

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

NAIARA NATALIA PEREIRA MENDES

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE POÇOS DE MONITORAMENTO E
SISTEMA DUPLO DE COLETA DE PERCOLADOS NA DETECÇÃO
DE VAZAMENTOS EM ATERROS SANITÁRIOS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2015

NAIARA NATALIA PEREIRA MENDES

ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE POÇOS DE MONITORAMENTO E SISTEMA DUPLO DE COLETA DE PERCOLADOS NA DETECÇÃO DE VAZAMENTOS EM ATERROS SANITÁRIOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Curitiba.

Orientador: Prof. Dr. André Nagalli

CURITIBA

2015

FOLHA DE APROVAÇÃO

ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE POÇOS DE MONITORAMENTO E SISTEMA DUPLO DE COLETA DE PÉRCOLADOS NA DETECÇÃO DE VAZAMENTOS EM ATERROS SANITÁRIOS

Por

NAIARA NATALIA PEREIRA MENDES

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Civil, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, defendido e aprovado em nove de dezembro de 2015, pela seguinte banca de avaliação:

Prof. Orientador - Dr. André Nagalli
UTFPR

Profa. Dra. Amanda Dalla Rosa Johann
UTFPR

Prof. Dr. Ronaldo Luis S. Izzo
UTFPR

AGRADECIMENTOS

Ao professor Dr. Mihail Popescu, que me fez apaixonar por aterros sanitários na disciplina *Geotechnical Landfill Design, Illinois Institute of Technology, 2015*.

Ao professor Dr. André Nagalli, pela paciência, atenção e prontidão na minha pesquisa.

A minha irmã Nádia Rivia Pereira que sempre me apoiou e me deu força pra continuar me dedicando com excelência aos estudos.

Ao meu tio Eider Pereira e meu pai Bruno Vicente de Paula Mendes, que tornaram possível o meu sonho de estudar.

“Se você não consegue explicar algo de forma simples, você não entendeu suficientemente bem.”

Albert Einstein

RESUMO

MENDES, N. N. P. **Análise comparativa entre poços de monitoramento e sistema duplo de coleta de percolados na detecção de vazamentos em aterros sanitários.** 65 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

Essa pesquisa consiste na comparação de custos e preservação do meio ambiente entre sistema de 4 poços de monitoramento com coleta e análise de amostras do lençol freático a cada 3 meses e sistema de coleta de percolados secundário. Foram utilizados para a comparação de custos três portes de aterros sanitários. Os resultados mostraram que a substituição do sistema de detecção de vazamentos atual, por meio de 4 poços de monitoramento é viável economicamente para sistema secundário de coleta de percolados para aterros sanitários com área igual ou menor a: 181.500 m², para sistema de revestimento de argila compactada, 170.500 m² para sistema de revestimento de geomembrana, 124.080 m², para revestimento composto (geomembrana/argila compactada). De modo a evitar uma possível restrição do Órgão Ambiental em relação a total substituição do sistema de poços de monitoramento por sistema secundário de coleta de percolados foi elaborado um estudo comparativo entre sistema de 4 poços de monitoramento com coleta e análise de amostras do lençol freático a cada 3 meses e sistema secundário de coleta de percolados mais 2 poços de monitoramento com coleta e análise de amostras a cada 12 meses. A substituição do sistema de 4 poços de monitoramento por sistema de coleta de percolados secundário aliado a instalação de 2 poços de monitoramento é viável economicamente para aterros sanitários com área menor ou igual a 127.600 m². O sistema de detecção de vazamentos através de sistema secundário de coleta de percolados além de ser viável economicamente para aterros sanitários de médio e pequeno porte apresenta a vantagem de evitar a contaminação do lençol freático, pois proporciona o controle contínuo de vazamentos e evita gastos com multa e correção da qualidade do lençol freático.

Palavras-chave: aterro sanitário, poço de monitoramento, sistema de coleta de percolados secundário, sistema de detecção de vazamentos.

ABSTRACT

MENDES, N. N. P. **Comparison between two leakage detection systems: downstream monitoring wells and double leachate collection system in landfills.** 65 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

This research consists of comparing costs and preservation of the environment between two leachate leakage detection systems in landfills: 4 monitoring wells to collect and analyze samples of groundwater every three months and secondary leachate collection system. Three sanitary landfill sizes were used to compare costs. The results showed that the replacement of the current detection system using four monitoring wells is economically viable for secondary leachate collection system to landfills with an area equal or less than: 181,500 m² for compacted clay liner, 170,500 m² for geomembrane liner, 124,080 m² for composite liner (geomembrane/compacted clay liner). The secondary leachate collection system plus the installation of two monitoring wells to sample groundwater every 12 months is economically viable to landfills with area less or equal to 127,600 m² over the four monitoring wells system. The secondary leachate collection system in addition of being economically viable for medium and small landfills this system has the advantage of avoiding contamination of the groundwater and provides the continuous control of the leak in order to promote correction ready to liner system. The secondary leachate collection system in addition of being economically viable to medium and small landfills, this system has the advantage of avoiding contamination of the groundwater and avoid spending on fine and correction of the quality of the groundwater.

Keywords: landfill, downstream monitoring wells, double leachate collection system, leachate leakage detection system.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Corte esquemático de um aterro sanitário com sistema de detecção de vazamentos através de poços de monitoramento.	15
Figura 2: Esquemático de um aterro sanitário com sistema de monitoramento de vazamento através de sistema de coleta de percolados secundária (sistema de detecção de vazamentos).	16
Figura 3: Padrões de infiltração através de revestimento simples e composto.	18
Figura 4: Formação de percolados na fase ativa do aterro sanitário com camada dupla de coleta de percolados.	20
Figura 5: Esquemático do comprimento de percolação de percolado entre tubulações em aterro sanitário com sistema de coleta de percolados simples.	21
Figura 6: Esquemático do sistema de coleta de percolados com base inclinada.	22
Figura 7: Esquemático do sistema armazenamento e recalque de percolados.	23
Figura 8: Sistema de revestimento para aterros sanitários.	24
Figura 9: Esquemático da formação de percolados após a instalação do sistema de cobertura no aterro sanitário com sistema duplo de coleta de percolados.	25
Figura 10: Disposição dos poços de monitoramento em planta	27
Figura 11: Disposição dos poços de monitoramento em seção	28
Figura 12: Elementos básicos do poço de monitoramento.	29
Figura 13: Filtros para tubos PVC tipo ranhurado.	30
Figura 14: Perfil esquemático do poço de monitoramento.	31
Figura 15: Coletor de caneca.	34
Figura 16: Capacidade de recebimento de resíduos sólidos urbanos de acordo com o porte do aterro sanitário.	39
Figura 17: Esquemático do Caso de Estudo 1.	42
Figura 18: Esquemático do Caso de Estudo 2.	43
Figura 19: Esquemático do Caso de Estudo 3.	43
Figura 20: Esquemático do caso de estudo 4.	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Exemplos de substâncias, separadas em grupos e dispostas por ordem de coleta.....	35
Tabela 2: Procedimento de amostragem e preservação para monitoramento.	36
Tabela 3: Características dos aterros sanitários de grande, médio e pequeno porte.	38
Tabela 4: Índice de preços ao consumidor.....	46
Tabela 5: Composição de custos unitários para sistema de coleta de percolados secundária e poços de monitoramento, com valores referentes a outubro de 2015.	46
Tabela 6: Orçamento de poços de monitoramento, com valores referentes a outubro de 2015.	49
Tabela 7: Orçamento do sistema de coleta de percolados secundário com revestimento simples de argila compactada, com valores referentes a outubro de 2015.	50
Tabela 8: Orçamento de sistema secundário de coleta de percolados com revestimento simples de geomembrana, com valores referentes a outubro de 2015.	52
Tabela 9: Orçamento de sistema de coleta de percolados secundário com revestimento composto (argila compactada e geomembrana), com valores referentes a outubro de 2015.	54
Tabela 10: Orçamento de sistema de detecção de vazamentos composta por sistema de coleta de percolados secundário e 2 poços de monitoramento, com valores referentes a outubro de 2015.....	56
Tabela 11: Área do aterro sanitário, na qual o custo dos dois sistemas em comparação são equivalentes, para todos os casos estudados.	59

LISTA DE SIGLAS

ABETRE	Associação Brasileira de Empresas de Tratamento de Resíduos
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
COFINS	Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social
CSLL	Contribuição Social Sobre o Lucro Líquido
IAP	Instituto Ambiental do Paraná
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IR	Imposto de Renda
IRPJ	Imposto de Renda Pessoa Jurídica
ISS	Imposto Sobre Serviços
NBR	Norma Brasileira

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1. OBJETIVO GERAL.....	13
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	13
1.3. JUSTIFICATIVA.....	13
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1. ATERRO SANITÁRIO.....	15
2.2. SISTEMA DE REVESTIMENTO.....	16
2.3. VAZAMENTO DE PERCOLADOS.....	18
2.4. SISTEMA DE COLETA DE PERCOLADOS.....	19
2.4.1. SISTEMA DE COLETA DE PERCOLADOS SECUNDÁRIA.....	23
2.5. SISTEMA DE COBERTURA FINAL.....	24
2.6. POÇOS DE MONITORAMENTO.....	25
2.6.1. PROJETO.....	27
2.6.2. CONSTRUÇÃO.....	28
2.6.3. AMOSTRAGEM.....	32
2.7. ESTUDO SOBRE OS ASPECTOS ECONÔMICOS E FINANCEIROS DA IMPLANTAÇÃO E OPERAÇÃO DE ATERROS SANITÁRIOS - ABETRE.....	38
2.8. ESTUDO DE CASO – ATERRO SANITÁRIO DE CACHIMBA.....	40
3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	42
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
4.1. COMPARAÇÃO DE CUSTOS - CASO 1.....	49
4.2. COMPARAÇÃO DE CUSTOS – CASO 2.....	52
4.3. COMPARAÇÃO DE CUSTOS - CASO 3.....	53
4.4. COMPARAÇÃO DE CUSTOS - CASO 4.....	56
4.5. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS.....	59
5 CONCLUSÃO	62
REFERÊNCIAS	64

1 INTRODUÇÃO

Segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), a geração total de resíduos sólidos urbanos (RSU) no Brasil em 2014 foi de aproximadamente 78,6 milhões de toneladas, o que representa um aumento de 2,9% de 2013 para 2014, enquanto à taxa de crescimento populacional no país no mesmo período foi de 0,9% (ABRELPE, 2014). A produção média de RSU por habitante no Brasil em 2014 foi de 0,963 kg/hab/dia, sendo que na região Sudeste a produção foi igual 1,205 kg/hab/dia e na região sul a produção foi igual a 0,725 (ABRELPE, 2014). Em 2014 apenas 36,2% dos resíduos sólidos urbanos (RSU) coletados foram direcionados para aterros sanitários, 37% dos RSU foram direcionados para aterros controlados e 21,2% foram direcionados para vazadouros a céu aberto (lixões) (ABRELPE, 2014). A região sul e sudeste destina a maior parte dos RSU para aterros sanitários, enquanto as demais regiões destinam a maior parte dos RSU para aterros sanitários controlados e lixões (ABRELPE, 2014). Segundo a NBR 8849 (1985), aterro controlado apresenta como vantagem principal em relação ao vazadouro a céu aberto o sistema de cobertura dos RSU após cada jornada de trabalho, porém o mesmo não apresenta sistema de revestimento e coleta de gases e percolados como os aterros sanitários.

Depois que o aterro sanitário municipal começa a receber resíduos sólidos inicia-se a formação de líquido percolado pela passagem de águas pluviais através dos resíduos e também pela decomposição dos materiais. O sistema de coleta de percolados é localizado na base do aterro e consiste em uma rede de tubulações perfuradas localizadas no interior de uma camada de drenagem. A camada de drenagem é geralmente composta por material granular ou geossintético que abrange toda a base do aterro sanitário. Segundo NBR 13896 (1997), caso o solo local não apresente permeabilidade inferior a 10^{-5} cm/s e uma zona não saturada de espessura superior a 3,0 m é necessário à instalação de camada de revestimento no aterro sanitário. O sistema de coleta de percolados é projetado e construído para controlar o nível de percolados na base do aterro sanitário, de forma a minimizar vazamentos através da camada de revestimento, e dessa forma reduzir a probabilidade de contaminação do lençol freático.

O sistema de detecção de vazamentos é geralmente composto por poços de monitoramento em aterros sanitários convencionais, NBR 13896 (ASSOCIAÇÃO..., 1997). O sistema de poços de monitoramento deve ser constituído de no mínimo quatro poços, sendo um a montante do aterro sanitário e três a jusante no sentido do fluxo do lençol freático. O monitoramento deve ser efetuado durante toda a vida útil e também na fase de pós-fechamento do aterro sanitário. O monitoramento deve ser composto por pelo menos quatro amostragens realizadas em intervalos de três meses, ou seja, o monitoramento é realizado apenas quatro vezes ao ano NBR 13896 (ASSOCIAÇÃO..., 1997). Em caso de contaminação o proprietário do aterro sanitário é obrigado a recuperar a qualidade do aquífero NBR 13896 (ASSOCIAÇÃO..., 1997).

Como descrito anteriormente o sistema de detecção de vazamentos de percolados convencional consiste na coleta de amostras do lençol freático nos poços de monitoramento. Uma alternativa a esse sistema de detecção de vazamentos convencional consiste na instalação de um sistema de coleta e remoção de percolados adicional a estrutura do aterro sanitário, que coleta o percolado que atravessa o sistema de impermeabilização do sistema de coleta de percolados principal. O sistema de coleta de percolados duplo é composto por dois sistemas de coleta e remoção de percolados (primário e secundário) intercalados por um sistema de revestimento composto. Revestimento composto é um revestimento que contém dois ou mais componentes, (ROWE et al., 2012a). O sistema de coleta de percolados primário tem como função a coleta e transporte de percolados à central. Na central o percolado coletado é bombeado, tratado ou redirecionado ao aterro novamente, dependendo da estratégia de gerenciamento utilizada em cada aterro sanitário. O sistema de coleta de percolados secundário tem como função a detecção de vazamentos de percolados, uma vez que o mesmo é responsável pela coleta e transporte apenas do percolado que infiltrou no sistema de revestimento primário.

1.1. OBJETIVO GERAL

O objetivo principal deste trabalho é comparar o sistema de poços de monitoramento e o sistema duplo de coleta de percolados na detecção de vazamentos de percolados em relação a custos e melhor proteção ao meio ambiente.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste trabalho consistem em:

- Comparar os custos relativos a sistema de 4 poços de monitoramento (coleta e análise de amostras a cada 3 meses) e sistema secundário de coleta de percolados;
- Comparar os custos de instalação e operação de sistema de 4 poços de monitoramento e sistema secundário de coleta de percolados mais 2 poços de monitoramento (coleta e análise de amostras do lençol freático a cada 12 meses);
- Comparar as vantagens dos dois sistemas em relação à segurança ambiental;
- Comparar o tempo disponível entre a detecção de vazamento e a recuperação da qualidade do aquífero que cada sistema proporciona; e
- Concluir qual dos dois sistemas apresenta melhor relação custo benefício.

1.3. JUSTIFICATIVA

A estrutura de aterro sanitário convencional consiste em apenas um sistema de coleta e remoção de percolados com detecção de vazamentos realizada através

de poços de monitoramento. Caso ocorra a infiltração de percolado através do sistema de revestimento o solo local será contaminado. No sistema convencional essa contaminação será detectada através de amostragens do lençol freático realizadas a cada três meses em poços de monitoramento, ou seja, quando o vazamento for detectado a região provavelmente já estará significativamente contaminada.

No sistema duplo de coleta e remoção de percolados o percolado que infiltra no revestimento primário é coletado na tubulação secundária, de modo a evitar a contaminação do meio ambiente. Com a camada de detecção de vazamentos (sistema de coleta secundário) a quantidade de líquido coletada é monitorada ao longo do tempo, resultando numa taxa de vazamento em litros/hectare/dia (QIAN *et al.*, 2002). Além de evitar a contaminação do meio ambiente o sistema duplo de coleta de percolados evita os gastos de recuperação da qualidade do lençol freático direcionados ao proprietário do aterro sanitário.

De modo geral o sistema de detecção de vazamentos composto por sistema duplo de coleta e remoção de percolados apresenta maior segurança em relação ao meio ambiente do que o sistema de poços de monitoramento, pois o sistema duplo de coleta de percolados proporciona acompanhamento de vazamentos ao longo do tempo e evita a infiltração do percolado no solo. Com os resultados dessa pesquisa será possível verificar se os custos do sistema duplo de coleta de percolados compensam a sua implantação como sistema de detecção de vazamentos em aterros sanitários brasileiros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. ATERRO SANITÁRIO

Aterro sanitário é uma estrutura de deposição de resíduos sólidos composta por sistema de revestimento, sistema de coleta e remoção de percolados, sistema de coleta e remoção de gases, sistema de cobertura final e sistema de monitoramento de vazamentos de percolados, NBR 13896 (ASSOCIAÇÃO..., 1997). A detecção de vazamentos de percolados pode ser realizada através de poços de monitoramento, como se pode observar na Figura 1, ou através de sistema de coleta de percolados secundária, como se pode observar na Figura 2.

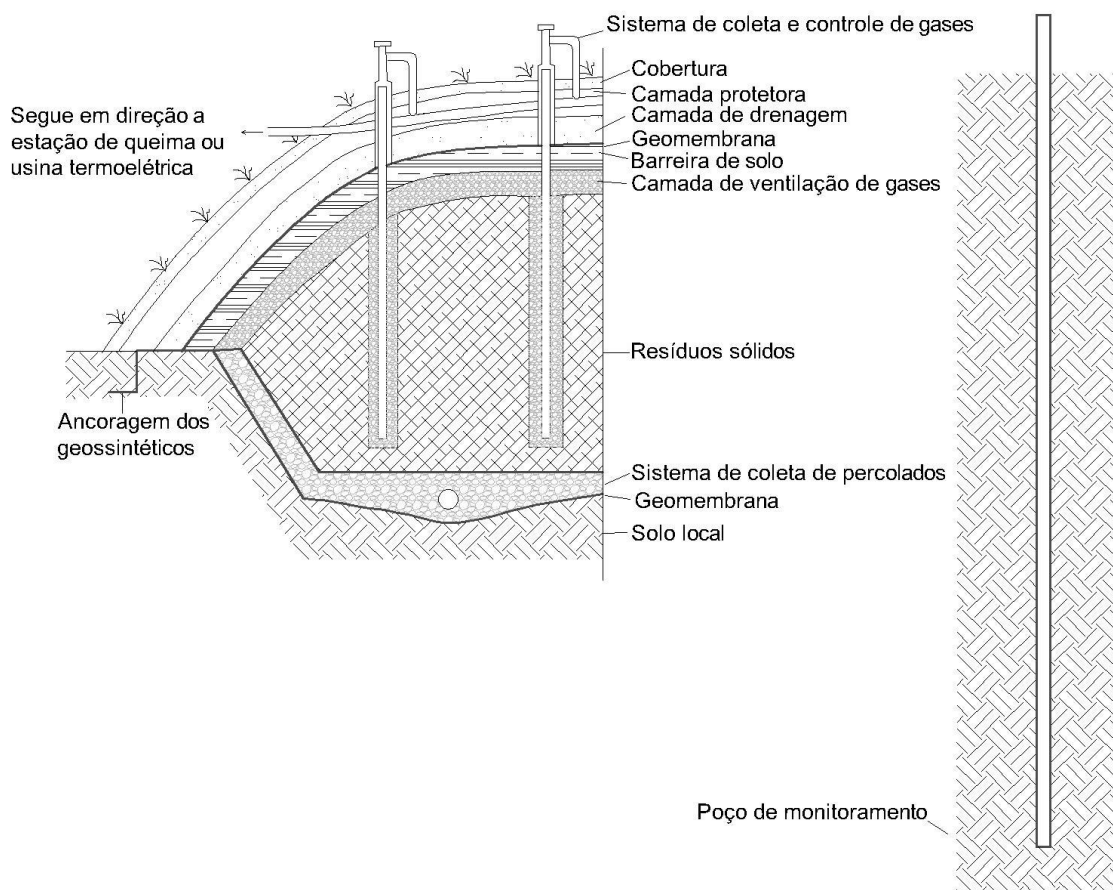


Figura 1: Corte esquemático de um aterro sanitário com sistema de detecção de vazamentos através de poços de monitoramento.
 Fonte: Adaptado de QIAN *et al.*, (2002).

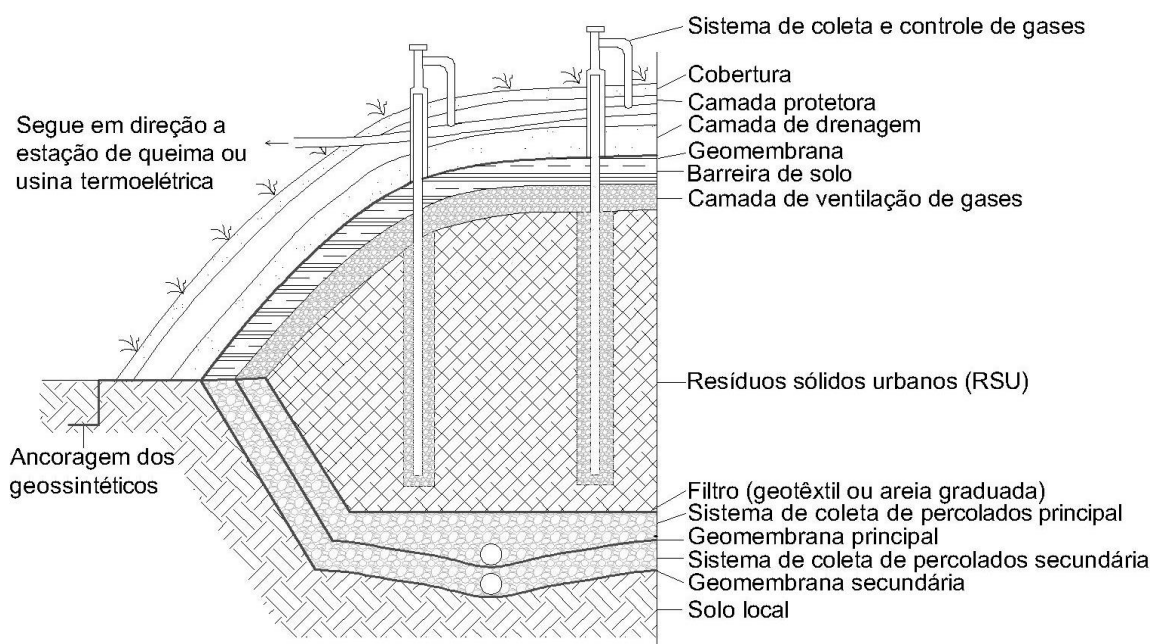


Figura 2: Esquemático de um aterro sanitário com sistema de monitoramento de vazamento através de sistema de coleta de percolados secundária (sistema de detecção de vazamentos). Fonte: Adaptado de QIAN *et al.*, (2002).

2.2. SISTEMA DE REVESTIMENTO

Aterros sanitários geralmente apresentam sistema de revestimento na base e laterais do aterro de modo a evitar a contaminação de percolados no meio ambiente (ROWE *et al.*, 2004). De acordo com Chappel *et al.* (2012), geomembranas (HDPE) de 1,5 a 2,5 mm de espessura são geralmente utilizadas em aterros sanitários como barreiras de fluxo de percolados e vapores, para evitar a contaminação do lençol freático.

Sistema de revestimento composto é a combinação de dois ou mais materiais de revestimento, geralmente essa combinação é formada por geomembrana sobreposta a uma camada de argila (ROWE *et al.*, 2012b). A camada de argila pode ser formada por argila compactada (compacted clay liner – CCL) ou argila geossintética (geosynthetic clay liner – GCL) (ROWE *et al.*, 2012b).

Estudos de campo realizados por Giroud *et al.* (2005), mostraram que durante a instalação do revestimento na base e laterais do aterro sanitário ocorre a dilatação da geomembrana devido a combinação do aquecimento solar, alto coeficiente de expansão, e rigidez do polietileno de alta densidade (HDPE – high

density polyethylene). Esse dobramento acarreta a formação de rugas, o que gera a formação de espaços vazios entre a geomembrana e a CCL, GCL ou solo local (GIROUD et al. 2005). Após estar à sujeita sobrecargas (peso da camada granular e RSUs) as rugas podem reduzir a altura e espessura, mas não apresentam planicidade novamente (GUDINA et al., 2011). A tensão de deformação devido a camada granular sobreposta a geomembrana pode ser aumentada na região enrugada, o que aumenta a probabilidade de formação de furos nessa região (GUDINA et al., 2011). Estudos realizados por Chappel (2012), mostraram que em média 20 a 30% da área da geomembrana pode apresentar rugas após o processo de instalação, as quais podem aumentar substancialmente a probabilidade de vazamentos, caso a geomembrana apresente um furo na região enrugada, pois a presença de furo na região enrugada da geomembrana permite a livre passagem de percolados (CHAPPEL, 2012). Estudos experimentais realizados por Rowe *et al.* (2012a), mostraram que a espessura média das rugas em geomembranas são entre 0,1 e 0,8 m, a altura das rugas varia entre 0,05 m e 0,13 m, o espaçamento entre as rugas apresentam-se em média entre 0,3 e 1,6 m e ocorre em média 1200 rugas/hectare.

Estudos experimentais realizados por Rowe et al. (2012a), mostraram que a utilização de sistema de revestimento composto apresenta uma taxa de vazamentos através do sistema de revestimento muito menor que o sistema de revestimento simples com apenas geomembrana ou argila compactada. A capacidade de barreira de sistema de revestimento composto depende do contato entre a geomembrana e a CCL ou GCL, dessa forma deve-se evitar a formação de rugas no processo de instalação das geomembranas, principalmente rugas com grandes comprimentos (ROWE et al., 2012a). Informações a respeito da quantidade de rugas, espessura e comprimento da ruga são essenciais para estimar a taxa de vazamento em geomembranas (CHAPPEL et al., 2012).

Com alto controle de qualidade na instalação, as geomembranas apresentam em média 3 furos/hectare após o processo de instalação e 12 furos/hectare após a instalação da camada de drenagem (CHAPPEL et al., 2012). De acordo com Rowe et al. (2010), as geomembranas apresentam orifícios naturais de fabricação, na ordem de 2,5 a 5,0 furos/hectare além dos orifícios gerados na instalação das geomembranas na base e laterais do aterro sanitário. De acordo com

Rowe et al. (2012a), além disso podem ocorrer a formação de furos na geomembrana durante o processo de fabricação e transporte, instalação e processo de colagem, execução da camada de drenagem acima da geomembrana e trânsito de equipamentos pesados.

2.3. VAZAMENTO DE PERCOLADOS

No sistema de revestimento de geomembrana, o vazamento de percolados ocorre facilmente através dos furos da geomembrana, assumindo que o solo local não impeça a infiltração (QIAN et al, 2002). Em revestimento de barreira de argila compactada a infiltração ocorre em toda a área da camada (QIAN et al, 2002). Por outro lado, com o sistema de revestimento composto, apenas uma quantidade limitada de percolado atravessa o furo da geomembrana, pois o solo de baixa permeabilidade (CCL ou GCL) impede a infiltração dos percolados que atravessam os furos (QIAN et al, 2002). Na Figura 3 se pode observar a taxa de infiltração que ocorre nos diferentes tipos de sistema de revestimento.

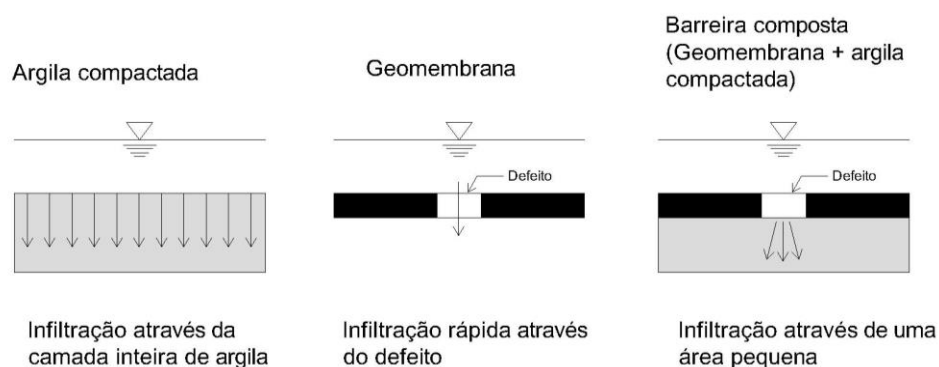


Figura 3: Padrões de infiltração através de revestimento simples e composto.
Fonte: QIAN et al. (2002).

Estudos laboratoriais realizados por Rowe et al. (2012b), mostraram que a taxa de vazamento através de sistema de revestimento composto (geomembrana/CCL, geomembrana/GCL) é muito menor que a taxa de vazamento que ocorre em sistema de revestimento simples de geomembrana ou CCL. O estudo realizado também demonstrou que a taxa de vazamentos através do sistema de revestimento composto formado por geomembrana/GCL é geralmente muito menor

que a taxa de vazamentos em revestimento composto de geomembrana/CCL (ROWE et al., 2012a).

2.4. SISTEMA DE COLETA DE PERCOLADOS

Sistema de coleta e remoção de percolados é composto por camada granular de drenagem e sistema de tubulação perfurada (HDPE) (ROWE et al., 2012b). O sistema de tubulações de coleta de percolados é localizado na base do aterro sanitário e consiste em uma rede de tubulações perfuradas localizadas no interior de um sistema de drenagem, composto usualmente por material granular uniformemente graduado que abrange toda a base do aterro sanitário sobre o sistema de revestimento (US EPA, 2000). O sistema de coleta de percolados é projetado e construído para controlar a altura de percolados que atua na base do aterro sanitário, de forma a minimizar vazamentos através das membranas e camadas de argila compactada, e dessa forma reduzir a probabilidade de contaminação do lençol freático (ROWE et al., 2013b). De acordo com Rowe et al. (2004), para diminuir o potencial impacto na saúde humana e meio ambiente através do vazamento de percolados no lençol freático e rios, o nível de percolados sobre o sistema de revestimento deve ser menor que a espessura da camada de drenagem, geralmente entre 0,3 e 0,5 m (ROWE et al., 2004).

O sistema de tubulação perfurada deve coletar e transportar o percolado adequadamente à central, onde o mesmo deve ser bombeado, tratado ou redirecionado ao aterro novamente, dependendo da estratégia de gerenciamento utilizada em cada aterro sanitário (ROWE et al., 2013b). Segundo Rowe et al. (2012b), o sistema de coleta de percolados atinge a vida útil quando o nível de percolados sobre o sistema de revestimento apresenta-se igual a espessura da camada de drenagem (ROWE et al., 2012b).

Os percolados são gerados pela decomposição dos materiais e também pela passagem de águas pluviais através dos resíduos sólidos urbanos (ROWE et al. 2012b). Na Figura 4 se pode observar o esquemático da formação de percolados, durante a fase ativa do aterro sanitário.

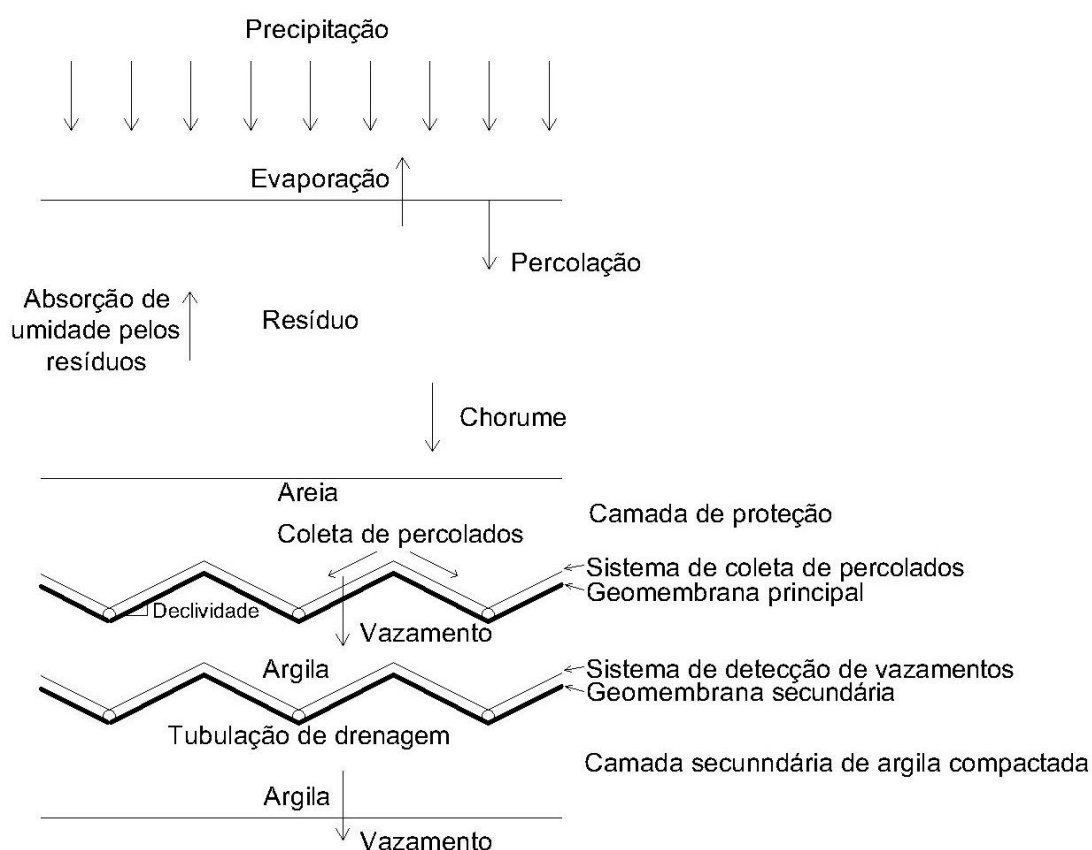


Figura 4: Formação de percolados na fase ativa do aterro sanitário com camada dupla de coleta de percolados.
Fonte: QIAN et al. (2002).

Pesquisas de campo mostraram que a passagem de percolados através do sistema de drenagem pode causar a colmatção dos materiais granulares, dos filtros separadores e da tubulação de coleta, devido ao crescimento de biomassa, precipitação de minerais e decomposição de partículas sólidas no sistema (BASS, 1986; BRUNE et al., 1991; KOERNER et al., 1993, McBEAN et al., 1993; ROWE, 1998; FLEMING et al., 1999; CRAVEN et al., 1999; MALIVA et al., 2000; BOUCHEZ et al., 2003; LEVINE et al., 2005, MCISAAC et al., 2008). Essa acumulação de materiais de obstrução causa a redução da porosidade e condutividade hidráulica do sistema de drenagem, o que gera a acumulação de percolados acima da geomembrana na base do aterro (ROWE et al., 2012b, ROWE et al., 2013f). Estudos laboratoriais mesocosmos com camada de drenagem granular e filtro separador permeados com percolados durante 6 anos, realizados por McIsaac et al. (2008) e

Rowe *et al.* (2013c), mostraram que o uso de filtros separadores (geotêxtil *woven*, geotêxtil *nonwoven* e camada de areia graduada) reduziram a taxa de colmatação da camada de drenagem. Segundo Rowe *et al.* (2013c), o geotêxtil *woven* previne a intrusão de RSU na camada de drenagem. Da mesma forma que o geotêxtil *woven* o geotêxtil *nonwoven* e a camada de areia graduada também previnem a intrusão de RSU na camada granular de drenagem, mas também atuam como filtros. O geotêxtil *nonwoven* e a camada de areia graduada promovem o tratamento dos percolados, essa filtragem proporciona a redução da entrada de materiais dissolvidos, sólidos suspensos e partículas finas na camada granular de drenagem, ou seja, diminui a concentração do percolado, dessa forma ocorre a redução da colmatação da camada granular de drenagem (ROWE *et al.* 2013c). Os resultados do experimento realizado por Yu *et al.* (2013e) e Rowe *et al.* (2013a), mostraram que a taxa de colmatação do sistema de coleta e remoção de percolados aumentou proporcionalmente com o aumento do comprimento de percolação, ou seja, metade da distância entre duas tubulações de coleta de percolados paralelas, como se pode observar na Figura 5.

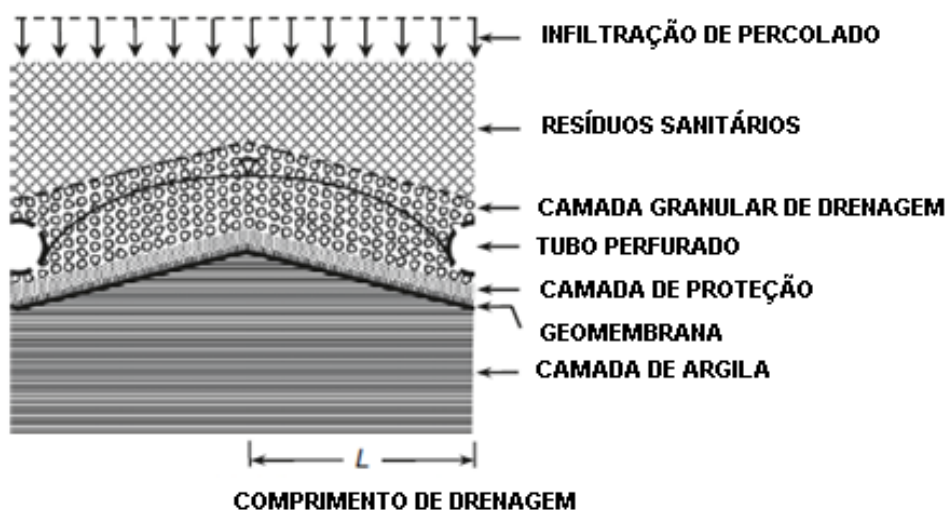


Figura 5: Esquemático do comprimento de percolação de percolado entre tubulações em aterro sanitário com sistema de coleta de percolados simples.
Fonte: Rowe *et al.* (2013e).

Resultados experimentais através de laboratórios mesocosmos realizados por Rowe *et al.* (2013a), mostraram que camada de drenagem com brita 19 mm apresenta uma maior taxa de colmatação do que camada granular com brita 38 mm

depois de aproximadamente 6 anos de permeação de percolados. O estudo também mostrou que a colmatação causou o aumento do nível de percolados na base do aterro com o uso da brita 19 mm após 6 anos de drenagem de percolados e tal fato não ocorreu com a utilização da brita 38 mm (ROWE et al., 2013a).

Além disso a base do aterro sanitário deve apresentar uma inclinação que permita o escoamento do percolado por gravidade até a tubulação de coleta, de modo a evitar a acumulação de líquido no sistema de revestimento (US EPA). A inclinação mínima da base do aterro deve ser igual a 2%, como se pode observar na Figura 6 (US EPA).

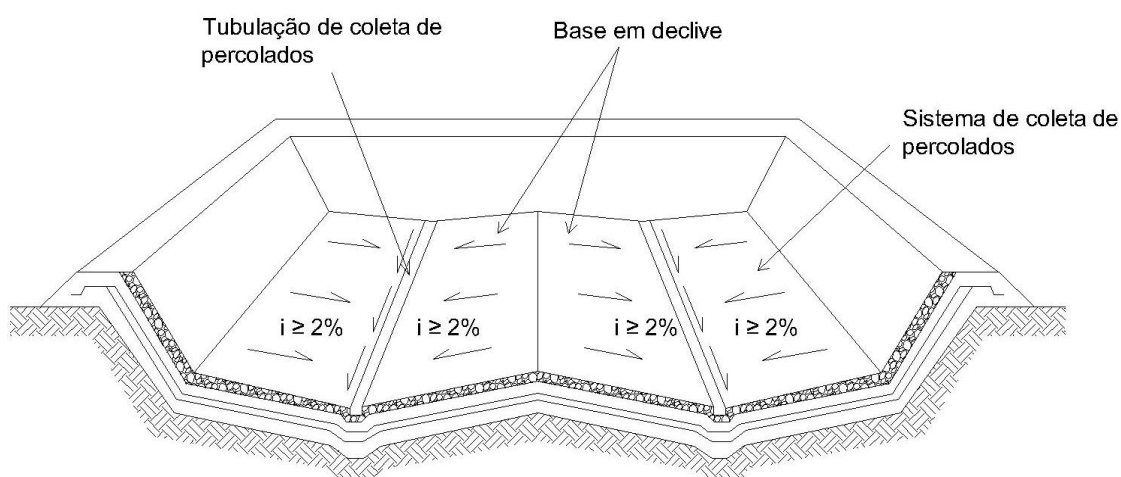


Figura 6: Esquemático do sistema de coleta de percolados com base inclinada.
Fonte: Adaptado de QIAN et al. (2002).

O ponto mais baixo do aterro sanitário deve apresentar um reservatório de armazenamento de percolados com sistema de recalque, como se pode verificar na Figura 7 (US EPA, 2000).

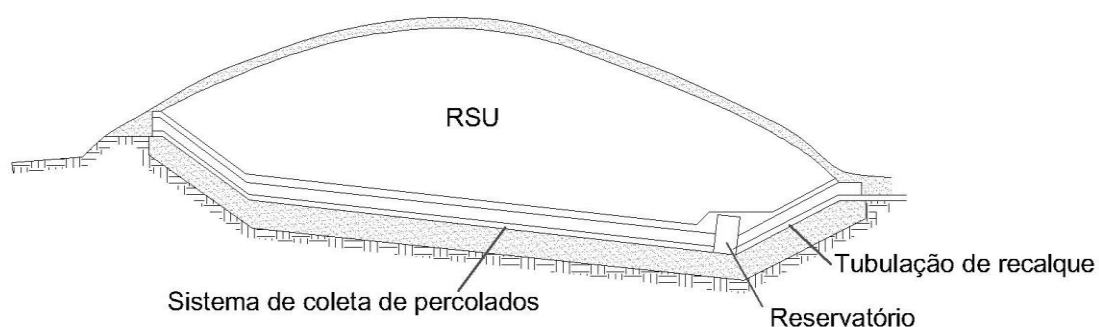


Figura 7: Esquemático do sistema armazenamento e recalque de percolados.
Fonte: Adaptado de US EPA, 2000.

2.4.1. Sistema de coleta de percolados secundária

O sistema de coleta de percolados secundário apresenta características equivalentes ao sistema de coleta de percolados principal: sistema de revestimento, camada granular de drenagem, sistema de tubos perfurados de coleta e remoção de percolados, reservatório de armazenamento e sistema de recalque se necessário. O sistema secundário de coleta de percolados (sistema de detecção de vazamentos) tem como função principal a coleta e transporte do percolado que atravessa o sistema de revestimento principal, de modo a evitar a contaminação do lençol freático e proporcionar o monitoramento ao longo do tempo de vazamentos (QIAN *et al.*, 2002).

O aterro sanitário deve apresentar sistema duplo de coleta de percolados com sistema de revestimento composto no caso de deposição de resíduos sólidos tóxicos (US EPA, 2000). O aterro sanitário de deposição de resíduos sólidos tóxicos deve apresentar na sua estrutura: camada de coleta de percolados, camada impermeabilizante, camada de detecção de vazamentos, camada impermeabilizante e camada de solo compactado, conforme se pode verificar na Figura 8 (US EPA, 2000).

A camada de coleta de percolados deve apresentar no mínimo 0,5 m de espessura, com condutividade hidráulica mínima de 1×10^{-3} m/s (US EPA, 2000). O sistema de revestimento composto superior deve ser composto de no mínimo HPDE

de 2 mm ou membrana flexível equivalente, e uma camada de solo compactado de no mínimo 1 m de espessura e condutividade hidráulica inferior a 1×10^{-9} m/s (construído em séries de compactação de 250 mm) (EPA, 2000). O sistema de detecção de vazamentos deve apresentar espessura mínima de 0,5 m e condutividade hidráulica de no mínimo 1×10^{-3} m/s ou material geossintético com desempenho equivalente (EPA, 2000). O sistema de revestimento composto inferior deve apresentar no mínimo HDPE de 2 mm ou membrana flexível equivalente, e uma camada de solo compactado de no mínimo 1 m de espessura e condutividade hidráulica inferior a 1×10^{-9} m/s (construído em séries de compactação de 250 mm) (EPA, 2000).

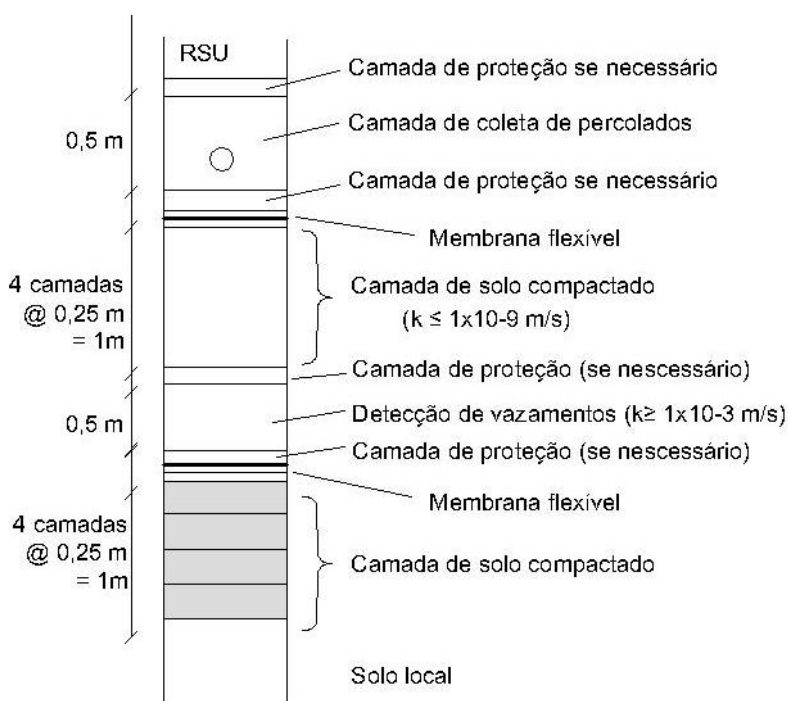


Figura 8: Sistema de revestimento para aterros sanitários.

Fonte: U.S. EPA, 2000.

2.5. SISTEMA DE COBERTURA FINAL

O sistema de cobertura final do aterro sanitário consiste em cobertura vegetal, camada de proteção, camada de drenagem e sistema de revestimento (US EPA, 2000). O principal objetivo da cobertura final do aterro consiste em minimizar a infiltração de água dentro do aterro sanitário de modo a reduzir a quantidade de percolados gerados na fase de pós-fechamento do aterro sanitário (US EPA, 2000).

Na Figura 9 se pode observar a formação de percolados durante a fase de pós-fechamento do aterro sanitário.

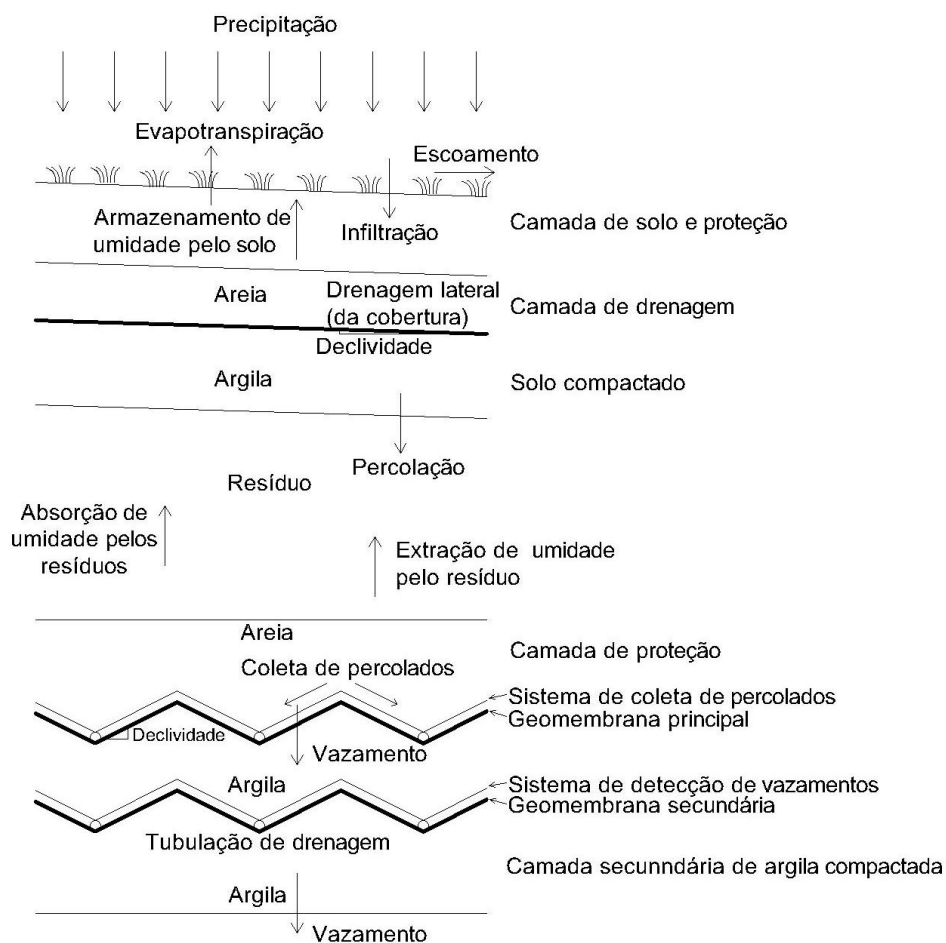


Figura 9: Esquemático da formação de percolados após a instalação do sistema de cobertura no aterro sanitário com sistema duplo de coleta de percolados.

Fonte: QIAN *et al.* (2002).

2.6. POÇOS DE MONITORAMENTO

Segundo a NBR 13896 (1997) todos os aterros sanitários devem possuir sistema de monitoramento de águas subterrâneas, em alguns casos esse sistema pode ser dispensado a critério do Órgão de Controle Ambiental (OCA). De acordo com a NBR 13896 (1997), o sistema de controle da qualidade do lençol freático é composto por uma rede de poços de monitoramento. Os poços de monitoramento

têm como objetivo a avaliação de influências do líquido percolado na qualidade das águas do lençol freático NBR 13896 (ASSOCIAÇÃO..., 1997).

A NBR 13896 (1997) estabelece que a qualidade das águas subterrâneas, na área de instalação do aterro sanitário deve atender aos padrões de potabilidade estabelecidos na legislação vigente. De acordo com Portaria MS Nº 2914 de 12/12/2011 (Federal), água potável corresponde a água destinada ao consumo humano, cujos padrões microbiológicos físico, químicos e radioativos atendam ao padrão de potabilidade e que não ofereça riscos a saúde.

A NBR 13896 (1997) estabelece que a quantidade de poços de monitoramento deve ser suficiente para representar a qualidade da água existente no aquífero. O sistema de poços de monitoramento deve ser constituído de no mínimo quatro poços, sendo um a montante do aterro sanitário e três a jusante no sentido do fluxo de escoamento preferencial do lençol freático NBR 13896 (ASSOCIAÇÃO..., 1997). De acordo com a NBR 13896 (1997), os poços de monitoramento devem ter diâmetro mínimo de 101,6 mm e ser revestidos e tampados para evitar a contaminação de amostras.

De acordo com a NBR 13896 (1997) a qualidade das águas subterrâneas deve ser monitorada durante toda a vida útil do aterro sanitário e também durante a fase de pós-fechamento. Segundo a NBR 13896 (1997) caso os resultados da amostragem do lençol freático não apresentem valores correspondentes ao padrão de potabilidade, o proprietário do aterro sanitário é obrigado a recuperar a qualidade do aquífero contaminado.

Segundo a NBR 13896 (1997) o programa de monitoramento da qualidade das águas subterrâneas do aterro sanitário deve: indicar os parâmetros a serem monitorados; estabelecer e citar os procedimentos de coleta, preservação e análise de amostras; estabelecer valores naturais para todos os parâmetros do programa de monitoramento. Estes valores podem ser definidos preferivelmente pela amostragem do lençol freático antes do início da operação do aterro ou através da amostragem de poços a montante da instalação após o início de operação do aterro sanitário; prever uma análise de todos os parâmetros a serem monitorados, pelo menos a cada três meses durante a fase ativa do aterro sanitário e registrar o nível do lençol

freático a cada coleta realizada e determinar a velocidade e a direção do escoamento do lençol freático.

Segundo a NBR 13896 (1997), o monitoramento de águas subterrâneas deve ser realizado por no mínimo 20 anos após o fechamento do aterro sanitário. Este período de monitoramento pode ser reduzido ou estendido de acordo com a geração de percolados do aterro sanitário NBR 13896 (ASSOCIAÇÃO..., 1997).

2.6.1. Projeto

A rede de monitoramento deve possuir pelo menos um poço a montante do aterro sanitário a ser monitorado, de modo que se possa avaliar a qualidade original da água subterrânea, e três poços a jusante, como se pode verificar nas Figuras 10 e 11 NBR 13895 (ASSOCIAÇÃO..., 1997).

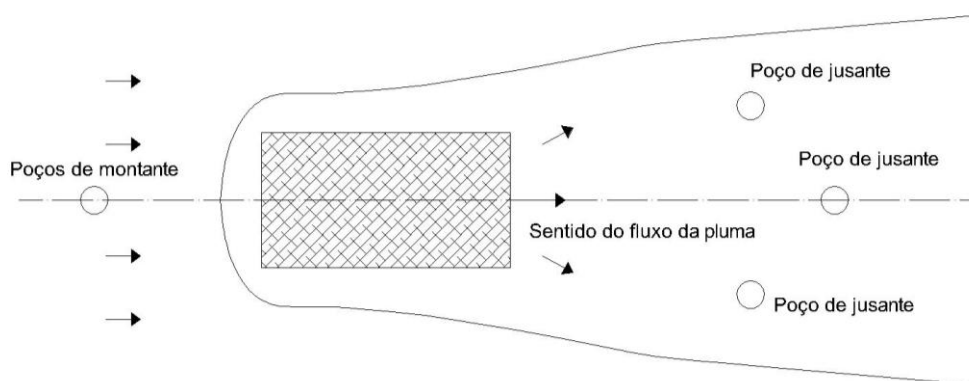


Figura 10: Disposição dos poços de monitoramento em planta
Fonte: NBR 13895 (ASSOCIAÇÃO..., 1997)

De acordo com a NBR 13895 (1997), para apresentação de projeto de poços de monitoramento devem ser fornecidos a OCA os seguintes itens: descrição da geologia local, aspectos hidrogeológicos, mapa piezométrico, localização dos poços, memorial descritivo e os parâmetros a serem analisados na água. Na descrição da geologia local deve ser incluída uma descrição objetiva da distribuição litológica, das

características sedimentológicas estratificadas e das características estruturais. Em relação aos aspectos hidrogeológicos devem ser abordados a faciologia hidrogeológica, a espessura do aquífero, a estimativa da velocidade do fluxo e apreciação da rede de fluxo e sentido de escoamento. No mapa piezométrico deve ser incluído as cotas do nível de água do aquífero superior com referência a um “datum” especificado.

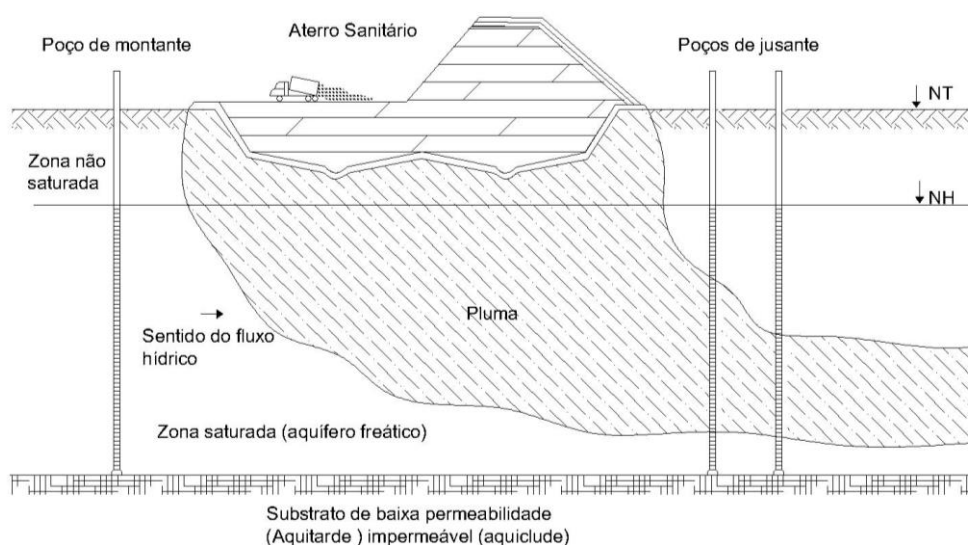


Figura 11: Disposição dos poços de monitoramento em seção
Fonte: Adaptado de NBR 13895 (ASSOCIAÇÃO..., 1997).

Os poços a jusante (obrigatório no mínimo 3) do aterro sanitário devem ser instalados não alinhados, para melhor avaliar a infiltração de percolados na água subterrânea NBR 13895 (ASSOCIAÇÃO..., 1997). Os poços a jusante do aterro sanitário devem ser posicionados transversalmente ao fluxo de água subterrânea e serem distribuídos próximos à área de deposição NBR 13895 (ASSOCIAÇÃO..., 1997). Dessa forma é possível a identificação da pluma o mais breve possível.

2.6.2. Construção

Segundo a NBR 13895 (1997), a perfuração dos poços de monitoramento deve ser monitorada por profissional legalmente habilitado e o diâmetro de perfuração do poço de monitoramento deve ser no mínimo de 200 mm. Durante o

processo de perfuração é importante observar as variações do nível de água, bem como o acompanhamento e a descrição das amostras do material geológico seccionado (NB13895/97).

Os poços de monitoramento são constituídos basicamente dos seguintes elementos: revestimento interno, filtro, pré-filtro, proteção sanitária; tampão, caixa de proteção, selo, preenchimento e guias centralizadoras NBR 13895 (ASSOCIAÇÃO..., 1997). Na Figura 12 se pode observar o esquemático dos elementos básicos que compõem o poço de monitoramento.

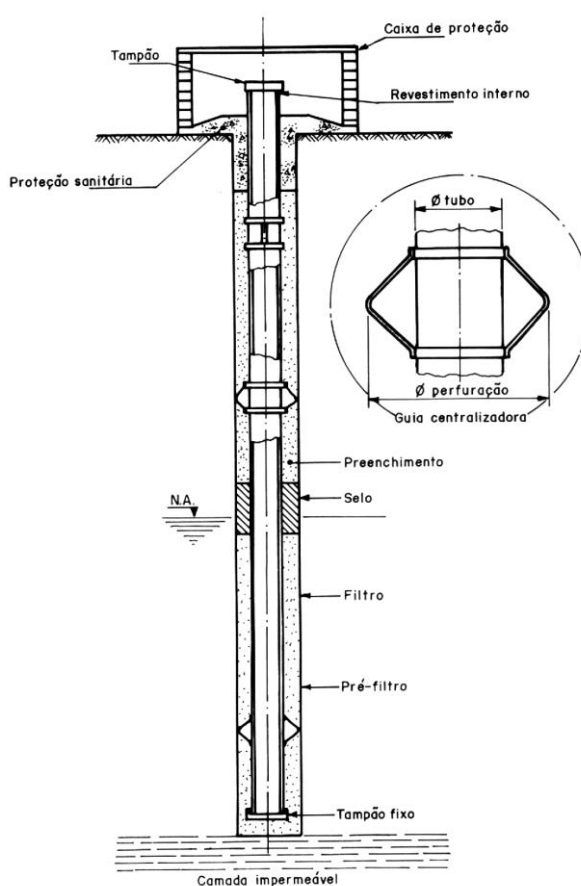


Figura 12: Elementos básicos do poço de monitoramento
 Fonte: NBR 13895 (ASSOCIAÇÃO..., 1997).

O filtro tem a função de impedir a penetração de algumas impurezas sólidas no poço, sem impedir a passagem de água NBR 13895 (ASSOCIAÇÃO..., 1997). O filtro mais utilizado em poços é o tipo ranhurado de PVC, que consiste em um tubo com ranhuras vazadas NBR 13895 (ASSOCIAÇÃO..., 1997). Na Figura 13 se pode

observar o esquemático de filtro para tubos de PVC tipo ranhurado. De acordo com NBR 13895 (1997), a largura da ranhura deve ser entre 2 mm a 3 mm.

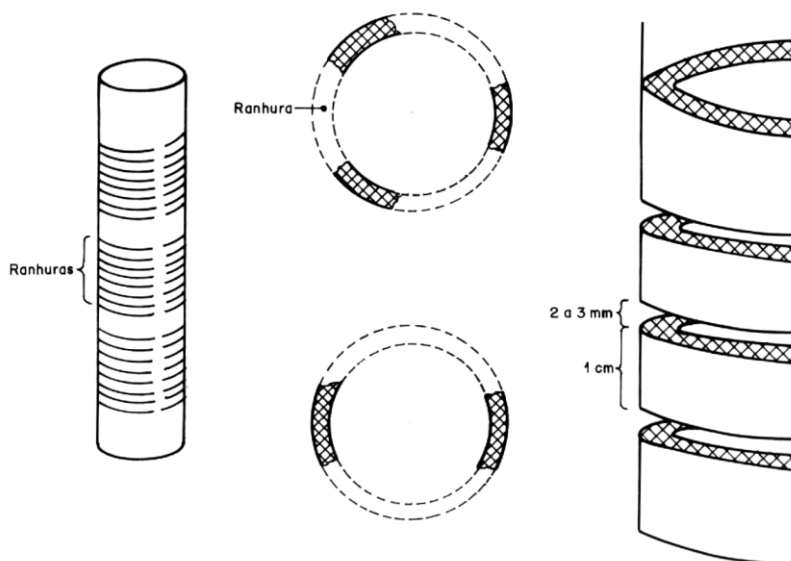


Figura 13: Filtros para tubos PVC tipo ranhurado.
Fonte: NBR 13895 (1997).

O comprimento do filtro depende dos seguintes fatores: espessura saturada, geologia, gradiente hidráulico, propriedades físico químicas e concentração do poluente NBR 13895 (ASSOCIAÇÃO..., 1997).

Segundo a NBR 13895 (1997), o pré-filtro ocupa o espaço anular entre o filtro e a parede de perfuração, sendo constituído de areia lavada de grãos ou pedriscos de quartzo. A granulometria do pré-filtro deve ser igual a um diâmetro maior do que a abertura do filtro NBR 13895 (ASSOCIAÇÃO..., 1997).

O poço deve apresentar uma caixa de proteção de alvenaria ou aço com dimensões suficientes para envolver a parte saliente do tubo de revestimento com uma tampa na parte superior para permitir o acesso ao poço NBR 13895 (ASSOCIAÇÃO..., 1997). Na Figura 14 se pode observar o esquemático da caixa de proteção. De acordo com a NBR 13895 (1997), o tubo de revestimento deve apresentar comprimento aproximadamente 0,20 m superior ao nível do terreno, para evitar a penetração de águas superficiais e elementos estranhos no poço.

A proteção sanitária corresponde ao conjunto formado pelo selo sanitário e laje de proteção e apresenta a função de evitar a contaminação do poço por águas

superficiais através do espaço anular NBR 13895 (ASSOCIAÇÃO..., 1997). Selo sanitário é constituído de argamassa de cimento da extremidade superior do espaço anular, com aproximadamente 30 cm NBR 13895 (ASSOCIAÇÃO..., 1997). A laje de proteção corresponde ao piso de cimento, construído com pequeno declive, ao redor da boca do poço NBR 13895 (ASSOCIAÇÃO..., 1997).

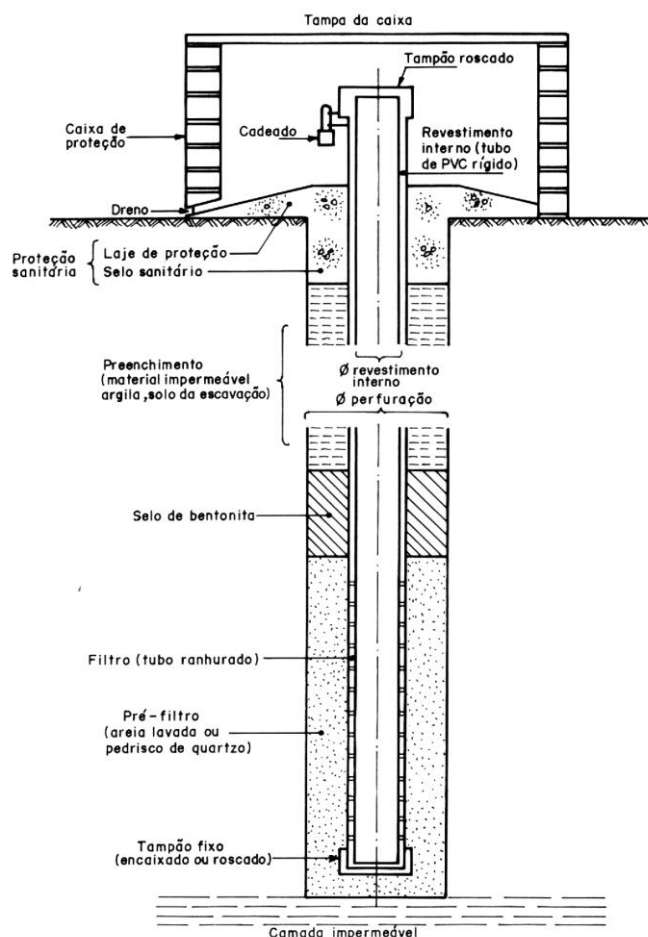


Figura 14: Perfil esquemático do poço de monitoramento.
Fonte: NBR 13895 (1997).

Além disso deve ser instalado um tampão removível e com chave na extremidade superior tubo (boca do poço), de modo a evitar a penetração de substâncias indesejáveis NBR 13895 (ASSOCIAÇÃO..., 1997). Na extremidade inferior do tubo deve ser instalado um tampão fixo, de preferência rosqueado, de modo a evitar a entrada de material sólido dentro do poço NBR 13895 (ASSOCIAÇÃO..., 1997).

O selo apresenta como função principal vedar o espaço anular em torno do tubo de revestimento, acima do limite máximo de variação do nível do aquífero, de modo a evitar a contaminação do poço por líquidos percolados pelo espaço anular, NBR 13895 (ASSOCIAÇÃO..., 1997). De acordo com NBR 13895 (1997), o material vedante (bentonita, cimento) deve obstruir uma pequena parte do espaço anular, de modo a impedir a passagem de água de um nível para outro.

O espaço anular entre a parede de perfuração e a superfície externa do tubo de revestimento deve ser preenchido por material impermeável (argila, solo da escavação), em toda a extensão não saturada, de modo a fixar o tubo de revestimento e dificultar a penetração de líquidos provenientes da superfície NBR 13895 (ASSOCIAÇÃO..., 1997).

2.6.3. Amostragem

Segundo a NBR 13895 (1997), o poço deve ser esvaziado pelo menos uma vez antes de iniciar a coleta de amostras.

De acordo com a NBR 13895 (1997), o plano de amostragem deve seguir as seguintes informações básicas: planejamento da sequência da amostragem, coleta de amostras, preservação e manuseio de amostras, procedimento de encaminhamento das amostras, procedimento analítico e controle de qualidade no campo e no laboratório. Deve ser estabelecida uma sequência de amostragem de modo a evitar a contaminação dos poços NBR 13895 (ASSOCIAÇÃO..., 1997).

Em relação à coleta de amostras o plano de amostragem deve prever a medição do nível de cada poço antes de cada operação de esvaziamento, além do tipo de instrumento e metodologia utilizados NBR 13895 (1997). Os dados do nível de água coletados em cada poço são importantes para determinar o fluxo horizontal e vertical NBR 13895 (ASSOCIAÇÃO..., 1997). Recomenda-se um equipamento eletrônico para medição do nível de água NBR 13895 (ASSOCIAÇÃO..., 1997).

O plano de amostragem deve prover uma previsão para determinar contaminantes imiscíveis, geralmente líquidos orgânicos insolúveis menos densos que a água NBR 13895 (ASSOCIAÇÃO..., 1997). Segundo a NBR 13895 (1997), o

procedimento de detecção de camadas imiscíveis deve ser composto das seguintes etapas: remoção da tampa do poço de monitoramento, amostragem do ar do poço para verificação de voláteis, determinação do nível estático da camada superior, e inserção de sensor no poço para detecção da existência de camada imiscível. A amostragem do ar do poço de monitoramento é necessária para verificação do risco de explosão ou fogo NBR 13895 (ASSOCIAÇÃO..., 1997).

Para medição precisa da profundidade da superfície do líquido do poço pode ser utilizado um manômetro ou sonda acústica (para poços muito rasos), NBR 13895 (ASSOCIAÇÃO..., 1997). Para verificar a existência de camadas imiscíveis e presença de líquido orgânico é utilizado o sensor de interface NBR 13895 (ASSOCIAÇÃO..., 1997). Para determinar a fase densa de líquido imiscível imerge o equipamento até a base do poço, onde o detector de interface é capaz de registrar a presença de líquido inorgânico NBR 13895 (ASSOCIAÇÃO..., 1997). Segundo a NBR 13895 (1997), o procedimento de coleta da fase leve imiscível depende da profundidade e espessura da camada imiscível. Caso a espessura da fase leve seja maior ou igual a 60 cm pode ser utilizado o coletor de caneca para coletar a amostra, como se pode verificar na Figura 15. Se a profundidade da superfície for menor do que a altura de sucção e a espessura da camada for menor do que 60 cm pode ser utilizada uma bomba peristáltica para coletar as amostras NBR 13895 (ASSOCIAÇÃO..., 1997).

O plano de amostragem deve descrever a operação de esvaziamento dos poços e indicar o tipo de equipamento a ser utilizado pelo operador NBR 13895 (ASSOCIAÇÃO..., 1997). Assim que o poço recupera o volume deve ser realizada a primeira amostragem para medição de pH, temperatura e condutividade NBR 13895 (ASSOCIAÇÃO..., 1997).

Para reduzir as possibilidades de contaminação da amostra, o operador deve utilizar equipamentos de teflon ou aço inoxidável e empregar amostrador específico para cada poço NBR 13895 (ASSOCIAÇÃO..., 1997). Segundo a NBR 13895 (1997), caso não tenha disponível amostrador para cada poço é necessário desmontar e limpar o equipamento antes de cada amostragem. A primeira lavagem pode ser realizada com ácido nítrico ou clorídrico 0,1 N, a segunda lavagem deve ser realizada com água de torneira e a última deve ser realizada com água destilada

NBR 13895 (ASSOCIAÇÃO..., 1997). O plano de amostragem deve especificar a ordem de coleta das amostras e os procedimentos de limpeza dos equipamentos NBR 13895 (ASSOCIAÇÃO..., 1997).

As amostras devem ser acondicionadas de acordo com a ordem de susceptibilidade à volatilização NBR 13895 (ASSOCIAÇÃO..., 1997). O plano de amostragem deve especificar as técnicas que devem ser adotadas para transferir as amostras com voláteis do equipamento de amostragem para o frasco de coleta, de modo a evitar as perdas por agitação e volatilização NBR 13895 (ASSOCIAÇÃO..., 1997). Na Tabela 1 se pode observar alguns exemplos de substâncias, separadas em grupos e dispostas por ordem de coleta.

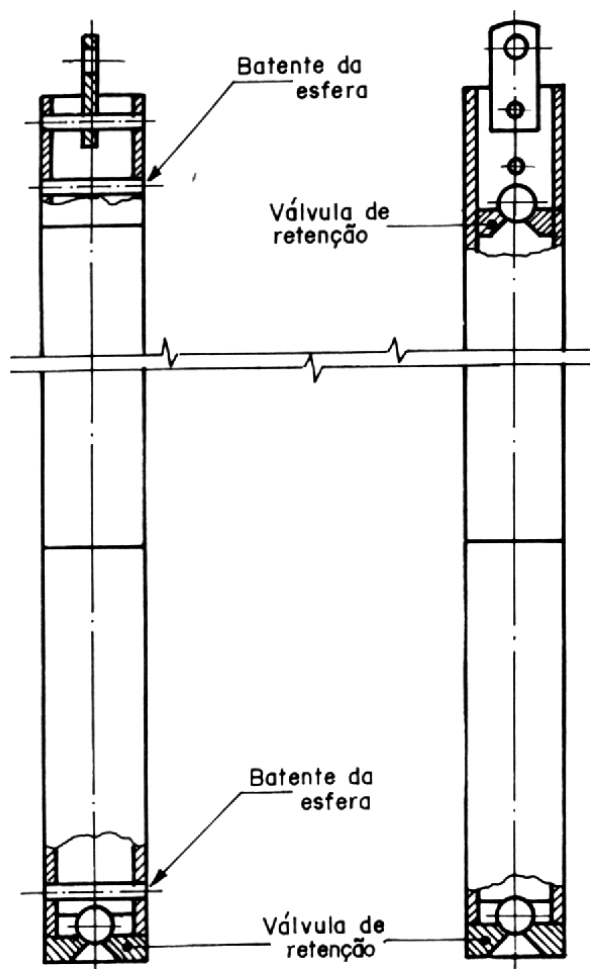


Figura 15: Coletor de caneca.
Fonte: NBR 13895 (1997).

Tabela 1: Exemplos de substâncias, separadas em grupos e dispostas por ordem de coleta.

B.1 Voláteis	B.2 Compostos semivoláteis	B.3 Pesticidas/PCB	B.4 Metais e outros	B.5 Fenóis:
Clorometano	acenafteno	aldrin	alumínio	fenol
Bromometano	2,4dinitrofenol	aroclor-1216	antimônio	2metilfenol
cloreto de vinila	bis(2cloroetil)éter	aroclor-1221	arsênio	4metilfenol
Cloroetano	2clorofenol	aroclor1232	bário	2,4-dimetilfenol
cloreto de metileno	1,3diclorobenzeno	aroclor1242	berílio	
Acetona	1,4diclorobenzeno	aroclor1248	cádmio	
bissulfeto de carbono	álcool benzílico	aroclor1254	cálcio	
1,1dicloroeteno	1,2diclorobenzeno	aroclor1260	cromo	
1,1dicloroetano	bis (2clorisopropil) éter	αBHC	cobalto	
trans1,2dicloroeteno	nnitrosodinpropilamina	βBHC	cobre	
Clorofórmio	hexacloroetano	BHC (lindano)	ferro	
1,2dicloroetano	nitrobenzeno	BHC	chumbo	
2butanona	isoforona	clordano	magnésio	
1,1,1tricloroetano	2nitrofenol	4,4DDD	manganês	
tetracloroeto de carbono	ácido benzóico	4,4DDE	mercúrio	
acetato de vinila	bis (2cloroetóxi)metano	4,4DDT	níquel	
bromodiclorometano	2,4diclorofenol	dieldrin	potássio	
1,1,2,2tetracloroetano	1,2,4triclorobenzeno	endrin	selênio	
1,2dicloropropano	naftaleno	aldeído de endrin	prata	
trans1,3dicloropropeno	4cloroanilina	cetona de endrin	sódio	
Tricloroetano	hexaclorobutadieno	endossulfan I	tálio	
dibromoclorometano	4cloro3metilfenol	endossulfan II	estanho	
1,1,2tricloroetano	2metilnaftaleno	sulfato de endossulfan	vanádio	
Benzeno	hexaclorociclopentadieno	heptacloro	zinco	
cis1,3dicloropropeno	2,4,6triclorofenol	heptacloro epóxido		
2cloroetilviniléter	2,4,5triclorofenol	metoxicloro		
Bromofórmio	20 NBR 13895/1997	toxafeno		
2hexanona	cloronaftaleno			
4metil2pentanona	2nitroanilina			
Tetracloroeteno	dimetilftalato			
Tolueno	acenaftaleno			
Clorobenzeno	4nitrofenol			
Etilbenzeno	dibenzofurano			
Estireno	2,4dinitrotolueno			

Fonte: NBR 13895 (1997).

Vários elementos instáveis devem ser testados diretamente no poço, segundo a NBR 13895 (1997), os elementos e propriedades instáveis que devem ser testados *in situ* são: pH, potencial redox, cloro, sulfeto, oxigênio dissolvido, alcalinidade e temperatura. Muitos dos constituintes químicos e parâmetros físicos que devem ser medidos ou avaliados no monitoramento da qualidade das águas subterrâneas não são quimicamente estáveis, sendo necessária a preservação dessas amostras NBR 13895 (ASSOCIAÇÃO..., 1997). O Guia Técnico de Coleta de Amostras de água (CETESB, 1988) especifica frascos de amostras que devem ser utilizados para cada elemento ou parâmetro, como se pode verificar na Tabela 2.

Tabela 2: Procedimento de amostragem e preservação para monitoramento.

Parâmetro	Frasco recomendado	Método de preservação	Tempo máximo de armazenamento	Volume mínimo necessário para análise
Indicadores de contaminação de água subterrânea				
pH	T.P.V.	Determinado no campo	Nenhum	200 mL
Condutividade	T.P.V.	Determinado no campo	Nenhum	100 mL
TOC	Vidro âmbar, tampa revestida com T	Refrigerar a 4°C, HCl até pH <2	28 dias	100 mL
TOX	Vidro âmbar, septos ou tampas revestidas com T	Refrigerar a 4°C, adicionar 1 mL de sulfito de sódio 1,1 M	7 dias	100 mL
Características de qualidade de água subterrânea				
Cloreto	T.P.V.	4°C	28 dias	200 mL
Ferro	T.P.	Acidificado no campo com HNO ₃ até pH < 2	6 meses	300 mL
Manganês				
Sódio				
Fenóis	V	4°C/H ₂ SO ₄ até pH < 2	28 dias	1000 mL
Sulfato	T.P.V.	Refrigerar, 4°C	28 dias	200 mL
Características provisórias de potabilidade da água, de acordo com a EPA				
Cromo-hexa	T.P.	Refrigerar, 4°C	24 h	250 mL
Arsênico	T.P.	Metais totais Acidificado no campo com HNO ₃ até pH < 2	6 meses	1000 mL
Bário				
Cádmio				
Cromo				
Chumbo		Metais dissolvidos 1. Filtração no campo (0,45 µm) 2. Acidificar com HNO ₃ até pH < 2	6 meses	1000 mL
Selênio				
Prata				

Continuação da Tabela 2: Procedimento de amostragem e preservação para monitoramento.

Nitrato/nitrito	T.P.V.	4°C/H ₂ SO ₄ até pH < 2	14 dias	200 mL
Endrin	T.V.	Refrigerar, 4°C	7 dias	2000 mL
Lindano				
Metoxicloro				
Toxafeno				
2,4 D				
2, 4, 5 TP Silvex	P.V.	Acidificado no campo com HNO ₃ até pH < 2	6 meses	3785 mL
Radio				
Alfa total				
Beta total	P, P.V. (esterilizado)	Refrigerar, 4°C	6 h	200 mL
Bactérias coliformes				
Outras características de interesse das águas subterrâneas				
Cianeto	P.V.	Refrigerar, 4°C, pH > 12, 0,6 g de ácido ascórbico	14 dias	500 mL
Óleo e graxa	V (somente)	Refrigerar, 4°C, H ₂ SO ₄ até pH < 2	28 dias	1000 mL
Orgânicos semivoláteis e voláteis	T.V.	Refrigerar, 4°C	14 dias	1000 mL
Voláteis	V. revestido com T	Refrigerar, 4°C	14 dias	250 mL

Fonte: NBR 13895 (1997).

O plano de amostragem deve especificar o método de preservação e o tipo de frasco de coleta NBR 13895 (ASSOCIAÇÃO..., 1997). Os métodos de preservação de amostras geralmente limitam-se a controle de pH, edição química, refrigeração e proteção a luz, de modo a retardarem a ação biológica, retardarem a hidrólise e reduzirem os efeitos de absorção ou adsorção NBR 13895 (ASSOCIAÇÃO..., 1997). As amostras no campo devem ser retiradas diretamente do equipamento de amostragem para o frasco de coleta NBR 13895 (ASSOCIAÇÃO..., 1997).

Os diários de campo e os relatórios de análise de laboratório devem registrar o espaço vazio nos frascos de amostra no momento de recepção no laboratório, e também no momento em que a mostra for transferida pela primeira vez para o frasco na boca do poço NBR 13895 (ASSOCIAÇÃO..., 1997).

2.7. ESTUDO SOBRE OS ASPECTOS ECONÔMICOS E FINANCEIROS DA IMPLANTAÇÃO E OPERAÇÃO DE ATERROS SANITÁRIOS - ABETRE

A fase útil do aterro sanitário, ou seja, a fase de recebimento de resíduos sólidos urbanos consiste na fase que gera receitas para o empreendimento. A fase útil do aterro sanitário deve gerar recursos suficientes para as obras de encerramento do aterro sanitário e monitoramento ambiental e geotécnico, tratamento de percolados, manutenção das instalações, segurança, dentre outros custos englobados na fase de pós-fechamento do aterro sanitário (CAMPOS et al., 2007). Esses custos adicionais nem sempre são considerados nos planos e orçamentos do Setor Público (CAMPOS et al., 2007). De modo a proporcionar um melhor entendimento desses custos a ABETRE contratou a Fundação Getúlio Vargas para desenvolver um estudo detalhado dos aspectos econômicos e financeiros da implantação e operação de aterros sanitários, com o objetivo final de disponibilizá-lo aos profissionais e organizações da área ambiental, e ao público em geral (CAMPOS et al., 2007).

Nesse estudo foram considerados aterros de grande, médio e pequeno porte (CAMPOS et al., 2007). Os aterros sanitários foram modelados como empreendimentos típicos, segundo premissas de engenharia elaboradas por profissionais da ABETRE, e orçados de acordo com referências práticas do setor e custos unitários de publicações especializadas (CAMPOS et al., 2007). Se pode observar os dados dos aterros sanitários fornecidos pela ABETRE na Tabela 3.

Tabela 3: Características dos aterros sanitários de grande, médio e pequeno porte.

Descrição	Unidade	Grande	Médio	Pequeno
Vida útil	anos	20	20	20
Monitoramento pós encerramento	anos	20	20	20
Capacidade de recebimento	t/dia	2000	800	100
Capacidade total	t	14.600.000	5.840.000	730.000
Capacidade volumétrica total	m ³	19.466.667	7.786.667	973.333
Altura total	m	40	30	20
Taludes inclinação	m/m	2:1	2:1	2:1
Largura da base	m	718	524	231
Largura do topo	m	478	344	111
Área de deposição	m ²	514.834	274.987	53.144

Fonte: Campos et. al (2007), adaptado.

A ABETRE forneceu os custos de aterros sanitários de três portes: grande porte, com capacidade de recebimento de 2.000 toneladas de RSU por dia; de médio porte, com capacidade de recebimento de 800 toneladas por dia e de pequeno porte, com capacidade de recebimento de 100 toneladas por dia, na Figura 16 se pode observar a capacidade de recebimento de RSU de acordo com o porte do aterro sanitário (CAMPOS et al., 2007).

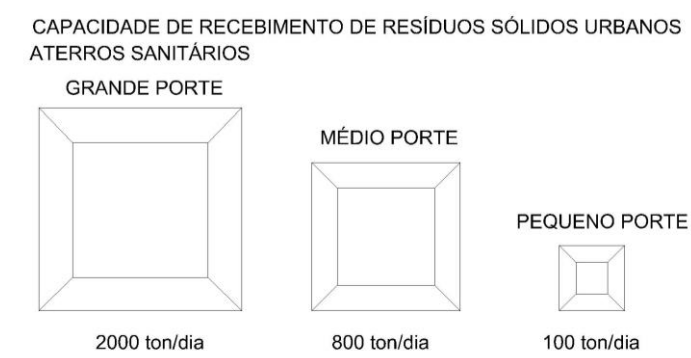


Figura 16: Capacidade de recebimento de resíduos sólidos urbanos de acordo com o porte do aterro sanitário.

Fonte: Campos et al. (2007), adaptado.

O estudo financeiro se baseou nos conceitos fundamentais de Engenharia Econômica e Análise de Projetos de Investimento para calcular a receita média de equilíbrio (CAMPOS et al., 2007). No estudo foram feitos pressupostos necessários em relação aos aspectos tributários envolvidos, Programa de Integração Social (PIS), Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social (COFINS), Imposto Sobre Serviço (ISS), Imposto de Renda Pessoa Jurídica (IRPJ) e Contribuição Social Sobre Lucro Líquido (CSLL) (CAMPOS et al., 2007).

Em relação aos tributos sobre faturamento considerou-se as seguintes alíquotas: ISS representou 5% da receita operacional; a COFINS foi calculada com 7,6% da receita; o PIS representou 1,65% do faturamento e o Imposto de Renda (IR) somado a CSLL totalizaram 34% do lucro tributável. Em relação às despesas de depreciação os valores informados pela ABETRE foram para um horizonte temporal de um projeto de aterro sanitário de 42 anos (CAMPOS et al., 2007).

2.8. ESTUDO DE CASO – ATERRO SANITÁRIO DE CACHIMBA

Em 1989 foi iniciada a operação do Aterro Sanitário de Cachimba, localizado em Curitiba. A princípio o aterro sanitário de Cachimba era um vazadouro a céu aberto (lixão). O aterro sanitário foi criado para depositar os resíduos sólidos urbanos de Curitiba e outras 20 cidades da região metropolitana (ALMEIDA, 2010). A área de deposição de resíduos sólidos do aterro sanitário de Cachimba consiste em 237.000 m² (SCHERER et al., 2012). O sistema de tratamentos de percolados consiste em tratamento físico-químico, lagoas de estabilização e *wetlands* (SCHERER et al., 2012). O aterro sanitário recebia em média 2.400 toneladas de resíduos sólidos urbanos por dia em 2010, ano em que encerrou as atividades de deposição de RSU. Durante a fase útil o aterro sanitário de Cachimba recebeu 12.133.794,80 toneladas de RSU (SCHERER et al., 2012).

Em 2009 o presidente do Instituto Ambiental (IAP), Vitor Hugo Burgo, notificou a Prefeitura Municipal de Curitiba devido ao lançamento de chorume coletado do aterro sanitário de Cachimba diretamente no Rio Iguaçu, em níveis que ultrapassam em 60 vezes os padrões estabelecidos em legislação ambiental (ANEP, 2009). Os laudos emitidos pela diretoria de Estudos de Padrões Ambientais do IAP (Depam) apontaram o comprometimento da qualidade do rio, principalmente nos níveis de toxicidade, medidos pelos efeitos daphnias (pequenos crustáceos de água doce, que servem de alimento para peixes) (ANEP, 2009). Em rios, a legislação permite fator 1 de toxicidade para esse organismo vivo, sendo que o resultado obtido pelo IAP foi de 64 (ANEP, 2009). Outro parâmetro avaliado pelo IAP foi a demanda bioquímica de oxigênio (DBO), utilizada para mensurar a quantidade de matéria orgânica presente em um efluente ou corpo hídrico (ANEP, 2009). O valor de DBO permitido pela legislação do Conselho Nacional do Meio Ambiente (Conama) corresponde ao máximo de 5 miligramas por litro (ANEP, 2009). Em um dos pontos monitorados pela Depam os níveis de DBO encontrados foram iguais a 56 mg/L, dez vezes superior aos níveis permitidos (ANEP, 2009). Além disso os níveis de DQO encontrados na amostragem apresentaram valores 17 vezes superiores aos aceitáveis pela legislação, a DQO além de avaliar a quantidade de oxigênio também verifica a presença de outros elementos químicos (ANEP, 2009). Com base no parecer técnico do IAP, Burgo determinou a coleta de amostras de todos os poços

de captação da região do Cachimba, de modo a ser realizado um monitoramento do nível de contaminação da região (coletada amostras dos poços das casas da região) (ANEP, 2009).

Em 2010 a Prefeitura Municipal de Curitiba foi multada pelo Ibama em 100 mil reais devido ao descarte de lixo hospitalar no aterro sanitário de Cachimba (ALMEIDA, 2010). A fiscalização foi realizada a pedido do Ministério Público Estadual a menos de um mês para o encerramento das operações do aterro sanitário (ALMEIDA, 2010). A Secretaria Municipal do Meio Ambiente (SMMA) alegou que o material encontrado no aterro sanitário não era resíduo hospitalar usado ou contaminado, mas sim material fora da validade (ALMEIDA, 2010). A Prefeitura recorreu da multa e autuou os hospitais Vita e Cruz vermelha pelo descarte irregular, pois o município de Curitiba exige de hospitais um Plano de Gerenciamento de Lixo, no qual está estabelecido que material hospitalar fora da validade deve ser reciclado e não descartado no aterro sanitário (ALMEIDA, 2010).

Devido a ação judicial proposta em 2001 em setembro de 2015 a justiça decidiu que a Prefeitura de Curitiba deve recuperar o Rio Iguaçu e o lençol freático por danos supostamente causados pelo aterro sanitário de Cachimba, além da multa de 25 milhões de reais como punição (MAROS et al., 2015). A Prefeitura deve elaborar um plano de recuperação das águas, o qual deve ser apresentado e aprovado pelo Instituto de Águas do Paraná (IAP) (MARTINEZ, 2015). O caso foi julgado em primeira instância e cabe recurso no Tribunal Regional Federal (MAROS et al., 2015). Enquanto isso a contaminação do lençol freático se agrava ainda mais, pois mesmo na fase de pós-fechamento continua ocorrendo a formação de chorume pela degradação dos RSU e também pela infiltração de águas pluviais na cobertura do aterro sanitário. A contaminação exige que seja feita a recuperação das águas subterrâneas e de um trecho do Rio Iguaçu contaminadas pelo chorume (MAROS et al., 2015). Além disso a Prefeitura teria que pagar 20 milhões de reais ao Fundo Estadual do Meio Ambiente e mais 5 milhões de reais a título de honorários de sucumbência (MAROS et al., 2015). A Prefeitura contestou a decisão, sob a prerrogativa de que a sentença apresenta problemas formais e devido ao fato do aterro sanitário de Cachimba não estar mais em funcionamento (MAROS et al., 2015).

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O método estabelecido para a pesquisa consiste no entendimento detalhado dos três sistemas de detecção de vazamentos de percolados: sistema de 4 poços de monitoramento (coleta e análise de amostras do lençol freático a cada 3 meses), sistema de coleta de percolados secundário e sistema de coleta de percolados secundário mais 2 poços de monitoramento (coleta e análise de amostras do lençol freático a cada 12 meses). Além da elaboração de orçamentos comparativos de custos entre os sistemas para aterros sanitários de grande, médio e pequeno porte de acordo com a Tabela 3.

A comparação de custos estabelecida foi baseada em 4 casos de estudo. O caso de estudo 1 consiste na comparação entre sistema secundário de coleta de percolados com sistema de revestimento de argila compactada e sistema de 4 poços de monitoramento (coleta e análise de amostras a cada 3 meses), como se pode observar na Figura 17.

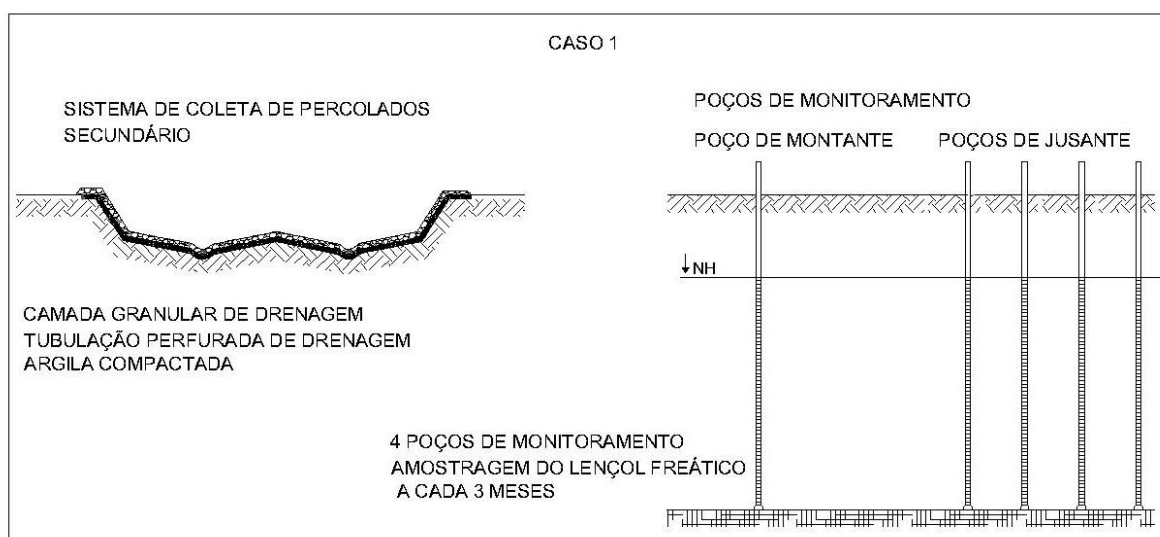


Figura 17: Esquemático do Caso de Estudo 1.
Fonte: Autoria própria.

O Caso de Estudo 2 consiste na comparação entre sistema secundário de coleta de percolados com sistema de revestimento de geomembrana e sistema de 4 poços de monitoramento (coleta e análise de amostras a cada 3 meses), como se pode observar na Figura 18.

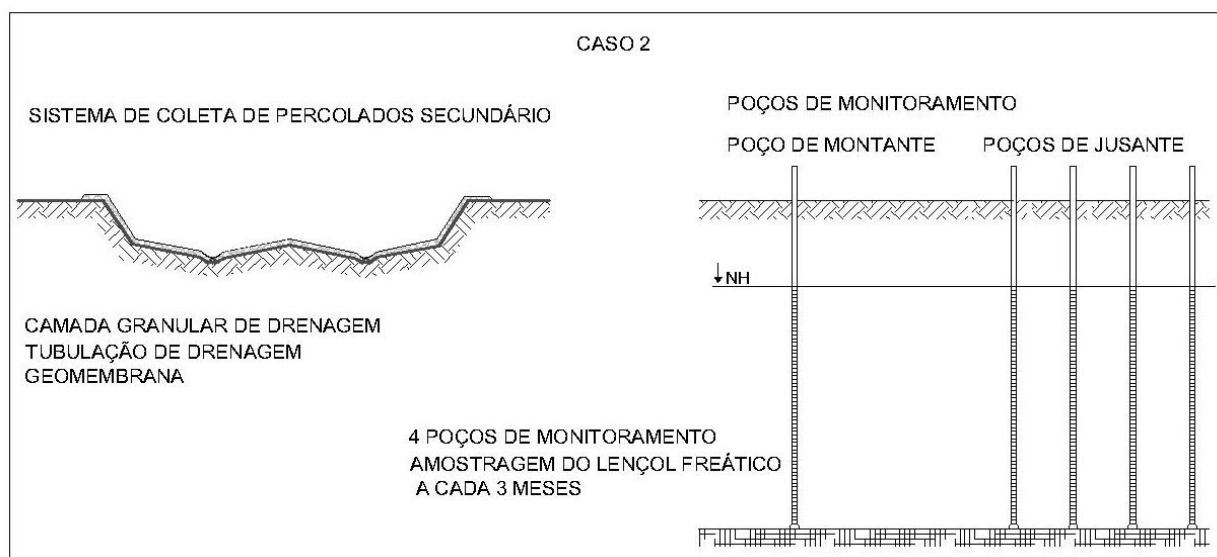


Figura 18: Esquemático do Caso de Estudo 2.
Fonte: Autoria própria.

O caso de estudo 3 consiste na comparação entre sistema secundário de coleta de percolados com sistema de revestimento composto (geomembrana/CCL) e sistema de 4 poços de monitoramento (coleta e análise de amostras a cada 3 meses), como se pode observar na Figura 19.

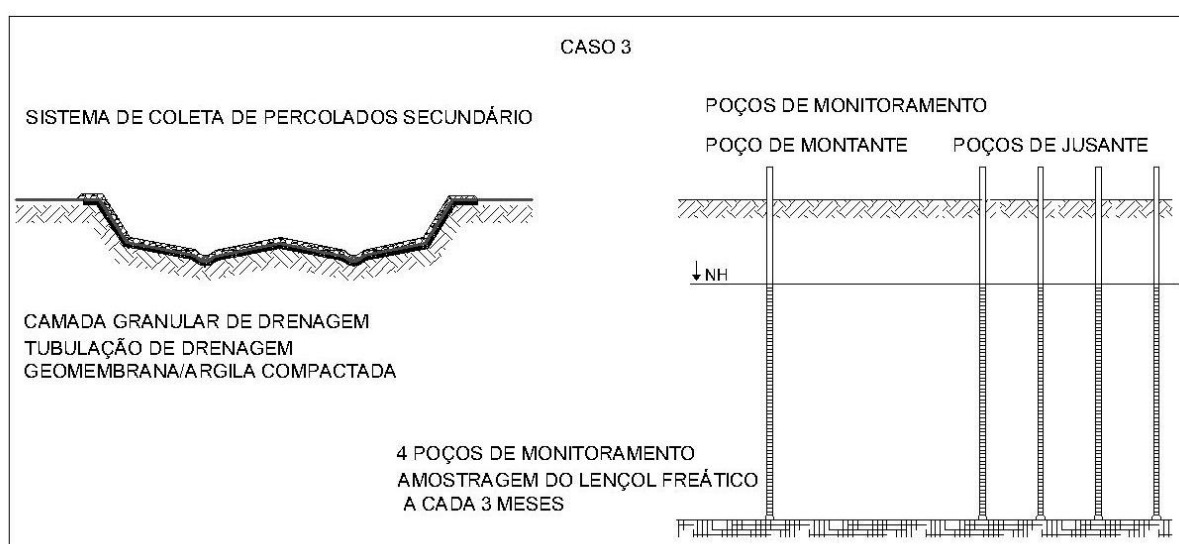


Figura 19: Esquemático do Caso de Estudo 3.
Fonte: Autoria própria.

De modo a evitar a substituição total de sistema de coleta de percolados secundário por poços de monitoramento foi elaborado o caso de estudo 4, que consiste na comparação entre sistema secundário de coleta de percolados com sistema de revestimento de geomembrana mais 2 poços de monitoramento (coleta e análise de amostras a cada 12 meses) e sistema de 4 poços de monitoramento (coleta e análise de amostras a cada 3 meses), como se pode observar na Figura 20.

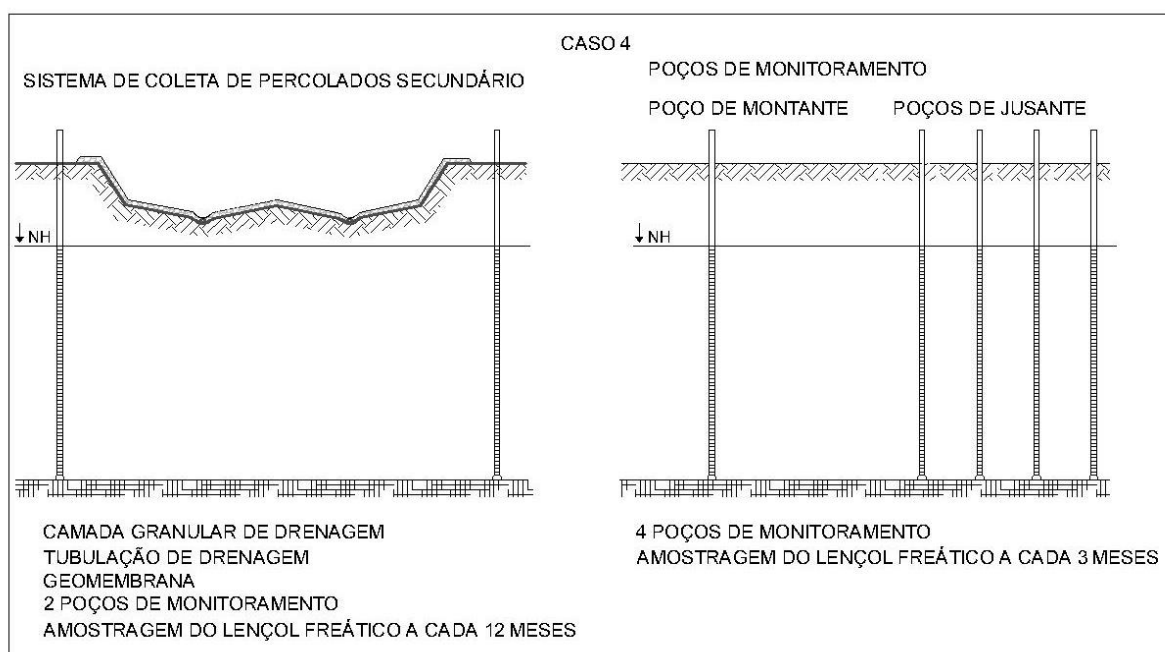


Figura 20: Esquemático do caso de estudo 4.
Fonte: Autoria própria.

A composição de custos do sistema de coleta de percolados secundário consiste na soma dos custos de instalação do sistema de revestimento, camada granular de drenagem e tubulação de coleta e remoção de percolados (vazamento). A composição de custos do sistema de detecção de vazamentos através de poços de monitoramento consiste na soma dos custos de instalação dos poços de monitoramento e custos de coleta e análise de amostras realizados durante a vida útil do aterro e por no mínimo 20 anos após o fechamento do aterro sanitário.

Para o dimensionamento do sistema de coleta de percolados secundário foram considerados sistema de impermeabilização secundária com geomembrana

lisa PEAD de 1mm de espessura, camada de argila compactada com 0,30 m de altura, camada de drenagem com brita #3 (38 mm), sistema de coleta de percolados com drenos de PVC - 100 mm de diâmetro. Para o estudo foram utilizadas as características de três aterros disponibilizados no estudo financeiro realizado por Campos et al. (2007). No estudo realizado por Campos et al. (2007), foi considerado aterro sanitário de grande porte com área igual a 514.834 m², aterro sanitário de médio porte com área igual a 274.987 m² e aterro sanitário de pequeno porte com área igual a 53.114 m². Para o dimensionamento do sistema de revestimento foi utilizada a área da base do aterro sanitário mais 10%, devido a sobreposição da geomembrana no processo de colagem. Para o dimensionamento do camada de argila compactada foi considerada a área da base do aterro sanitário multiplicada pela altura da camada igual a 0,30 m (US EPA, 2000) .

Para cálculo da camada de drenagem foi considerada área da base do aterro sanitário multiplicada por uma altura da camada granular de 0,15 m. Foi adotada a altura da camada granular secundária igual a metade da altura da camada granular principal recomendada pela NBR 8419 (1992), pois o sistema de coleta de percolados secundário apresenta a função de coletar e transportar apenas o percolado que atravessa o sistema de revestimento principal. Além do fato de camada de drenagem com menor espessura proporcionar a detecção mais rápida do vazamento de percolados.

Em relação ao dimensionamento do sistema de coleta de percolados foi considerada uma tubulação perfurada de 100 mm a cada 40 m na base do aterro sanitário, conforme recomendado no estudo desenvolvido por Rowe et al. (2013d). Não foi considerado no estudo reservatório e sistema de bombeamento, pois os aterros utilizados para elaboração do orçamento encontram-se no plano do terreno. Para o dimensionamento da quantidade de habitantes foi utilizado a produção média de resíduos sólidos urbanos igual a 0,963 kg/hab/dia (ABRELPE, 2014), densidade média dos RSU igual 230 kg/m³ (ORNETAS, 2011) e vida útil do aterro sanitário igual a 20 anos (CAMPOS et al., 2007).

Para a composição de custos do sistema de revestimento de geomembrana, camada de argila compactada, camada de drenagem e tubulação foi utilizada a SINAPI (2010). Para obtenção do preço dos insumos foi utilizada a SINAPI (2015),

referente ao mês de outubro de 2015, para a localidade de Brasília. Para a composição de custos de instalação de poço de monitoramento foi utilizado o orçamento disponibilizado pela TERRACAP (2013), referente a 2013, para a localidade de Brasília. Para a composição de custos de coleta e análise de amostras foi utilizado o estudo realizado por Campos et al. (2007), referente a 2007. Os custos unitários foram atualizados de acordo com a inflação no período cujo índice oficial utilizado (índice de preços ao consumidor) se pode observar na Tabela 5 (GOUVEIA, 2010).

Tabela 4: Índice de preços ao consumidor

		Inflação								
Ano		2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
%		4,08	6,57	5,06	5,11	6,6	5,43	6,38	6,03	8,96

Fonte: IBGE, 2015.

É possível observar a composição dos custos unitários atualizados na Tabela 6.

Tabela 5: Composição de custos unitários para sistema de coleta de percolados secundária e poços de monitoramento, com valores referentes a outubro de 2015.

Código	Descrição	u.n.	Coef.	R\$/u.n.	R\$	
74005/ 2	Compactação mecânica c/ controle do GC>=95%					
I 1147	Caminhão pipa 6.000l c/ barra espargidora (incl manutencao/operacão)	H	0,01	36	0,36	SINAPI (2010) e SINAPI (2015)
I 4091	Motoniveladora 140 a 155hp (incl manut/operacao)	H	0,005	202,5	1,01	
I 6059	Rolo compactador vibratório liso autopropelido 83hp, força impact 11t, tipo muller vap-ssl ou equiv (incl manutencao/operacão)	H	0,005	62,55	0,31	
I 6060	Rolo compactador vibratório pé de carneiro autopropelido 83hp, força impacto 19t, tipo muller vap-ssp ou equiv (incl manutencao/operacao)	H	0,01	65,84	0,66	
I 6111	Servente ou operario nao qualificado	H	0,03	8,77	0,26	
I 7642	Trator de pneus ate 75hp (incl manut/operacão)	H	0,01	37,8	0,38	
I 10798	Grade de disco 20 x 24"	H	0,01	16,2	0,16	
	Total	m ³	-	-	3,15	

Fonte: SINAPI (2010) e TERRACAP (2013), adaptado e atualizado.

Continuação da Tabela 6: Composição de custos unitários para sistema de coleta de percolados secundária e poços de monitoramento, com valores referentes a outubro de 2015.

Código	Descrição	u.n.	Coef.	R\$/u.n.	R\$
74034/ 1	Espalhamento de material de 1ª categoria com trator de esteira				
C 74036/001	Trator de esteiras, 153hp - chi - inclusive operador	H	0,0034	96,14	0,33
C 74036/002	Trator esteiras diesel 140cv - chp - inclusive operador	H	0,0079	233,87	1,85
I 6111	Servente ou operario nao qualificado	H	0,0113	8,77	0,1
	Total	m³	-	-	2,27
Código	Descrição	u.n.	Coef.	R\$/u.n.	R\$
	Argila ou barro para aterro/reaterro com transporte até 10 km				
I 6081	Argila ou barro para aterro/reaterro com transporte até 10 km	m³	1	27,49	27,49
Código	Descrição	u.n.	Coef.	R\$/u.n.	R\$
73964/6	Reaterro manual de valas				
I 6111	Servente ou operario não qualificado	H	3	8,77	8,91
Código	Descrição	u.n.	Coef.	R\$/u.n.	R\$
74033/1	Geomembrana lisa PEAD espessura 1mm				
I 4750	Pedreiro	H	0,2	13,51	2,7
I 6111	Servente ou operario não qualificado	H	0,2	8,77	1,75
I 25863	Manta termoplastica, pead, geomembrana lisa, e = 1,00 mm (NBR 15352)	m²	1,05	10,1	10,61
	Total	m²	-	-	15,06
Código	Descrição	u.n.	Coef.	R\$/u.n.	R\$
74017/ 1	Drenos de chorume em tubos drenantes, PVC, diam=100 mm, envoltos				
I 2696	Encanador ou bombeiro hidraulico	H	0,0175	13,51	0,24
I 4021	Geotextil nao tecido agulhado de filamentos continuos 100% polies er rt 14 p/ drenagem tipo bidim ou equiv	m²	2,15	7,42	15,95
I 4722	Pedra britada n. 3 ou 38 mm	m³	0,075	66,5	4,99
I 4723	Pedra britada n. 4 ou 50 mm	m³	0,075	72,55	5,44
I 6111	Servente ou operario nao qualificado	h	0,7993	8,77	7,01
I 9833	Tubo pvc drenagem corrugado flexivel perfurado dn 100 ou 110	m	1	9,77	9,77
	Total	m	-	-	43,4
Código	Descrição	u.n.	Coef.	R\$/u.n.	R\$
73902/ 1	Camada drenante com brita num # 3				
I 4718	Pedra britada n. 3 ou 38 mm	m³	1,1	66,5	73,15
I 6111	Servente ou operario nao qualificado	H	2,5	8,77	21,93
	Total	m	-	-	95,08

SINAPI (2010) e SINAPI (2015)

Fonte: SINAPI (2010) e TERRACAP (2013), adaptado e atualizado.

Continuação da Tabela 6: Composição de custos unitários para sistema de coleta de percolados secundária e poços de monitoramento, com valores referentes a outubro de 2015.

Descrição	u.n.	Coef.	R\$/u.n.	R\$
Coleta e análise de amostras do lençol freático, para aterro sanitário de grande porte				
Geólogo ou engenheiro civil	H	10	66,21	662,1
Instalação dos poços e piezômetros (altura = 15 m, posição do lençol freático entre 3 e 10 m)	u n	1	5.776,51	5.776,51
Análises das amostras de água	u n	2	577,65	1.155,30
Edição e repografia	u n	1,25	231,06	288,83
Total	m	-	-	7.882,74
Coleta e análise de amostras do lençol freático, para aterro sanitário de grande porte				
Monitoramento das águas subterrâneas, a cada 3 meses durante 20 anos	u n	4	8.127,63	32.510,52
Monitoramento das águas subterrâneas, a cada 3 meses durante 20 anos - Pós fechamento	u n	4	8.127,63	32.510,52
Total	m	-	-	65.021,04
Coleta e análise de amostras do lençol freático, para aterro sanitário de médio e pequeno porte				
Monitoramento das águas subterrâneas, a cada 3 meses durante 20 anos	u n	4	6.502,10	26.008,40
Monitoramento das águas subterrâneas, a cada 3 meses durante 20 anos - Pós fechamento	u n	4	6.502,10	26.008,40
Total	m	-	-	52.016,80

TERRACAP (2013)

Campos et al. (2007)

Fonte: SINAPI (2010) e TERRACAP (2013), adaptado e atualizado.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. COMPARAÇÃO DE CUSTOS - CASO 1

É possível observar na Tabela 7 o orçamento da instalação e operação de 4 poços de monitoramento com coleta e análise de amostras a cada 3 meses, para a fase útil e fase de pós-fechamento dos três portes de aterros sanitários conforme descritos na Tabela 3 .

Tabela 6: Orçamento de poços de monitoramento, com valores referentes a outubro de 2015.

Orçamento dos poços de monitoramento

Aterro sanitário de grande porte					
Descrição	u.n.	qde	R\$/u.n.	R\$	Fonte
Execução de poço de monitoramento	u.n.	4	7.882,74	31.530,96	TERRACAP (2013)
Monitoramento das águas subterrâneas, a cada 3 meses durante 20 anos	u.n.	80	32.510,52	2.600.841,60	Campos et al. (2007)
Monitoramento das águas subterrâneas, a cada 3 meses durante 20 anos - Pós fechamento	u.n.	80	32.510,52	2.600.841,60	
Total	-	-	-	5.233.214,16	-
Aterro sanitário de médio e pequeno porte					
Descrição	u.n.	qde	R\$/u.n.	R\$	Fonte
Execução de poço de monitoramento	u.n.	4	7.882,74	31.530,96	TERRACAP (2013)
Monitoramento das águas subterrâneas, a cada 3 meses durante 20 anos	u.n.	80	26.008,40	2.080.672,00	Campos et al. (2007)
Monitoramento das águas subterrâneas, a cada 3 meses durante 20 anos - Pós fechamento	u.n.	80	26.008,40	2.080.672,00	
Total				4.192.874,96	-

Fonte: Campos et al, 2013 e TERRACAP, 2013, adaptado e atualizado.

Se pode observar na Tabela 8 orçamento da instalação do sistema de coleta de percolados secundário com sistema de revestimento simples de argila compactada.

Tabela 7: Orçamento do sistema de coleta de percolados secundário com revestimento simples de argila compactada, com valores referentes a outubro de 2015.

Orçamento do sistema de coleta de percolados secundário com revestimento simples de argila compactada

Aterro sanitário de grande porte, A = 514.834 m ²				
Descrição	u.n.	Qde	R\$/u.n.	R\$
Argila com transporte (até 10 km)	m ³	140409,273	27,49	3.859.850,91
Espalhamento da argila	m ³	140409,273	2,27	319.227,50
Compactação mecânica da argila	m ³	140409,273	3,15	441.832,88
Reaterro manual de valas	m ³	3489,05202	8,91	31.087,45
Drenos de chorume em tubos drenantes de concreto, diam = 100 mm	m	11700,8	43,40	507.790,56
Camada drenante com brita # 3	m ³	70204,6	95,08	6.674.705,82
Total	-	-	-	11.834.495,12
Aterro sanitário de médio porte, A = 274.987 m ²				
Descrição	u.n.	Qde	R\$/u.n.	R\$
Argila com transporte (até 10 km)	m ³	74996,454	27,49	2.061.652,52
Espalhamento da argila	m ³	74996,454	2,27	170.508,19
Compactação mecânica da argila	m ³	74996,454	3,15	235.995,09
Reaterro manual de valas	m ³	2549,93972	8,91	22.719,96
Drenos de chorume em tubos drenantes de concreto, diam = 100 mm	m	6249,7	43,40	271.224,90
Camada drenante com brita # 3	m ³	37498,2	95,08	3.565.143,93
Total	-	-	-	6.327.244,60
Aterro sanitário de pequeno porte, A = 181.500 m ²				
Descrição	Unidade	Qde	R\$/u.n.	R\$
Argila com transporte (até 10 km)	m ³	49500	27,49	1.360.755,00
Espalhamento da argila	m ³	49500	2,27	112.540,73
Compactação mecânica da argila	m ³	49500	3,15	155.764,13
Reaterro manual de valas	m ³	2071,62979	8,91	18.458,22
Drenos de chorume em tubos drenantes de concreto, diam = 100 mm	m	4125	43,40	179.016,90
Camada drenante com brita # 3	m ³	24750,0	95,08	2.353.106,25
Total	-	-	-	4.179.641,22
Aterro sanitário de pequeno porte, A = 53.114 m ²				
Descrição	u.n.	Qde	R\$/u.n.	R\$
Argila com transporte (até 10 km)	m ³	12180,546	27,49	334.843,21
Espalhamento da argila	m ³	12180,546	2,27	27.693,08
Compactação mecânica da argila	m ³	12180,546	3,15	38.329,13
Reaterro manual de valas	m ³	1027,64456	8,91	9.156,31
Drenos de chorume em tubos drenantes de concreto, diam = 100 mm	m	1015,0	43,40	44.050,98
Camada drenante com brita # 3	m ³	6090,3	95,08	579.032,71
Total	-	-	-	1.033.105,42

Fonte: Adaptado de SINAPI (2010) e SINAPI (2015).

Através dos resultados dos orçamentos dos dois sistemas observados nas Tabelas 7 e 8, é possível concluir que para aterro sanitário com área da base igual a

181.500 m² os custos de instalação de sistema secundário de coleta de percolados é equivalente aos custos de instalação e operação de poços de monitoramento.

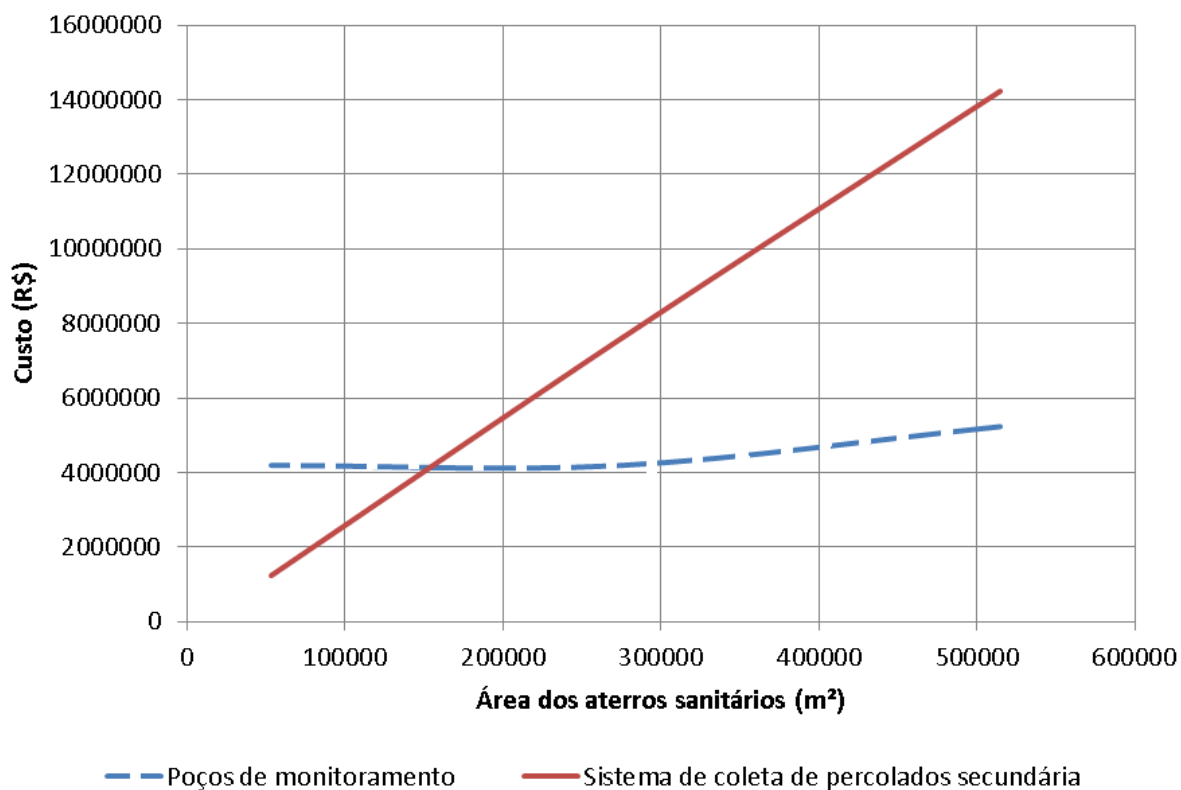


Gráfico 1: Relação entre custo e área dos aterros sanitários, para Caso 1.
 Fonte: Campos et al., 2007, SINAPI (2010), TERRACAP (2013) e SINAPI (2015), adaptado e atualizado.

Se pode observar no gráfico 1, a variação do custo de instalação e operação de sistema de poços de monitoramento e sistema de coleta de percolados. Nota-se que as duas curvas se interceptam para o custo de R\$ 4.192.874,96 e área igual a 181.500 m². Dessa forma é possível concluir que a substituição do sistema de detecção de vazamentos através de poços de monitoramento é viável economicamente em relação ao sistema secundário de coleta de percolados com revestimento de argila compactada para aterro sanitário com área da base menor ou igual a 181.500 m².

4.2. COMPARAÇÃO DE CUSTOS – CASO 2

Se pode observar na Tabela 9 orçamento da instalação do sistema de coleta de percolados secundário com sistema de revestimento simples de geomembrana.

Tabela 8: Orçamento de sistema secundário de coleta de percolados com revestimento simples de geomembrana, com valores referentes a outubro de 2015.

Orçamento do sistema de coleta de percolados secundário, com revestimento simples de geomembrana a				
Aterro sanitário de grande porte, A = 514.834 m ²				
Descrição	u.n.	Qde	R\$/u.n.	R\$
Geomembrana lisa PEAD 1 mm	m ²	468030,9	15,06	7.049.013,54
Drenos de chorume em tubos drenantes de concreto, diam = 100 mm	m	11700,8	43,40	507.790,56
Camada drenante com brita # 3	m ³	70204,6	95,08	6.674.705,82
Total	-	-	-	14.231.509,91
Aterro sanitário de médio porte, A = 274.987 m ²				
Descrição	u.n.	Qde	R\$/u.n.	R\$
Geomembrana lisa PEAD 1 mm	m ²	249988,2	15,06	3.765.071,98
Drenos de chorume em tubos drenantes de concreto, diam = 100 mm	m	6249,7	43,40	271.224,90
Camada drenante com brita # 3	m ³	37498,2	95,08	3.565.143,93
Total	-	-	-	7.601.440,81
Aterro sanitário de pequeno porte, A = 170.500 m ²				
Descrição	Unidade	Qde	R\$/u.n.	R\$
Geomembrana lisa PEAD 1 mm	m ²	155000,0	15,99	2.477.985,00
Drenos de chorume em tubos drenantes de concreto, diam = 100 mm	m	3875,0	39,70	153.851,92
Camada drenante com brita # 3	m ³	23250,0	66,93	1.556.006,25
Total	-	-	-	4.187.843,17
Aterro sanitário de pequeno porte, A = 53.114 m ²				
Descrição	u.n.	Qde	R\$/u.n.	R\$
Geomembrana lisa PEAD 1 mm	m ²	40601,8	15,06	611.504,01
Drenos de chorume em tubos drenantes de concreto, diam = 100 mm	m	1015,0	43,40	44.050,98
Camada drenante com brita # 3	m ³	6090,3	95,08	579.032,71
Total	-	-	-	1.234.587,70

Fonte: Adaptado de SINAPI (2010) e SINAPI (2015).

Por meio dos resultados dos orçamentos dos dois sistemas observados nas Tabelas 7 e 9, é possível concluir que para aterro sanitário com área da base igual a 170.500 m² os custos de instalação de sistema secundário de coleta de percolados é equivalente aos custos de instalação e operação de poços de monitoramento.

Se pode observar no gráfico 2, a variação do custo de instalação e operação de sistema de poços de monitoramento e sistema de coleta de percolados. Nota-se que as duas curvas se interceptam para o custo de R\$ 4.192.874,96 e área igual a 170.500 m². Dessa forma é possível concluir que a substituição do sistema de detecção de vazamentos através de poços de monitoramento é viável economicamente em relação ao sistema secundário de coleta de percolados com revestimento de geomembrana para aterro sanitário com área da base menor ou igual a 170.500 m².

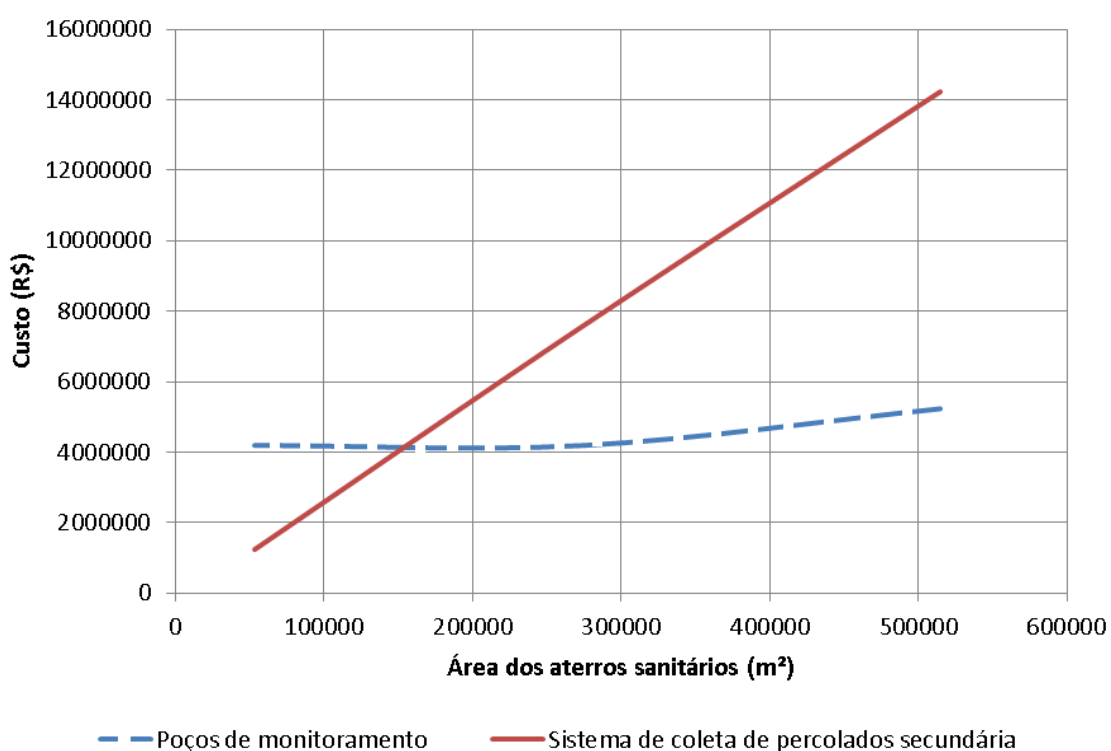


Gráfico 2: Relação entre custo e área dos aterros sanitários, para Caso 2.

Fonte: Campos et al. (2007), SINAPI (2010), TERRACAP (2013) e SINAPI (2015), adaptado e atualizado.

4.3. COMPARAÇÃO DE CUSTOS - CASO 3

Se pode observar na Tabela 10 o orçamento de instalação do sistema de coleta de percolados secundário com sistema de revestimento composto de geomembrana/argila compactada.

Tabela 9: Orçamento de sistema de coleta de percolados secundário com revestimento composto (argila compactada e geomembrana), com valores referentes a outubro de 2015.

Orçamento do sistema de coleta de percolados secundário com revestimento composto				
Aterro sanitário de grande porte, A = 514.834 m ²				
Descrição	u.n.	Qde	R\$/u.n.	R\$
Argila com transporte (até 10 km)	m ³	140409,3	27,49	3.859.850,91
Espalhamento da argila	m ³	140409,3	2,27	319.227,50
Compactação mecânica da argila	m ³	140409,3	3,15	441.832,88
Aterro sanitário de grande porte, A = 514.834 m ²				
Reaterro manual de valas	m ³	3489,052	8,91	31.087,45
Geomembrana lisa PEAD 1 mm	m ²	468030,9	15,06	7.049.013,54
Drenos de chorume em tubos drenantes de concreto, diam = 100 mm	m	11700,8	43,4	507.790,56
Camada drenante com brita # 3	m ³	70204,6	95,08	6.674.705,82
Total	-	-	-	18.883.508,66
Aterro sanitário de médio porte, A = 274.987 m ²				
Descrição	u.n.	Qde	R\$/u.n.	R\$
Argila com transporte (até 10 km)	m ³	74996,45	27,49	2.061.652,52
Espalhamento da argila	m ³	74996,45	2,27	170.508,19
Compactação mecânica da argila	m ³	74996,45	3,15	235.995,09
Reaterro manual de valas	m ³	2549,94	8,91	22.719,96
Geomembrana lisa PEAD 1 mm	m ²	249988,2	15,06	3.765.071,98
Drenos de chorume em tubos drenantes de concreto, diam = 100 mm	m	6249,7	43,4	271.224,90
Camada drenante com brita # 3	m ³	37498,2	95,08	3.565.143,93
Total	-	-	-	10.092.316,57
Aterro sanitário de pequeno porte, A = 124.080 m ²				
Descrição	Unidade	Qde	R\$/u.n.	R\$
Argila com transporte (até 10 km)	m ³	33840	27,49	930.261,60
Espalhamento da argila	m ³	33840	2,27	76.936,93
Compactação mecânica da argila	m ³	33840	3,15	106.486,02
Reaterro manual de valas	m ³	1712,871	8,91	15.261,68
Geomembrana lisa PEAD 1 mm	m ²	112800	15,99	1.803.333,60
Drenos de chorume em tubos drenantes de concreto, diam = 100 mm	m	2820	39,7	111.964,49
Camada drenante com brita 2	m ³	16920	66,93	1.132.371,00
Total	-	-	-	4.176.615,33

Fonte: Adaptado de SINAPI (2010) e SINAPI (2015).

Continuação da Tabela 10: Orçamento de sistema de coleta de percolados secundário com revestimento composto (argila compactada e geomembrana), com valores referentes a outubro de 2015.

Aterro sanitário de pequeno porte, A = 53.114 m ²				
Descrição	u.n.	Qde	R\$/u.n.	R\$
Argila com transporte (até 10 km)	m ³	12180,55	27,49	334.843,21
Espalhamento da argila	m ³	12180,55	2,27	27.693,08
Compactação mecânica da argila	m ³	12180,55	3,15	38.329,13
Reaterro manual de valas	m ³	1027,645	8,91	9.156,31
Geomembrana lisa PEAD 1 mm	m ²	40601,8	15,06	611.504,01
Drenos de chorume em tubos drenantes de concreto, diam = 100 mm	m	1015	43,4	44.050,98
Camada drenante com brita # 3	m ³	6090,3	95,08	579.032,71
Total	-	-	-	1.644.609,43

Fonte: Adaptado de SINAPI (2010) e SINAPI (2015).

Por meio dos resultados dos orçamentos dos dois sistemas, observados nas Tabelas 7 e 10, é possível concluir que para aterro sanitário com área da base igual a 124.080 m² os custos de instalação de sistema secundário de coleta de percolados é equivalente aos custos de instalação e operação de poços de monitoramento.

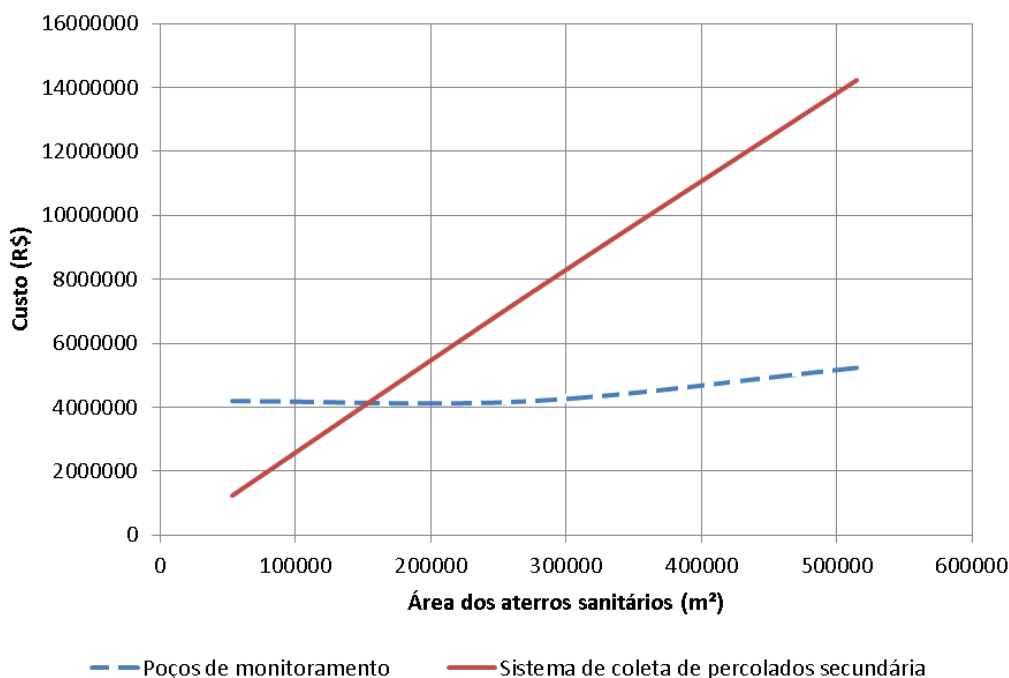


Gráfico 3: Relação entre custo e área dos aterros sanitários, para Caso 3.

Fonte: Campos et al. (2007), SINAPI (2010), TERRACAP (2013) e SINAPI (2015), adaptado e atualizado.

Se pode observar no gráfico 3, a variação do custo de instalação e operação de sistema de poços de monitoramento e sistema de coleta de percolados. Nota-se que as duas curvas se interceptam para o custo de R\$ 4.192.874,96 e área igual a 124.080 m². Dessa forma é possível concluir que a substituição do sistema de detecção de vazamentos através de poços de monitoramento é viável economicamente em relação ao sistema secundário de coleta de percolados com revestimento composto (geomembrana/argila compactada) para aterro sanitário com área da base menor ou igual a 124.080 m².

4.4. COMPARAÇÃO DE CUSTOS - CASO 4

Se pode observar na Tabela 11 orçamento da instalação do sistema composto por sistema de coleta de percolados secundário com sistema de revestimento simples de geomembrana e 2 poços de monitoramento com coleta e análise de amostras do lençol freático a cada 12 meses.

Tabela 10: Orçamento de sistema de detecção de vazamentos composta por sistema de coleta de percolados secundário e 2 poços de monitoramento, com valores referentes a outubro de 2015.

Orçamento do sistema de coleta de percolados secundário com 2 poços de monitoramento					
Aterro sanitário de grande porte, A = 514.834 m ²					
Descrição	u.n.	Qde	R\$/u.n.	R\$	Fonte
Geomembrana lisa PEAD 1 mm	m ²	468030,9	15,06	7.049.013,54	SINAPI (2010) e (2015)
Drenos de chorume em tubos drenantes de concreto, diam = 100 mm	m	11700,8	43,4	507.790,56	
Camada drenante com brita # 3	m ³	70204,6	95,08	6.674.705,82	
Execução de poço de monitoramento	u.n.	2	7.882,74	15.765,48	TERRACAP (2013)
Monitoramento das águas subterrâneas, a cada 3 meses durante 20 anos	u.n.	20	32.510,52	650.210,40	Campos et al. (2007)
Monitoramento das águas subterrâneas, a cada 3 meses durante 20 anos - Pós fechamento	u.n.	20	32.510,52	650.210,40	
Total	-	-	-	15.547.696,19	-

Fonte: Campos et al. (2007), SINAPI (2010), TERRACAP (2013) e SINAPI (2015), adaptado e atualizado.

Continuação da Tabela 11: Orçamento de sistema de coleta de percolados secundário mais 2 poços de monitoramento, com valores referentes a outubro de 2015.

Aterro sanitário de médio porte, A = 274.987 m ²					
Descrição	u.n.	Qde	R\$/u.n.	R\$	Fonte
Geomembrana lisa PEAD 1 mm	m ²	249988,2	15,06	3.765.071,98	SINAPI (2010) e (2015)
Drenos de chorume em tubos drenantes de concreto, diam = 100 mm	m	6249,7	43,4	271.224,90	
Camada drenante com brita # 3	m ³	37498,2	95,08	3.565.143,93	
Execução de poço de monitoramento	u.n.	2	7.882,74	15.765,48	TERRACAP (2013)
Monitoramento das águas subterrâneas, a cada 3 meses durante 20 anos	u.n.	20	26.008,40	520.168,00	Campos et al. (2007)
Monitoramento das águas subterrâneas, a cada 3 meses durante 20 anos - Pós fechamento	u.n.	20	26.008,40	520.168,00	
Total	-	-	-	8.657.542,29	-
Aterro sanitário de médio porte, A = 127.600 m ²					
Descrição	u.n.	Qde	R\$/u.n.	R\$	Fonte
Geomembrana lisa PEAD 1 mm	m ²	116000	15,987	1854492	SINAPI (2010) e (2014)
Drenos de chorume em tubos drenantes de concreto, diam = 100 mm	m	2900	39,7	115.140,79	
Camada drenante com brita 2	m ³	17400	66,93	1.164.495,00	
Execução de poço de monitoramento	u.n.	2	7.882,74	15.765,48	TERRACAP (2013)
Monitoramento das águas subterrâneas, a cada 3 meses durante 20 anos	u.n.	20	26.008,40	520.168,00	Campos et al. (2007)
Monitoramento das águas subterrâneas, a cada 3 meses durante 20 anos - Pós fechamento	u.n.	20	26.008,40	520.168,00	
Total	-	-	-	4.190.229,27	-
Aterro sanitário de pequeno porte, A = 53.114 m ²					
Descrição	u.n.	Qde	R\$/u.n.	R\$	Fonte
Geomembrana lisa PEAD 1 mm	m ²	40601,8	15,061	611504,011	SINAPI (2010) e (2014)
Drenos de chorume em tubos drenantes de concreto, diam = 100 mm	m	1015	43,4	44.050,98	
Camada drenante com brita # 3	m ³	6090,3	95,08	579.032,71	
Execução de poço de monitoramento	u.n.	2	7.882,74	15.765,48	TERRACAP (2013)
Monitoramento das águas subterrâneas, a cada 3 meses durante 20 anos	u.n.	20	26.008,40	520.168,00	Campos et al. (2007)
Monitoramento das águas subterrâneas, a cada 3 meses durante 20 anos - Pós fechamento	u.n.	20	26.008,40	520.168,00	
Total	-	-	-	2.290.689,18	-

Fonte: Campos et al. (2007), SINAPI (2010), TERRACAP (2013) e SINAPI (2015), adaptado e atualizado.

Por meio dos resultados dos orçamentos dos dois sistemas, observados nas Tabelas 7 e 11, é possível concluir que para aterro sanitário com área da base igual a 127.600 m² os custos de instalação de sistema secundário de coleta de percolados mais 2 poços de monitoramento (coleta e análise de amostras a cada 12 meses) é equivalente aos custos de instalação e operação de 4 poços de monitoramento (coleta e análise de amostras a cada 3 meses).

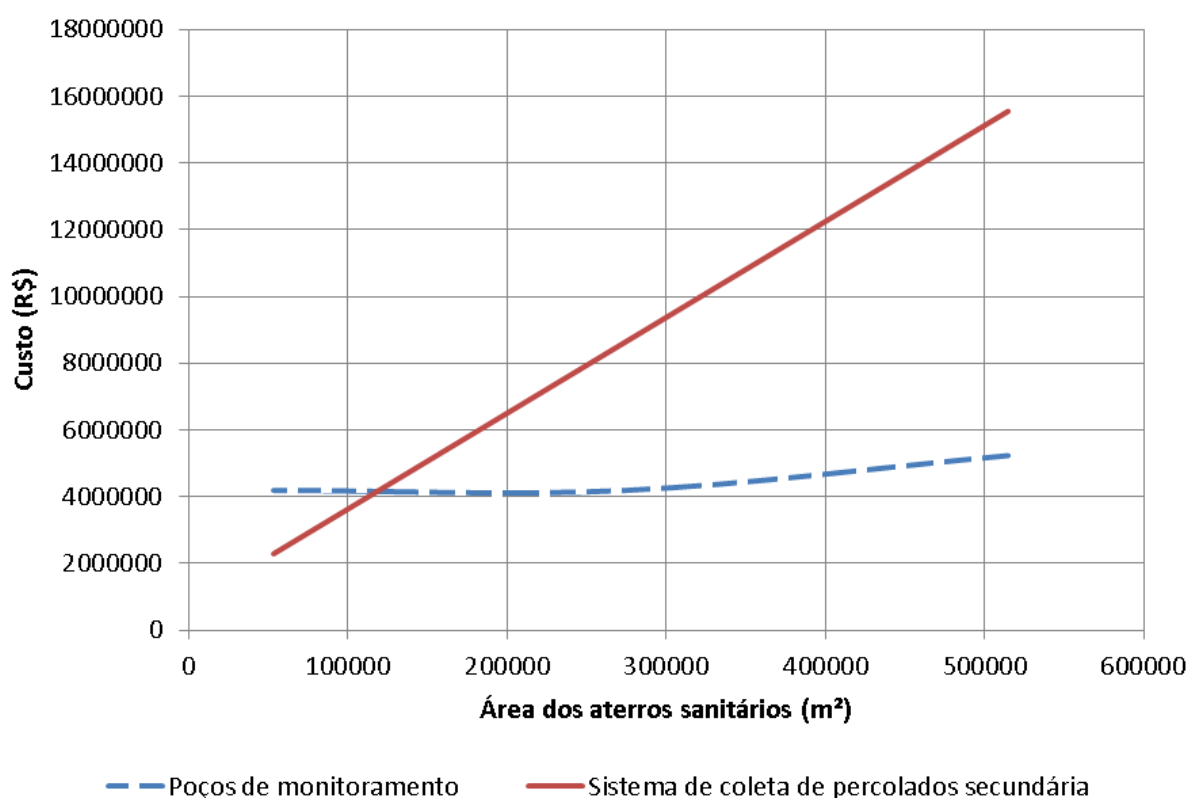


Gráfico 4: Relação entre custo e área dos aterros sanitários.

Fonte: Campos et al. (2007), SINAPI, (2010), TERRACAP (2013) e SINAPI (2015), adaptado e atualizado.

Se pode observar no gráfico 4, a variação do custo de instalação e operação de sistema de 4 poços de monitoramento (amostragem do lençol freático a cada 3 meses) e sistema de coleta de percolados secundário mais 2 poços de monitoramento (amostragem do lençol freático a cada 12 meses). Nota-se que as duas curvas se interceptam para o custo de R\$ 4.192.874,96 e área igual a 127.600 m². Dessa forma é possível concluir que a substituição do sistema de detecção de vazamentos através de 4 poços de monitoramento é viável economicamente em

relação ao sistema secundário de coleta de percolados mais 2 poços de monitoramento para aterro sanitário com área da base menor ou igual a 127.600 m².

4.5. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

Se pode observar na Tabela 12, a área da base do aterro sanitário, na qual os custos dos dois sistemas analisados em cada caso são equivalentes.

Tabela 11: Área do aterro sanitário, na qual o custo dos dois sistemas em comparação são equivalentes, para todos os casos estudados.

Comparação de custos	Caso	Revestimento do sistema secundário de coleta de percolados	Custos dos dois sistemas equivalentes	Habitantes	
				Aterro sanitário de médio porte Altura = 30 m	Aterro sanitário de pequeno porte Altura = 20 m
				Densidade dos RSU = 230 kg/m ³	
			Área (m ²)		
Sistema de coleta de percolados secundário e sistema de 4 poços de monitoramento (coleta de amostras a cada 3 meses)	1	Argila	181.500	154.259	107.979
	2	Geomembrana	170.500	144.233	101.123
	3	geomembrana/CCL	124.080	102.237	72.332
Sistema de coleta secundário mais 2 poços de monitoramento (coleta de amostras a cada 12 meses) e sistema de 4 poços de monitoramento (coleta de amostras a cada 3 meses)	4	Geomembrana	127.600	105.400	74.506

Fonte: Campos et al. (2007), SINAPI (2010), Ornelas (2011), TERRACAP (2013) ABRELPE (2014) e SINAPI (2015), adaptado e atualizado.

Após a comparação entre todos os casos de estudo é possível concluir que a substituição do sistema de detecção de vazamentos por meio de poços de monitoramento é o mais viável economicamente para sistema secundário de coleta de percolados com revestimento de argila compactada, seguido do sistema com revestimento de geomembrana, em sequência encontra-se o sistema de coleta de percolados mais 2 poços de monitoramento e por último o sistema de revestimento composto (geomembrana/CCL).

De modo geral através do estudo de comparação de custos é possível concluir que a substituição do sistema de detecção de vazamentos atualmente utilizada no Brasil através de poços de monitoramento e coleta e análise de amostras a cada 3 meses é viável economicamente para aterros sanitários com área menor ou igual a 181.500 m² (aterro sanitário de médio e pequeno porte) para sistema de revestimento de argila compactada de 0,30 m de espessura. Para área de aterro sanitário igual a 181.500 m² e altura igual a 30 m (aterro sanitário de médio porte) seria possível atender a demanda de um município com 144.233 habitantes e para altura igual a 20 m (aterro sanitário de pequeno porte) seria possível atender a demanda de um município com 101.123 habitantes.

A substituição também é viável para aterros sanitários com área da base menor ou igual a 170.500 m² (aterro sanitário de médio porte) para sistema de revestimento de geomembrana lisa PEAD de 1 mm de espessura. Para área de aterro sanitário igual a 181.500 m² e altura igual a 30 m (aterro sanitário de médio porte) seria possível atender a demanda de um município com 144.233 habitantes e para altura igual a 20 m (aterro sanitário de pequeno porte) seria possível atender a demanda de um município com 101.123 habitantes.

Da mesma forma a substituição do sistema é viável para aterros sanitários com área menor ou igual a 124.080 m² (aterro sanitário de médio porte) para sistema de revestimento composto formado por geomembrana lisa PEAD de 1 mm de espessura e argila camada de argila compactada com 0,30 m de espessura. Para área de aterro sanitário igual a 181.500 m² e altura igual a 30 m (aterro sanitário de médio porte) seria possível atender a demanda de um município com 102.237 habitantes e para altura igual a 20 m (aterro sanitário de pequeno porte) seria possível atender a demanda de um município com 72.332 habitantes.

Como foi mostrado nas pesquisas realizadas por Rowe et al. (2012b), a taxa de vazamentos em argilas compactadas é maior que a taxa de vazamentos em geomembranas e taxa de vazamentos em geomembranas é maior que a taxa de vazamentos em revestimentos com a combinação dos dois materiais (geomembrana/CCL). Pois o vazamento ocorre em toda a área da argila, enquanto na geomembrana o vazamento ocorre apenas através dos furos (ROWE et al., 2012b). Portanto de modo a visar pela maior segurança ao meio ambiente é

recomendável a utilização de sistema de revestimento composto, que evita de forma significativa o vazamento de percolados no lençol freático.

De modo a evitar a total substituição do sistema secundário pelo sistema de poços de monitoramento foi elaborado um estudo comparativo entre um aterro sanitário com sistema secundário de coleta de percolados, sistema de revestimento de geomembrana lisa PEAD de 1 mm de espessura mais 2 poços de monitoramento 1 a montante e 1 a jusante do aterro sanitário e coleta e análise de amostras a cada 12 meses e um aterro sanitário e sistema de detecção de vazamentos através de 4 poços de monitoramento e coleta e análise de amostras do lençol freático a cada 3 meses. O orçamento desses dois sistemas mostrou que o sistema de coleta de percolados secundário mais 2 poços de monitoramento é viável economicamente para aterros sanitários com área igual ou menor a 127.600 m² (aterro sanitário de médio porte) em relação do sistema com 4 poços de monitoramento. Para área de aterro sanitário igual a 181.500 m² e altura igual a 30 m (aterro sanitário de médio porte) seria possível atender a demanda de um município com 105.400 habitantes e para altura igual a 20 m (aterro sanitário de pequeno porte) seria possível atender a demanda de um município com 74.506 habitantes.

5 CONCLUSÃO

Através dos estudos realizados é possível concluir que a substituição do sistema de 4 poços de monitoramento (coleta e análise do lençol freático a cada 3 meses) por sistema de coleta de percolados secundário é viável economicamente para aterros sanitários de médio porte até área igual a: 1) 181.500 m² (sistema de revestimento de argila compactada), que atenderia a demanda de um município de 154.259 habitantes, 2) 170.500 m² (sistema de revestimento de geomembrana), que atenderia a demanda de um município de 144.233 habitantes, para aterro sanitário de médio porte (altura do aterro sanitário igual a 30 m) e atenderia a demanda de um município de 107.979 habitantes, para aterro sanitário de pequeno porte (altura igual a 20 m), e 3) 124.080 m² (sistema de revestimento composto: geomembrana/CCL), que atenderia a demanda de um município de 102.237 habitantes e atenderia a demanda de um município de 72.332 habitantes, para aterro sanitário de pequeno porte (altura igual a 20 m). A substituição do sistema de 4 poços de monitoramento por sistema secundário de coleta de percolados é viável economicamente para aterros sanitários de pequeno porte em geral, pois aterros sanitários de pequeno porte apresentam área da base menor que os aterros sanitários de médio porte.

A substituição do sistema de 4 poços de monitoramento (amostragem do lençol freático a cada 3 meses) por sistema secundário de coleta de percolados (revestimento de geomembrana) mais 2 poços de monitoramento (amostragem do lençol freático a cada 12 meses) é viável para aterros sanitários de médio porte com área da base menor ou igual a 127.600 m², que atenderia a demanda de um município de 105.400 habitantes para aterro sanitário de pequeno porte (altura do aterro sanitário igual a 30 m) e atenderia a demanda de um município de 74.506 habitantes para aterro sanitário de pequeno porte (altura do aterro sanitário igual a 20 m). A substituição do sistema de 4 poços de monitoramento (amostragem do lençol freático a cada 3 meses) por sistema secundário de coleta de percolados (revestimento de geomembrana) mais 2 poços de monitoramento (amostragem do lençol freático a cada 12 meses) é viável para aterros sanitários de pequeno porte, pois, como descrito anteriormente, aterros sanitários de pequeno porte apresentam

área da base menor que os aterros sanitários de médio porte. Dessa forma é possível concluir que mesmo mantendo dois poços de monitoramento com coleta de amostras anuais é viável economicamente a instalação de sistema de coleta de percolados secundário.

Além do sistema secundário de coleta de percolados ser viável economicamente para aterros sanitários de médio (com limitação da área da base) e pequeno porte, esse sistema apresenta inúmeras vantagens de preservação do meio ambiente e saúde humana. O sistema secundário evita o vazamento de percolados no lençol freático e proporciona controle contínuo da taxa de vazamento do sistema de coleta de percolados principal para o sistema de coleta de percolados secundário. Tal fato não é possível no sistema de detecção de vazamentos através de poços de monitoramento, pois o método de análise consiste na verificação de uma possível contaminação do lençol freático realizada a cada 3 meses, ou seja esse método não evita a contaminação. Além de gerar gastos extras com multa e custos com a recuperação da qualidade do lençol freático em caso de vazamentos de percolados.

Por meio do estudo de caso do aterro sanitário de Cachimba é possível concluir que aplicação de multas não necessariamente acarreta na recuperação da qualidade das águas superficiais e subterrâneas. Pois no estudo de caso a Prefeitura Municipal de Curitiba foi multada e após 10 anos ainda não havia elaborado métodos de evitar e remediar a contaminação (processo ainda em trâmite). Entretanto vale lembrar que o aterro sanitário de Cachimba foi iniciado como vazadouro a céu aberto (lixão). De qualquer forma, é possível concluir que a melhor solução em relação à preservação do meio ambiente consiste em evitar a contaminação através da utilização de sistema secundário de coleta de percolados aliado a um sistema de revestimento eficiente e instalado com controle de qualidade.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8849: Apresentação de projetos de aterros sanitários controlados. Rio de Janeiro, 1985

_____. NBR 8419: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro, 1992.

_____. NBR 13896: Aterros de resíduos não perigosos. Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS - ABRELPE **Panorama dos Resíduos sólidos no Brasil**. São Paulo, 2014.

AGENCIA DE NOTÍCIAS DO ESTADO DO PARANÁ - ANEP **IAP constata níveis altos de toxicidade no aterro da Cachimba e notifica Prefeitura**. Setembro de 2009.

ALMEIDA, A. **Ibama multa Prefeitura em R\$ 100 mil**. Gazeta do Povo, 03 de setembro de 2010.

BACAS, B. M., KONIETZKY, H., BERINI, J. C., AND SAGASETA, C. **A new constitutive model for textured geomembrane/geotextile interfaces**. J. Geotextile Geomembr., 29(2), 137–148, 2011.

BASS, J. M. **Avoiding failure of leachate collection and cap drainage systems**. EPA-600/2-86-058, EPA, Land Pollution Control Division, Hazardous Waste Engineering Research Laboratory, Cincinnati, OH, 1986.

BOUCHEZ, T., MUNOZ, M. L., VESSIGAUD, S., BORDIER, C., ARAN, C., and DUQUENNOI, C. **Clogging of MSW landfill leachate collection systems: Prediction methods and in situ diagnosis**. Proc., Sardinia 2003, 9th Int. Waste Management and Landfill Symp., CISA, Environmental Sanitary Engineering Centre, Cagliari, Italy, 2003.

BRUNE, M., RAMKE, H. G., COLLINS, H. J., AND HANERT, H. H. **Incrustation processes in drainage systems of sanitary landfills**. Environmental Sanitary Engineering Centre, Cagliari, Italy, 999–1035, 1991.

CAMPOS, C. C., SIMONSEN, R., SANDRONI, P. H. **Estudo sobre os aspectos econômicos e financeiros da implantação e operação de Aterros Sanitários**. Fundação Getúlio Vargas, 2008.

CHAPPEL, M. J. **A field scale evaluation of wrinkles in exposed HDPE geomembranes**, Queen's University, Kingston Ontario, Canada, 2012.

CHAPPEL, M. J., BRACHMAN, R. W. I., TAKE, W. A., AND ROWE, R. K.. **Large-scale quantification of wrinkles in a smooth, black, HDPE geomembrane**. J. Geotech. Geoenviron. Eng., 138(6), 671–679, 2012.

CRAVEN, W., TOWNSEND, T. G., VOGEL, K., AND LAUX, S. **Field investigation of landfill leachate collection system clogging**. Pract. Period. Hazard. Toxic Radioact. Waste Manage., 3(1), 2–9, 1999.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL - CETESB **Amostragem e monitoramento de águas subterrâneas**. São Paulo, 1988.

FLEMING, I. R., ROWE, R. K., AND CULLIMORE, D. R. **Field observations of clogging in a landfill leachate collection system**. Can. Geotech. J., 36(4), 685–707, 1999.

GIROUD, J. P. **Equations for Calculating the Rate of Liquid Migration through Composite Liners due to Geomembrane defects**. Geosynthetics International, Vol. 4, Nos. 3-4, pp. 335-348, 1997.

GIROUD, J.P. **Quantification of geosynthetic behavior**. Geosynthetics International, Special Issue on the Giroud Lectures, 12(1), 2–27, 2005.

GOUVEIA, J. M. C. **A métrica da sustentabilidade na perspectiva da Geografia: aplicação e avaliação do Painel da Sustentabilidade (Dashboard of Sustainability) na Comunidade Quilombola do Mandira – Cananéia/SP**. São Paulo, 2010.

GUDINA, S., AND BRACHMAN, R. W. I. **Geomembrane strains from wrinkle deformations**. J. Geotextile Geomembrane., 29(2), 181–189, 2011.

KOERNER, R. M. **Designing with Geosynthetics**. Fifth Edition. Prentice Hall, N. J. 2005.

KOERNER, G. R., KOERNER, R. M., AND MARTIN, P. M. **Field performance of leachate collection systems and design implications**. Proc., of 31st Annual Int. Solid Waste Exposition, Solid Waste Association of North America, Silver Spring, MD., 365–380, 1993.

LEVINE, A. D., CARDOSO, A. J., NAYAK, B., RHEA, L. R., DODGE, B. M., AND HARWOOD, V. J. **Assessment of biogeochemical deposits in landfill leachate**

drainage systems. Project Final Rep., Center for Solid and Hazardous Waste Management, Gainesville, FL, 2005.

MAROS, A. BREMBATTI, K. **Justiça leva 14 anos para julgar poluição na Caximba.** Gazeta do Povo, 15 de Setembro de 2015.

MCBEAN, E. A., MOSHER, F. R., ROVERS, F. A. **Reliability-based design for leachate collection systems.** Proc. of Sardinia 93, 3rd Int. Landfill Symp., Santa MALIVA, R. G., MISSIMER, T. M., LEO, K. C., THYNE, G. T. **Unusual calcite stromatolites and pisoids from a landfill leachate collection system.** Geology, 28(10), 931–934, 2000.

MCISAAC, R. ROWE, R. K. **Clogging of unsaturated gravel permeated with landfill leachate.** Can. Geotech. J., 45(8), 1045–1963, 2008.

MARGHERITA, P. **Environmental Sanitary Engineering Centre,** Cagliari, Italy, 433–441, 1993.

MARTINEZ, J. **Curitiba é condenada a pagar R\$ 20 milhões por despejo de resíduos do Caximba no Rio Iguaçu.** Portal do Paraná, 15 de Setembro de 2015.

ORNELAS A. R. **Aplicação de métodos de análise espacial na gestão de resíduos sólidos urbanos.** Belo Horizonte, 2011.

Portaria nº 2914 de 12 de dezembro de 2011 **Os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade,** Diário Oficial da União, Brasília, 2011.

SCHERER, P. N., SILVA, A. J., MACEDO, L. F. F., RAMOS, F. F. *et al.* **Composição e distribuição da avifauna na área do aterro sanitário da Caximba, região metropolitana de Curitiba.** Atualidades Ornitológicas nº 168, Julho/Agosto 2012.

QIAN, X., R. M., KOERNER; D. H. GRAY. **Geotechnical Aspects of Landfill Design and Construction.** Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall, 2002.

ROWE, R. K. **From the past to the future of landfill engineering through case histories.** Proc., 4th Int. Conf. on Case Histories in Geotechnical Engineering, Univ. of Missouri-Rolla, Rolla, MO, 145–166, 1998.

ROWE, R. K., QUIGLEY, R. M., BRACHMAN, R. W. I., BOOKER, J. R. **Barrier systems for waste disposal facilities.** Taylor & Francis Books Ltd, London. 2004.

ROWE, R. K. **Long-term performance of contaminant barrier systems.** 45th Rankine Lecture." *Geotechnique*, 55(9), 631–678, 2005.

ROWE, R.K. HOSNEY, M.S. **A systems engineering approach to minimizing leachate leakage from landfills.** 9th International Conference on Geosynthetics, Brazil, 2010.

ROWE, R. K. **Short and long-term leakage through composite liners.** *Canadian Geotechnical Journal*, 49(2), 141–169, 2012a.

ROWE, R. K. YU Y. **Modelling leachate-induced clogging of porous media,** *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 49, 2012b.

ROWE, R. K. YU Y. **Effect of grain size on service life of MSW landfill drainage systems.** *Canadian Geotechnical Journal*. 50: 1-14, 2013a.

ROWE, R. K. F. ASCE AND YU Y. **Modeling of Leachate Characteristics and Clogging of Gravel Drainage Mesocosms Permeated with Landfill Leachate,** ASCE July 2013b.

ROWE, R. K, ASCE F, YU Y. **Modelling of Leachate Collection Systems with Filter Separators in Municipal Solid Waste Landfills.** *Journal of Environmental Engineering*, ASCE, August, 2013c.

ROWE, R. K. F. ASCE AND YU Y. **Modeling of Leachate Characteristics and Clogging of Gravel Drainage Mesocosms Permeated with Landfill Leachate,** ASCE July 2013d.

ROWE R. K, ASCE F, YU Y. **Modeling the Leachate Characteristics and Clogging of Gravel Drainage Mesocosms Permeated with Landfill Leachate.** *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering ASCE*, Vol. 139, N° 7, 1, 2013e.

ROWE K. R. YU Y. **Effect of grain size on service life of MSW landfill drainage systems.** *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 50,p: 1-14, 2013f.

SINAPI - Sistema Nacional de pesquisa de custos e índices da construção civil, **Composição de Custos**, 2010.

SINAPI - Sistema Nacional de pesquisa de custos e índices da construção civil, **Preços Insumos, Brasília, Outubro de 2015.** 2015.

TERRACAP, **Termo de referência para monitoramento do aquífero poroso - setor complementar de indústria e abastecimento – SCIA.** Brasília, 2013

U.S. Environmental Protection Agency **Final Cover on Hazardous Waste Landfills and Impoundments**. U.S. EPA Guide to Technical Resources for the Design of Land Disposal Facilities, 1988. EPA/530-SW 88-047.

U.S. Environmental Protection Agency **Landfill Manuals**. U.S. EPA Guide to Technical Resources for the Design of Land Disposal Facilities, 2000.