

Edite do Carmo Guerra Regueiro

**Avaliação da Influência de Diferentes
Configurações das Camadas dos Aterros na
Formação de Lixiviados**

Universidade Fernando Pessoa

Porto, 2006

Edite do Carmo Guerra Regueiro

**Avaliação da Influência de Diferentes
Configurações das Camadas dos Aterros na
Formação de Lixiviados**

Universidade Fernando Pessoa

Porto, 2006

Edite do Carmo Guerra Regueiro

**Avaliação da Influência de Diferentes
Configurações das Camadas dos Aterros na
Formação de Lixiviados**

Projecto de Graduação apresentado à
Universidade Fernando Pessoa como parte
dos requisitos para obtenção do grau de
licenciada em Engenharia do Ambiente.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer ao meu pai por todo o apoio prestado ao longo dos meus estudos, por confiar em mim, e principalmente pelo esforço que fez para me tentar dar um futuro melhor.

À Joana, por todo o apoio prestado, pela amizade e nos meus momentos mais difíceis nunca me ter deixado desistir.

À Professora Alzira por toda a disponibilidade e apoio prestado a nível da elaboração deste projecto.

Ao Engenheiro Celso pela ajuda prestada a nível de fornecimento de dados e principalmente confiança depositada.

Resumo

Actualmente os aterros possuem sistemas de contenção de resíduos altamente complexos, projectados para minimizar o impacte dos resíduos sólidos no ambiente e na saúde humana, através da utilização de revestimentos próprios. O primeiro objectivo do sistema de revestimento é isolar o conteúdo do aterro do ambiente e, portanto, proteger o solo e as águas subterrâneas da poluição originada no mesmo. A maior ameaça para as águas subterrâneas, imposta pelo aterro, são os lixiviados. Estes consistem em água ou compostos solúveis em água nos resíduos que se acumulam e posteriormente se movem ao longo do aterro. Esta água pode provir da chuva ou dos próprios resíduos. Estes lixiviados podem deslocar-se ao longo do aterro e contaminar o solo e as águas subterrâneas, apresentando então um risco para o ambiente e saúde humana.

Os revestimentos do aterro são, então, projectados e construídos para criar uma barreira entre os resíduos e o ambiente e para drenar os lixiviados para locais de recolha e tratamento. Isto é, feito para prevenir a libertação descontrolada dos mesmos lixiviados no ambiente.

O presente trabalho pretende essencialmente abordar a questão da influência de diferentes camadas na formação de lixiviados, tendo em conta, por exemplo, características tais como, diferentes espessuras e diferentes tipos de solos ou geossintéticos, utilizados. A exposição encontra-se dividida em capítulos abordando os diferentes tipos de revestimentos, coberturas e também as redes de drenagem de águas pluviais e de lixiviados. Efectuou-se também uma breve abordagem aos tipos de revestimento utilizados em diferentes países. No último capítulo aborda-se uma entidade de tratamento de resíduos, cujo nome não é revelado, pretendendo demonstrar a influência de factores tais como a quantidade de resíduos sólidos depositados e a abundância da precipitação na formação de lixiviados.

É complexo avaliar a influência das camadas na formação dos lixiviados uma vez que existem outros factores que influenciam a produção do mesmo tais como a precipitação a quantidade de resíduos e a sua composição, a evapotranspiração, entre outros.

Abstract

Modern landfills are highly engineered containment systems, designed to minimize the impact of solid waste on the environment and human health. In landfills, the waste is contained by a liner system. The primary purpose of the liner system is to isolate the landfill contents from the environment and, therefore, to protect the soil and ground water from pollution originating in the landfill. The greatest threat to ground water posed by modern landfills is leachate. Leachate consists of water and water-soluble compounds in the refuse that accumulate as water moves through the landfill. This water may be from rainfall or from the waste itself. Leachate may migrate from the landfill and contaminate soil and ground water, thus presenting a risk to human and environmental health.

Landfill liners are designed and constructed to create a barrier between the waste and the environment and to drain the leachate to collection and treatment facilities. This is done to prevent the uncontrolled release of leachate into the environment.

The present project essentially intends to approach the question of the influence of different layers in the formation of leachate, having in account, for example, different thicknesses and different types of soils or geosynthetics, used. It is divided in chapters approaching the different types of liners, coverings and also the drainage nets of leachate and pluvial water. A brief approach to the used types of liners in different countries was also made. In the last chapter an entity of waste treatment, whose name is not revealed, was studied. The aim is discuss the evaluation of disposal municipal solid waste quantity and precipitation in leachate formation.

Is complex to evaluate the influence of the layers in the formation of leachate because exist other factors that influence the production of the same as the precipitation, the amount of wastes and your composition, evapotranspiration, and others.

Índice

Índice de Figuras.....	iii
Índice de Tabelas	v
I. Introdução	1
II. Sistemas de Revestimento	3
II.1. Geossintéticos.....	7
II.1.1. Elementos Estruturais	7
II.1.1.1. Fundação	8
II.1.1.2. Sistema de Impermeabilização da Base.....	8
II.1.2. Geomembranas	9
II.2. Cobertura Diária	12
II.3. Cobertura Intermédia	13
II.4. Cobertura Final	15
II.5. Componentes do Sistema de Limitações Ambientais de um Aterro	19
III. Redes de Drenagem	24
III.1. Rede de Drenagem de Águas Pluviais.....	24
III.2. Rede de Drenagem e Recolha de Lixiviados	24
IV. Requisitos para os Revestimentos do Aterro em Alguns Países.....	29
V. Colocação dos Resíduos	37
VI. Estudo de Caso: Entidade de Tratamento de Resíduos	39
VI.1. Coberturas utilizadas	41
VI.2. Análise dos Dados	42
VI.2.1. Quantidade de Resíduos Sólidos depositada no Aterro vs. Lixiviados Produzidos.	43
VI.2.2. Influência da Precipitação na Formação de Lixiviados.....	44
VI.2.3. Análise Estatística	50
VI.2.3.1. Média.....	50
VI.2.3.3. Moda.....	51
VI.2.3.4. Desvio Padrão	52
VI.2.3.4. Coeficiente de Variação	53
VI.2.3.5. Coeficiente de <i>skewness</i>	53
VI.2.3.6. Coeficiente de <i>kurtosis</i>	54

VI.2.4. Discussão dos Resultados Obtidos	55
VII. Conclusões	56
Bibliografia.....	60

Índice de Figuras

Figura II.1.	Sistema de camadas de protecção para revestimento em aterros nos Estados Unidos, revestimento simples composto.	4
Figura II.2.	Sistema de camadas de protecção para revestimento em aterros nos Estados Unidos, revestimento composto duplo.	4
Figura II.3.	Exemplo de um esquema de impermeabilização do fundo de um alvéolo	6
Figura II.4.	Exemplo de fundo de alvéolo impermeabilizado com geossintéticos e talude com camada de pneus usados para protecção mecânica das telas e fácil drenagem.....	6
Figura II.5.	Vista de uma alvéolo de deposição de resíduos sólidos de um Aterro	9
Figura II.6.	Sistema de Cobertura Final.....	15
Figura II.7.	Algumas configurações sugeridas para a cobertura final.....	16
Figura II.8.	Camada de erosão e de infiltração	17
Figura II.9.	Camadas essenciais de um sistema de solos naturais.....	19
Figura II.10.	Alternativas de Geossintéticos para substituir o material de solo natural na cobertura final	19
Figura II.11.	Componentes do aterro.....	22
Figura III.1.	Corte esquemático do dreno de recolha de lixiviados.....	25
Figura III.2.	Vista da caixa de fundo da drenagem de lixiviados.....	26
Figura III.3.	Instalação de um sistema de recolha de lixiviados ao longo de um sistema de revestimento, o qual inclui o uso de 1,5 mm de HDPE, GCL e rede de drenagem	27
Figura IV.1.	Sistemas de revestimento simples de geomembranas.....	29
Figura IV.2.	Sistema de revestimento na Suíça.....	30
Figura IV.3.	Sistema de revestimento na Alemanha.....	30
Figura IV.4.	Sistema de base composto	30
Figura IV.5.	Diferentes tipos de revestimento utilizados em França.....	31
Figura IV.6.	Zonas de Camadas e níveis relativos de um sistema de revestimento basal composto.....	32
Figura IV.7.	Diferentes camadas de protecção usados na Alemanha.	34
Figura IV.8.	Colocação dos resíduos sobre as camadas de protecção.	35

Figura V.1.	Deposição dos resíduos na forma de fardos	38
Figura VI.1.	Esquema do revestimento composto usado nos Aterros em Portugal	39
Figura VI.2.	Coberturas utilizadas no Aterro da entidade estudada	41
Figura VI.3.	Quantidade de RSU depositados desde 2002 a 2005.....	43
Figura VI.4.	Quantidade de lixiviados produzidos desde 2002 a 2005.	44
Figura VI.5.	Avaliação da Influência da Pluviosidade e quantidade de RSU depositados na formação de Lixiviados	47

Índice de Tabelas

Tabela VI.1. Quantidade de Resíduos Sólidos Depositados Anualmente no Aterro da Entidade Estudada	43
Tabela VI.2. Médias anuais de produção de lixiviados, pluviosidade e resíduos sólidos para os anos de 2002 a 2005.	50
Tabela VI.3. Cálculo da mediana da produção de lixiviados e pluviosidade para os anos de 2002 a 2005.	51
Tabela VI.4. Cálculo da classe modal da produção de lixiviados e pluviosidade para os anos de 2002 a 2005.	52
Tabela VI.5. Cálculo do desvio padrão da produção de lixiviados e pluviosidade para os anos de 2002 a 2005.	52
Tabela VI.6. Cálculo do Coeficiente de Variação da produção de lixiviados e pluviosidade para os anos de 2002 a 2005.....	53
Tabela VI.7. Cálculo do coeficiente de skewness da produção de lixiviados e pluviosidade para os anos de 2002 a 2005.....	54
Tabela VI.8. Cálculo do coeficiente de <i>kurtosis</i> da produção de lixiviados e pluviosidade para os anos de 2002 a 2005.....	54

I. Introdução

Os resíduos são originados fundamentalmente devido a três causas: processos de produção ineficientes, baixa durabilidade de bens e padrões de consumo não sustentáveis. O que se tem verificado é que o desenvolvimento económico, envolvendo um aumento da produção e consumo, originou um aumento da produção de resíduos (Ferrão e Canas, 2000). Segundo Ferrão e Canas (2000), a problemática de resíduos envolve essencialmente dois aspectos: qualidade dos resíduos gerados e a quantidade que é gerada. O impacto dos resíduos não consiste apenas nas suas características mas também no impacto do seu transporte e tratamento e destino final. Como destino final tem-se o exemplo dos aterros, tratam-se de locais que armazenam permanentemente resíduos de uma maneira que pretende minimizar a libertação de contaminantes no ambiente. Os sistemas de protecção ambiental para os aterros municipais de resíduos sólidos incluem um sistema sob os resíduos e um sistema de cobertura construído sobre os resíduos. O sistema sob os resíduos consiste numa combinação de uma camada de drenagem revestida por barreiras de baixa permeabilidade ou revestimentos (Munie, 2003).

As barreiras usadas podem ser argilas compactadas, geomembranas, revestimentos de argila geossintéticos, barreiras baseadas em bentonite, asfalto e barreiras químicas. Um problema comum com estas barreiras é que não podem ser reparadas sem escavação e reconstrução se estão danificadas. Em muitos casos, é impossível reparar as barreiras, tal como os revestimentos dos aterros (Shi e Booth, 2005). As funções dos revestimentos e da camada de drenagem são complementares e actuam em conjunto para prevenir a descarga incontrolável de contaminantes no ambiente. A camada de drenagem ou o sistema de drenagem e recolha de lixiviados é uma parte integrada do sistema de protecção ambiental de qualquer revestimento. O sistema de recolha de lixiviados está localizado sob os resíduos com o objectivo de recolher o líquido na parte superior do revestimento (Reddy e Saichek, 1998). Os lixiviados são líquidos contaminados num aterro que passam através ou estão em contacto directo com os resíduos sólidos. A produção destes é controlada pelas condições superficiais e quando considerado o processo durante um longo período de tempo, toda a água que infiltra no aterro formará lixiviados (Bengtsson e Bendz, 1996).

A quantidade de lixiviados produzidos num aterro depende de vários factores, tais como (Claubaugh, 2001, Oliveira e Pasqual, 2001):

- Condições meteorológicas do local (humidade, precipitação, evaporação, temperatura e ventos);
- Geologia e geomorfologia (escoamento superficial e/ou infiltração subterrânea, grau de compactação e capacidade do solo em reter humidade);
- Condições de operação do aterro (conformação e cobertura das células, grau de compactação dos resíduos, tipo de equipamento, recirculação do percolado);
- Idade e natureza dos resíduos sólidos (tipo, humidade, nível de matéria orgânica, características);
- Topografia (área e perfil do aterro);
- Qualidade e quantidade de recicláveis e hábitos da população;
- É específica do local;
- Propriedades química e física da precipitação.

Com este trabalho pretende-se avaliar a eficácia dos revestimentos dos aterros em Portugal e qual a estrutura de revestimento mais adequada. Através do estudo de caso pretende demonstrar-se a influência de outros factores na formação de lixiviados tais como: a pluviosidade e a quantidade de RSU (Resíduos Sólidos Urbanos) depositada.

II. Sistemas de Revestimento

O objectivo do revestimento (ou cobertura) é impedir a libertação de lixiviados e biogás e melhorar a capacidade de recolha da camada de drenagem de cobertura. Os sistemas de revestimento servem como barreiras que previnem a contaminação sub – superficial pela minimização da deslocação dos constituintes dos resíduos para a sub – superfície do ambiente (Munie, 2003).

Nos aterros, os sistemas de revestimento podem variar de um sistema composto único ou sistema simples, consistindo em múltiplas camadas de argila compactada, para limitar o movimento dos lixiviados através do material e impermeabilizar a fundação do aterro, cobertas por uma geomembrana; para um sistema composto duplo ou mais complexo, consistindo em múltiplas camadas de argila compactada, geomembranas, geotêxteis, georredes e geocompósitos (Hughes *et al.*, 2005; Munie, 2003; Reddy *et al.*, 1998; Reddy *et al.*, 1996; Giroud e Bonaparte, 1989). Este sistema composto duplo consiste num revestimento primário sobrejacente a um revestimento secundário com uma camada de detecção de fugas entre os dois revestimentos. Tanto o revestimento primário como o secundário possuem duas componentes de baixa permeabilidade (Hughes *et al.*, 2005).

Nas Figuras II.1. e II.2. pode visualizar-se estes dois tipos de revestimento, sendo a principal diferença a nível da maior complexidade do revestimento composto duplo, uma vez que possui duas camadas de argila compactada separadas uma da outra por diferentes tipos de geossintéticos. Uma vez que existe uma maior complexidade ao nível deste tipo de revestimento é de esperar uma maior eficiência a nível de retenção de lixiviados produzidos.

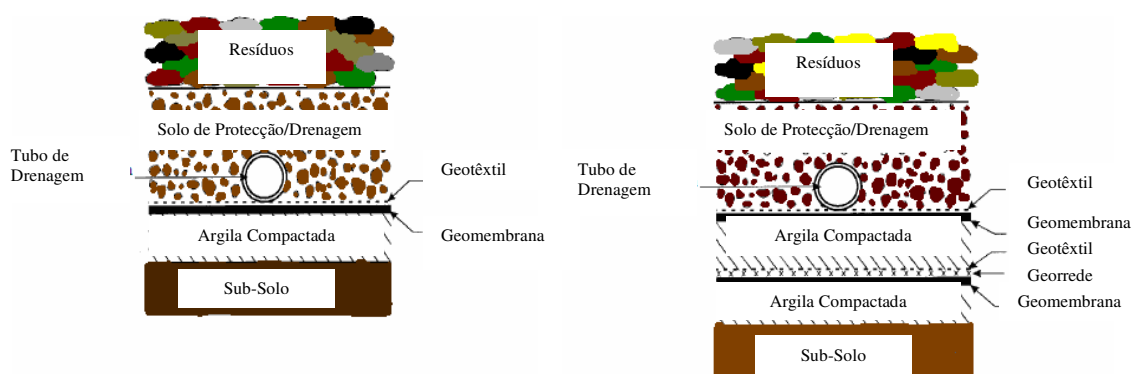


Figura II.1. Sistema de camadas de protecção para revestimento em aterros nos Estados Unidos, revestimento simples composto (Adaptado de Reddy *et al.*, 1996).

Figura II.2. Sistema de camadas de protecção para revestimento em aterros nos Estados Unidos, revestimento composto duplo (Adaptado de Reddy *et al.*, 1996).

O objectivo da camada de detecção de fugas é monitorizar o desempenho do revestimento superior e conduzir a uma acção apropriada para ser tomada quando os lixiviados são encontrados nesta camada. Esta camada num sistema de revestimento composto duplo pode conter fluxos que podem ser devidos a fugas através da camada superior ou devido a outras fontes tais como água da construção, água de consolidação e água de infiltração. Contudo, quando os lixiviados são encontrado nesta camada é um sinal que o revestimento composto superior é insuficiente. Se o revestimento superior falhou, então a eficiência do revestimento composto duplo é reduzida à do revestimento composto único. Este sistema de revestimento possui o sistema de recolha de lixiviados directamente sobre o revestimento primário (Hughes *et al.*, 2005; Munie, 2003). O revestimento composto deve consistir em duas componentes: a camada superior que é composta por uma geomembrana de 1,5 mm de espessura e a componente inferior que é composta por uma camada de argila compactada de no mínimo 120 mm de espessura. A geomembrana deve ser instalada em contacto directo e uniforme com a componente de solo de argila compactada (Young *et al.*, 2004; Munie, 2003). A argila é considerada favorita na sua utilização como revestimento, devido à sua capacidade para adsorver e reter muitos dos constituintes químicos encontrados nos lixiviados e pela sua resistência ao fluxo dos lixiviados. No entanto, o uso combinado de uma geomembrana e revestimentos de argila é utilizado devido à resistência proporcionada pelas geomembranas ao movimento dos lixiviados e dos gases (Tchobanoglous *et al.*, 1993).

Limitando o tamanho da área activa de deposição e usando medidas efectivas para minimizar a infiltração da chuva no interior dos resíduos e para desviar o escoamento da água superficial dos resíduos conseguirá diminuir-se significativamente as taxas de formação de lixiviados comparadas com as taxas observadas sob condições menos controladas. Os sistemas de camadas bem construídos e projectados podem ser muito efectivos na minimização da infiltração da chuva nos resíduos, reduzindo então as taxas de produção de lixiviados para valores próximos de zero (Munie, 2003).

As camadas de cobertura dos aterros são geralmente criadas por uma camada de nivelamento, camada de cobertura e camada de protecção. As características da camada de nivelamento, especialmente a sua espessura e a permeabilidade, são projectados tendo em consideração o plano geral das camadas cobertura. A camada de protecção protege a camada de cobertura contra os danos, especialmente mecânicos. É geralmente criada por um geotêxtil ou solo adequado. A camada de drenagem é composta por um material permeável com menos de 0,3 m de espessura e com um coeficiente de filtração $k \geq 1 \times 10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$. A camada de cobertura de topo sobre a cobertura do aterro tem de ser bastante espessa para assegurar a protecção da cobertura do topo do aterro contra danos, especialmente por efeitos climáticos e biológicos. A espessura recomendada desta camada é de pelo menos 1,0 m (Kohoutek e Tuček, 2001).

O fundo dos alvéolos e as paredes laterais têm, por sua vez, que apresentar estanquidade de modo a cumprir com a legislação ou as recomendações das entidades responsáveis pelo Ambiente. Deste modo, podem ser impermeabilizados através de camadas múltiplas geológicas (argilas com espessura de 1 m com o coeficiente de permeabilidade $k \leq 10^{-9} \text{ m.s}^{-1}$) e geomembrana de polietileno de alta densidade nas espessuras recomendadas estruturalmente, como medida de segurança contra acção poluente dos lixiviados (Russo, 2003; Katsumi *et al.*, 2001).

Na Figura II.3. pode ver-se um exemplo de um esquema de impermeabilização do fundo de um alvéolo com quatro camadas de geossintéticos e utilização de brita como camada de drenagem.

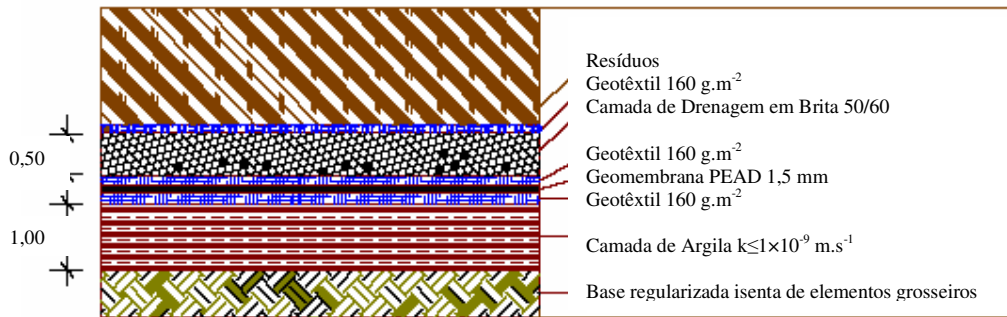


Figura II.3. Exemplo de um esquema de impermeabilização do fundo de um alvéolo (Adaptado de Russo, 2003).

Na Figura seguinte (II.4.) pode observar-se a introdução de pneus como protecção mecânica das telas e para facilitar a drenagem, sendo também usados como meio de drenagem nos sistemas de recolha de lixiviados em alternativa à gravilha. O tamanho indicado para os pedaços de pneus usados na camada de drenagem é de 50 mm com uma gama aceitável de 25-100 mm. Como a camada de drenagem se localiza perto da base do aterro, esta camada experimenta grandes compressões devido à sobrecarga dos resíduos que reduz principalmente a sua espessura para 19-50 % em comparação com o valor de espessura inicial. A redução dos espaços vazios nos pedaços de pneus colocados abaixo dos resíduos podem reduzir a condutividade hidráulica (permeabilidade) da camada de drenagem (Warith e Rao, 2006).

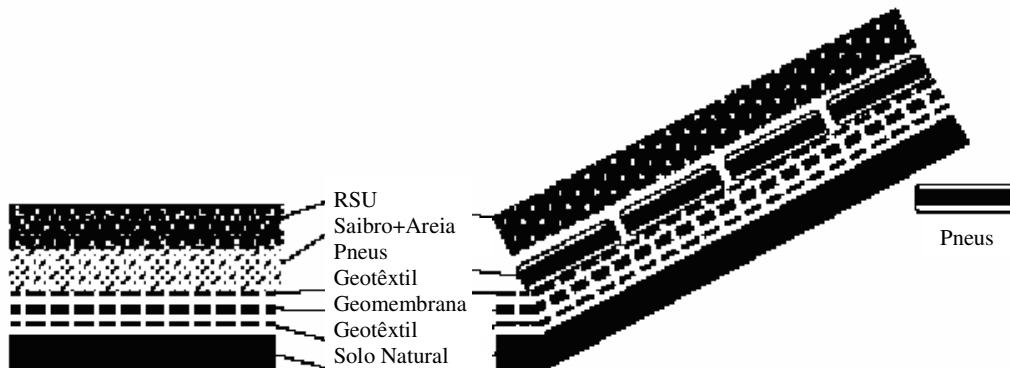


Figura II.4. Exemplo de fundo de alvéolo impermeabilizado com geossintéticos e talude com camada de pneus usados para protecção mecânica das telas e fácil drenagem (Adaptado de Russo, 2003).

II.1. Geossintéticos

Os geossintéticos são muito usados em sistemas de revestimento para isolamento e remoção dos lixiviados do ambiente devido ao limitado espaço necessário e fácil colocação. Por isso, os geossintéticos substituíram a gravilha na segunda camada de drenagem. Contudo a gravilha permanece ainda na primeira camada de drenagem (Jaisi *et al.*, 2005; Iizuka *et al.*, 2004; Jaros, 1996; Seeger e Müller, 1996).

Num aterro sanitário, os geossintéticos podem desempenhar diferentes funções não só nos sistemas de impermeabilização, como também nos sistemas de drenagem, nos sistemas de recobrimento, na fundação, nas estruturas de reforço, etc. A aplicação de geossintéticos em aterros sanitários pode ter mais ou menos impactes positivos ou negativos no ambiente, conforme o desempenho exigido, as funções exercidas, o local de aplicação e o tempo de vida da estrutura (Russo, 2003; Reddy e Butul, 1999).

As vantagens dos geossintéticos são (Bouazza, 2002):

- Espessura limitada;
- Boa conformidade com assentamentos diferenciais do solo subjacente ou dos resíduos;
- Fácil instalação;
- Baixo custo.

A espessura limitada desta barreira pode produzir vulnerabilidade a acidentes mecânicos, limitada capacidade de adsorção e aumento significativo do transporte difusivo.

II.1.1. Elementos Estruturais

A nível de elementos estruturais de um aterro pode encontrar-se a fundação, sistema de impermeabilização da base, sistema de impermeabilização lateral, sistema de drenagem de lixiviados, sistema de extracção de biogás, corpo de resíduos, aterro reforçado, capeamento de topo e finalmente a superfície de topo.

Neste capítulo optou-se por abordar apenas a fundação e o sistema de impermeabilização de base, relativamente ao corpo de resíduos este será abordado mais tarde (Capítulo V).

II.1.1.1. Fundação

Num aterro sanitário pretende-se que a fundação actue como barreira hidráulica natural e possua capacidade resistente adequada e baixa compressibilidade. Segundo o mesmo autor as exigências relativamente à fundação, envolvem problemas geológicos e hidrogeológicos a considerar na fase preliminar de selecção do local. Naturalmente que a melhor solução tem a ver com a possibilidade de construir sobre um estrato espesso de argila homogénea sobreconsolidada. Porém, a possibilidade de encontrar fundações com estas características é muito baixa, havendo necessidade de recorrer a sistemas de impermeabilização artificiais. Outra exigência é a nível de questões de natureza geotécnica, que pode levar a roturas por falta de capacidade de carga da fundação, a deformações excessivas e assentamentos diferenciais responsáveis por roturas dos sistemas de impermeabilização, ou aparecimento de fendas e fissuras (Russo, 2003).

II.1.1.2. Sistema de Impermeabilização da Base

A função fundamental atribuída ao sistema de impermeabilização da base é a de actuar como barreira aos lixiviados, protegendo, assim, as águas subterrâneas da poluição. A produção de lixiviados inicia-se num curto espaço de tempo após a deposição dos resíduos e continua durante muitos anos, mesmo depois da cobertura final do aterro (Ganjian *et al.*, 2004; Russo, 2003). A integridade do revestimento do aterro e dos sistemas de recolha de lixiviados está fundamentalmente dependente da integridade da sub – base que permanece abaixo. A sub – base deve ser bem consolidada, com um recalque mínimo, para fornecer uma plataforma firme para a compactação da camada de argila, para proteger a geomembrana das excessivas tensões e para assegurar que o sistema de drenagem drena efectivamente durante todo o tempo de vida do aterro. A sub – base pode também oferecer a capacidade para atenuar a deslocação dos contaminantes através do revestimento (Department of Environment, 2005). O solo da sub – base é

usado para contornar a superfície do aterro e servir como sub – base para a camada que actua como barreira (Amin, 2000; Tchobanoglous *et al.*, 1993).

A base deve consistir num material sobre a sub – base com uma espessura mínima de 300 mm. Não deve existir qualquer leito de rocha ou outra rocha a aflorar à superfície menos do que 300 mm sobre a superfície da base. O material da base deve possuir uma condutividade hidráulica mínima de pelo menos $1 \times 10^{-3} \text{ cm.s}^{-1}$ (Underwood, 1997).

A grande durabilidade dos sistemas de impermeabilização utilizados está dependente das camadas minerais às quais se atribui a função principal de selagem e retenção de poluentes (Dinis *et al.*, 2002).

Na Figura seguinte pode visualizar-se um alvéolo de deposição de resíduos sólidos e uma possível cobertura da base.



Figura II.5. Vista de uma alvéolo de deposição de resíduos sólidos de um Aterro (Russo, 2003).

Os geossintéticos englobam não só as geomembranas, como também geotêxteis, georredes, entre outros, no entanto optou-se por abordar mais aprofundada e pormenorizadamente as geomembranas.

II.1.2. Geomembranas

As barreiras que contêm geomembranas podem ser úteis em qualquer aplicação onde o fluxo da água ou outros líquidos têm de ser controlados. O uso de geomembranas é um modo de assegurar a continuidade de um material de permeabilidade extremamente

baixa (Thomas e Koerner, 1996) e são normalmente usadas em aterros para minimizar a potencial contaminação do ambiente (Koerner e Koerner, 2005; Kodikara, 2000; Seeger e Müller, 1996).

Uma vez que os aterros envolvem o enchimento de uma depressão natural ou feita pelo homem no interior do solo, com resíduos, os revestimentos são colocados nos lados e na base destas instalações para formar uma barreira efectiva à deslocação da contaminação dos resíduos para as águas subterrâneas (Kodikara, 2000; Koerner e Eith, 1998). A prática comum consiste na construção de revestimentos de argila compactada nos taludes preparados com solo natural e depois coloca-se o revestimento de geomembranas na superfície da argila. Subsequentemente a construção do aterro inclui a colocação da cobertura de solo e camadas de resíduos com várias alturas sobre o revestimento da geomembrana. As geomembranas têm uma capacidade de tensão limitada e por isso, devem ser protegidas de elevadas tensões para assegurar a sua integridade como barreiras (Kodikara, 2000; Reddy e Butul, 1999). Além disso, possuem baixo ângulo de atrito e alta expansão/retracção térmica (Dinis *et al.*, 2002).

Os requisitos de uma geomembrana para o seu uso como barreira incluem (Koerner e Koerner, 2005; Thomas e Koerner, 1996):

- Elevada rigidez para facilidade da instalação;
- Elevada resistência a uma variedade de produtos químicos, incluindo solventes orgânicos;
- Capacidade para unir perfis entrelaçados nas bordas das camadas;
- Durabilidade em aplicações submersas.

As geomembranas devem ser protegidas por um geotêxtil para evitar a perfuração pela camada de drenagem granular, evitar o estado fractura do revestimento de argila compactada durante a instalação da geomembrana, melhorar a qualidade, assegurando que a superfície mais baixa da geomembrana permanece limpa, e prevenir os danos da geomembrana pelos elementos fortes perfurantes, algumas vezes presentes na superfície do revestimento de argila compactada (Cartaud *et al.*, 2005). As geomembranas são sujeitas a cargas pesadas por equipamentos de construção principalmente durante a instalação. Por isso, é necessário uma cobertura de protecção para colocação dos

materiais sobre a geomembrana para prevenir os danos da construção, e prevenir o esforço demasiado da geomembrana devido a colocação corrente dos resíduos (Reddy *et al.*, 1996).

A espessura da geomembrana é importante pelas seguintes razões (Yin *et al.*, 2001):

- Assegurar suficiente permeabilidade a líquidos e gases;
- Assegurar que pode resistir adequadamente a forças mecânicas, especialmente na fase de construção;
- Assegurar técnicas seguras para soldar a membrana e as camadas em conjunto;
- Conduzir a possibilidade de gravação da geomembrana, aumentando portanto a fricção entre a geomembrana e outros materiais.

A diferença entre geomembranas e geotêxteis é que a geomembrana possui uma baixa permeabilidade, enquanto que os geotêxteis têm aproximadamente a mesma permeabilidade que a areia. Em comparação com as geomembranas, a aplicação de geotêxteis é relativamente nova, a qual inclui uma importante aplicação da protecção da geomembrana (Yin *et al.*, 2001).

Existem vários tipos de geomembrana, no entanto, pelo estudo efectuado, verificou-se uma maior utilização de geomembranas de polietileno de alta densidade.

Polietileno de Alta Densidade (HDPE)

O HDPE é uma boa escolha para muitos dos requisitos de geomembranas para o seu uso como barreira. Não é suficientemente rígido para ser directamente conduzido como uma chapa de aço. Outra razão para a escolha do HDPE é a sua capacidade para ser moldado pela extrusão de perfis (Zanzinger, 1999; Thomas e Koerner, 1996).

Uma das propriedades mais importantes das barreiras é a baixa permeabilidade a produtos químicos. É importante distinguir a permeabilidade de produtos químicos da permeabilidade normalmente usada pelos engenheiros geotécnicos, isto é, da

condutividade hidráulica. No caso dos solos ou de outros meios porosos, o transporte da água (ou de outros produtos químicos) ocorre através dos espaços vazios do solo, poros e fissuras. Alternativamente, na infiltração dos produtos químicos nas geomembranas, os produtos químicos passarão através de uma membrana não porosa ao nível molecular (Colmanetti, 2000; Thomas e Koerner, 1996).

O HDPE é também um plástico semi-cristalino o que o torna resistente à infiltração pelos produtos químicos. Existe uma variedade de factores que afectam a taxa de infiltração dos produtos químicos através das membranas: a concentração química, a temperatura, e a espessura da camada, por exemplo. Além disso, a penetração consiste em duas principais componentes, difusibilidade e solubilidade. A difusão é a velocidade do transporte dos produtos químicos através das barreiras. A solubilidade é a quantidade de produtos químicos que a barreira pode suportar (Sangam *et al.*, 2005).

Existem, no entanto, algumas desvantagens associadas, nomeadamente, porque é um material de difícil trabalhabilidade, tem pouca aderência aos solos, tem elevado coeficiente de expansão térmica e trincamentos por tensão (Colmanetti, 2000).

II.2. Cobertura Diária

A cobertura diária é uma camada que é colocada no topo do aterro no final de cada dia, tendo que esta camada ser impermeável (EPA, 2000). O solo arenoso é normalmente usado como uma cobertura diariamente, mas podem ser usados outros tipos de material, tais como (EREF Home Page, 2006):

- Argila (que necessita, contudo, de ser removida ou mudada para cima antes da colocação dos resíduos no topo para que não conduza os fluidos facilmente através dos resíduos);
- Areia;
- Cobertura têxtil (material produzido pelo homem enrolado sobre o topo de aterro);
- Pedacos de pneu (pneus que foram cortados em pequenos pedacos em tiras);
- Cascas de árvores;

- Pedacos de madeira.

A cobertura diária é usada para melhorar o acesso ao aterro, reduzir a quantidade de resíduos que se podem dispersar, reduzir os odores e reduzir a oportunidade de fogo (Enfouissement technique Home Page, 2006; Block e Rees, 2004).

A precipitação (chuva, neve) que cai na superfície da cobertura diária permanece no aterro, não podendo escoar para a terra circundante. A cobertura diária tem aproximadamente 150 mm de espessura, excepto se é feita por têxteis produzidos pelo homem (EREF Home Page, 2006; Tchobanoglous *et al.*, 1993).

Quando o solo é usado como cobertura, este deve conter alguma matéria orgânica para ajudar a atenuar os odores do aterro. A espessura típica da cobertura é de 0,3 m (Department of Environment, 2005).

As vantagens de usar coberturas diárias alternativas sobre os métodos tradicionais podem incluir, por exemplo (EPA, 2001):

- Preservação dos espaços vazios;
- Preservação do material do solo;
- Biodegradável ; e
- Permeável à água e gás.

Para além da cobertura diária existem outros tipos de cobertura essenciais num aterro, tal como a cobertura intermédia, que permite uma menor infiltração dos lixiviados.

II.3. Cobertura Intermédia

Esta cobertura é usada nas áreas de topo do aterro que não será usada por um longo período de tempo (cerca de 2 anos ou mais). Cobrindo as partes do aterro que não são usadas poderá reduzir-se a quantidade de líquido que se acumulará no aterro, desde que qualquer água que se acumula na superfície de uma camada intermédia seja conduzida

para escoar para o local e para a terra circundante (EREF Home Page, 2006). As camadas intermédias normalmente são feitas a partir de qualquer tipo de solo que está disponível no local do aterro.

A espessura da cobertura intermédia é de aproximadamente de 300 mm, duas vezes mais à usada para a cobertura diária. A vegetação normalmente cresce no topo da cobertura como protecção contra a erosão. Quando a área é para ser usada novamente para o despejo de resíduos, a vegetação é cortada (EPA, 1996).

Os materiais e os métodos de colocação da cobertura intermédia podem limitar a quantidade de água superficial que entra no aterro e mais tarde se torna lixiviados. Materiais tais como revestimento de argila compactada e argila são efectivos na limitação da entrada de água superficial no aterro. Para a cobertura intermédia ser eficaz os materiais devem estar inclinados para aumentar o escoamento da água superficial. Em alguns aterros é colocada temporariamente uma camada muito espessa de solo (900 a 1800 mm) sobre a célula completa. Qualquer chuva que infiltre a camada de cobertura intermédia é retida devido à sua capacidade de campo. Quando é colocada uma segunda camada sobre a primeira, o solo é removido e armazenado antes de começar o enchimento (Tchobanoglous *et al.*, 1993).

Quando a quantidade de solo natural disponível para o uso como material de cobertura intermédia é limitada, são usados materiais de resíduos alternativos para este objectivo. Os materiais apropriados que podem ser usados como um substituto para o solo natural incluem o húmus e matéria vegetal produzida de resíduos de cercas e húmus produzido dos resíduos sólidos municipais (EPA, 2001). Uma vantagem importante de usar húmus e matéria vegetal produzido de resíduos sólidos municipais é que o volume do aterro que seria ocupado pelo solo usado como cobertura intermédia está agora disponível para deposição dos materiais de resíduos (Tchobanoglous *et al.*, 1993).

O elevado grau de compactação do solo da camada intermédia e dos resíduos corresponde a um elevado nível de lixiviados devido à diminuição na capacidade de

campo e na condutividade hidráulica. O efeito da espessura do solo de cobertura no nível dos lixiviados é menor (Jang *et al.*, 2002).

II.4. Cobertura Final

A Figura II.6 ilustra o perfil das componentes do sistema de cobertura final que foi projectado e construído para o encerramento do aterro. O objectivo da camada de 0,75 m de espessura (condutividade hidráulica de $1 \times 10^{-6} \text{ cm.s}^{-1}$ ou menos) é suportar a vegetação, assim como, proteger as camadas subjacentes da penetração de raízes e evitar danos da geada. A camada de drenagem geocomposta colocada imediatamente a seguir à camada de cobertura vegetativa serve como o sistema de recolha e remoção da infiltração para o controlo da precipitação que se infiltrou através da camada de cobertura vegetativa. A barreira composta consiste numa geomembrana em PVC (Policloreto de vinila) de 0,5 mm de espessura colocada no topo do revestimento geossintético de argila.

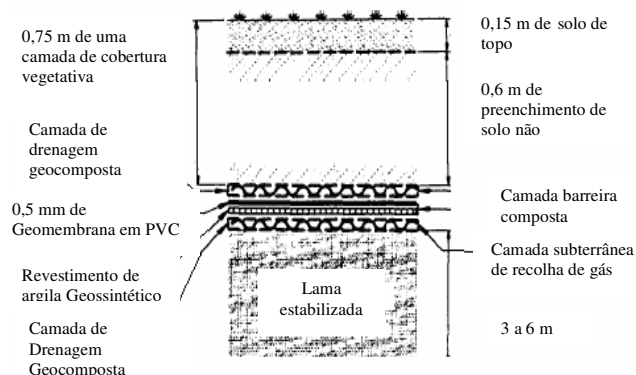


Figura II.6. Sistema de Cobertura Final (Adaptado de Tweneboah *et al.*, 1994).

Os objectivos da barreira composta são (Amin, 2000; Tweneboah *et al.*, 1994):

- Minimizar o derrame de precipitação no interior do aterro, desse modo minimizando a taxa e quantidade de produção de lixiviados;
- Minimizar a migração ascendente dos lixiviados para fora do aterro;
- Reduzir o volume e velocidade do gás descarregado para a atmosfera através dos sistemas de camadas finais.

A Figura II.7. pretende apresentar algumas configurações utilizadas para a cobertura final de um aterro, desde coberturas mais simples até mais complexas através da inserção de uma camada de drenagem e uso de geotêxtil.

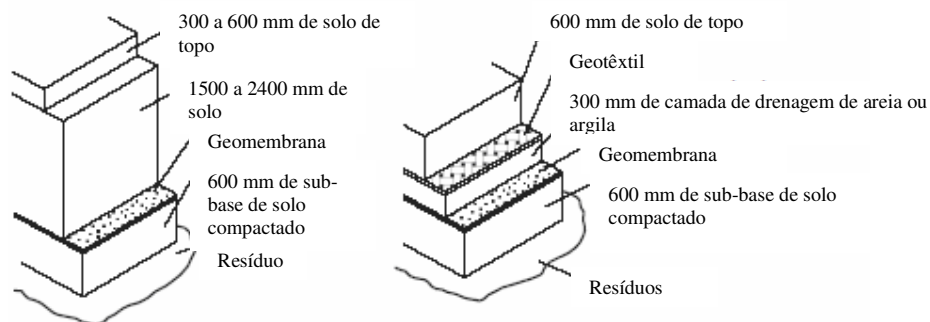


Figura II.7. Algumas configurações sugeridas para a cobertura final (Adaptado de Amin, 2000).

Sobre a barreira composta existe uma camada geocomposta que serve como uma camada de canalização subterrânea para a recolha e remoção dos lixiviados expelido da lama espessa devido à consolidação causada pela colocação do sistema de cobertura final e pelo próprio peso. Esta camada de canalização subterrânea também serve como uma camada de recolha de gás para o controlo da migração do gás do aterro (Tweneboah *et al.*, 1994).

Cada destas duas camadas de drenagem geocompostas consiste numa camada de georrede colocada entre duas camadas de geotêxtil *nonwoven needlepunched*. Os geotêxteis funcionam assim como filtros e/ou separadores (Tchobanoglous *et al.*, 1993).

Os geossintéticos são usados como os principais componentes do sistema de cobertura no lugar dos materiais de construção convencional para reduzir o stress vertical aplicado na lama. Assim diminui-se o recalque total e o volume dos lixiviados gerado devido à consolidação do resíduo (Zanzinger, 1999; Tweneboah *et al.*, 1994).

Para facilitar a colocação do solo da cobertura vegetativa e para suportar o peso dos equipamentos de construção, é colocada uma camada de lama estabilizada com 3 m a 6 m de espessura sobre a lama do local. A lama estabilizada consiste numa mistura de

lama com cascas de árvores e cinzas volantes para fornecer uma tensão mínima da camada de canalização subterrânea de 24 kPa (Tweneboah *et al.*, 1994).

Os objectivos dos sistemas de cobertura final nos aterros consistem em reduzir a infiltração de água da precipitação, limitar a libertação incontrolável dos gases do aterro, reduzir a proliferação dos vectores, reduzir potenciais fogos, fornecer a revegetação superficial, e servir como um elemento primário na selecção do local. A redução da infiltração num aterro é atingida através da drenagem superficial e escoamento com erosão mínima, transpiração e da percolação (EPA, 2003; Murphy e Garwell, 1998).

O sistema de cobertura final é necessário para fechar o aterro e deve possuir uma camada de infiltração com uma espessura mínima de 450 mm, que atinge uma redução equivalente na infiltração, coberta por uma camada de erosão que tem uma espessura mínima de 150 mm, como se pode observar na

Figura II.8. A camada de erosão é usada para suportar a vegetação e fornecer protecção contra o vento e erosão da água (RTDF Home Page, 2006; Murphy e Garwell, 1998).

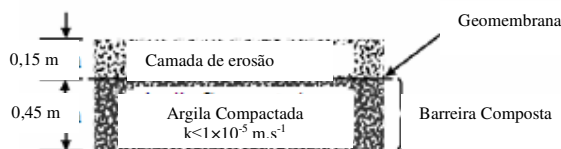


Figura II.8. Camada de erosão e de infiltração (Adaptado de EPA, 2003).

A camada de infiltração deve possuir uma condutividade hidráulica menor ou igual a qualquer revestimento de fundo ou solos naturais presentes para prevenir o efeito de “banheira”. Este efeito aumenta o potencial de formação de lixiviados (EPA, 2003). A camada de infiltração não pode ter uma condutividade hidráulica maior do que $1 \times 10^{-5} \text{ cm.s}^{-1}$ sem ter importância a permeabilidade dos revestimentos inferiores. A barreira de infiltração deve possuir uma inclinação de 3 % mas não mais do que 5 % (Block e Rees, 2004; Murphy e Garwell, 1998).

A cobertura final deve ser projectada para ter uma permeabilidade menor ou igual à permeabilidade do sistema de revestimento do fundo do subsolo natural presente, ou

uma permeabilidade não superior a $1 \times 10^{-5} \text{ cm.s}^{-1}$. A camada de baixa permeabilidade do sistema de cobertura final tem como objectivos minimizar a produção dos lixiviados pelo derramamento da precipitação mais do que conduzi-la para percolar através dos resíduos, prevenir o movimento rápido dos lixiviados e fornecer uma barreira entre os resíduos e os receptores. A instalação da cobertura final deve ser completada em 6 meses da última recepção de resíduos (Murphy e Garwell, 1998).

O projecto da cobertura final é dificultado pelas temperaturas extremas, ciclo de molha e seca dos solos, raízes da plantas, covas dos animais e insectos no solo, arranjo diferencial, deslizamento descendente do declive ou deformação, movimento dos veículos nas vias, erosão do vento e da água e deformação causada pelos tremor de terra (Tchobanoglous *et al.*, 1993).

O movimento da água através das barreiras capilares é determinado pela diferença nas propriedades hidráulicas insaturadas que existem entre as camadas de cobertura. Quando os solos são insaturados a condutividade hidráulica da camada de superfície do topo é maior do que a camada de solo inferior (Murphy e Garwell, 1998). A eficiência do solo compactado é controlada pela sua condutividade hidráulica, a qual é limitada pelas agências de protecção ambiental (Bozbey e Guler, 2005).

A cobertura final tem normalmente uma espessura de 900 a 1800 mm e inclui uma camada de argila compactada, com outras camadas para aumentar a drenagem e suportar a vegetação da superfície (Tchobanoglous *et al.*, 1993). As coberturas finais de um aterro são sempre específicas do local. No entanto, existem algumas generalidades relacionadas com a concepção das camadas específicas que devem ser consideradas (Koerner, 2002).

A Figura II.9. apresenta a identificação das camadas gerais e a Figura II.10. apresenta materiais geossintéticos que são muitas vezes usados para substituir ou aumentar algum, ou todo, o material de solo natural que deve ser colocado (Koerner, 2002).

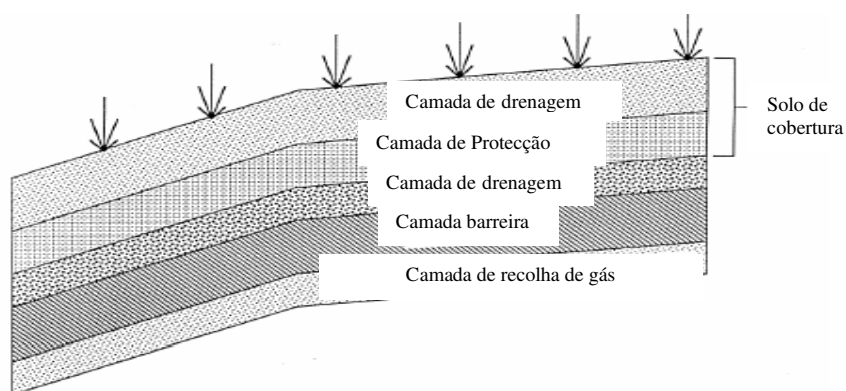


Figura II.9. Camadas essenciais de um sistema de solos naturais (Adaptado de Koerner, 2002).

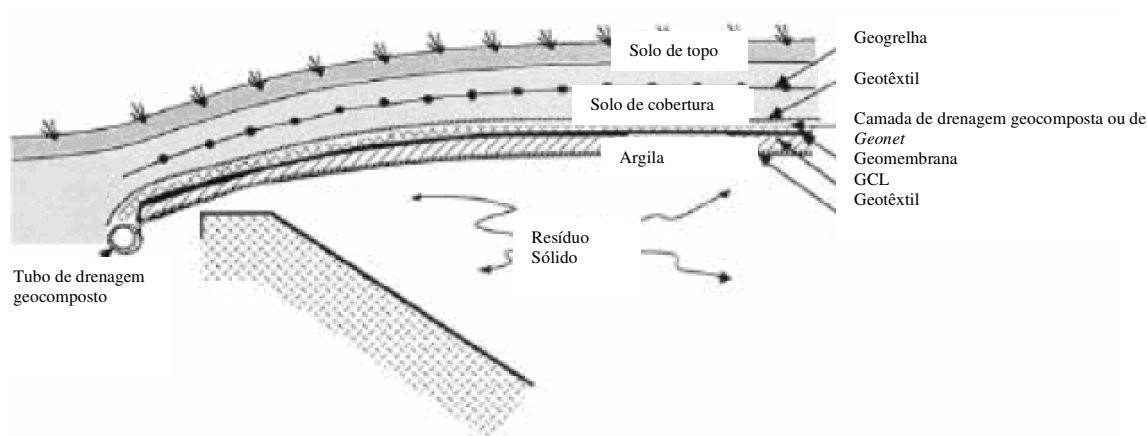


Figura II.10. Alternativas de Geossintéticos para substituir o material de solo natural na cobertura final (Adaptado de Koerner, 2000).

II.5. Componentes do Sistema de Limitações Ambientais de um Aterro

A camada de protecção de 600 mm composta por solo e os 150 mm sobrepostos de solo de topo, como pode ser visualizado na Figura II.11., servem para proteger a geomembrana subjacente e estimular o escoamento da água da chuva para fora do aterro (NYSDEC Home Page, 2006).

São usados vários tipos de cobertura de protecção para os revestimentos dos aterros. O uso de geotêxteis sobre a geomembrana aumenta a resistência de perfuração das geomembranas e amortece as cargas causada pela elevada colocação inicial de resíduos. O solo da camada de protecção previne o contacto directo do equipamento de construção com a geomembrana e distribui a carga dos veículos por uma área grande,

reduzindo a tensão na geomembrana. Esta consiste num solo granular de livre drenagem que também serve como uma camada de drenagem para o sistema de recolha e remoção dos lixiviados. O grau de protecção da geomembrana depende do tipo e propriedades do geotêxtil, e da composição e espessura da camada de solo usada (Russo, 2003).

Uma cobertura de protecção ideal para revestimentos de aterros com geomembranas deve satisfazer os seguintes requisitos durante a construção e após a colocação de resíduos (Reddy *et al.*, 1996):

- Prevenir os danos para a geomembrana do stress induzido pela construção da camada de drenagem e colocação de resíduos;
- Prevenir os danos para a geomembrana tais como rompimento, rotura ou perfuração;
- Possuir propriedades que conduzam à colocação com o mínimo fracturas e formação de irregularidades, uma vez que o fácil acesso através de grandes áreas durante a construção é crítico para atingir o custo efectivo;
- Consistir num material de livre drenagem que também pode servir como um meio de drenagem efectivo para os lixiviados do aterro;
- Ser capaz de resistir às condições de construção, operação e selagem do aterro sem experimentar maiores mudanças nas propriedades físicas.

Uma espessura de geomembrana de 1,5 mm ou uma espessura de 1 mm, dependendo do tipo de material usado, juntamente com a camada de argila de baixa permeabilidade subjacente, formam um sistema de cobertura de barreira composta que previne a infiltração da chuva de atingir os resíduos sólidos submersos no aterro e produzindo lixiviados adicionais. A camada de passagem de gás recebe e controla os gases do aterro gerado pela decomposição da massa de resíduos (NYSDEC Home Page, 2006).

O sistema primário de recolha e remoção de lixiviados consiste numa série de tubos e canos no interior da camada de gravilha ou areia projectada para recolher todos os lixiviados, os quais drenam através da massa de resíduo e para controlar a capacidade de lixiviados, actuando no revestimento inferior (Rowe, 1998). Este sistema reduz a altura de lixiviados acumulados, filtra os lixiviados e, conseqüentemente, minimiza a contaminação de águas subterrâneas. Com a redução da carga de lixiviados na base do

aterro, o gradiente hidráulico através da barreira subjacente e a velocidade de fluxo são reduzidos a níveis aceitáveis. Desta forma, a massa de contaminantes avaliada para transporte dentro do sistema hidrológico será bastante reduzida (Colmanetti, 2000).

A geomembrana de 1,5 mm de espessura está na base do sistema de recolha de lixiviados. No fundo do aterro, esta geomembrana está sobreposta por uma camada de argila ou GCL (uma camada fina manufacturada de têxteis muito fortes e argila de extremamente baixa permeabilidade) para fazer um revestimento composto. Os lixiviados recolhidos são enviados para uma Estação de Tratamento de Águas Residuais (ETAR) (NYSDEC Home Page, 2006).

O sistema secundário de recolha e remoção de lixiviados é constituído por uma série de tubos e canos suplementares no interior da camada de areia ou gravilha projectada para recolher alguns lixiviados que não foi controlado pelo sistema primário de revestimento. Uma geomembrana de 1,5 mm de espessura sobreposta por uma camada de argila de espessura 600 mm ou GCL compreende o sistema de revestimento secundário composto o qual actua como limitação secundária para os lixiviados (NYSDEC Home Page, 2006; Rowe, 1998). Quando a camada drenante for de material granular (areia ou brita) exige-se uma espessura não inferior a 0,30 m e condutividade hidráulica superior a 1×10^{-2} cm.s^{-1} .

A figura seguinte permite visualizar as principais componentes de um aterro.



Figura II.11. Componentes do aterro (Adaptado de NYSDEC Home Page, 2006).

Começando do topo mais alto da cobertura, pode encontrar-se:

- Solo de topo – É uma camada de solo rica em nutrientes. A vegetação pode ser plantada aqui. A camada do solo de topo tem cerca de 150 mm de espessura (Rock e Rees, 2004).
- Camada de protecção – A camada de protecção protegerá a camada barreira abaixo das fracturas, do gelo e a descongelação durante os meses frios, também permite que as raízes da vegetação cresçam. Esta camada é normalmente composta por solo sedimentoso e tem cerca de 600 mm de espessura (Project Memorandum, 2004).

- Camada de drenagem – A camada de drenagem é usada para fornecer a drenagem para afastar muita humidade da camada barreira tanto para baixo quanto possível, diminuindo a pressão da água na camada barreira. Esta camada é normalmente de areia grossa e com cerca de 200 mm de espessura (EPA, 2000).
- Camada barreira – A camada barreira é colocada no local de modo a afastar o movimento dos líquidos no aterro e a libertação dos gases através da cobertura. Normalmente é de argila e com cerca de 50 mm de espessura (Amin, 2000).
- Camada de nivelamento – O material é normalmente solo grosso ou areia. É colocada no topo dos resíduos para tornar uma superfície uniforme e de nível. Esta camada tem normalmente de 150 a 600 mm de espessura (EREF Home Page, 2006; Warith *et al.*, 2004).

A argila é utilizada para proteger a água subterrânea dos contaminantes do aterro, os revestimentos de argila são construídos como um simples revestimento que tem 600 a 1500 mm de espessura. Em revestimentos compostos ou duplos, as camadas de argila compacta possuem normalmente 600 a 1500 mm de espessura, dependendo das características da geologia abaixo e do tipo de revestimento a ser instalado. Em teoria, 300 mm de argila é suficiente para conter os lixiviados. A razão para usar mais argila é salvaguardar o ambiente no caso de alguma perda de eficiência da camada de argila, ou seja, é um factor de segurança. A eficiência das camadas de argila pode ser maximizada pela colocação da argila em camadas de 100 a 150 mm e depois compactar cada camada com um rolo pesado (Hughes *et al.*, 2005).

Para minimizar a formação de lixiviados e prevenir a poluição das fontes de água superficial, cada fase do aterro deve estar equipada com sistemas adequados de drenagem (Project Memorandum, 2004).

III. Redes de Drenagem

Um sistema de drenagem é composto por uma camada drenante de altura máxima de 30 cm formada por pedregulhos com granulometria crescente no sentido do fluxo, e que filtra e conduz para tubos ou drenos o efluente a ser recolhido (Real, 2005). Segundo o mesmo autor, os principais parâmetros de um sistema de drenagem são:

- O coeficiente de permeabilidade da camada drenante;
- A inclinação da base da camada de drenagem, em relação ao eixo da tubulação ou dreno;
- A Taxa de entrada de efluente no sistema;
- A inclinação da tubulação ou dreno, em relação ao ponto de recolha.

III.1. Rede de Drenagem de Águas Pluviais

É importante instalar uma rede de drenagem de águas pluviais, uma vez que o volume das águas lixiviantes que se acumula no interior de um aterro depende em grande parte da infiltração das águas pluviais. Por este motivo, esta rede tem a finalidade de interceptar e desviar o escoamento superficial das águas pluviais, durante e após a vida útil do aterro, evitando a sua infiltração na massa de resíduo (Net Resíduos Home Page, 2006).

III.2. Rede de Drenagem e Recolha de Lixiviados

Para impedir a acumulação de lixiviados no fundo das células dos resíduos, caso estas sejam impermeabilizadas, e evitar a sua percolação pelas camadas, são construídos sistemas de drenagem e recolha de lixiviados (Colmanetti, 2000).

Como os lixiviados percolam através dos substratos superiores, muitos dos constituintes químicos e orgânicos contidos nos lixiviados serão removidos pela acção de filtragem e de adsorção do material que compõem o substrato. Em geral, a extensão desta acção depende das características do solo, especialmente do conteúdo de argila. Devido ao risco potencial envolvido na condução dos lixiviados para percolar para a água subterrânea, a melhor prática é a eliminação ou contenção (Tchobanoglous *et al.*, 1993).

A implantação de uma rede de drenagem de águas lixiviantes tem como principal objectivo a diminuição de possíveis riscos, devido à sua elevada carga poluente (Net Resíduos Home Page, 2006). Este sistema deve recolher e conduzir os lixiviados, reduzindo as pressões deste sobre a massa de resíduos e, também, minimizar o potencial de migração para o subsolo. Outro motivo para se drenar os lixiviados é impedir que ele ataque as estruturas do aterro (camada de impermeabilização de base, por exemplo) (Warith *et al.*, 2004).

A Figura III.1. permite visualizar um dreno de recolha de lixiviados, constituído por quatro camadas de geossintéticos.

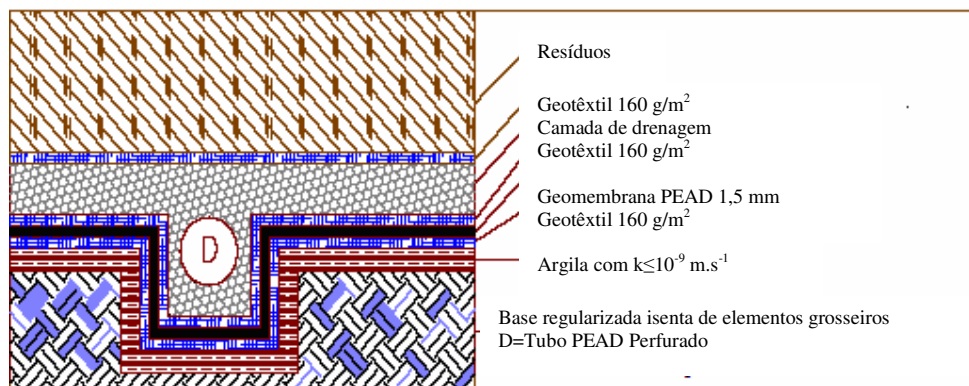


Figura III.1. Corte esquemático do dreno de recolha de lixiviados (Adaptado de Russo, 2003).

Esta rede será instalada no fundo dos alvéolos e é constituída por um conjunto de tubagens com diâmetros adequados aos caudais de lixiviados a drenar com pendentes mínimas de 1 %, ligados por caixas de visita e passagem sempre que haja mudança de direcção ou em trecho recto sempre que ultrapasse 60 m, como se pode visualizar na Figura III.2. (Russo, 2003).



Figura III.2. Vista da caixa de fundo da drenagem de lixiviados (Russo, 2003).

Os objectivos do sistema de recolha de lixiviados consistem em assegurar que este é:

1. Capaz de drenar os lixiviados de tal forma que os lixiviados sobre o revestimento é minimizado;
2. Projectado apropriadamente para recolher o volume de lixiviados estimado;
3. Resistente ao ataque químico e físico e à obstrução química e biológica;
4. Capaz de resistir ao peso dos resíduos e dos equipamentos de compactação sem esmagar, e:
5. Capaz de ser inspeccionado e limpo por inspecção de vídeo disponível e equipamento de limpeza de tubos.

A capacidade máxima de lixiviados (medido no ponto mais baixo do revestimento) para um aterro situado sobre a toalha freática é de 0,3 m.

Um sistema de recolha de lixiviados normalmente engloba uma camada de drenagem de elevada permeabilidade, tubos de recolha perfurados, um colectores onde os lixiviados recolhidos são extraídos do aterro, e geotêxteis para proteger qualquer geomembrana e prevenir a obstrução da camada de drenagem geocomposta ou camada de solo (Department of Environment, 2005; Warith *et al.*, 2004; Koerner e Soong, 2000; Reddy *et al.*, 1998; Rowe, 1998).

Na figura seguinte pode visualizar-se a instalação de um sistema de recolha de lixiviados.



Figura III.3. Instalação de um sistema de recolha de lixiviados ao longo de um sistema de revestimento, o qual inclui o uso de 1,5 mm de HDPE, GCL e rede de drenagem (adaptado de Allison *et al.*, 2004).

A camada de drenagem é um meio de elevada porosidade fornecendo um caminho preferencial para o fluxo de lixiviados para os tubos de recolha e/ou reservatório (Department of Environment, 2005). Os geotêxteis são muitas vezes usados como filtros entre os resíduos e a camada de drenagem, especialmente quando tanto a gravilha como as georredes são usadas para fornecer uma cobertura de drenagem (Rowe, 1998). Estes filtros são projectados para impedir a entrada de finos no dreno. Eles possuem a vantagem de requererem menor espaço que os filtros de solos granulares (areia ou brita), resultando num maior espaço para acondicionamento dos resíduos, além de serem fáceis de instalar e ancorar. Os critérios para dimensionamento de filtros de geotêxteis comumente utilizados são os critérios de retenção, de permeabilidade, de resistência à colmatção e de durabilidade. De entre esses, o de resistência à colmatção merece especial atenção tendo em vista que a colmatção, tanto física como biológica, é uma das maiores preocupações para a escolha dos filtros naturais e sintéticos (Colmanetti, 2000).

O elevado nível de lixiviados pode ser devido à compactação do solo efectuada diariamente para minimizar a infiltração da chuva. Mesmo que o solo de cobertura seja eficiente quando está na superfície, frequentemente torna-se uma barreira e reduz o movimento vertical dos lixiviados para os tubos de drenagem colocados no fundo (Jang *et al.*, 2002). A camada de recolha de lixiviados é um meio de recolher todos os

lixiviados sem exceder uma profundidade de lixiviados nesta camada de 300 mm. O sistema de recolha de lixiviados deve ser capaz de transferir todos os lixiviados para um ponto comum para o tratamento necessário. A camada de recolha de lixiviados deve ter uma condutividade hidráulica de $1 \times 10^{-3} \text{ cm.s}^{-1}$ ou mais. O sistema de recolha deve ser inclinado tal que pode drenar adequadamente os lixiviados. Assim, uma protecção adequada deve ser colocada sobre o sistema de recolha de lixiviados para prevenir a obstrução desta camada (Underwood, 1997).

IV. Requisitos para os Revestimentos do Aterro em Alguns Países

É conhecido que a natureza de concepção do revestimento varia, tanto no interior dos países como entre os mesmos, dependendo das estratégias e práticas de gestão de resíduos, com interesse público e decisão política. Os factores geralmente considerados incluem a minimização da infiltração e migração de gases, instalação de resíduos e outros factores (ataques químicos, congelação, etc) (Impe e Bouazza, 1997).

Para ser efectiva a minimização da deslocação de contaminantes é necessário um revestimento composto, no qual existem camadas alternadas de material para funcionar como barreiras à tentação dos contaminantes para se deslocarem do local de recolha e camadas de recolha desses contaminantes (Impe e Bouazza, 1997; Giroud e Bonaparte, 1989).

Outra alternativa usada é o uso das camadas simples de geomembranas como material. Neste caso, a geomembrana é colocada sobre o solo da fundação natural. Sobre a geomembrana, existe uma camada de gravilha com tubos perfurados para recolha e remoção dos lixiviados. Uma camada de filtro de solo é colocada entre os resíduos sólidos e a gravilha, como pode ser visualizado na Figura IV.1..

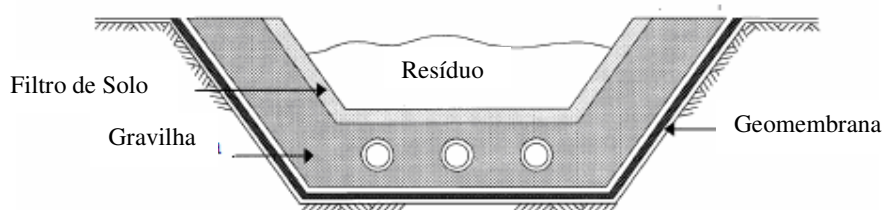


Figura IV.1. Sistemas de revestimento simples de geomembranas (Adaptado de Impe e Bouazza, 1997).

As Figuras IV.2. e IV.3. mostram exemplos de construção de revestimentos na Suíça e Alemanha em 1997. A diferença porque na Suíça o design inclui apenas uma camada de drenagem e um geotêxtil é devido ao facto de todos os resíduos domésticos serem incinerados e depositados na forma de cinzas imobilizadas. Acredita-se, neste caso, que o primeiro geotêxtil é usado como um filtro e o segundo geotêxtil como um suporte para o sistema de revestimento (Impe e Bouazza, 1997).

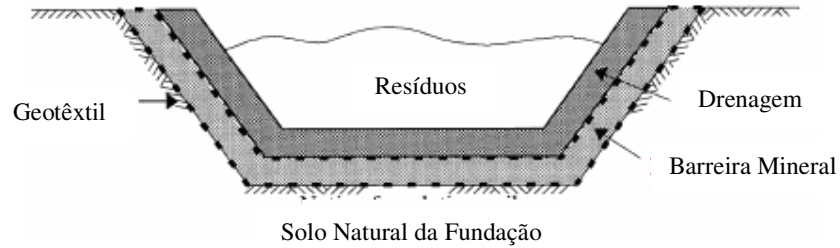


Figura IV.2. Sistema de revestimento na Suíça (Adaptado de Impe e Bouazza, 1997).

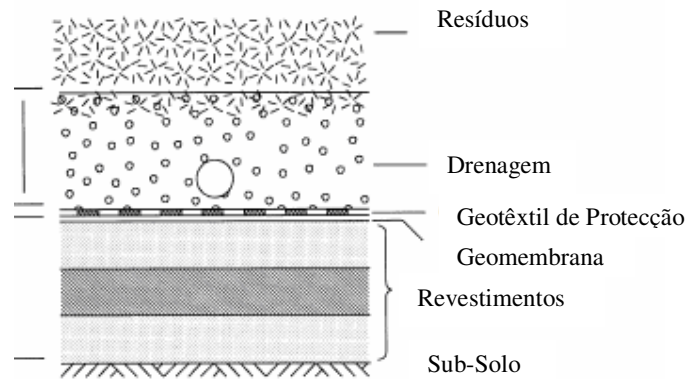


Figura IV.3. Sistema de revestimento na Alemanha (Adaptado de Impe e Bouazza, 1997).

Na Alemanha, o revestimento ainda consiste em várias camadas (os solos são colocados e compactados em camadas) de material de terra com uma espessura mínima de 0,75 m e uma geomembrana espessa. A geomembrana é protegida como um geotêxtil espesso com elevada resistência à perfuração. O sistema de base composto, como pode ser visualizado na Figura IV.4., é também usado na Áustria com uma camada de drenagem ≥ 50 cm, assim como em França (Chai e Miura, 2002).

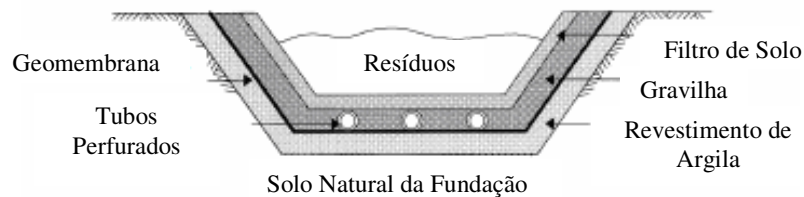
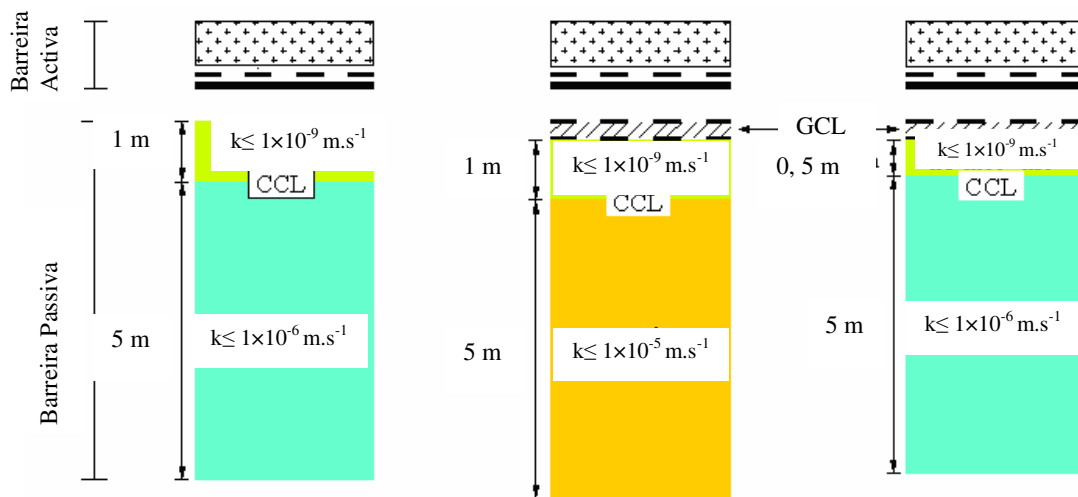


Figura IV.4. Sistema de base composto (Adaptado de Impe e Bouazza, 1997).

Em França, as barreiras activas do revestimento de fundo compreendem uma camada de drenagem e uma geomembrana HDPE (2 mm) e as barreiras passivas devem incluir um revestimento de argila compactada (CCL) com 1 m de espessura ($k \leq 10^{-9} \text{ m.s}^{-1}$) sobre 5 m de solo compactado ($k \leq 10^{-6} \text{ m.s}^{-1}$). Contudo, devido aos revestimentos de argila geossintéticos se terem tornados mais e mais utilizados neste país, o seu uso aumenta. Soluções equivalentes podem ser atingidas usando tanto um revestimento de argila geossintético (GCL) sobre 1 m de solo compactado ($k \leq 10^{-9} \text{ m.s}^{-1}$) sobre 5 m de solo compactado ($k \leq 10^{-6} \text{ m.s}^{-1}$) como um revestimento de argila geossintético sobre 0,5 m de solo compactado ($k \leq 10^{-9} \text{ m.s}^{-1}$) sobre 5 m de solo compactado ($k \leq 10^{-6} \text{ m.s}^{-1}$) (Barroso, 2005).

Na Figura seguinte pode visualizar-se os diferentes tipos de revestimentos utilizados em França. Relativamente à barreira activa esta é sempre composta por uma camada de drenagem, um geotêxtil e uma geomembrana, enquanto que a barreira passiva possui diferentes espessuras nas camadas constituintes, diferentes condutividades hidráulicas e presença ou ausência de geotêxteis.



Legenda (Barreira Activa):




-  Camada de Drenagem
-  Geotêxtil
-  Geomembrana

Figura IV.5. Diferentes tipos de revestimento utilizados em França (Barroso, 2005).

No Japão existem diferentes tipos de aterros, sendo estes constituídos principalmente por uma barreira mineral e um revestimento duplo de geomembrana, possuindo uma camada de drenagem no meio. A espessura da barreira mineral pode variar desde 50 mm até 5000 mm, dependendo do solo utilizado e respectiva condutividade hidráulica (Chai e Miura, 2002).

Na Austrália, a legislação dos aterros é principalmente da responsabilidade dos Estados e portanto o *design* do revestimento tende a ser específico por parte do Estado. Como consequência existem diferenças na proporção na qual os revestimentos foram desenvolvidos em cada Estado. Também a diferença na variação da geologia e hidrogeologia nas diferentes partes da Austrália influencia o modo no qual as regulações dos aterros forma desenvolvidas e o modo no qual o revestimento foi experimentado. Geralmente, os requisitos consistem em ter um revestimento de argila de 0,6-0,9 m para aterros de resíduos putrescíveis. Os aterros de resíduos inertes podem também exigir revestimentos dependentes da hidrogeologia do local (Impe e Bouazza, 1997).

Nos Estados Unidos, o revestimento mínimo consiste num revestimento composto único (geomembrana/argila compacta) com um sistema de recolha de lixiviados, como pode ser visualizado na Figura IV.6..

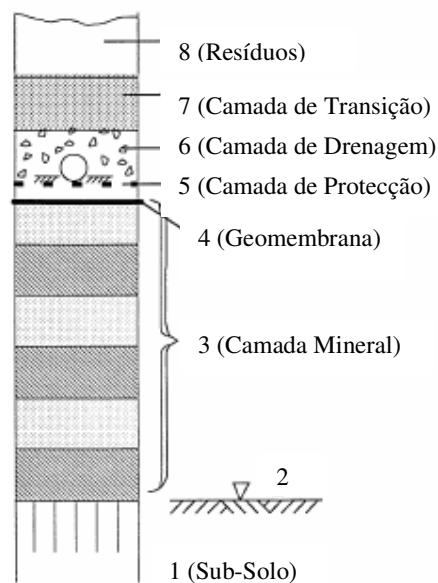


Figura IV.6. Zonas de Camadas e níveis relativos de um sistema de revestimento basal composto (Adaptado de Impe e Bouazza, 1997).

Neste caso, a camada de drenagem tem uma espessura de pelo menos 450 mm e possui tipicamente uma condutividade hidráulica $\geq 1 \text{ cm.s}^{-1}$, a geomembrana deve ter pelo menos 0,76 mm de espessura. A barreira mineral deve possuir uma espessura de pelo menos 600 mm (Chai e Miura, 2002).

A prática nos Estados Unidos para a concepção e construção de sistemas de cobertura de protecção de geomembranas para revestimentos em aterros tem várias deficiências como as expressas de seguida (Reddy *et al.*, 1996):

- O tipo de solo que pode ser usado como cobertura não está bem documentado. Como resultado o solo da camada de protecção também pode servir como uma camada de drenagem, que da perspectiva do regulamento, deve possuir uma condutividade hidráulica maior do que $1 \times 10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$. Vários tipos de solo enfrentam este critério, no entanto, é necessário um critério adicional em termos de características físicas e resistência para a avaliação do solo como um material de protecção de revestimento de geomembrana efectivo.
- Uma explicação específica para a selecção da espessura da camada de solo de protecção não está formulada. De uma perspectiva de regulamento, a espessura mínima da camada de drenagem deve ser 0,3 m. Actualmente, a espessura da camada de solo de protecção está na gama de 0,3 m a 0,9 m. O uso de espessuras mais pequenas pode criar um potencial para danos nos revestimentos da geomembrana, enquanto o uso de espessuras maiores podem demonstrar-se pouco económicos.

Nos Estados Unidos, tanto o geotêxtil como a camada de solo, ou ambos, são actualmente usados como um sistema de cobertura de protecção para os sistemas de revestimento por geomembranas. A espessura da camada de solo deve ser tal que, além de prevenir o dano mecânico para o revestimento de geomembranas, também conduz a uma drenagem eficiente dos lixiviados no interior dos tubos de recolha de lixiviados. Frequentemente, é inserido um geotêxtil entre o solo granular (também chamado solo de

cobertura) e o revestimento de geomembrana para adicionar uma protecção extra contra os danos mecânicos (Reddy e Saichek, 1998).

Em outros países, tais como a Alemanha, uma cobertura de protecção é construída como uma camada separada directamente sobre o revestimento de geomembrana. A camada de drenagem é depois construída no topo da cobertura de protecção. De acordo com a legislação da Alemanha, uma camada de protecção é considerada apropriada se as deformações do local produzidas pela camada de drenagem não induzem uma tensão maior do que 0,25 % no revestimento de geomembrana subjacente durante a construção e operação do aterro. A Figura IV.7. mostra alguns materiais de cobertura de protecção: areia grossa, um geotêxtil concreto, um geotêxtil de areia, um geotêxtil de areia grossa, e camadas compostas com diferentes filamentos e estruturas (Reddy *et al.*, 1996).

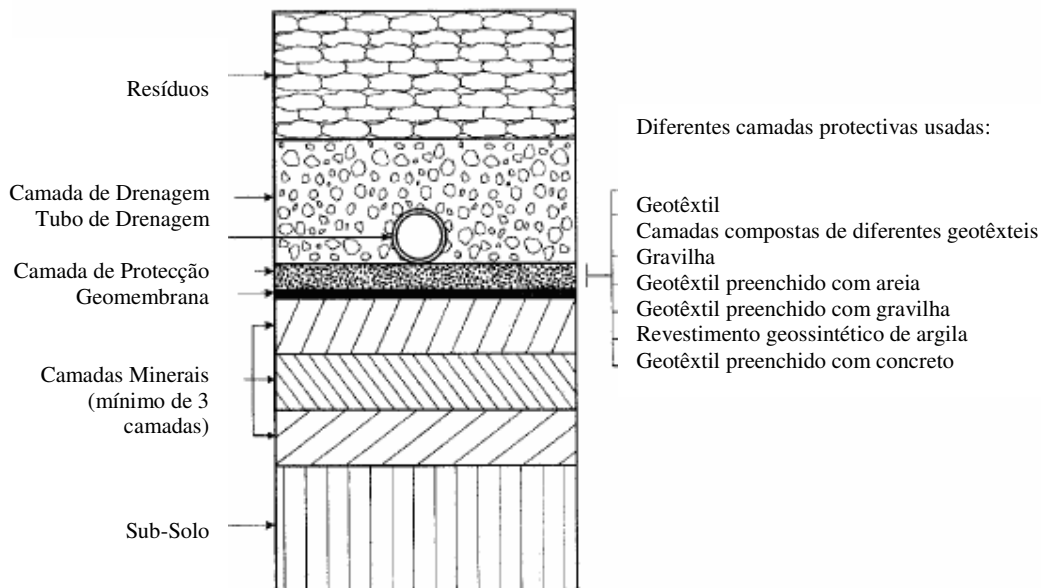


Figura IV.7. Diferentes camadas de protecção usados na Alemanha (Adaptado de Reddy *et al.*, 1996).

Uma sequência típica de revestimentos de aterros e construção de camadas de protecção seguidas nos Estados Unidos é mostrada na Figura IV.8. O sistema de revestimento, que consiste numa camada de argila compactada e num revestimento de geomembrana é construído em primeiro lugar. Depois é instalado um geotêxtil sobre a geomembrana. O solo da camada de protecção está inicialmente posicionado pela última descarga, e os *bulldozers* são usados para espalhar o solo pela superfície total de revestimento do aterro para a espessura desejada (Reddy *et al.*, 1996).

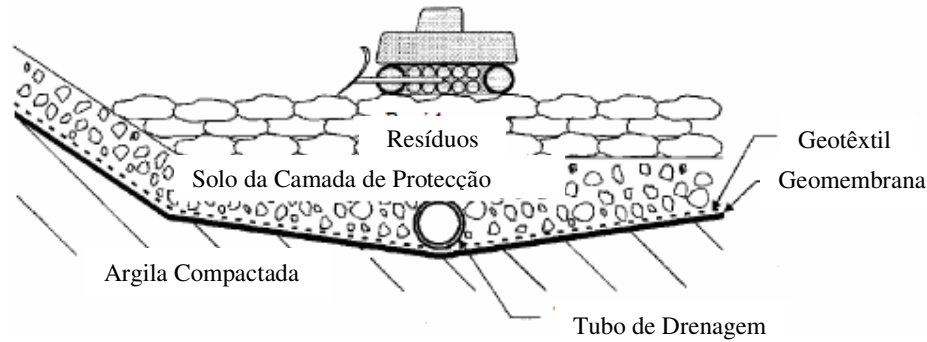


Figura IV.8. Colocação dos resíduos sobre as camadas de protecção (Adaptado de Reddy *et al.*, 1996).

Em Illinois os requisitos mínimos de *design* para o revestimento incluem duas opções. A primeira conduz a um revestimento de solo compactado com uma espessura mínima não inferior a 1500 mm e uma compactação específica. O revestimento de solo deve ser colocado de modo uniforme, em camadas horizontais de cerca de 150 mm de espessura no máximo e construído para assegurar que a condutividade hidráulica do solo compactado é $1 \times 10^{-7} \text{ cm.s}^{-1}$ ou menos. A segunda é um revestimento composto único, consistindo numa geomembrana imediatamente sobrejacente um revestimento de solo recompactado com uma espessura mínima de 900 mm. Para o revestimento composto a espessura mínima da geomembrana é não inferior a 1,5 mm. A componente de solo de ambos os tipos de revestimento deve ser recompactada para atingir uma condutividade hidráulica mínima de $1 \times 10^{-7} \text{ cm.s}^{-1}$ (Munie, 2003).

Para os requisitos mínimos de *design* de revestimento existem muitos outros regulamentos que são uma parte integral do sistema de restrição ambiental. A construção do revestimento deve ser levada a cabo de acordo com procedimentos de certeza da qualidade de construção tal como para reduzir espaços vazios e conduzir o revestimento a suportar as cargas impostas pela operação de deposição de resíduos sem depósitos que causem ou contribuem para o insucesso da recolha dos lixiviados e do sistema de revestimento. O revestimento deve actuar em conjunto com o sistema de recolha e remoção de lixiviados para atingir o desempenho requerido para proteger a saúde humana e o ambiente (Munie, 2003).

Não existe nenhum consenso em volta da espessura mínima apropriada para as camadas de argila compactadas. Na Bélgica, é normalmente usada uma espessura mínima de 1 m. No Reino Unido, a tendência actual é ser necessário que os revestimentos de solo compacto sejam 1 m de espessura. Na Suíça, a espessura mínima requerida é de 0,8 m (Chai e Miura, 2002). As recomendações do GLR (Comité Técnico Europeu nº. 8 1993) requerem uma espessura mínima de $\geq 0,75$ m para aterros municipais de resíduos sólidos (Impe e Bouazza, 1997).

Na Florida os aterros têm uma camada de solo, uma geomembrana, ou uma combinação de uma geomembrana com um material de baixa permeabilidade. Para os aterros de resíduos sólidos municipais, a camada barreira tem de ser equivalente ou menor do que permeabilidade do revestimento do fundo. Para aterros de resíduos sólidos municipais sem geomembranas, a camada barreira tem de possuir uma permeabilidade de 1×10^{-7} cm.s⁻¹ ou menos e uma espessura mínima de 0,5 m (EPA, 2001; Murphy e Garwell, 1998). As funções desta camada são controlar a produção de lixivado através da minimização da infiltração da água e controlar o movimento do gás do aterro (EPA, 2001).

O revestimento de topo consiste apenas em solo, com 450 mm de espessura colocado em 150 mm de camadas. A camada de 450 mm de espessura será capaz de segurar a vegetação. Se é usada uma geomembrana na camada barreira, será um termoplástico semi-cristalino pelo menos de 1,0 mm de espessura ou um termoplástico não-cristalino pelo menos de 0,8 mm. Uma camada de solo de protecção de pelo menos 600 mm de espessura será colocada no topo da geomembrana (Murphy e Garwell, 1998).

Para além das camadas normais é usual em Nova Scotia existir uma camada amortecedora. Deve ser colocada uma camada com uma espessura mínima de 300 mm sobre uma camada de recolha de lixiviados. Esta camada deve ser de material estruturalmente preenchido capaz de separar os resíduos da camada de recolha de lixiviados. A nível da cobertura final também possui uma “almofada” de separação que existe uma espessura mínima de 300 mm e consiste num material estruturalmente preenchido capaz de suportar o material acima. Esta camada deve conduzir o movimento lateral dos gases (Underwood, 1997).

V. Colocação dos Resíduos

Os resíduos devem ser colocados na base da parte exterior e com um compactador empurra-se os resíduos para cima da superfície e compacta-os em camadas finas. A espessura da camada dos resíduos não deve exceder os dois metros, e o compactador deve fazer de três a cinco passagens sobre os resíduos para maximizar a compactação e então minimizar o recalque (fixação). A cobertura deve ser aplicada ao mesmo tempo para manter o comprimento da área de inclinação a menos do que 30 m (EPA, 2001). A compactação dos resíduos é atingida ao passar equipamento de compactação sobre os resíduos. Isto reduz os espaços vazios entre os resíduos, reduzindo então a possibilidade de canais que promovem a infiltração rápida e a deslocação de alguns lixiviados formados (DWAF, 1998).

Operar um aterro numa base celular significa muitas vezes que pelo menos uma face ou lado da célula não será confinada. Nestas circunstâncias, os resíduos devem ser colocados até que estejam estáveis e possam ser cobertos por solo ou outro material de cobertura aprovado. O factor limitante para o gradiente de um volume de resíduos ilimitado no interior do aterro será normalmente determinado pela estabilidade do solo de cobertura colocado sobre a área exposta (EPA, 2001). Além das áreas geográficas de elevada precipitação levarem a uma maior geração de lixiviados do que as áreas áridas e semi-áridas, as operações de colocação de resíduos são também significativas na geração do mesmo. Usando uma separação e materiais de cobertura diária adequados, os lixiviados podem ser minimizados durante as operações de enchimento do aterro (Koerner e Soong, 2000).

No entanto, a deposição dos resíduos nos aterros também pode ser efectuada através da deposição em fardos.

A compactação e enfardamento propiciam resultados nos aterros tais como: o melhor aproveitamento da área disponível, vida útil até duas vezes maior, uma significativa economia do material de cobertura e pequena formação de lixiviados a ser tratado. Os equipamentos de transporte e manuseio dos fardos são bem mais leves, exigindo menor investimento e manutenção (Cavo Home Page, 2006).

Com a deposição de resíduos em forma de fardos, que pode ser visualizada na Figura V.1., conseguem-se as seguintes garantias (Valoris Home Page, 2006):

- Menor índice de vazios;
- Maior confinamento dos resíduos;
- Maior volume de resíduos depositados;
- Menor percentagem de águas lixiviantes;
- Melhores condições de trabalho;
- Diminuição de riscos ambientais;
- Menores assentamentos finais;
- Melhor integração ambiental.



Figura V.1. Deposição dos resíduos na forma de fardos (Jesus, 2003).

VI. Estudo de Caso: Entidade de Tratamento de Resíduos

Em Portugal, como pode ser visualizado através da Figura seguinte, os sistemas de revestimento do fundo, implementados em muitos aterros de resíduos sólidos municipais, incluem normalmente uma barreira activa, que inclui, por sua vez, uma camada de drenagem de pelo menos 0,5 m e uma geomembrana de HDPE de 2 mm de espessura, e uma barreira passiva, que consiste num revestimento de argila geossintético sobre um revestimento de argila compactada, com uma condutividade hidráulica de $k < 10^{-9} \text{ m.s}^{-1}$ e espessura de pelo menos 0,5 m (Barroso, 2005).

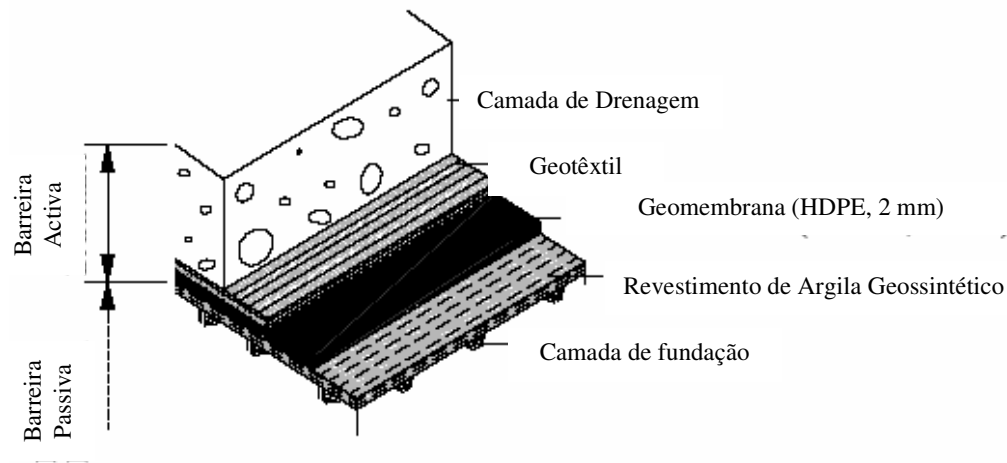


Figura VI.1. Esquema do revestimento composto usado nos Aterros em Portugal (Adaptado de Barroso, 2005).

Segundo o Decreto-Lei nº152/2002, a camada de solo subjacente ao aterro no sistema de protecção ambiental passiva deve constituir uma barreira de segurança passiva durante a fase de exploração e até completa estabilização dos resíduos devendo garantir, tanto quanto possível, a prevenção da poluição dos solos, das águas subterrâneas e de superfície pelos resíduos e lixiviados. A barreira de segurança passiva deve ser constituída por uma formação geológica de baixa permeabilidade e espessura adequada, de acordo com algumas especificações:

- Exigências relativas à barreira de segurança passiva: A base e os taludes do aterro devem consistir numa 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.

- As barreiras artificialmente criadas não poderão ser de espessura inferior a 0,5 m.
- O sistema de protecção ambiental activa deve ser constituído por uma barreira de impermeabilização artificial; um sistema de drenagem de águas pluviais; um sistema de drenagem e de recolha de lixiviados, e finalmente por um sistema de drenagem e tratamento de biogás.

Os sistemas de drenagem de águas pluviais e de drenagem e recolha de lixiviados deverão ser dimensionados tendo em conta as características do aterro e as condições meteorológicas locais. Os sistemas de drenagem de águas pluviais deverão ser dimensionados de modo a evitar a formação desnecessária de lixiviados e a minimizar a ocorrência de fenómenos erosivos ao nível dos taludes do aterro. Este sistema deverá incluir valetas, estrategicamente colocadas, de modo a assegurar o cumprimento da função a que se destinam. Deverá igualmente prever-se a instalação, no sistema de encerramento, de uma camada de drenagem de águas pluviais. O sistema de drenagem e recolha de lixiviados deverá ser dimensionado de modo a assegurar a sua rápida remoção do aterro, minimizando o risco de infiltração de lixiviados no solo subjacente ao aterro causado por uma carga hidráulica excessiva.

Este sistema deverá obedecer, entre outras, às seguintes características:

- O fundo do aterro deverá ter uma inclinação mínima de 2 % em toda a área;
- A camada drenante deverá apresentar um valor de permeabilidade hidráulica igual ou superior a $1 \times 10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$.
- A camada mineral drenante deverá apresentar uma espessura mínima de 0,5m e ser isenta de material calcário.
- Os lixiviados recolhidos deverão ter um tratamento e destino final adequado.

Entidade de Tratamento de Resíduos

O Aterro gerido pela entidade de tratamento de resíduos, cujo nome não é revelado, foi projectado para ser totalmente estanque, com sucessivas camadas de geocompósitos drenantes, que asseguram a protecção dos solos e aquíferos contra a eventualidade de qualquer migração acidental de lixiviados. Beneficiando da integração paisagística das margens de um rio, na extensão que este percorre junto ao aterro, esta infra-estrutura foi projectada dentro de rígidos parâmetros de controlo e protecção ambiental, incluindo um rigoroso programa de monitorização. Baseado no controlo e análise de recursos hídricos, com a monitorização das águas superficiais e subterrâneas envolventes, este programa inclui também o controlo dos resíduos recepcionados, lixiviados, biogás e de outros descritores ambientais, garantindo a qualidade de todo o processo de funcionamento, minimizando os efeitos potencialmente negativos para o ambiente e a saúde pública.

É necessário ter em conta que os RSU (Resíduos Sólidos Urbanos) são apenas depositados neste Aterro quando a central de valorização se encontra em manutenção.

VI.1. Coberturas utilizadas

Procedeu-se apenas à caracterização do Aterro de Resíduos Sólidos Urbanos, sendo que este é constituído por quatro camadas de geossintéticos. A Figura seguinte mostra as camadas geossintéticas utilizadas, bem como as respectivas espessuras e densidades utilizadas.

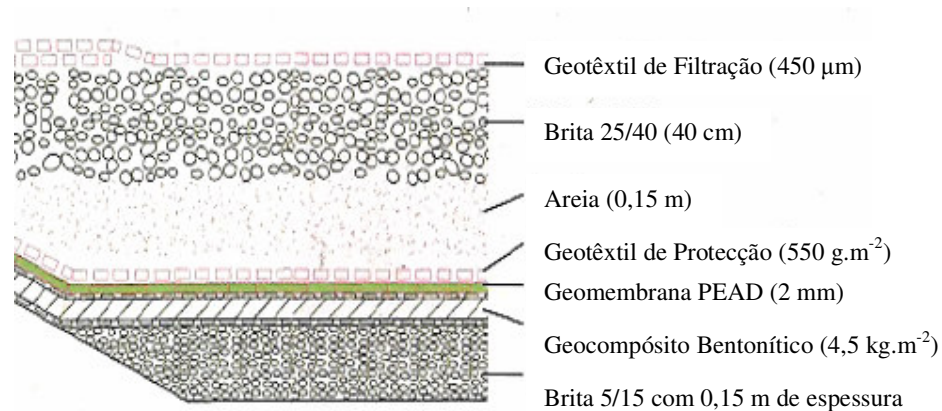


Figura VI.2. Coberturas utilizadas no Aterro da entidade estudada (Fonte não revelada).

Nesta Figura pode visualizar-se o uso de brita, a qual não é comumente usada noutros países. Esta é utilizada para proteger a camada de areia onde se situa a rede de drenagem de lixiviados. Assim, funciona como uma “filtração” de sólidos para evitar que os resíduos colmatem a tubagem dos lixiviados. A argila é colocada por baixo da rede de drenagem de lixiviados. Na eventualidade de uma fuga, a argila entra em contacto com a água e, desenvolvendo propriedades hidráulicas, fica dura como cimento. A argila que é aqui utilizada é-o na forma de geocompósito bentonítico.

A nível de cobertura diária são utilizadas escórias, resultantes de um processo de combustão de RSU. Estas escórias permitem um maior grau de compactação e assim um maior espaço disponível no aterro.

VI.2. Análise dos Dados

A quantidade de lixiviados produzidos pode ser estimada através da realização de um balanço hidrológico. Este balanço envolve a adição dos montantes de água que entram no aterro e a subtração dos montantes de água consumida nas reacções químicas, bem como das quantidades de água em excesso relativamente à capacidade de retenção de humidade por parte dos resíduos. Os componentes do balanço são: precipitação, escoamento superficial, evaporação e evapotranspiração e água contida nos resíduos. Isto pode ser traduzido através da seguinte equação, que é utilizada para a taxa de produção na “Área Activa”, neste caso de estudo:

$$\text{Volume de lixiviado} = \text{Volume de precipitação} + \text{Volume dos líquidos dos poros} - \text{Volume perdido através da evaporação} - \text{Volume de água absorvido pelos resíduos}$$

(VI.1)

A precipitação é o componente que mais contribui para a formação de lixiviados. A situação crítica acontece nas alturas de chuva leve durante um longo período. Os pequenos períodos de chuva forte resultam numa rápida saturação do material de cobertura provocando uma infiltração reduzida e um forte escoamento superficial.

Para além dos componentes mais importantes, existem outros factores que influenciam o volume de lixiviados produzidos. Entre outros, estes factores poderão ser: a

permeabilidade dos resíduos; a quantidade e tipo de solo de cobertura utilizado; e a adição de líquidos como sejam as lamas de uma ETAR.

Neste capítulo foram tratados dados reais fornecidos pela entidade estudada e compreendem dados desde 2002 até 2005.

VI.2.1. Quantidade de Resíduos Sólidos depositada no Aterro vs. Lixiviados Produzidos.

Recorrendo à Tabela VI.1. é possível traçar o gráfico patente na Figura VI.3., que engloba as quantidades de RSU depositadas anualmente e o respectivo ano de produção. Pode concluir-se que nos últimos anos, nomeadamente a partir de 2003 tem-se registado um aumento significativo de deposição de resíduos, o que se deve em parte ao aumento de desenvolvimento económico, que gera uma maior produção de resíduos e à necessidade de manutenção da central. Este desenvolvimento conduz ao aumento da produção e subsequente aumento do consumo. Todos estes factores conduzem a uma maior quantidade de resíduos gerados, que não sendo efectuada a separação levam à sua deposição em aterro.

Tabela VI.1. Quantidade de Resíduos Sólidos Depositados Anualmente no Aterro da Entidade Estudada (Fonte não revelada).

Ano	Quantidade (ton)
2001	34095,100
2002	57670,740
2003	37030,160
2004	64274,420
2005	64205,300

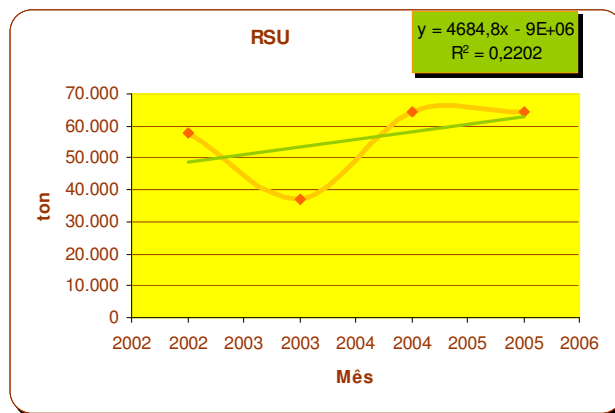


Figura VI.3. Quantidade de RSU depositados desde 2002 a 2005 (Fonte não revelada).

Faz-se notar que as quantidades apresentadas são totais anuais, porque não foram disponibilizadas as quantidades totais mensais. Através da visualização da recta do gráfico pode concluir-se que existe uma tendência para uma maior necessidade de deposição de RSU no aterro, uma vez que o declive se apresenta positivo, sendo a correlação praticamente inexistente.

A produção de lixiviados é uma vez que uma menor camada de resíduos leva a afectada principalmente pelo tipo a uma maior infiltração da água da chuva.

de coberturas utilizadas mas também pelas questões que levam à colocação desse tipo de coberturas, nomeadamente, a precipitação, que sendo elevada conduz a um aumento de produção de lixiviados, e a quantidade de resíduos sólidos depositados. Como se pode visualizar através das Figuras VI.3. e VI.4., a quantidade de lixiviados produzida é inversamente proporcional à quantidade de resíduos depositada,

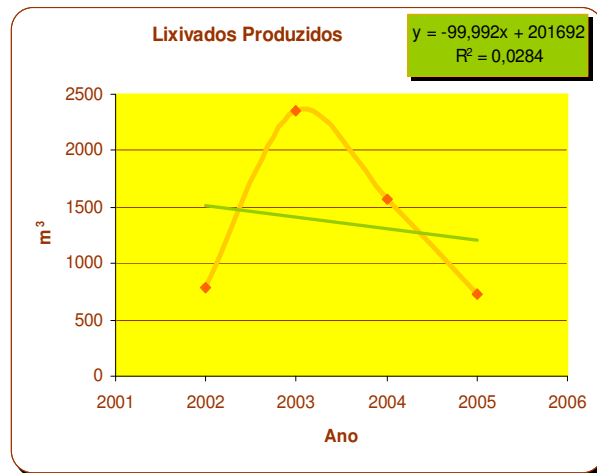


Figura VI.4. Quantidade de lixiviados produzidos desde 2002 a 2005 (Fonte não revelada).

A Figura VI.4. reflecte perfeitamente o que foi concluído atrás uma vez que, por exemplo, em 2003 a quantidade de RSU diminui devido ao facto da necessidade de manutenção da central não ser tão exigente e por consequência a quantidade de lixiviados no mesmo ano ter aumentado. Ao contrário do que se constata na figura VI.3. esta possui um declive negativo, ou seja, à medida que os anos passam a quantidade de lixiviados produzidos é menor. Em relação à correlação entre os dados esta é praticamente desprezável.

VI.2.2. Influência da Precipitação na Formação de Lixiviados

Da água que precipita sobre o aterro, parte é devolvida à atmosfera pela evapotranspiração, parte escoia superficialmente e a restante infiltra-se, podendo ficar

retida na camada de cobertura ou produzir um fluxo de percolação quando for atingida a saturação desta camada. A infiltração da precipitação através do solo é um processo natural, e faz parte do ciclo de recarga do lençol freático. A percolação é a infiltração de água através dos resíduos sólidos, carregando com ela, as substâncias solúveis suspensas no mesmo; e a lixiviação é a operação que separa certas substâncias, contidas nos resíduos sólidos, por meio de lavagem ou de percolação. Os resíduos sólidos inicialmente agem como uma esponja e simplesmente absorvem a água, entretanto, o material atinge um teor de humidade, conhecido como capacidade de retenção. Qualquer acréscimo de água adicional resulta na percolação de igual quantidade da massa. Alguma percolação poderá forma-se antes que a capacidade de retenção tenha sido atingida, porque os resíduos, não sendo homogêneos, apresentam canais, e alguns destes, também não absorvem a água prontamente. A absorção do lixiviado, irá variar em função do subsolo. Quando aumenta o nível de água no local do aterro, surgem dois efeitos indesejáveis: primeiro, considerando a Lei de Darcy, o aumento da pressão do percolado, irá aumentar a taxa de vazamento do líquido percolado no local, agravando o risco de possível contaminação da água subterrânea; segundo, é que, em tais circunstâncias, o nível de água contaminada, pode alcançar o topo da escavação, com a consequente dispersão lateral e possível ameaça às fontes da superfície (Oliveira e Pasqual, 2001).

Pluviosidade

Relativamente à pluviosidade em 2002, esta apresenta uma maior abundância nos meses de Inverno (Novembro e Dezembro), sendo praticamente inexistente nos meses de Verão tal como Agosto.

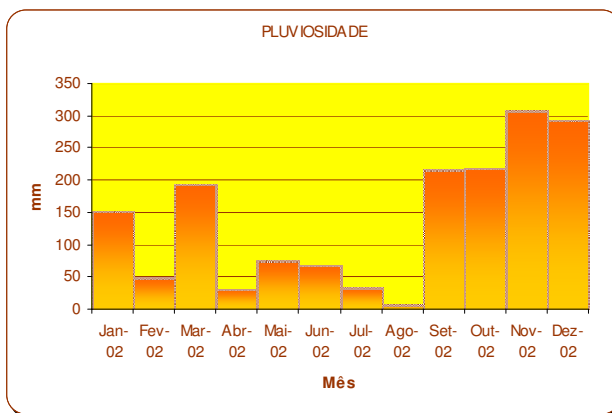


Figura VI.5. Pluviosidade ocorrida em 2002, na região da entidade estudada (Fonte não revelada).

Quanto a 2003, o mês com maior produção é Janeiro e o mês com menor precipitação é Setembro, o que constata o que foi dito anteriormente, ou seja, nos meses de Inverno existe uma maior precipitação e o contrário ocorre no Verão.

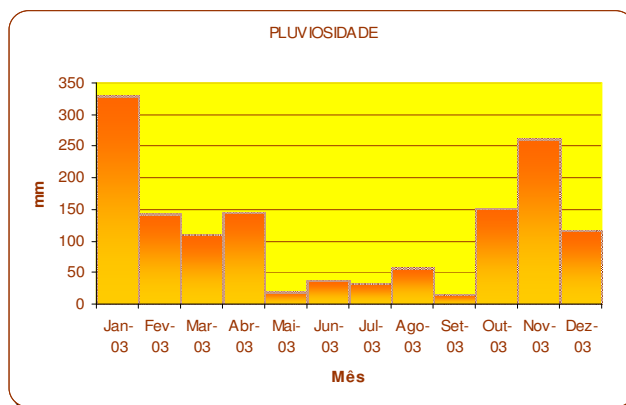


Figura VI.6. Pluviosidade ocorrida em 2003, na região da entidade estudada (Fonte não revelada).

Em 2004, os meses de maior pluviosidade são Agosto, Outubro e Janeiro e os meses de menor pluviosidade são Junho, Julho e Setembro. A maior precipitação no mês de Agosto pode dever-se ao facto de ter sido um ano em que o mês de Agosto foi chuvoso. Mas, analisando a Figura VI.7. pode verificar-se que no mês de Agosto não se verifica uma elevada produção de lixiviados mas sim em Novembro. Este facto pode dever-se a valores de precipitação ou de lixiviados mal lidos devido a erros humanos ou dos equipamentos de medição ou também pode considerar-se a hipótese que como

não é só a pluviosidade que conduz à formação de lixiviados e nos meses de Inverno os resíduos serem susceptíveis a uma maior quantidade de humidade, a precipitação que ocorreu em Agosto não consegue influenciar tanto a produção de lixiviados como a ocorrida em Novembro. E também dever-se ao facto de ter sido um pequeno período de chuva forte.

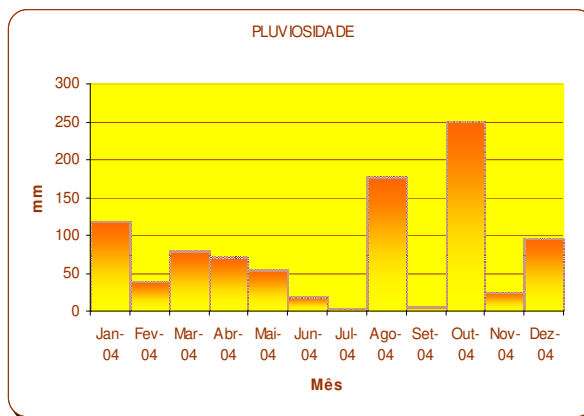


Figura VI.7. Pluviosidade ocorrida em 2004, na região da entidade estudada (Fonte não revelada).

Exceptuando Outubro, Novembro e Dezembro, devido a não se possuírem dados disponíveis, os meses de maior pluviosidade são Março, Abril e Maio e os meses de menor precipitação os de Junho, Julho e Agosto. No entanto, analisando a Figura VI.8. que diz respeito à quantidade de lixiviados produzidos, verifica-se que os meses de maior produção são Novembro, Dezembro e Janeiro.

Relativamente a estes dados nada se pode concluir uma vez que existem meses para os quais não existem dados, os quais dificultam a interpretação dos resultados obtidos.

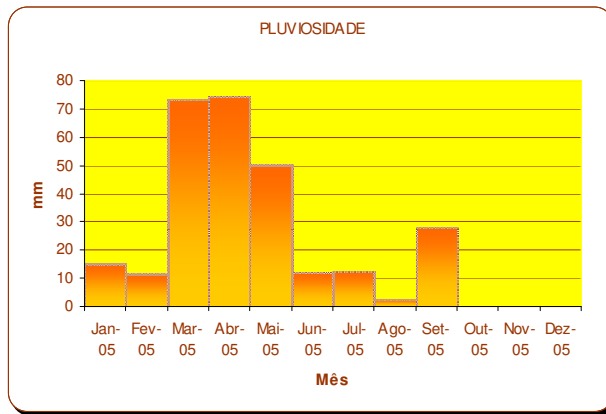


Figura VI.8. Pluviosidade ocorrida em 2005, na região da entidade estudada (Fonte não revelada).

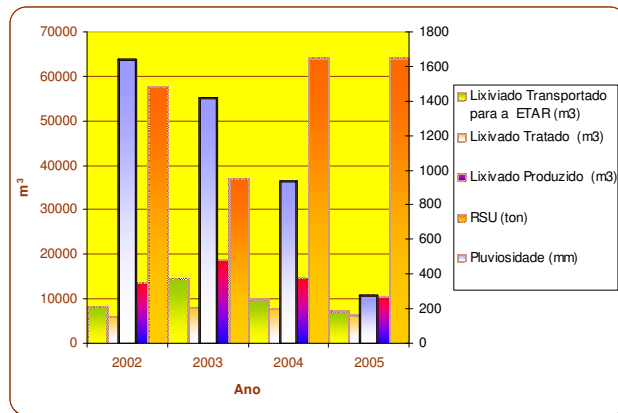


Figura VI.9. Avaliação da Influência da Pluviosidade e RSU na formação de Lixiviados (Fonte não revelada).

Relacionando diversos factores tais como pluviosidade, lixiviados produzidos e RSU pode concluir-se, com excepção de 2003, que à medida que a pluviosidade diminui a quantidade de lixiviado produzido também diminui, isto porque a pluviosidade tem uma elevada influência na produção do mesmo. O efeito contrário pode verificar-se no caso

dos RSU, ou seja, à medida que a quantidade de RSU depositada diminui a quantidade de lixiviados produzidos é maior.

Lixiviados Produzidos

A partir dos dados fornecidos (Anexo A) é possível traçar os gráficos de lixiviados/mês do ano e pluviosidade /mês do ano, visualizados nas próximas figuras.

No anexo mencionado também se podem observar valores de temperatura, evaporação, vento e humidade, os quais também influenciam a formação de lixiviados. Na medida em que uma menor temperatura e evaporação, uma maior humidade conduzem a uma maior quantidade de lixiviados formados.

A leitura do gráfico da Figura VI.5. permite concluir que os meses com maior produção de lixiviados são Outubro, Novembro e Dezembro, que se deve ao facto de ser nestes meses que ocorre uma maior quantidade de precipitação contínua. Os de menor produção, excluindo Janeiro, Fevereiro, Março e Abril para os quais não se possuem dados disponíveis, são Maio, Junho, Julho e Agosto, que são os ditos meses de Verão, nos quais a

quantidade de precipitação não é tão elevada sendo, por vezes, até inexistente. O que se pode concluir que a quantidade de lixiviados formada depende das estações do ano.

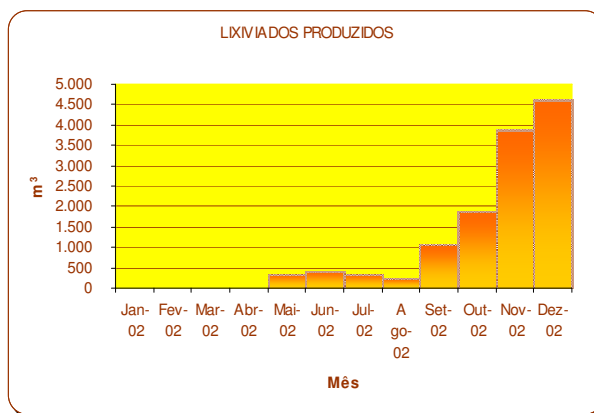


Figura VI.10. Quantidade de lixiviados produzidos em 2002, no aterro da entidade estudada (Fonte não revelada).

Em 2003, verifica-se a maior produção nos mesmos meses que 2002 incluindo também Janeiro, que é mesmo o mês que possui maior produção de lixiviados. Os meses de menor produção são equivalentes aos verificados em 2002.

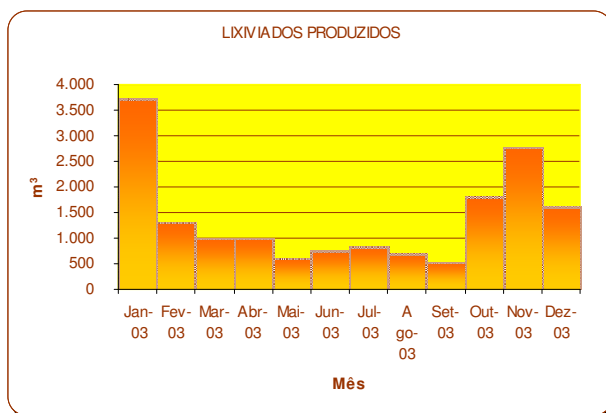


Figura VI.11. Quantidade de Lixiviados Produzidos em 2003, no aterro da entidade estudada (Fonte não revelada).

Quanto a 2004, verifica-se uma grande abundância de lixiviados produzidos, comparando com os anos anteriores.

Os meses de maior produção continuam a ser os meses de Inverno, nomeadamente Outubro, Novembro e Dezembro, e os de menor produção Maio, Junho, Julho e Setembro, verificando-se

uma elevada produção no mês de Agosto. Isto pode dever-se ao facto de ter sido um mês chuvoso.

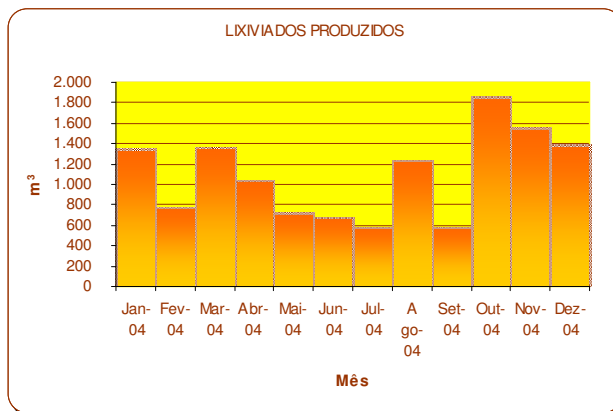


Figura VI.12. Quantidade de Lixiviados Produzidos em 2004, no aterro da entidade estudada (Fonte não revelada).

Tal como se pode observar em 2004 existe uma elevada produção de lixiviados verificada principalmente nos meses de Inverno.

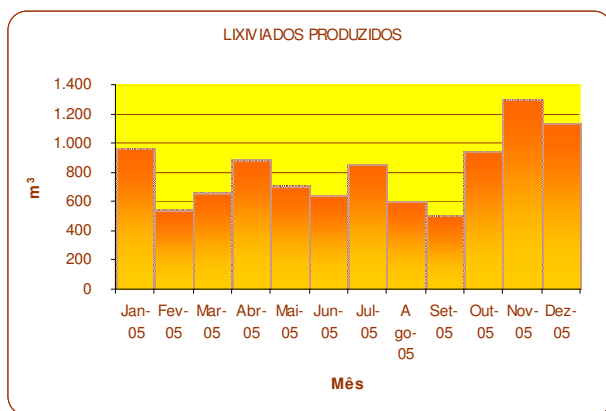


Figura VI.13. Quantidade de Lixiviados Produzidos em 2005, no aterro da entidade estudada (Fonte não revelada).

Para compreender melhor os dados efectuou-se uma análise estatística dos mesmos.

VI.2.3. Análise Estatística

A análise estatística engloba várias formas estatísticas clássicas para quantificar a natureza da distribuição dos diferentes valores, no entanto, aqui apenas se calcula a média, moda, mediana, desvio padrão e coeficientes de *kurtosis* e *skewness*. Apresentam-se a seguir os cálculos para essas medidas de localização estatística. Este tipo de cálculos só serão realizados para os lixiviados produzidos e para a pluviosidade, uma vez que para os RSU apenas se possuem valores anuais.

VI.2.3.1. Média

A média é uma medida de localização de tendência central, que é obtida somando todos os valores medidos para a variável e dividindo pelo número total dos mesmos (Guedes *et al.*, 2006; Tchobanoglous *et al.*, 1993). A partir dos dados obtidos é possível calcular as médias anuais de produção de lixiviados e pluviosidade e construir a Tabela VI.2. Para isso recorreu-se à equação VI.2..

$$X = \frac{\sum x}{n} \quad (\text{VI.2.})$$

Onde:

x – valores observados

n – número de observações (12 meses)

Tabela VI.2. Médias anuais de produção de lixiviados, pluviosidade e resíduos sólidos para os anos de 2002 a 2005.

	Ano 2002	Ano 2003	Ano 2004	Ano 2005
X (m ³)	1602,8	1387,17	1395,5	812,38
X (mm)	136,62	118,38	78,36	31,18
X (t)	4805,9	3085,8	5356,2	5350,4

Como se pode verificar, e calculando a média para os RSU a partir da Tabela VI.2., a média de produção de RSU é de 4649 t/mês, a de lixiviados produzidos é 1299 m³/mês e a da precipitação é 91 mm/mês.

Estes valores servem para voltar a confirmar as conclusões já tiradas anteriormente tais como, a quantidade de lixiviados produzidos é directamente proporcional à pluviosidade ocorrida e inversamente proporcional à quantidade de RSU depositados.

VI.2.3.2. Mediana

A mediana (*Med*) é outra medida de tendência central que pode ser definida como o valor da variável que divide a distribuição de valores em duas partes iguais, de tal modo que abaixo da mediana existem 50 % dos dados e acima os restantes 50 % (Guedes *et al.*, 2006; Tchobanoglous *et al.*, 1993).

Para calcular a mediana deve-se ordenar os valores da variável por ordem crescente. Se o número de valores é ímpar a mediana é o valor central, se o número de valores é par a mediana é a média dos dois valores centrais.

Tabela VI.3. Cálculo da mediana da produção de lixiviados e pluviosidade para os anos de 2002 a 2005.

	Ano 2002	Ano 2003	Ano 2004	Ano 2005
<i>Med</i> (m ³)	754,2	1001,0	1141,8	783,7
<i>Med</i> (mm)	112,6	113,2	63,1	15,0

VI.2.3.3. Moda

A moda é outra medida de tendência central. É definida como o valor mais frequente, ou seja, aquele que é medido mais vezes e pode ser calculada recorrendo à equação VI.3..

$$Mod = 3 \times Med - 2 \times X \quad (VI.3.)$$

Onde:

Mod – Moda

Med – Mediana

X – Média

Uma vez que os dados são contínuos, a moda tem usualmente pouco significado, devendo por isso ser usada a mediana e a média. Caso se queira estimar a moda deve

construir-se um histograma e utilizar a fórmula para calcular a moda em dados agrupados em classes.

Tabela VI.4. Cálculo da classe modal da produção de lixiviados e pluviosidade para os anos de 2002 a 2005.

	Ano 2002	Ano 2003	Ano 2004	Ano 2005
Mod (m ³)	[0-500]	[500-1000]; [1000-1500]	[500-1000]	[500-1000]
Mod (mm)	[0-50]	[0-50]; [100-150]	[0-50]	[0-50]

Através da visualização dos resultados obtidos pode concluir-se que em 2003 a distribuição é bimodal, uma vez que possui duas classes com a mesma frequência, tanto na pluviosidade como na produção de lixiviados. Verifica-se, no entanto, que a classe mais frequente em todos os anos para a precipitação é de [0-50] mm, enquanto em termos de produção de lixiviados é de [500-1000] m³.

VI.2.3.4. Desvio Padrão

O desvio padrão (s), que é uma medida de dispersão, é definida como a diferença entre a média aritmética e os valores mensuráveis (Guedes *et al.*, 2006; Tchobanoglous *et al.*, 1993), recorrendo à equação VI.4. para o seu cálculo. A dispersão pretende medir a proximidade relativa dos valores medidos para a variável.

$$s = \sqrt{\frac{\sum (x - X)^2}{n - 1}} \quad \text{(VI.4.)}$$

Onde:

x – Valores Observados

X – Média

n – Número de Observações (12 meses)

Tabela VI.5. Cálculo do desvio padrão da produção de lixiviados e pluviosidade para os anos de 2002 a 2005.

	Ano 2002	Ano 2003	Ano 2004	Ano 2005
s (m ³)	1732,5	976,9	424,1	245,7
s (mm)	106,6	97,7	74,5	27,9

Da análise dos valores obtidos pode concluir-se que a maior parte dos valores possui um elevado desvio em relação à média, ou seja, existe uma elevada variabilidade dos dados. Uma vez que quanto maior é o desvio padrão maior é a variabilidade entre os dados.

VI.2.3.4. Coeficiente de Variação

O coeficiente de variação (CV) é dado pela relação, em termos percentuais, entre o desvio padrão e a média da distribuição (Guedes *et al.*, 2006; Tchobanoglous *et al.*, 1993) e é calculado através da equação VI.5..

$$CV = \frac{s}{X} \times 100 \quad (\text{VI.5.})$$

Onde:

s – Desvio Padrão

X – Média

Tabela VI.6. Cálculo do Coeficiente de Variação da produção de lixiviados e pluviosidade para os anos de 2002 a 2005.

	Ano 2002	Ano 2003	Ano 2004	Ano 2005
CV (lix.)	108%	70%	30%	30%
CV (pluv.)	78%	82%	95%	89%

Analisando os valores obtidos pode verificar-se que nos caso dos lixiviados o coeficiente de variação é elevado para os dois primeiros anos e para a pluviosidade é elevado para todos os anos, isto quer dizer que os valores obtidos estão muito distantes da média. Resumindo, a dispersão (heterogeneidade dos dados) é elevada e a média é pouco representativa, ou seja, quanto maior o valor de CV menos representativa será a média.

VI.2.3.5. Coeficiente de *skewness*

O coeficiente de *skewness* (α_3) ou de assimetria é calculado através da seguinte equação (VI.6.).

$$\alpha_3 = \frac{2 \times (X - Mod)}{s} \quad (VI.6)$$

Onde:

X – Média

Mod – Moda

s – Desvio Padrão

Tabela VI.7. Cálculo do coeficiente de skewness da produção de lixiviados e pluviosidade para os anos de 2002 a 2005.

	Ano 2002	Ano 2003	Ano 2004	Ano 2005
α_3 (lix.)	1,9	2,8	6,6	6,6
α_3 (pluv.)	2,6	2,4	2,1	2,2

A distribuição dos dados da tabela é assimétrica pois α_3 tem valores diferentes de zero.

VI.2.3.6. Coeficiente de kurtosis

Quando as distribuições são muito equivalentes ou muito assimétricas normalmente utiliza-se o coeficiente de *kurtosis* (α_4), para o cálculo utilizou-se a equação VI.7..

$$\alpha_4 = \frac{(\sum x_i - X)^4}{n s^4} \quad (VI.7)$$

Onde:

x_i – Valores individuais observados

n – Número de observações (12 meses)

X – Média

s – Desvio Padrão

Tabela VI.8. Cálculo do coeficiente de *kurtosis* da produção de lixiviados e pluviosidade para os anos de 2002 a 2005.

	Ano 2002	Ano 2003	Ano 2004	Ano 2005
α_4 (lix.)	1,36	0,33	0,01	0,00
α_4 (pluv.)	1,39	1,75	0,69	0,01

Segundo Tchobanoglous *et al.* (1993), o valor de *kurtosis* para uma distribuição normal é de 3. A curva em cume terá valores superiores a 3, enquanto que a curva nivelada tem valores inferiores a 3. Tanto para a produção de lixiviados como para a pluviosidade ocorrida nos diferentes anos verifica-se que os valores são sempre inferiores a 3, ou seja, a curva é nivelada.

VI.2.4. Discussão dos Resultados Obtidos

As quantidades de areia e brita têm influência na trabalhabilidade (facilidade de se adaptar às formas) e na resistência. A brita aumenta a resistência e a areia a trabalhabilidade diminuindo a porosidade. A porosidade por sua vez tem influência na impermeabilidade. Assim é de prever que este aterro possua uma elevada impermeabilidade diminuindo então a quantidade de lixiviados que podem contaminar o ambiente, possuindo também uma elevada resistência, uma vez que usa brita. Mas na legislação menciona uma camada mineral não inferior a 50 cm o que este aterro não possui, uma vez que tem uma camada mineral de brita com apenas 40 cm.

Através da análise dos dados fornecidos pode concluir-se que, além das coberturas utilizadas, tanto a pluviosidade como a quantidade de resíduos sólidos depositados têm influência na quantidade de lixiviados produzida.

Como as amostras possuem um coeficiente de variação elevado pode dizer-se que os valores estão muito distantes da média e conseqüentemente a média é entendida como sendo pouco representativa. Existe uma elevada variabilidade entre os dados, ou seja, heterogeneidade elevada. E pode dizer-se que a distribuição é assimétrica, representando uma curva nivelada de dados.

Através da visualização dos dados pode concluir-se que estes são contínuos, logo não possuem moda mas sim classe modal, sendo esta considerada pouco significativa.

VII. Conclusões

A geração de resíduos das mais diversas fontes e as suas possíveis consequências para o meio ambiente tornaram-se uma preocupação mundial. Acidentes relacionados com a contaminação de recursos naturais por derramamentos de líquidos perigosos ou disposição inadequada de resíduos levaram à prática cada vez mais comum das chamadas obras de protecção ambiental.

Num Aterro Sanitário são utilizados diversos tipos de geossintéticos, exercendo várias funções nos sistemas de drenagem de águas pluviais, lixiviados e gases, na protecção e reforço dos taludes laterais e em sistemas de impermeabilização. As vantagens encontradas na aplicação destes produtos são: facilidade e rapidez na instalação, ocupação de menor espaço de disposição e fabrico com controlo de qualidade.

Os geotêxteis são utilizados, principalmente, nos sistemas de drenagem em aterros sanitários, no entanto, podem também ser aplicados como elementos de separação e protecção. Quando utilizados como elemento filtrante para os lixiviados, são dispostos sob os resíduos, logo acima da camada drenante e têm a função de permitir a passagem dos lixiviados para o sistema de drenagem e impedir a entrada de resíduos e outras partículas no referido sistema, evitando assim a colmatção da camada drenante. No entanto, o uso de geotêxteis como filtros traz preocupações, nomeadamente com a colmatção física e biológica. Um aterro sanitário é um verdadeiro ecossistema com altas concentrações de bactérias que se podem fixar às fibras ou à superfície do geotêxtil colmatando-o total ou parcialmente.

A utilização de camadas de argila compactadas nos aterros tem sido muito utilizada. O facto é que, devido às limitações no uso de argila como material impermeabilizante, as geomembranas vêm ocupar um lugar cada vez maior no mercado de produtos geossintéticos. As camadas de argila ocupam um volume considerável, que poderia ser aproveitado para o acondicionamento de um maior volume de resíduos, a exposição solar ou os recalques diferenciais quase sempre provocam trincamentos na camada de argila, facilitando a passagem de poluentes e ainda existe a possibilidade de ocorrência de *piping* em camadas de argila submetidas a altas concentrações de lixiviados. No caso

das geomembranas, a maior desvantagem encontrada quanto à sua utilização é a possibilidade de ocorrência de rasgos ou furos durante a sua instalação ou operação do aterro.

Os ditos lixiviados são originados da percolação da água da chuva através dos resíduos sólidos, que lixivia os sais solúveis e produtos orgânicos biodegradáveis. Grãos de solo utilizados nas camadas de cobertura diária podem ainda estar incorporados como sólidos suspensos nos lixiviados.

Em relação à quantidade de lixiviados gerados podem ter influência factores tais como, a precipitação, a intrusão de águas subterrâneas, as condições dos resíduos sólidos e o projecto de cobertura final. A precipitação depende da localização geográfica e influencia significativamente na quantidade de lixiviados. Aterros construídos sobre lençóis freáticos podem sofrer um aumento na produção de lixiviados, ocasionado por intrusões de águas subterrâneas. O aumento de lixiviados é ocasionado também pela água libertada dos vazios dos resíduos quando estes são comprimidos. À ainda que salientar que parte da precipitação resulta em escoamento superficial, outra parte retorna à atmosfera na forma de evapotranspiração e a restante é incorporada ao solo de cobertura. Porém, toda a vez que este solo atinge a sua capacidade de campo, há infiltração de água para dentro dos resíduos, resultando na produção de lixiviados.

Neste sentido, o estudo efectuado pretendeu verificar a influência que diferentes configurações das camadas possuem na formação de lixiviados, permitindo concluir que camadas mais espessas vão dificultar a passagem de lixiviados e uma boa camada de cobertura vai dificultar a passagem da água da chuva que mais tarde se torna em lixiviados.

Actualmente os revestimentos mais apropriados são os geossintéticos uma vez que o espaço que ocupam nos aterros é menor possibilitando uma maior deposição de resíduos e o entrave aos lixiviados é maior.

Relativamente às coberturas utilizadas em Portugal a legislação é muito vaga, verificando-se através da entidade estudada que nem todos os requisitos são cumpridos e podem ser usadas camadas minerais diferentes, ou seja, não está especificado qual o tipo de solo a usar. Em comparação com revestimentos utilizados noutros países possui um revestimento adequado, no entanto, existem países tais como os Estados Unidos que possui uma impermeabilização mais complexa à passagem de lixiviados.

Da pesquisa bibliográfica pode-se concluir que as diferentes camadas utilizadas têm influência na maior ou menor quantidade de lixiviados produzida, nomeadamente na espessura e no tipo de geossintéticos utilizados. Mas através do caso prático pode visualizar-se que existem outros factores que influenciam a formação dos mesmos, ou seja, a precipitação e a quantidade de resíduos sólidos depositados. A precipitação influencia, na medida em que uma maior exposição do aterro à precipitação conduz a uma maior produção de lixiviados, uma vez que esta água infiltra através das camadas do mesmo. Logo aterros localizados em zonas de elevada precipitação são propícios a uma elevada formação de lixiviados. Relativamente aos RSU, uma maior quantidade de deposição conduz a uma menor quantidade de lixiviados formados, isto porque esta elevada quantidade de RSU proporciona uma camada de maior espessura, o que dificulta a passagem do mesmo. Uma menor quantidade leva então a uma maior quantidade de lixiviados.

Os dados tratados foram cedidos pela empresa de tratamento de resíduos com termo de confidencialidade, não sendo por isso analisados mais pormenorizadamente devido à falta de informação.

No sub – capítulo de análise de dados, incluindo a análise estatística, conclui-se que à medida que a quantidade de RSU depositada aumenta a quantidade de lixiviados produzidos diminui. Nada se pode concluir acerca da evolução da produção de RSU uma vez que a quantidade de RSU depositados está influenciada pela maior ou menor necessidade de manutenção da central. Os RSU apenas são depositados neste aterro quando a central de valorização se encontra em manutenção por isso é difícil prever quanto à sua evolução. No entanto percebe-se que a tendência é para aumentar.

Assim, as coberturas utilizadas nos aterros sanitários têm uma elevada influência na diminuição da produção de lixiviados, tendo necessariamente de ser complexas, nomeadamente no uso de geossintéticos e não em solos naturais. Um aterro bem impermeabilizado a nível de todas as camadas, nomeadamente na cobertura final, vai contribuir para diminuir a quantidade de lixiviados.

Bibliografia

Allison, B., Herlin, B., Jetté, D. (2004). Geosynthetic solutions landfill remediation/Case Study. [Em Linha]. Disponível em <http://www.terrafixgeo.com/pdfs/projects/lining/N035.PDF>. [Consultado em 9/03/2006].

Amin, A. (2000). Designing sustainable landfill for Jeddah City, Saudi Arabia. *Bull Eng Geol Env*, 58, pp. 265-273.

Barroso, M. (2005). Fluid Migration Through Geomembrane Seams and Through The Interface Between Geomembrane And Geosynthetic Clay Liner. Disponível em <http://tel.ccsd.cnrs.fr/docs/00/04/82/10/PDF/tel-00009662.pdf>. [Consultado em 16/05/2006].

Bengtsson, L. e Bendz, D. (1996). Evaporation from an active, uncovered landfill. *Journal of Hydrology*, 18, pp. 143-155.

Block, R., Rees, K. (2004). Characterization of Aspen Ash, Sand and Log-Yard waste mixtures from an Aspen-Based Oriented strand board mill for use as an intermediate landfill cover. *Water, Air and Soil Pollution*, 158, pp. 223-235.

Bouazza, A. (2002). Geosynthetics clay liners. *Geotextiles and Geomembranes*, 20, pp. 3-17.

Bozbey, I., Guler, E. (2005). Laboratory and field testing for utilization of an excavated soil as landfill liner material. *Waste Management, In Press*.

Cartaud, F., Foltz, N., Duval, Y. (2005). Experimental investigation of the influence of a geotextile beneath the geomembrane in a composite liner on the leakage through a hole in the geomembrane. *Geotextiles and Geomembrane*, 23, pp. 117-143.

Cavo Home Page. [Em Linha]. Disponível em http://www.cavo.com.br/servicos_municipios_imabe.html. [Consultado em 21/06/2006].

Chai, J. e Miura, N. (2002). Comparing the Performance of Landfill Liner Systems. *Mater Cycles Waste Management*, 4, pp. 135-142.

Clabaugh, M. (2001). Nitrification of landfill leachate by biofilm columns. [Em Linha]. Disponível em scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-06132001-154255/unrestricted/final.pdf. [Consultado em 04/08/2006].

Colmanetti, J. (2000). Comportamento de Filtros Geotêxteis em Sistemas de Drenagem para Resíduos Sólidos Municipais. [Em Linha]. Disponível em <http://www.unb.br/ft/enc/geotecnia/teses/GDM07600.pdf>. [Consultado em 18/07/2006].

Decreto – Lei nº 152/2002 de 23 de Maio. *Estabelece normas aplicáveis em matéria de instalação, exploração, encerramento e manutenção pós-encerramento de aterros*.

Department of Environment (2005). Siting, Design, Operation and Rehabilitation of Landfills. [Em Linha]. Disponível em http://www.epa.wa.gov.au/docs/2233_B1218.pdf. [Consultado em 12/04/2006].

Dinis, C., Farinha, F., Reis, M. (2002). A deformabilidade dos geossintéticos no projecto da fundação de aterros de resíduos sólidos urbanos. [Em Linha]. Disponível em <http://cegeo.ist.utl.pt/html/investiga/com071.pdf>. [Consultado em 04/08/2006].

DWAF – Departement of water affairs and forestry (1998). Minimum requirements for the handling, classification and disposal of hazardous waste – Waste Management series. [Em Linha]. Disponível em http://www.dwaf.gov.za/Dir_WQM/docs/Pol_Hazardous.pdf. [Consultado em 20/03/2006].

Efouissement technique Home Page. Traitment/Valorisation Des Déchetes et Résidus. [Em Linha]. Disponível em http://www.enviroaccess.ca/fiches_4/F4-01-04f.html. [Consultado em 13/04/2006].

EPA–Environmental Protection Agency (1996). Environmental Guidelines: Solid Waste Landfills. [Em Linha]. Disponível em <http://www.environment.nsw.gov.au/resources/solidlandfill.pdf>. [Consultado em 11/07/2006].

EPA–Environmental Protection Agency (2000). Landfill Manuals-Landfill Site Design. [Em Linha]. Disponível em <http://www.epa.ie/NewsCentre/ReportsPublications/Waste/FileUpload,9755,en.pdf>. [Consultado em 20/04/2006].

EPA–Environmental Protection Agency (2003). Evapotranspiration Landfill Cover Systems Fact Sheet. [Em Linha]. Disponível em <http://www.epa.gov/superfund/new/evapo.pdf>. [Consultado em 13/04/2006].

EPA – Environmental Protection Authority (2001). Siting, Design, Operation and Rehabilitation of Landfills. [Em Linha]. Disponível em [http://epanote2.epa.vic.gov.au/EPA/Publications.nsf/2f1c2625731746aa4a256ce90001cbb5/b9fed7c5c8c28e02ca256adb000e2c6d/\\$FILE/788.pdf](http://epanote2.epa.vic.gov.au/EPA/Publications.nsf/2f1c2625731746aa4a256ce90001cbb5/b9fed7c5c8c28e02ca256adb000e2c6d/$FILE/788.pdf). [Consultado em 12/04/2006].

EREF–Environmental Research and Education Foundation Home Page. Landfill Covers. [Em Linha]. Disponível em <http://www.erefdn.org/educationact1/Landfill%20Covers.pdf>. [Consultado em 10/05/2006].

Ferrão, P. e Canas, A. (2000). Estudo Horizontal Ambiente. [Em Linha]. Disponível e http://in3.dem.ist.utl.pt/ET2000/PDF/env_final.pdf. [Consultado em 14/04/2006].

Ganjian, E., Claisse, P., Tyrer, M., Atkinson, A. (2004). Preliminary investigations into the use of secondary waste minerals as a novel cementitious landfill liner, *Construction and Building Materials*, 18, pp. 689-699.

Giroud, J., Bonaparte, R. (1989). Leakage through Liners Constructed with Geomembranes-Part I. Geomembranne Liners. *Geotextiles and Geomembranes*, 8, pp.27-67.

Guedes, T., Acorsi, C., Martins, A., Janeiro, V. (2006). Estatística Descritiva. [Em Linha]. Disponível em http://www.des.uem.br/projetos/Estatistica_Descritiva.pdf. [Consultado em 25/07/2006].

Hughes, L., Christy, A., Heimlich, J. (2005). Landfill Types and Liner Systems. [Em Linha]. Disponível em <http://ohioline.osu.edu/cd-fact/pdf/0138.pdf>. [Consultado em 13/04/2006].

Iizuka, A., Kawai, K., Kim, E., Hirata, M. (2004). Modeling of the confining effect due to the geosynthetics wrapping of compacted soil specimens. *Geotextiles and Geomembranes*, 22, pp. 329-358.

Impe, W., Bouazza, A. (1998). Liner design for waste disposal sites. *Environmental Geology*, 35 (1), pp. 41-54.

Jaisi, D., Glawe, U., Bergado, D. (2005). Hydraulic behaviour of geosynthetics and granular landfill drainage materials in the Sa Kaeo landfill, Thailand. *Geotextiles and Geomembranes*, 23, pp. 185-204.

Jang, Y., Kim, Y., Lee, S. (2002). Hydraulic properties and leachate level analysis of Kimpo metropolitan landfill, Korea. *Waste Management*, 22, pp. 261-267.

Jaros, D. (1996). Overview of Corps of Engineers Waste Containment Activities Involving Geosynthetics, *Geotextiles and Geomembranes*, 14, pp. 331-339.

Jesus, C. (2003). Valorlis – Valorização e Tratamento de Resíduos sólidos urbanos, S.A. [Em Linha]. Disponível em <http://www.esac.pt/Jornadas/Sess%C3%A3o%206/Centro%20de%20triagem.pdf>. [Consultado em 10/07/2006].

Kohoutek, P., Tuček, J. (2001). Use of Geomembrane for Waste Landfill Sealing. *In: Geomembrane Junifol-HDPE*. [Em Linha]. Disponível em http://www.juta.cz/english/junifol_landa/082Junifol.htm. [Consultado em 12/04/2006].

Katsumi, T, Benson, C., Foose, G., Kamon, M. (2001). Performance-based design of landfill liners, *Engineering Geology*, 60, pp. 139-148.

Kodikara, J., (2000). Analysis of tension development in geomembranes placed on landfill slopes. *Geotextiles and Geomembranes*, 18, pp. 47-61.

Koerner, G., Eith, A. (1998). Assessment of HDPE Geomembrane Performance in a Municipal Waste Landfill Double Liner System After Eight Years of Service. *Geotextiles and Geomembranes*, 15, pp. 277-287.

Koerner, R., Soong, T. (2000). Leachate in landfills: the stability issues. *Geotextiles and Geomembranes*, 18, pp. 293-309.

Koerner, R. (2002). The Questionable Strategy of Soil-Only Landfill Covers. [Em Linha]. Disponível em http://www.golder.com/archive/The_Questionable_Strategy_of_Soil-Only_Landfill_Covers.pdf. [Consultado em 13/04/2006].

Koerner, G. e Koerner, R. (2005). Long-term temperature monitoring of geomembranes at dry and wet landfills. *Geotextiles and Geomembranes, In Press*.

Munie, J. (2003). A Study of the merits and effectiveness of alternate liner systems at Illinois Landfills. [Em Linha]. Disponível em <http://www.epa.state.il.us/land/regulatory-programs/permits-and-management/alternate-landfill-liner-study/alternate-landfill-liner-study.pdf>. [Consultado em 14/04/2006].

Murphy, R. e Garwell, E. (1998). Infiltration Rates Through Landfill Liners. [Em Linha]. Disponível em http://www.floridacenter.org/publications/infiltration_rates_landfill_liners_97-11.pdf. [Consultado em 3/04/2006].

Net Resíduos Home Page. Aterros Sanitários. [Em Linha]. Disponível em <http://www.netresiduos.com/cir/rsurb/aterros.htm>. [Consultado em 15/04/2006].

NYSDEC – New York State Department of Environmental Conservation Home Page. Componentes of a modern Municipal Solid Waste Landfill's Environmental Containment System. [Em Linha]. Disponível em www.ateec.org/prof_dev/fellows/2005fellows/groups/group%201/landfill-profile.doc. [Consultado em 12/04/2006].

Oliveira, S., Pasqual, A. (2001). Avaliação da qualidade da água subterrânea a jusante do depósito de resíduos sólidos municipais de BOTUCATU/SP. [Em Linha]. Disponível em www.botucatu.sp.gov.br/artigos/artigos/ARTIGINT.PRN.pdf. [Consultado em 04/08/2006].

Project Memorandum (2004). Development of Engineered Sanitary Landfill. [Em Linha]. Disponível em <http://www.kerala.gov.in/tudp/ProInfMem.pdf>. [Consultado em 11/07/2006].

Valorlis Home Page. [Em Linha]. Disponível em <http://www.valorlis.pt/valorlis.html>. [Consultado em 26/06/2006].

Real, J. (2005). Riscos Ambientais em Aterros de Resíduos Sólidos com Ênfase na Emissão de Gases. [Em Linha]. Disponível em http://www.pec.coppe.ufrj.br/teses/mestrado/inter/2005/Teses/REAL_JLG_05_t_M_int.pdf. [Consultado em 14/04/2006].

Reddy, K., Bandi, S., Rohr, J., Finy, M. e Sibken, J. (1996). Field Evaluation of Protective Covers for Landfill Geomembrane Liners Under Construction Loading. *Geosynthetics International*, 3(6), pp. 679-700.

Reddy, K. e Saichek, R. (1998). Performance of protective cover systems for landfill geomembrane liners under long-term MSW loading. *Geosynthetics International*, 5 (3), pp. 287-307.

Reddy, D.V., Butul, B. (1999). A comprehensive literature review of liner failures and longevity. [Em Linha]. Disponível em http://www.floridacenter.org/publications/liner_failure_99.pdf .[Consultado em 10/03/2006].

Rock, R., Rees, K. (2004). Characterization of aspen ash, sand and log-yard waste mixtures from an aspen-based oriented strand board mill for use as an intermediate landfill cover. *Water, Air and Pollution*, 158, pp. 223-235.

Rowe, R. (1998). Geosynthetics and the Minimization of Contaminant Migration through Barrier Systems Beneath Solid Waste. Six International Conference on Geosynthetics. [Em Linha]. Disponível em <http://www.geoeng.ca/Directory/kerry%20Pub/Atlanta%201998.pdf> [Consultado em 15/04/2006].

RTDF – Remediation Technologies Development Forum Home Page. Alternative Cover Design Report. [Em Linha]. Disponível em <http://www.acap.dri.edu/design/kieferssd.pdf>. [Consultado em 11/07/2006].

Russo, M. (2003). Tratamento de Resíduos Sólidos. [Em Linha]. Disponível em http://www.uc.pt/mhidro/Tratamentos_Residuos_Solidos.pdf . [Consultado em 10/04/2006].

Sangam, H., Rowe, R., Asce, F. (2005). Effect of Surface Fluorination on Diffusion through a High Density Polyethylene Geomembrane, *Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131 (6), pp. 694-704.

Seeger, S. e Müller, W. (1996). Requirements and Testing of Protective Layer Systems for Geomembranes. *Geotextiles and Geomembranes*, 14, pp. 365-376.

Shi, C., Booth, R. (2005). Laboratory development and field demonstration of self-sealing/self-healing landfill liner. *Waste Management*, 25, pp. 231-238.

Thomas, R., Koerner, R. (1996). Advanced in HDPE Barrier Walls. *Geotextiles and Geomembranes*, 14, pp. 393-408.

Tchobanoglous, G., Theisen, H., Vigil, S. (1993). *Integrated Solid Waste Management: Engineering Principles and Management Issues*. Singapore, McGraw-Hill International Editions, Civil Engineering Series.

Tweneboah, K., Williams, N., Haubeil, D. (1994). Assessment of a PVC Geomembrane used in a Landfill Cover System. [Em Linha]. Disponível em <http://www.geomembrane.com/TechPapers/Settlement.htm>. [Consultado em 10/04/2006].

Underwood, P. (1997). Municipal Solid Waste Landfill Guidelines. [Em Linha]. Disponível em http://www.gov.ns.ca/enla/waste/docs/Municipal_Solid_Waste_Landfill_Guidelines.pdf. [Consultado em 12/04/2006].

Warith, M., Evgin, E., Benson, P. (2004). Suitability of shredded tires for use in landfill leachate collection systems. *Waste Management*, 24, pp. 967-979.

Warith, M. e Rao, S. (2006). Predicting the compressibility behaviour of tire shred samples for landfill applications, *Waste Management*, 26, pp. 268-276.

Yin, H., Liu, X., Cho, U. (2001). Geomembranes. [Em Linha]. Disponível em http://www.apparesearch.com/Education/Research/Nonwoven/2001_Kermit_Duckett/education_research_nonwoven_geomembranes.htm. [Consultado em 14/04/2006].

Young, H., Johnson, B., Johnson, A., Carson, D., Lew, C., Liu, S., Handcock, K. (2004). Characterization of Infiltration rates from landfills: supporting groundwater modelling efforts. *Environmental Monitoring and Assessment*, 96, pp. 283-311.

Zanzinger, H. (1999). Efficiency of Geosynthetics Protection Layers for Geomembrane Liners: Performance in a Large-Scale Model Test, *Geosynthetics International*, 6 (4), pp. 303-317.

Edite do Carmo Guerra Regueiro

**Avaliação da Influência de Diferentes Configurações das Camadas dos
Aterros na Formação de Lixiviados**

ANEXOS

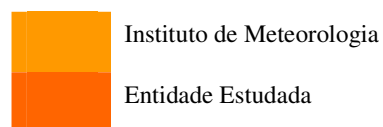
Universidade Fernando Pessoa

Porto, 2006

Anexo A – Dados de precipitação, vento e evaporação da entidade estudada

Tabela A.1. Dados de precipitação, vento e evaporação da entidade estudada relativos ao ano de 2002 (Fonte não revelada).

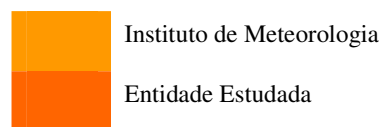
MÊS	TEMPERATURA (°C)						Direção Média do Vento (DEG)		Velocidade Média do Vento (m/s)		Humidade Atmosférica Média (%)		Volume Total de Precipitação (mm)		Volume Médio Diário de Precipitação (mm)		Evaporação Total (mm)	
	Mínima	Máxima	Média															
	Janeiro	3,0	7,0	19,7	22,0	14,3	14,2	301	196	13,40	1,96	67,40	81,79	150,8	118,1	4,86	3,81	35,1
Fevereiro	2,8	5,0	19,1	22,0	14,8	14,5	352	184	15,60	2,48	15,60	77,45	48,5	73,7	1,73	2,63	55,5	—
Março	3,3	7,0	29,1	32,0	16,5	16,3	299	184	15,60	2,41	59,60	73,22	192,7	117,3	6,22	3,78	79,6	—
Abril	3,4	8,0	29,5	32,0	16,8	16,2	348	198	18,30	2,60	58,70	71,07	30,8	44,3	1,03	1,48	81,4	—
Maió	5,8	10,0	24,1	28,0	16,6	17,4	256	233	18,90	2,54	74,20	78,36	74,3	100,5	2,40	3,24	70,7	—
Junho	8,7	13,0	30,3	33,0	19,5	20,0	380	264	16,10	2,45	70,50	81,82	69,0	79,1	2,30	2,64	63,2	—
Julho	10,6	14,0	32,8	36,0	21,3	21,7	445	257	17,90	2,66	65,80	78,15	33,0	47,2	1,06	1,52	87,8	—
Agosto	9,7	15,0	30,3	33,0	22,1	22,1	388	247	16,10	2,13	63,50	78,57	6,1	18,5	0,20	0,60	87,2	—
Setembro	10,7	14,0	33,6	35,0	21,6	21,7	439	173	11,80	1,59	66,00	79,60	216,6	193,5	7,22	6,45	59,4	—
Outubro	7,3	11,0	28,3	31,0	20,0	20,3	389	154	13,80	2,22	68,70	81,05	217,9	216,2	7,26	7,21	53,6	—
Novembro	3,5	6,0	20,1	23,0	15,0	16,0	336	155	15,00	2,09	73,80	85,21	307,3	276,3	10,24	9,21	38,7	—
Dezembro	3,2	6,0	19,2	22,0	14,4	15,4	257	142	16,80	2,72	74,30	83,32	292,4	260,4	9,75	8,68	39,8	—
TOTAL													1639,40	1545,12			752,0	



Anexo A – Dados de precipitação, vento e evaporação da entidade estudada

Tabela A.2. Dados de precipitação, vento e evaporação da entidade estudada relativos ao Ano de 2003 (Fonte não revelada).

MÊS	TEMPERATURA (°C)						Direção Média do Vento (DEG)		Velocidade Média do Vento (m/s)	Humidade Atmosférica Média (%)		Volume Total de Precipitação (mm)		Volume Médio Diário de Precipitação (mm)		Evaporação Total (mm)		
	Mínima	Máxima	Média															
	Janeiro	-2,3	0,0	21,4	24,0	12,9	15,0	39	170	4,14	2,50	62,7	78,0	329,1	321,8	10,62	10,38	54,1
Fevereiro	-0,2	2,0	17,4	20,0	12,3	15,0	40	160	3,61	1,90	72,4	83,0	142,0	134,3	5,07	4,80	31,8	—
Março	5,3	8,0	22,0	24,0		20,0		165		1,70	72,6	77,0	110,1	89,7	3,55	2,89	61,9	—
Abril	7,6	11,0	25,1	26,0		20,0		157		2,80	71,5	75,0	145,5	151,3	4,85	5,04	76,6	—
Mai	5,7	11,0	30,8	34,0		22,0		192		2,60	63,3	71,0	19,0	50,5	0,61	1,63	99,8	—
Junho	9,8	12,0	36,9	39,0		25,0		192		2,40	70,7	75,0	37,5	20,9	1,25	0,70	87,7	—
Julho	11,6	15,0	33,1	35,0		24,0		186		2,00	73,5	80,0	34,0	9,1	1,10	0,29	79,6	—
Agosto	12,4	16,0	38,1	42,0		28,0		195		1,60	72,4	77,0	57,4	0,8	1,85	0,03	97,1	—
Setembro	12,6	16,0	35,1	38,0		27,0		180		1,60	67,2	73,0	16,2	0,4	0,54	0,01	92,9	—
Outubro	5,5	0,0	27,3	30,0		21,0		151		2,10	74,8	79,0	152,0	146,5	5,07	4,88	57,9	—
Novembro	3,6	7,0	23,9	27,0		16,0		146		2,30	78,7	80,0	261,5	248,1	8,72	8,27	48,4	—
Dezembro	1,9	0,0	17,6	20,0		16,0		138		1,90	80,5	81,0	116,2	92,6	3,87	3,09	40,2	—
TOTAL													1420,5	1266,0			828,0	



Anexo A – Dados de precipitação, vento e evaporação da entidade estudada

Tabela A.3. Dados de precipitação, vento e evaporação da entidade estudada relativos ao ano de 2004 (Fonte não revelada).

MÊS	TEMPERATURA (°C)					Direção Média do Vento (DEG)	Velocidade Média do Vento (m/s)	Humidade Atmosférica Média (%)		Volume Total de Precipitação (mm)		Volume Médio Diário de Precipitação (mm)		Evaporação Total (mm)	
	Mínima	Máxima	Média												
Janeiro	0,8	4,0	16,5	18,0	16,0	157	2,00	85,4	86,0	118,1	99,6	3,81	3,21	26,0	—
Fevereiro	1,3	2,0	20,7	23,0	17,0	141	1,80	75,6	75,0	40,2	42,3	1,44	1,51	49,7	—
Março	2,6	5,0	21,9	24,0	15,0	163	2,20	68,7	69,0	79,1	91,8	2,55	2,96	72,2	—
Abril	3,5	8,0	25,5	28,0	14,0	206	2,70	62,9	71,0	71,1	59,9	2,37	2,00	79,4	—
Maio	5,6	9,0	29,4	33,0	22,0	212	2,20	62,1	70,0	55,0	43,3	1,77	1,40	84,9	—
Junho	12,4	17,0	32,8	36,0	26,0	246	2,10	68,2	73,0	19,5	24,0	0,65	0,80	93,7	—
Julho	11,3	15,0	33,2	36,0	26,0	253	2,10	66,0	74,0	3,0	2,9	0,10	0,09	86,3	—
Agosto	13,0	17,0	26,0	28,0	25,0	218	2,20	76,8	80,0	176,2	178,2	5,68	5,75	64,3	—
Setembro	9,4	13,0	33,5	36,0	26,0	198	1,50	67,5	73,0	4,8	5,5	0,16	0,18	77,9	—
Outubro	8,2	11,0	25,2	27,0	21,0	181	2,20	82,1	84,0	251,4	309,4	8,38	10,31	41,2	—
Novembro	4,2	7,0	21,4	25,0	16,0	130	2,10	67,6	72,0	25,0	27,7	0,83	0,92	67,6	—
Dezembro	2,3	5,0	18,3	50,0	16,0	173	1,90	76,5	77,0	96,3	0,0	3,21	0,00	42,0	—
TOTAL										939,7	884,6			785,2	

	Instituto de Meteorologia
	Entidade Estudada

Anexo A – Dados de precipitação, vento e evaporação da entidade estudada

Tabela A.4. Dados precipitação, vento e evaporação da entidade estudada relativos ao ano de 2005 (Fonte não revelada).

MÊS	TEMPERATURA (°C)			Direção Média do Vento (DEG)	Velocidade Média do Vento (m/s)	Humidade Atmosférica Média (%)		Volume Total de Precipitação (mm)		Volume Médio Diário de Precipitação (mm)		Evaporação Total (mm)			
	Mínima	Máxima	Média												
Janeiro	-0,1	2,0	17,8	21,0	15,0	153	2,10	0,0	72,0	15,0	0,0	0,48	0,00	58,4	—
Fevereiro	0,0	3,0	18,4	21,0	14,0	173	2,10	0,0	67,0	11,7	24,4	0,42	0,87	66,3	—
Março	-2,2	2,0	27,7	30,0	18,0	171	2,60	61,4	68,0	73,4	81,1	2,37	2,62	83,5	—
Abril	5,0	8,0	21,3	25,0	19,0	204	2,40	70,1	76,0	74,7	84,1	2,49	2,80	68,1	—
Maiο	8,2	0,0	26,7	30,0	21,0	206	2,60	66,2	73,0	50,2	56,4	1,62	1,82	86,3	—
Junho	11,1	0,0	35,3	39,0	25,0	209	2,50	65,7	57,0	12,0	0,0	0,40	0,00	109,4	—
Julho	12,0	16,0	34,5	36,0	26,0	198	2,50	64,8	71,0	12,6	14,8	0,41	0,48	110,0	—
Agosto	12,2	17,0	38,0	42,0	28,0	222	2,10	57,0	64,0	2,6	4,9	0,08	0,16	131,5	—
Setembro	0,0	14,0	0,0	34,0	25,0	230	1,90	0,0	72,0	0,0	28,4	0,00	0,95	0,0	—
Outubro	8,5	0,0	27,0	31,0	23,0	187	2,40	70,9	73,0	147,4	153,8	4,91	5,13	79,9	—
Novembro	2,5	0,0	20,6	23,0	17,0	153	2,20	76,1	75,0	91,8	95,8	3,06	3,19	54,5	—
Dezembro	2,8	5,0	17,0	21,0	16,0	169	1,90	70,6	72,0	94,1	104,6	3,14	3,49	59,2	—
TOTAL										585,5	648,3			907,1	

