínima de 0,5 m, de permeabilidade hidráulica de valor igual ou superior a 10^{-4} m/s e isenta de material calcário. A utilização de materiais granulares nos taludes interiores do aterro pode ser, por vezes, dificultada por motivos de estabilidade, optando-se, com frequência, pela utilização de geossintéticos (geocompósitos drenantes).

Quando as camadas de drenagem de solos granulares se colocam sobre geomembranas, devem evitar-se os danos mecânicos nestas últimas, quer especificando convenientemente o material da camada de drenagem, quer interpondo uma camada de protecção (solo, geossintético ou ambos).

Os solos utilizados no sistema de drenagem devem ser capazes de manter uma elevada permeabilidade, de valor igual ou superior a 10^{-4} m/s, a longo prazo, sem que ocorra colmatação. São normalmente seixos ou areias relativamente limpos, devendo-se limitar a percentagem de finos (partículas

de diâmetro equivalente inferior a 75 microns). Como é sobejamente conhecido, uma pequena percentagem de finos pode reduzir a permeabilidade de um material drenante, areia ou seixo, em várias ordens de grandeza.

Normalmente são exigidas as seguintes especificações granulométricas:

- percentagem de finos (<peneiro #200, ASTM) inferior a 2 a 5%;
- tamanho máximo de partícula limitado a 25-50 mm;
- podem existir outras restrições granulométricas por diversos motivos, por exemplo, por critérios de filtro.

O coeficiente de condutividade hidráulica da camada granular a longo prazo *in situ* (k_f) pode calcular-se a partir de (Bonaparte et al., 2002):

$$k_f = k_l / (F_{cq} F_{cb}) \quad (1)$$

onde k_l é a condutividade hidráulica medida em laboratório (m/s); F_{cq} é um factor de redução por colmatção química; e F_{cb} é um factor de redução por colmatção biológica.

A espessura e a permeabilidade exigidas à camada de drenagem deveriam estabelecer-se sempre tendo em conta a especificidade do local e dos materiais empregues, e sem adoptar, portanto, os valores mínimos regulamentares sem antes verificar que tais valores são adequados para proporcionar uma capacidade de drenagem adequada, face aos caudais obtidos nas análises de projecto e tendo em consideração um certo factor de segurança para os mesmos.

As camadas de drenagem requerem, normalmente, a colocação de uma camada de filtro, a qual pode ser um geossintético ou um material granular. As funções do filtro resumem-se da seguinte maneira:

- o filtro deve evitar a passagem de quantidades significativas de solo;
- o filtro deve possuir uma permeabilidade relativamente elevada, maior que o solo ou materiais adjacente que está a reter;
- o material granular do filtro não deve migrar, em quantidades significativas, para a camada drenante.

Quando se trata de solos, são utilizados habitualmente critérios de filtro tais como:

- relação granulométrica entre o solo a reter e o filtro:

$$4 D_{15\text{solo}} \leq D_{15\text{filtro}} \leq (4 \text{ a } 5) D_{85\text{solo}} \quad (2)$$

- relação granulométrica entre o filtro e o material drenante:

$$4 D_{15\text{filtro}} \leq D_{15\text{dreno}} \leq (4 \text{ a } 5) D_{85\text{filtro}} \quad (3)$$

No caso de camadas filtrantes entre resíduos e camadas de drenagem de lixiviados, o projecto dos filtros complica-se de forma significativa. Em tais casos os critérios de filtro acima referidos podem ser modificados de modo a satisfazer as especificações locais. É previsível que se produza uma certa redução na permeabilidade do filtro, a qual será aceitável sempre que não prejudique as funções a que se destina.

Aos materiais granulares da camada de drenagem de lixiviados, e do seu respectivo filtro, são impostas, frequentemente, limitações de tipo mineralógico. Em primeiro lugar, os materiais granulares dos drenos e filtros devem apresentar uma resistência mecânica suficiente para resistir ao atrito que se produz entre as partículas e evitar a formação de finos em quantidades significativas. A alterabilidade dos materiais granulares, ou seja, a aptidão para produzir partículas finas, num prazo mais ou menos longo, com risco de colmatção de drenos e filtros, depende, em primeiro lugar, da composição mineralógica. As rochas xistosas, com presença de minerais filíticos desagregáveis, são normalmente excluídas como materiais para filtros e drenos. Por outro lado, também a quantidade de carbonato de cálcio ou outros carbonatos nos materiais de drenagem pode estar limitada pela legislação e pelas especificações do projecto, embora as opiniões sobre estas restrições não sejam ainda totalmente unânimes. As razões para as mesmas partem do facto de que os carbonatos são ligeiramente solúveis em água e podem dissolver-se em determinadas zonas do sistema de drenagem e depositar-se em outras, provocando colmatção. Os lixiviados podem agudizar a solubilidade dos carbonatos. Assim, é frequente limitar a um máximo de 10% o teor em carbonatos no material granular. De acordo com o Decreto-Lei 152/2002 a camada de drenagem deve ser isenta de material calcário.

A colocação de material britado (partículas com formas angulosas) de tamanho grosseiro directamente sobre uma geomembrana pode ocasionar, nesta, danos por punçoamento. Devem, pois, impor-se restrições ao tipo e características do material granular das camadas de drenagem localizadas directamente acima das geomembranas, ou então obrigar à colocação de uma camada intermédia de protecção que evite os problemas de punçoamento.

7 - SOLOS ARGILOSOS COMPACTADOS

7.1 - Considerações gerais

As camadas de solos argilosos compactados utilizam-se como reforço da barreira de segurança passiva no fundo e lados dos aterros de resíduos, para controlar a fuga de lixiviados para o terreno natural. Também se utilizam na cobertura final do

aterro, para reduzir as infiltrações de água para o interior do mesmo.

O transporte de contaminantes através das camadas de revestimento (Roque, 2001) é governado por mecanismos de advecção, difusão, dispersão e retardamento (sorção, precipitação química, etc.). As camadas de argila constituem uma barreira ao fluxo de líquidos como consequência, fundamentalmente, da sua baixa permeabilidade. Por outro lado, a argila pode actuar como um importante meio para a atenuação de algumas substâncias contaminantes através de processos de absorção, tais como: o intercâmbio iónico, a precipitação de metais pesados e a interacção de poluentes orgânicos com a matéria orgânica do solo, e também mediante processos de biodegradação.

As substâncias contaminantes, presentes nos resíduos, podem atravessar a barreira de confinamento basicamente mediante dois mecanismos diferenciados: por advecção, ou seja, o movimento dos contaminantes devido ao movimento da água no terreno; e por difusão, ou seja, o deslocamento dos poluentes desde zonas de elevada concentração para zonas de inferior concentração. O fluxo de contaminantes através da barreira depende, portanto, da condutividade hidráulica, do gradiente hidráulico e do coeficiente de difusão da mesma.

O fluxo por advecção dos contaminantes depende do gradiente hidráulico, ou seja, do posicionamento relativo entre o nível de lixiviados no interior do aterro e o nível freático no meio envolvente. Se o nível freático no meio envolvente estiver a uma cota mais elevada do que o lixiviado, o gradiente hidráulico seria negativo e o fluxo de água através da barreira dirigir-se-ia do exterior para o interior do aterro, diminuindo assim a fuga de substâncias poluentes. Esta situação ("armadilha hidráulica") pode ser criada intencionalmente em determinados casos na fase de projecto (ver Figura 2), rebaixando convenientemente as cotas da base do aterro (Rowe *et al.*, 1995).

Para conseguir executar um revestimento de solos argilosos compactados de boa qualidade e reduzida permeabilidade, é necessário que os projectos especifiquem devidamente os materiais e os procedimentos de construção e de controlo. Devem utilizar-se solos de baixa condutividade hidráulica, mas também devem satisfazer-se determinados requisitos de compactação e colocação em obra, de modo a obter permeabilidades *in situ* de ordem de grandeza semelhante à determinada em laboratório.

7.2 - Materiais

Para desempenhar a função de barreira hidráulica e minimizar a saída de lixiviados pela base do aterro de resíduos, o revestimento argiloso deve apresentar uma baixa condutividade hidráulica durante períodos prolongados de tempo.

Normalmente é exigida uma permeabilidade inferior a 10^{-9} m/s, e, portanto, os materiais utilizados, uma vez compactados, devem ser capazes de satisfazer esta condição. Outros factores que controlam o comportamento deste tipo de revestimento são a resistência ao corte do solo e o seu potencial de retracção em função do teor em água.

Os tipos de materiais mais frequentemente utilizados nas camadas de revestimento minerais são solos naturais com um certo conteúdo de argila, classificáveis como CL, CH ou SC, segundo o Sistema Unificado de classificação de solos.

Para atingir um coeficiente de permeabilidade inferior a 10^{-9} m/s é necessário especificar determinadas características relativamente aos limites de Atterberg dos solos. Normalmente recomenda-se um valor mínimo do índice de plasticidade (IP) de cerca de 10%. Também é recomendável limitar o valor máximo do índice de plasticidade, de modo a evitar materiais muito plásticos, difíceis de trabalhar em obra e com tendência a formar torrões duros, quando secos, e a tornar-se pegajosos, quando húmidos. É recomendável um limite superior de entre 30 % e 40 % para o IP.

No que diz respeito à granulometria do material, para obter uma permeabilidade inferior a 10^{-9} m/s, recomenda-se normalmente um conteúdo de finos (peneiro #200, ASTM) não inferior a 30%. As partículas grosseiras e fragmentos de rocha podem originar caminhos preferenciais para o fluxo dos lixiviados, pelo que se deve limitar o tamanho máximo de partícula, utilizando-se normalmente um valor entre 25 e 50 mm. Também se deve limitar a percentagem de grossos (material retido pelo peneiro nº 4, ASTM, de 4,75 mm de abertura), recomendando-se um máximo de 30%. Esta última limitação tem a ver com a necessidade de evitar que se formem, durante a construção, bolsas de seixo segregado, não misturado com o material fino, o que dá lugar, obviamente, a um aumento da condutividade hidráulica da camada.

As camadas de solos argilosos compactados devem apresentar um comportamento dúctil, particularmente quando utilizadas em sistemas de cobertura, de forma a poder acompanhar possíveis assentamentos diferenciais. As misturas de argila e areia são materiais muito adequados nos casos em que a resistência à retracção e à fissuração por dessecação são importantes.

Caso os solos locais disponíveis não apresentem propriedades que permitam atingir coeficientes de permeabilidade reduzidos, podem utilizar-se aditivos comerciais de natureza argilosa tais como a bentonite (montmorilonite). O aditivo mais frequente é a bentonite sódica. Pequenas quantidades deste material (5 a 10%) misturadas com solos não coesivos, tais como areias, permitem reduzir a condutividade hidráulica até níveis semelhantes aos dos solos argilosos, ou seja, abaixo dos 10^{-9} m/s. A

maior desvantagem deste aditivo parece ser a sua vulnerabilidade à degradação por contacto com os lixiviados.

Também se utiliza a bentonite cálcica, embora seja mais permeável que a sódica, já que parece ser mais resistente aos agentes químicos. Neste caso é necessário o dobro de quantidade de bentonite para conseguir permeabilidades semelhantes às do solo tratado com bentonite de sódio.

7.3 - Compactação

7.3.1 - Objectivos básicos da compactação

O objectivo da compactação das camadas de revestimento mineral nos aterros de resíduos não é exactamente atingir um determinado peso volúmico. O principal objectivo é remexer os torrões de solo de forma a obter uma massa homogénea e eliminar os poros de grande dimensão entre os torrões argilosos, para além de conseguir um aumento da resistência do solo. O fluxo de água através de solos argilosos compactados produz-se ao longo dos caminhos preferenciais de elevada permeabilidade (defeitos hidráulicos), constituídos pelos vazios entre os torrões, quando o processo de compactação não elimina adequadamente estes defeitos e a sua continuidade (Figura 5). É, portanto, necessário eliminar estes defeitos durante a compactação.

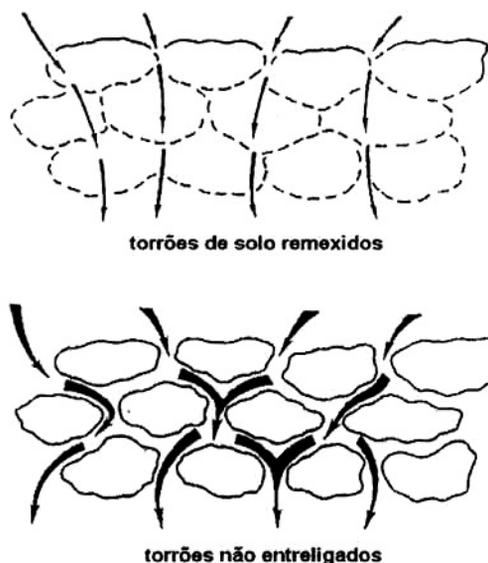


Fig. 5 - Influência da presença de torrões intactos na permeabilidade da camada de solos compactados (Elsbury *et al.*, 1990).

O teor em água, e o método e a energia de compactação são factores de influência decisiva na permeabilidade do revestimento de solos argilosos compactados. As permeabilidades mais baixas conseguem-se compactando o solo com um teor em água acima do óptimo de compactação. Por outro

lado, para eliminar os torrões de argila, deve utilizar-se um sistema de compactação com energia adequada e que produza um efeito de remeximento do solo.

7.3.2 - Relação peso volúmico seco-teor em água de compactação

Para construir correctamente a camada de solos argilosos compactados é necessário especificar os valores admissíveis do teor em água de compactação e do peso volúmico seco a atingir na compactação.

Estes valores delimitam uma "zona aceitável" no gráfico teor em água/peso volúmico seco. É prioritário garantir que a permeabilidade do revestimento é adequada. Assim, a delimitação da zona aceitável de compactação deve responder não só a critérios de resistência, mas, fundamentalmente, de permeabilidade do material e de minimização do potencial de retracção por secagem.

O peso volúmico seco do solo compactado é um parâmetro importante do ponto de vista da resistência, e serve de parâmetro de controlo no caso dos aterros estruturais. No entanto, o peso volúmico seco não pode ser utilizado isoladamente como índice para a permeabilidade, pois não existe correlação entre estes dois parâmetros. De facto, a permeabilidade da argila compactada varia em ordens de grandeza, entre o lado seco e o lado húmido do óptimo de compactação. Um aumento do teor em água de compactação conduz, em geral, a uma diminuição da permeabilidade, devido a um maior grau de dispersão na estrutura do solo argiloso, bem como a um maior esboroamento dos torrões de solo e homogeneização do material (eliminação de macroporos) durante a compactação. Para uma dada energia de compactação, a permeabilidade mais baixa de um solo argiloso consegue-se quando o solo é compactado com um teor em água 1 a 7 %, aproximadamente, superior ao teor óptimo (EPA, 1998).

Um solo compactado com um peso volúmico seco baixo e um elevado teor em água pode satisfazer as exigências relativas à permeabilidade para as camadas de revestimento, mas pode não cumprir os requisitos de resistência e de retracção. A deformação por retracção dos solos argilosos, originada pela secagem do material, cresce nitidamente com o teor em água de compactação.

Um procedimento clássico para definir a zona aceitável de compactação para um determinado tipo de solo é o denominado "método das três curvas" (Seed e Chan, 1959). O método consiste em compactar o material com três energias de compactação diferentes, representativas da gama de energias espectável em obra. Normalmente, utilizam-se as energias dos ensaios Proctor modificado (ou pesado), Proctor normal (ou leve), e "Proctor reduzido" (ensaio semelhante em tudo ao Proctor normal, mas com apenas 3/5 do número de

pancadas deste). Por cada energia compactam-se, por exemplo, cinco provetes, e desenham-se as três curvas de compactação correspondentes. Determina-se, depois, a permeabilidade dos quinze provetes; aqueles que apresentarem uma permeabilidade adequada delimitarão a zona aceitável, do ponto de vista da permeabilidade, no gráfico teor em água/peso volúmico seco. O mesmo procedimento pode utilizar-se para determinar a zona aceitável do ponto de vista da resistência ao corte e de outros factores relevantes. Finalmente, a intersecção das diferentes zonas aceitáveis, segundo os diversos critérios, constitui a zona aceitável definitiva. Nas Figuras 6 e 7 (Daniel, 1993) apresenta-se o fundamento do método descrito.

A eliminação de caminhos preferenciais de percolação formados por irregularidades macroscópicas (macroporos, fissuras, entre outras) durante a compactação é decisiva para atingir permeabilidades *in situ* semelhantes às permeabilidades determinadas em laboratório. As camadas de solos argilosos compactados do lado húmido da linha de óptimos (linha que resulta de unir os pontos óptimos de compactação correspondentes a diferentes energias) não apresentam, normalmente, este tipo de irregularidades e, por conseguinte, a sua permeabilidade *in situ* é reduzida.

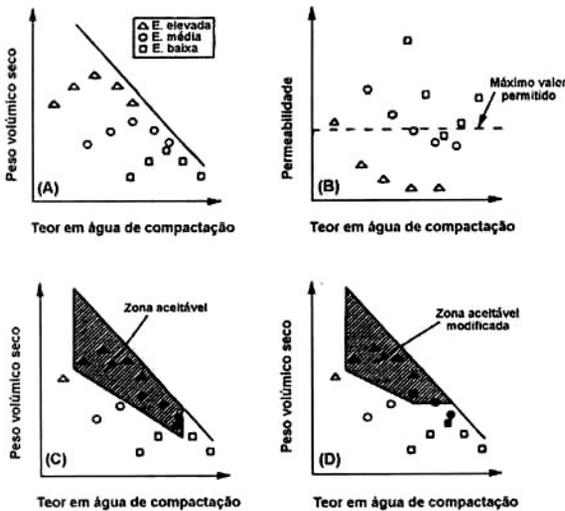


Fig. 6 - Procedimento para estabelecer a zona aceitável de compactação no gráfico peso volúmico seco/teor em água de compactação (Daniel, 1993).

Um factor de grande utilidade para avaliar o comportamento do revestimento em termos de permeabilidade *in situ* é a percentagem de valores de compactação em obra que se situam no lado húmido da linha de óptimos, P_o . Um critério de compactação

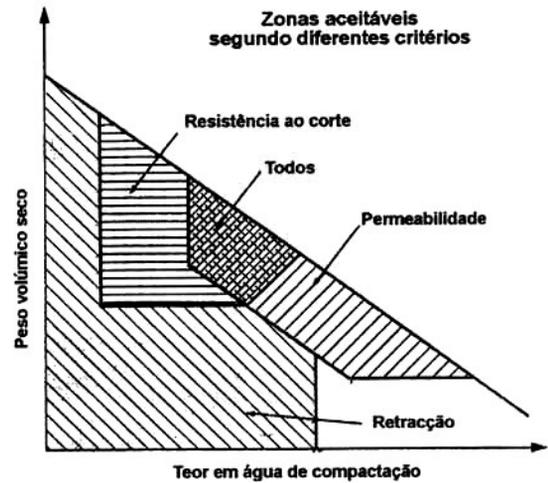


Fig. 7 - Zonas de peso volúmico seco e teor em água de compactação aceitáveis segundo diferentes critérios (Daniel, 1993).

de relativamente fácil aplicação (Blotz *et al.*, 1998) consiste em exigir um P_o mínimo de 70-80%. No caso de se cumprir este requisito, há grandes probabilidades de que a permeabilidade *in situ* do revestimento seja inferior a 10^{-9} m/s. A linha de óptimos de compactação não difere muito para a maior parte dos solos argilosos (Figura 8), visto que o óptimo normalmente corresponde a um grau de saturação de 85%. Porém, deve ter-se presente que quando P_o aumenta, a resistência ao corte do solo frequentemente diminui, incluindo a resistência ao corte no contacto do solo com os geossintéticos. Por este motivo, não se deve exigir arbitrariamente um P_o mínimo excessivamente elevado sem considerar os possíveis efeitos de uma resistência ao corte reduzida.

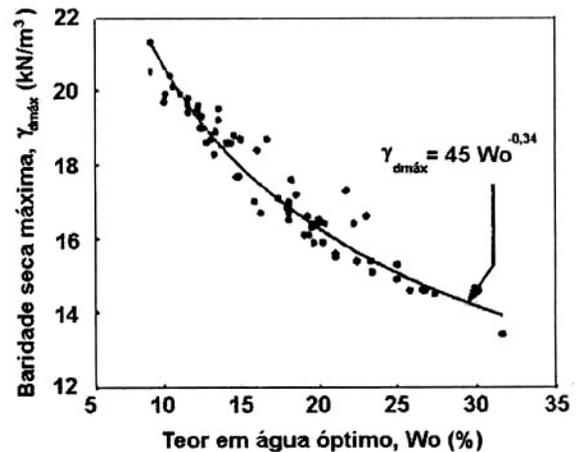


Fig. 8 - Peso volúmico seco máximo e teor em água óptimo dos solos utilizados em numerosos revestimentos nos Estados Unidos e Canadá (Benson *et al.*, 1999).

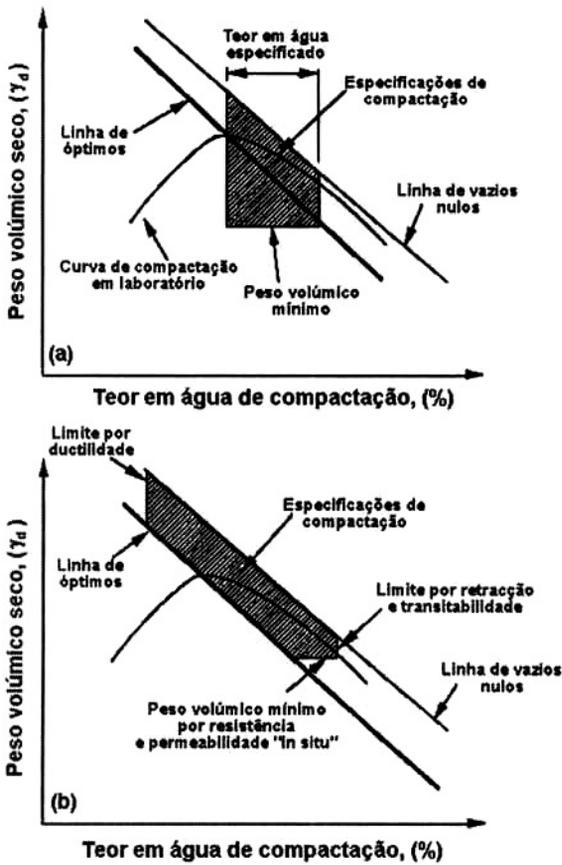


Fig. 9 - Especificações convencionais de compactação (a), e especificações recomendáveis (b) (Benson *et al.*, 1999).

Outras variáveis relacionadas com o processo construtivo, por exemplo, o tempo de hidratação, podem afectar significativamente a permeabilidade *in situ*, mesmo quando as medições de teor em água e peso volúmico indiquem que a compactação se realiza no lado húmido.

Em definitivo, não é, pois, apropriado, embora se utilize com frequência, especificar e construir um revestimento argiloso para atingir um determinado grau de compactação. Na Figura 9 apresenta-se o tipo de especificação que não se recomenda e, juntamente, o tipo de especificação recomendável e mais apropriado.

7.3.3 - Método e energia de compactação

O método utilizado para compactar o revestimento de solos argilosos é um factor importante para conseguir a permeabilidade requerida. A aplicação de energias elevadas de compactação conduz a um incremento do peso volúmico seco do material e a uma diminuição da permeabilidade, para um dado teor em água de compactação (Figura 10).

Assim, utiliza-se normalmente equipamento de compactação pesado (peso superior a 10 t), com vista

a aumentar a energia de compactação. O tipo de compactador mais apropriado é o cilindro de pés de carneiro, com espigões suficientemente longos para atravessar completamente a camada solta e penetrar na camada subjacente. O compactador deve ser capaz de proporcionar uma energia de compactação elevada e uma acção de remeximento do solo, quebrando os torrões de argila compacta e seca, e homogeneizando o material. Nesse sentido, a forma e o comprimento dos pés são importantes, sendo preferíveis os pés estreitos e com comprimentos longos, de 15 a 20 cm, embora possa ser necessário, para alguns solos, passar progressivamente da utilização dos cilindros de pés estreitos a compactadores de pés mais largos e curtos uma vez efectuada uma compactação inicial.

7.3.4 - Espessura e número de camadas

O revestimento deve ser construído numa série de camadas compactadas com espessura suficientemente reduzida, para permitir que a energia de compactação aplicada se transmita adequadamente até ao nível inferior da camada. Para além disso, com vista a conseguir uma boa ligação entre camadas consecutivas, a espessura da camada deve fixar-se em função do comprimento dos espigões do compactador de pés de carneiro. Em princípio, um critério pode ser seleccionar a maior espessura possível (de modo a maximizar a produtividade) que garanta, no entanto, que os pés do compactador atravessam a camada e penetram bem na camada subjacente.

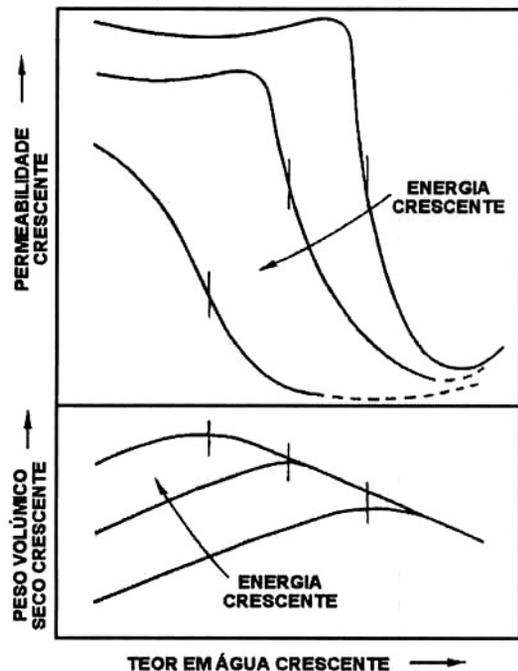


Fig. 10 - Influência do esforço de compactação e do teor em água na permeabilidade dos solos argilosos compactados (Elsbury *et al.*, 1990).

Normalmente são especificadas espessuras de camada compactada de 12 a 25 cm, sendo frequente um valor de 15 cm. Relativamente ao número de camadas, é recomendável especificar um mínimo de 4 camadas, de forma a compensar os efeitos da heterogeneidade na permeabilidade do solo do revestimento.

Os projectos preconizam, normalmente, uma espessura constante e inclinações suaves para a camada de solos argilosos compactados ao longo de toda a base do aterro. Porém, em determinadas zonas, convém prever uma maior espessura de revestimento, nomeadamente, nas zonas mais baixas, onde se localizam tubos de drenagem de lixiviados ou poços de bombagem e, também, junto ao pé dos taludes laterais, de forma a garantir uma boa ligação entre o revestimento de fundo e o dos taludes.

8 - VIAS DE ACESSO

O projecto dos aterros de resíduos deve prever um sistema de vias de acesso e vias internas para permitir a circulação de viaturas pesadas de transporte de materiais de construção, durante a fase construtiva, e de resíduos durante a fase de exploração. Devido à configuração deste tipo de obras, nomeadamente à existência de diques de contenção laterais, uma parte considerável das vias de acesso terão, normalmente, um perfil longitudinal em rampa, de forma a vencer os desníveis e entre os diques e o fundo do aterro, bem como entre os diferentes alvéolos do aterro. As cargas do tráfego podem ser bastante elevadas e estão associadas a um certo grau de esforços dinâmicos devidos, principalmente, às acções de travagem que os condutores das viaturas exercem na descida das rampas de acesso. O principal condicionante de projecto para estas vias é o facto do sistema de revestimento ter de se estender, de forma contínua, desde o topo do talude superior do dique até ao fundo da célula de deposição de resíduos, devendo, portanto, passar, sem interrupções, por baixo do pavimento das vias. É necessário, portanto, estabelecer um perfil estrutural para o pavimento das vias de acesso que garanta, por um lado, a transitabilidade das mesmas e, por outro, a integridade do sistema de confinamento subjacente, tanto durante a construção como durante a exploração (Figura 11).

As vias e rampas de acesso ao interior dos aterros de resíduos devem ter uma largura suficiente para o trânsito de viaturas previsto. É recomendável uma largura mínima de cerca de 5 m. A inclinação longitudinal deve limitar-se para poder permitir a circulação de viaturas pesadas e para reduzir os esforços gerados pelas travagens das mesmas. Esta inclinação não deve ser superior a 12 %, recomendando-se, sempre que possível, adoptar inclinações ainda mais suaves.

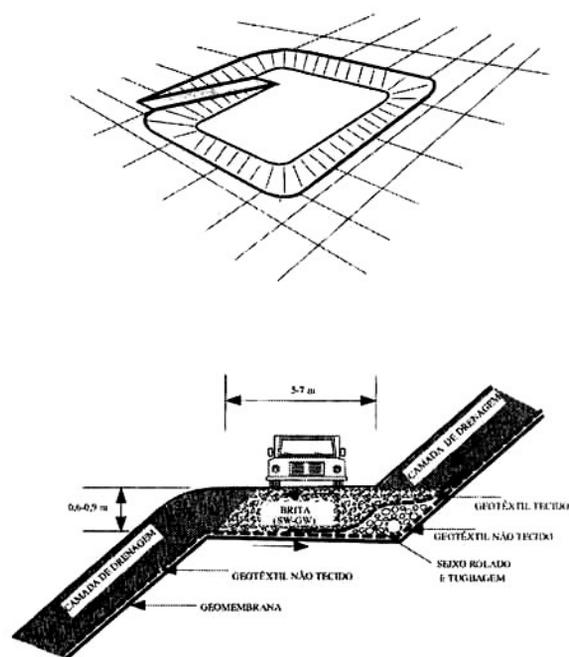


Fig. 11 - Geometria típica e perfil de uma rampa de acesso ao interior do aterro (Koerner, 1997).

As camadas de pavimento a cima do sistema de revestimento do aterro devem ter uma capacidade de suporte e uma espessura suficientes para evitar danos aos componentes deste sistema. É recomendável uma espessura mínima de 0,6 m de pavimento, entre o sistema de revestimento e a superfície do pavimento.

Relativamente ao material utilizado para as camadas de pavimento, deve ser suficientemente resistente e rígido para suportar as cargas previstas, sem deformações excessivas que dificultem a circulação ou ponham em risco o sistema de revestimento. Pode ser considerada necessária a incorporação de um elemento de reforço (geotêxtil, geogrelha) às camadas do pavimento.

É, igualmente, conveniente evitar a utilização de materiais excessivamente erodíveis, que ponham em risco a integridade do revestimento subjacente e forcem a reparações frequentes das camadas do pavimento.

Em definitivo, é recomendável a utilização de material granular de granulometria extensa, tipo SW ou GW, segundo o Sistema Unificado de classificação solos (ASTM), de preferência britado (com as devidas precauções, tais como, por exemplo, a colocação de camadas de protecção, para evitar possíveis problemas de punçoamento nas geomembranas subjacentes).

É importante, também, prestar a devida atenção ao sistema de drenagem para as vias de acesso. Para os caminhos localizados a meio talude, é recomendável incluir um dreno ou sistema de drenagem no encontro da rampa com o pé do talude superior, de forma a evitar que as águas procedentes

da camada de drenagem de lixiviados do talude superior se acumulem na via ou provoquem erosão no pavimento.

9 - ACTIVIDADES DE GARANTIA DA QUALIDADE DA CONSTRUÇÃO

9.1 - Actividades gerais de garantia da qualidade da construção relativas aos solos

A implementação de um Plano de Garantia da Qualidade da Construção (PGQC) é especialmente importante no caso dos aterros de resíduos, pois a sua deficiente construção pode pôr em risco, não só o confinamento dos resíduos, como induzir a fuga de lixiviados ou biogás, com as repercussões ambientais que se conhecem, nomeadamente, a contaminação do ar, do solo e das águas superficiais e subterrâneas. Os PGQC são documentos que têm por objectivo assegurar que os materiais e técnicas construtivas empregues na construção cumprem o especificado nos projectos. Resumidamente, estes documentos definem as responsabilidades dos vários intervenientes na construção dos aterros de resíduos (donos de obra, projectistas, empreiteiros, instaladores de geossintéticos, fiscalizações e agentes encarregues da coordenação dos PGQC), indicam os diferentes relatórios e documentação diversa que deve ser elaborada para evidenciar a qualidade de construção, orientam o plano de ensaios e apresentam as actividades de garantia da qualidade da construção (GQC) para os diferentes materiais e componentes da obra. As actividades de GQC comuns à construção dos diferentes componentes minerais do aterro de resíduos sólidos urbanos incluem:

- ◆ actividades relativas à realização de ensaios;
- ◆ actividades de supervisão da construção;
- ◆ actividades relativas à correcção de deficiências construtivas.

9.1.1 - Realização de ensaios

Os ensaios sobre os solos e componentes minerais realizam-se em três fases:

- a) ensaios de qualificação dos materiais de empréstimo: servem para avaliar a conformidade das características do material de um determinado empréstimo relativamente às especificações de projecto, de forma a poder aprovar o empréstimo antes da construção; a sua execução é da responsabilidade do empreiteiro;
- b) ensaios de verificação da conformidade dos solos: são utilizados para verificar se há conformidade entre as características de um determinado lote de solos, procedente de um empréstimo aprovado, antes da sua colocação em obra, e as especificações de projecto; são efectuados por um laboratório de solos independente;

- c) ensaios de controlo da qualidade da construção: realizam-se durante a construção sobre secções de obra já executadas para determinar se os procedimentos construtivos utilizados deram como resultado um produto que satisfaz as especificações de projecto relativas ao material e ao comportamento; a sua execução é, normalmente, da responsabilidade do empreiteiro (autocontrolo), podendo, o dono de obra, efectuar sempre ensaios de verificação quando considere necessário.

Os PGQC devem especificar as frequências mínimas para os diferentes tipos de ensaios. Relativamente aos de qualificação de materiais de empréstimo, o dono de obra, normalmente por indicação da fiscalização, poderá incrementar estas frequências quando se verificar variabilidade dos materiais no local da obra.

Exceptuando as amostras colhidas para qualificação de materiais de empréstimo, os locais de amostragem e de ensaio devem ser seleccionados, em geral, pela fiscalização.

As amostras para os ensaios de verificação da conformidade podem ser colhidas dos locais de empréstimo ou dos materiais empilhados no local da obra. O empreiteiro deve planificar as suas actividades e facilitar a colheita de amostras de maneira que os resultados dos ensaios possam estar disponíveis antes da colocação dos materiais. A fiscalização deve registar os locais de amostragem de forma a poder identificar as zonas de não conformidade.

Os locais de colheita de amostras e de ensaios de controlo da qualidade da construção devem ser seleccionados, em geral, de maneira aleatória. No entanto, corresponde à fiscalização indicar os locais de colheita de amostras ou de ensaios adicionais quando, mediante observações visuais, se detectarem zonas duvidosas indicativas da existência de possíveis problemas. Exemplos destas últimas são os seguintes: derrapagem dos cilindros durante a compactação; espessura de camadas superior à especificada; teor em água dos solos inadequado ou variável; número de passagens do cilindro inferior ao especificado; cilindros imprópriamente balastrados; materiais de aterro substancialmente diferentes dos especificados; ou grau de compactação duvidoso.

Igualmente, poderá ser aumentada a frequência de ensaios em situações tais como: condições meteorológicas adversas; avarias do equipamento; no início dos trabalhos; em casos de não conformidade com as especificações; ou em zonas de trabalho de pequenas dimensões.

9.1.2 - Actividades da fiscalização

Os PGQC devem indicar os trabalhos de fiscalização relativos à construção das componentes minerais do aterro, os quais devem incluir:

- revisão e análise da documentação de projecto e das especificações relativas aos solos, de forma a compreender todos os requisitos exigidos;
- revisão da documentação relativa aos ensaios de qualificação dos materiais de empréstimo fornecida pelo empreiteiro;
- inspecção das superfícies para verificação da conformidade antes da colocação de novas camadas ou materiais;
- colheita de amostras para realização de ensaios de verificação da conformidade dos solos;
- revisão dos resultados dos ensaios de verificação da conformidade dos solos;
- verificação de que as camadas de solos são construídas segundo os procedimentos e com os equipamentos especificados;
- supervisão dos trabalhos de descarga, espalhamento, colocação e compactação dos solos em obra;
- revisão dos resultados dos ensaios de controlo da qualidade da construção efectuados pelo empreiteiro e dos ensaios de verificação da qualidade da construção efectuados por uma entidade independente;
- supervisão dos trabalhos de construção das camadas e componentes térreos para assegurar que estas actividades não danificam os geossintéticos ou outros elementos do aterro.

9.2 - Actividades de GQC relativas às camadas de solos argilosos compactados

9.2.1 - Considerações gerais

Descrevem-se, neste capítulo, aspectos relacionados com as actividades de GQC, que se considera importante incluir nos PGQC, relativos às camadas de revestimento de solos argilosos compactados. Destacou-se esta componente pelo facto de ser específica dos aterros de resíduos (com muitas semelhanças, porém, com os núcleos de argila das barragens de aterro), pelas fortes repercussões de tipo ambiental que uma deficiente construção deste revestimento pode ocasionar, e, finalmente, pela decisiva influência de um adequado controlo durante a construção na qualidade do revestimento. As actividades de GQC visam garantir a consecução, em conformidade com as especificações do projecto, dos seguintes objectivos principais:

- assegurar que os materiais são os apropriados;
- assegurar que os materiais são devidamente colocados e compactados;
- assegurar que o revestimento, uma vez completado, fica devidamente protegido.

9.2.2 - Conformidade dos materiais

O empreiteiro deve apresentar atempadamente ao dono de obra o plano descritivo dos métodos de construção do revestimento de solos compactados para revisão dos mesmos.

Num prazo de, normalmente, pelo menos duas semanas antes do início da construção, o empreiteiro deve apresentar ao dono de obra amostras (50 kg no mínimo) dos solos propostos para a construção das camadas de revestimento mineral, juntamente com os resultados dos ensaios de qualificação efectuados sobre os mesmos. Devem incluir-se os seguintes ensaios de qualificação dos materiais:

- análises granulométricas;
- determinações dos limites de Atterberg;
- determinação do teor em água natural;
- ensaios de compactação Proctor normal ou Proctor modificado;

Por vezes especificam-se também ensaios de permeabilidade em laboratório.

Relativamente aos ensaios de compactação, a energia aplicada por unidade de volume é de 0,583 J/cm³ no ensaio Proctor normal (ou leve), e de 2,632 J/cm³ no ensaio Proctor modificado (ou pesado). A energia aplicada pelo equipamento de compactação em obra é normalmente intermédia entre estas duas. É recomendável realizar os dois ensaios para cada solo, e ainda um terceiro ensaio com uma energia diferente, de modo a definir a linha de óptimos correspondente ao solo em questão. É recomendável utilizar, como especificação de compactação, a percentagem (P_0) de determinações “in situ” do lado húmido desta linha.

No que diz respeito ao método de ensaio, devem utilizar-se os métodos e normas especificados no projecto.

Relativamente à frequência dos ensaios de qualificação dos solos, é habitual especificar frequências que vão desde um ensaio de cada tipo por cada 5000 m³ de solo, até um ensaio por local de empréstimo. As possíveis variações no tipo de material, que pela experiência são normalmente fáceis de detectar visualmente, devem levar a um incremento na frequência dos ensaios.

A fiscalização deve verificar e analisar toda a documentação entregue pelo empreiteiro relativamente aos solos propostos, e aprovar os materiais de empréstimo que satisfaçam as especificações de projecto.

Uma vez aprovado um determinado empréstimo, a fiscalização deve efectuar a colheita de amostras para realizar os ensaios de verificação da conformidade. A colheita pode ser efectuada no local de empréstimo ou nos locais de empilhamento em obra; em último caso, as amostras podem ser colhidas do material espalhado no local de construção antes da compactação das camadas. O empreiteiro deve planificar as suas actividades e

facilitar a colheita de amostras de maneira que os resultados dos ensaios possam estar disponíveis antes do início da construção do revestimento. A fiscalização deve registrar os locais de amostragem de forma a poder identificar as zonas ou lotes de não conformidade.

Os ensaios de verificação da conformidade dos materiais devem incluir, nomeadamente: análise granulométrica, normalmente por peneiração (EN 933-1); limites de Atterberg (EN 143), classificação do solo (ASTM-D-2487); e Proctor normal ou modificado (E 196-LNEC; ASTM-D698 e ASTM-D-1557). As frequências mínimas de ensaio recomendáveis são as seguintes:

- análise granulométrica, limites de Atterberg e classificação do solo: uma determinação por cada 1000 m³ de solo;
- ensaios de compactação Proctor normal ou modificado: uma determinação por cada 5000 m³ de solo.

O dono de obra ou a fiscalização podem incrementar as frequências quando se observe variabilidade dos materiais no local da obra, materiais de má qualidade, ou condições climáticas adversas. Os ensaios adicionais que resultem da variabilidade ou má qualidade dos materiais chegados à obra são executados a expensas do empreiteiro.

A fiscalização deve rever os resultados dos ensaios de verificação de conformidade e determinar se os materiais satisfazem as especificações de projecto e podem ser utilizados na construção do revestimento. Os materiais que não satisfaçam as especificações devem ser rejeitados, não sendo admitidos em obra, ou sendo retirados das áreas de trabalho a expensas do empreiteiro.

Relativamente à tolerância de resultados de verificação da conformidade dos materiais, recomendam-se os limites apresentados no Quadro 2.

Quadro 2 - Máxima percentagem de não conformidades recomendada para os ensaios de verificação dos solos

Parâmetro	Máxima percentagem de não conformidades tolerada
Limites de Atterberg	5%, não concentradas na mesma área ou camada
Percentagem de finos (#200)	5%, não concentradas na mesma área ou camada
Percentagem de partículas tamanho seixo	10%, não concentradas na mesma área ou camada
Permeabilidade	5%, não concentradas na mesma área ou camada

9.2.3 - Actividades construtivas

Antes da construção do revestimento mineral, a fiscalização deve verificar que o terreno de apoio ou

fundação se encontra preparado adequadamente. Designadamente, deve verificar que foram realizadas as oportunas escavações e terraplenagens de acordo com os desenhos e especificações do projecto, de forma a atingir as cotas da base do revestimento. Também é necessário verificar que:

- após os trabalhos de desmatação, foi retirada toda a camada de solo vegetal, e armazenada em local próprio;
- foram efectuadas as escavações necessárias para atingir as cotas de projecto;
- foram eliminados os solos inadequados do terreno de fundação, nomeadamente os solos moles, e foram substituídos por aterro compactado;
- foram construídas as oportunas camadas de aterro compactado onde necessário para atingir as cotas da base do revestimento.

O empreiteiro deve fornecer atempadamente à fiscalização as cotas da superfície subjacente preparada para receber a camada de revestimento. A fiscalização deve verificar que as cotas da base do revestimento correspondem às previstas no projecto, com uma margem de erro reduzida, não maior de, por exemplo, 3 cm.

A base do revestimento deve ser devidamente compactada, se for preciso com a dição de água, de modo a cumprir as especificações de projecto.

Os solos devem ser transportados e depositados em obra com o equipamento e nos locais adequados. Quando o teor em água natural do solo argiloso não for o adequado para a compactação, deve ser ajustado até atingir valores convenientes, quer adicionando água e misturando-a com o solo, quer deixando-o secar. Estes trabalhos podem ser feitos no material espalhado na própria área do revestimento, ou numa zona próxima escolhida para esta função. Durante os mesmos o material deve ser remexido de uma forma regular, de forma a atingir uma distribuição homogénea do teor em água.

O solo deve ser espalhado em obra em camadas de espessura adequada, ligeiramente superiores à especificada para a camada compactada, e com equipamento adequado e conforme às especificações. Para espalhar o material é recomendável utilizar equipamento de lagartas, o qual produz, por meio de um pequeno número de passagens, um certo grau de esboroamento do solo, desejável para uma boa compactação. Para ajustar o teor em água do solo *in situ*, é necessário que a superfície da camada espalhada fique convenientemente escarificada.

A fiscalização deve verificar que a adição de água, em caso de necessidade, é efectuada de forma a garantir uma distribuição uniforme. O empreiteiro deve dispor de água em quantidade suficiente e de equipamento adequado para ajustar conveniente e uniformemente o teor em água do solo antes da sua compactação. O ajuste uniforme do teor em água do

solo para atingir os valores adequados para a compactação é da responsabilidade do empreiteiro.

A fiscalização deve verificar que não foi incluído material inadequado na camada de solos antes de proceder à compactação.

No que se refere à compactação, o equipamento de compactação deve ser o adequado. É fundamental eliminar ou reduzir o tamanho dos torrões de argila durante a compactação; para isso devem utilizar-se compactadores que induzam um efeito amassador no solo, sendo os mais adequados os cilindros de pés de carneiro pesados, com espigões que atravessem completamente a camada solta de solo. Não se deve compactar o solo durante condições climáticas adversas, nomeadamente em períodos de forte precipitação.

Os PGQC devem obrigar a fiscalização a efectuar um registo diário da compactação do revestimento, incluindo data, esquema das áreas compactadas, número das camadas compactadas, origem (empréstimo) e identificação do solo utilizado, equipamento utilizado, número de passagens, ensaios de controlo da construção efectuados, condições climáticas e comentários pertinentes relativos à compactação das diferentes camadas e porções do revestimento mineral com solos argilosos.

Relativamente ao controlo do número de passagens, a fiscalização deve efectuar, periodicamente, observações do número de passagens do compactador sobre um determinado ponto. É recomendável efectuar uma observação deste tipo por cada 3000 m² de camada.

Para garantir um bom contacto entre camadas sobrepostas do revestimento mineral, podem adoptar-se os seguintes sistemas:

- escarificação com equipamento de discos ou outro semelhante da superfície da camada prévia, na altura de colocação de uma nova camada;
- compactação em camadas de espessura relativamente pequena com cilindro de pé de carneiro munido de espigões com um comprimento tal que consigam atravessar totalmente a camada solta e penetrar na camada subjacente; consegue-se, assim, um bom contacto entre o material da nova camada e o da camada anterior (Figura 12).

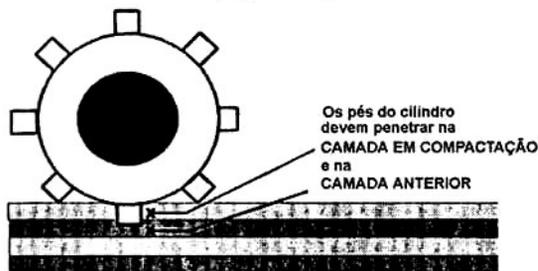


Fig. 12 - Relação entre a espessura da camada e o comprimento dos pés do cilindro (Bolton, 1995).

Em taludes de inclinação suave (inferiores a cerca de 2,5H:1V), é conveniente construir as camadas de solos paralelamente ao mesmo. Sempre que possível, esta disposição é preferível à solução de camadas horizontais já que as camadas paralelas ao talude proporcionam uma melhor barreira hidráulica, pois atenuam os efeitos prejudiciais de possíveis zonas de materiais pouco adequados, bem como de um contacto deficiente entre camadas.

Em caso de camadas horizontais sobre os taludes, convém que as superfícies de contacto entre as camadas apresentem uma ligeira inclinação para o interior da célula (Figura 13).

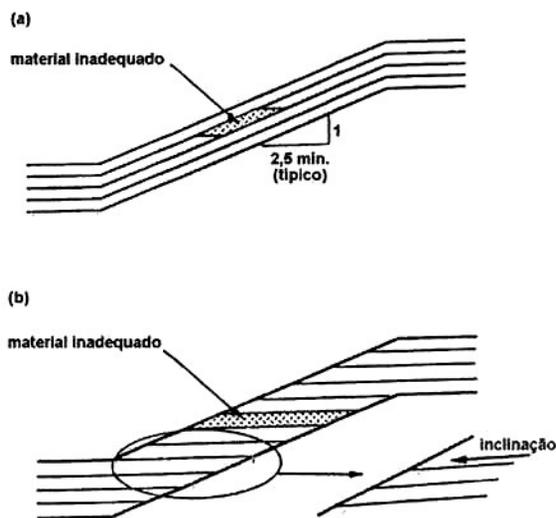


Fig. 13 - Taludes construídos com camadas paralelas ao talude (a) ou horizontais (b), (Daniel, 1993).

As camadas já construídas e expostas temporariamente devem ser devidamente protegidas da dessecação, preferencialmente por meio de sistemas tais como os seguintes:

- compactando a superfície com o cilindro liso para deixar uma superfície relativamente impermeável;
- regando periodicamente a superfície exposta;
- cobrindo a superfície temporariamente com um material de protecção, embora pondo a devida atenção na escolha do material para que não produza aquecimento do solo (por exemplo as películas plásticas) e, conseqüentemente, maior dessecação.

Igualmente, as camadas já construídas devem ficar protegidas de precipitações intensas, podendo-se adoptar para tal fim as seguintes medidas:

- assegurar, no fim de cada dia, que a drenagem superficial se orienta para fora da zona de trabalho e das camadas já construídas;
- fechar a superfície das camadas terminadas mediante passagens do cilindro liso, em caso de condições climáticas desfavoráveis.

No fim de cada dia de trabalho, a superfície das camadas compactadas deve ser alisada, para evitar alterações no teor em água, por meio de passagens de compactadores de cilindro liso. As superfícies devem deixar-se de tal maneira que se facilite a drenagem de águas superficiais em caso de precipitações. Após a compactação da última camada do revestimento com o cilindro de pé de carneiro ou equipamento semelhante, as superfícies finais do revestimento são compactadas e alisadas com compactador de cilindro liso.

9.2.4 - Ensaio de controlo da qualidade da construção

Os ensaios de controlo da qualidade da construção são efectuados normalmente pelo empreiteiro em porções terminadas do revestimento durante a fase de construção. O empreiteiro deve ter em conta a realização destes ensaios na hora de planificar as actividades construtivas. O objectivo destes ensaios é verificar que os procedimentos construtivos utilizados conduziram a um produto final que satisfaz as especificações relativas ao material e ao comportamento do revestimento.

Os PGQC atribuem à fiscalização a função de verificar a realização destes ensaios, registando a sua localização (em planta, e número da camada), resultados, data, hora e condições climáticas.

São três os aspectos fundamentais que se devem controlar nas camadas de solos compactadas: o peso volúmico seco, o teor em água e a espessura da camada.

As determinações *in situ* do teor em água e do peso volúmico seco podem efectuar-se por meio do método do gama-densímetro nuclear (ASTM-D-3017 e ASTM-D-2922), com frequências mínimas de um ensaio por cada 1000 m² de camada (Quadro 3). Em condições meteorológicas adversas, ou quando se observarem materiais ou zonas de aspecto ou comportamento insatisfatório, pode reforçar-se a frequência destes ensaios.

Para a determinação do peso volúmico seco, os gama-densímetros nucleares devem trabalhar em modo de transmissão directa. Neste caso a fonte de raios gama é descida verticalmente num furo efectuado na camada de solo. Depois de realizado o ensaio, é importante selar com argila, ou melhor com bentonite em pó, o pequeno furo feito com o espigão do densímetro de modo a não deixar caminhos preferenciais de infiltração.

Os ensaios com o gama-densímetro nuclear são rápidos de executar e eficazes. Porém, os resultados das determinações de baridade são afectados pela composição química do solo. O método deve ser calibrado com medições efectuadas por outros procedimentos, tais como o da garrafa de areia (Especificação E 204-LNEC; ASTM-D-2216),

recomendando-se uma determinação de calibração por cada 10 ensaios com o densímetro nuclear.

Quadro 3 - Frequências recomendáveis para ensaios de controlo da qualidade da construção

Ensaio	Frequência mínima de ensaio
Teor em água, determinação rápida (gama-densímetro)	1 ensaio/1000 m ² /camada
Teor em água (método da estufa)	1 por cada 10 determinações rápidas
Peso volúmico, determinação rápida (gama-densímetro)	1 ensaio/1000 m ² /camada
Peso volúmico (garrafa de areia)	1 por cada 10 determinações rápidas
Espessura de camada	1 determinação/400 m ² /camada

Os resultados das determinações do teor em água com o densímetro nuclear são igualmente afectados por diversos factores, nomeadamente pela presença de materiais, diferentes da água, que contêm hidrogénio. Também a proximidade de valas ou objectos a menos de um metro do aparelho podem causar uma sobre-avaliação do teor em água. Outra fonte de erro pode ser um apoio incorrecto do densímetro sobre a superfície da camada de solo. Devem efectuar-se, pois, medições de calibragem do teor em água mediante o método de secagem em estufa (NP-84; ASTM-D-2216), sendo recomendável um ensaio de secagem em estufa por cada dez ensaios com o densímetro nuclear.

Há outros métodos rápidos para a determinação *in situ* do teor em água do solo que se podem utilizar como alternativa ao densímetro nuclear, tais como o método do microondas (ASTM-D-4643), o método do álcool (BS 1377; NLT-103). Em todo caso, a utilização destes métodos rápidos deve ser acompanhada de calibração mediante o ensaio de secagem em estufa, com uma frequência semelhante à utilizada com o gama-densímetro nuclear.

Relativamente à localização dos pontos de amostragem e de execução dos ensaios de controlo da construção, a selecção pode ser feita segundo uma grelha predefinida, ou, alternativamente, de maneira aleatória, em ambos os casos de acordo com as frequências mínimas determinadas pelas especificações do projecto. Em caso de selecção aleatória dos locais de ensaio, a fiscalização deve vigiar para que não fiquem zonas amplas sem ensaios como resultado do próprio processo aleatório, devendo-se, nesses casos, efectuar ensaios adicionais nas zonas em questão. Caso se detectem zonas suspeitas de construção deficiente, quer pelo aspecto dos materiais, quer pela espessura, aspecto ou comportamento da camada compactada, ou mesmo

por suspeita de um procedimento de compactação incorrecto, devem ser efectuados ensaios adicionais de acordo com o critério da fiscalização.

No que diz respeito às tolerâncias admissíveis para os casos de não conformidade, podem adoptar-se os seguintes critérios:

- teor em água: 3% de casos de não conformidade, sempre que não estejam concentrados na mesma área ou camada, e não excedam 3% acima nem 2% abaixo dos valores admissíveis;
- peso volúmico: 3% de casos de não conformidade, sempre que não estejam concentrados na mesma área ou camada, e não excedam $0,8 \text{ kN/m}^3$ abaixo do valor requerido;

Se for utilizado, como especificação de compactação, a percentagem (P_0) de determinações *in situ* do lado húmido da linha de ótimos de compactação, pode utilizar-se como critério de aceitação de uma área ou camada: $P_0 > 80\%$.

Para controlar a espessura da camada de solo podem utilizar-se estacas de reperfilamento, para as quais um espaçamento de 20 m pode considerar-se adequado. É importante verificar que as estacas são retiradas depois de utilizadas, e o furo por elas deixado é convenientemente selado. Podem utilizar-se outras técnicas para controlar as cotas, tais como as baseadas no laser.

Devem ser especificadas tolerâncias no que diz respeito à espessura final da camada. É recomendável uma tolerância de até 5% de determinações fora dos limites especificados, sempre que nenhuma determinação exceda 25 mm dos limites permitidos para a espessura da camada.

9.2.5 - Reparação de deficiências

As zonas onde os resultados dos ensaios de controlo da construção indiquem que as especificações relativas ao teor em água e peso volúmico do solo não são satisfeitas, devem ser reparadas.

Se o teor em água for suficientemente elevado mas o peso volúmico não, a reparação pode limitar-se a uma recompactação. Se o teor em água for demasiado baixo, mas o peso volúmico relativamente elevado, deve proceder-se à escarificação da camada e ao ajuste conveniente do teor em água, aguardando depois o tempo suficiente para uma boa mistura da água com o solo, antes de, finalmente, voltar a compactar.

Quando for necessário reparar a primeira camada do revestimento e existirem por baixo dela geotêxteis, outros geossintéticos, drenos, ou outros componentes frágeis do aterro, a fiscalização deverá verificar que os trabalhos de reparação são efectuados com os devidos cuidados para evitar danificar os elementos subjacentes. Assim, deve cuidar-se, nestes casos, que os dentes ou discos do

escarificador não atravessem completamente a camada de solo em reparação.

Em condições climáticas secas, se a superfície da camada de argila compactada fica exposta e sem protecção durante um período de tempo excessivamente longo, pode produzir-se uma perda de humidade e uma fendilhação da mesma. Nesse caso, deve proceder-se, também, à escarificação superficial da camada, à adição de água e à recompactação.

9.2.6 - Aterros experimentais

A construção de aterros experimentais prévios permite experimentar o processo previsto para a construção das camadas do revestimento com diferentes tipos de equipamento de espalhamento e compactação, e analisar os resultados da compactação com diferentes teores em água, número de passagens do compactador, espessura de camada, etc. Os ensaios de controlo da construção, as determinações de teor em água e peso volúmico *in situ*, podem também ser afinados nos aterros experimentais. Desta maneira é possível deixar definido o melhor procedimento construtivo antes do início dos trabalhos no próprio revestimento.

Além disso, a construção de aterros experimentais permite a execução de ensaios de controlo difíceis de realizar durante a construção do revestimento. Em particular, os ensaios de determinação da permeabilidade *in situ*, que requerem tempos excessivamente longos, incompatíveis com os ritmos de obra, só podem ser realizados, normalmente, em aterros experimentais.

Relativamente às dimensões recomendáveis para os aterros experimentais, a largura deve ser maior de 10 m, aproximadamente, portanto cerca de três vezes a largura do equipamento de compactação. O comprimento deve ser igual ou superior à largura. No que diz respeito à espessura, o mais apropriado é que seja a mesma do revestimento, embora possam ser suficientes, ocasionalmente, espessuras inferiores.

10 - CONCLUSÕES

Nos últimos anos, tem-se verificado uma intensa actividade construtiva em Portugal no que diz respeito às estruturas de confinamento de resíduos sólidos, tanto urbanos como industriais. Do ponto de vista técnico, grande parte das atenções têm estado viradas para o campo dos geossintéticos, devido ao facto de serem produtos relativamente novos e de grande utilidade neste tipo de infra-estruturas. Em muitas situações, os geossintéticos podem desempenhar, nos aterros de resíduos, as mesmas funções que as componentes minerais, de forma eficaz e com uma série de vantagens, embora também desvantagens, inquestionáveis. No entanto, as funções que as componentes minerais

desempenham nos aterros de resíduos são fundamentais e, em determinados casos insubstituíveis. De facto, actualmente, a legislação nacional e europeia requerem, na prática, a utilização de camadas minerais, nomeadamente, no revestimento de fundo dos aterros (barreira de protecção ambiental passiva), no sistema de drenagem de lixiviados do fundo do aterro e no sistema de cobertura.

Da mesma maneira que no caso dos geossintéticos, é fundamental assegurar que as componentes minerais dos aterros de resíduos são projectadas e construídas devidamente, de forma a garantir um desempenho eficaz das suas funções, geotécnicas e ambientais. Assim, neste artigo foram apresentadas as diferentes componentes minerais dos aterros de resíduos, prestando especial atenção aos requisitos técnicos exigíveis a estas componentes. Foi referida a importância de implementar planos de garantia da qualidade da construção para as mesmas, e foram descritos os aspectos mais relevantes que se devem incluir nestes planos, realçando particularmente o caso dos revestimentos de camadas de solos argilosos compactados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Benson, C. H. *et al.* (1999) *Field Performance of compacted Clay Liners*. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, May.
- Bolton, N. (1995) *The Handbook of Landfill Operations*. Blue Ridge Solid Waste Consulting, Bozeman, MT.
- Bonaparte, R.; Daniel, D. E. e Koerner, R. M. (2002). *Assessment and Recommendations for Improving the Performance of Waste Containment Systems*. U. S. EPA/600/R-02/099.
- Blotz, L.; Benson, C. e Boutwell, G. (1998) *Estimating optimum water content and maximum dry unit weight for compacted clays*. Journal Geotech. and Geoenviron. Engrg. ASCE, 124(9), pp. 907-912.
- Daniel, D. E. (1993). *Geotechnical Practice for Waste Disposal*. Chapman&Hall, New York.
- Daniel, D.E. (1998). *Landfills for solid and liquid wastes*. Proc. 3rd Int. Congress on Environmental Geotechnics, Lisboa, Sêco e Pinto (ed), Balkema.
- Daniel, D. E. e Koerner, R. M. (1993). *Quality assurance and quality control for waste containment facilities*. EPA Technical Guidance Document, Setembro.
- Diário da República. (2002) *Decreto-Lei nº 152/2002 de 23 de Maio*. Diário da República-I Série-A, Nº 119.
- DOCE. (1999) *Diario Oficial de las Comunidades Europeas*. Directiva 1999/31/CE del Consejo, de 26 de abril de 1999 relativa al vertido de residuos.
- Elsbury B. R.; Daniel, D. E.; Sraders, G. A. e Aderson, D. C. (1990). *Lessons Learned from Compacted Clay Liner*. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 116, No. 11.
- EPA. (1998) *Solid Waste Disposal Facility Criteria*. Technical Manual, EPA530-R-93-017.
- Koerner, R. M. (1997). *Designing with geosynthetics*. Prentice Hall. 4th ed.
- LNEC. (1999) *Elaboração de Normas técnicas de gestão de tecnossistemas de confinamento de resíduos urbanos*. Relatório DH/DG, LNEC, Lisboa.
- Oweis, I. S. et Khera, R. P. (1998) *Geotechnology of Waste Management*. 2nd ed., International Thomson Publishing, Boston, MA.
- Pardo de Santayana, F. (2000) *Problemas construtivos das camadas de revestimento minerais*. Seminário sobre Aspectos Geotécnicos do Projecto e Construção de Aterros de Resíduos, LNEC, Lisboa, SPG.
- Roque, A. J. (2001) *Transfert advectif et diffusif de polluants inorganiques dans les barrières d'étanchéité minérales présentes dans les Centres de Stockage de Déchets. Application aux sols fins portugais*. Thèse Génie Civil-Sols: Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.
- Rowe, R. K.; Quigley, R. M. e Booker, J. R. (1995) *Clayey Barrier Systems for Waste Disposal Facilities*. E & FN Spon, London.
- Sharma, H. D. e Sangeete, P. L. (1994). *Waste containment systems, waste stabilization, and landfills: design and evaluation*. John Wiley and Sons, Inc.
- Seed, H. B. e Chan, C. K. (1959). *Structure and strength characteristics of compacted clays*. J. Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol. 85, No. 5.