

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**ASPECTOS GEOTÉCNICOS E AMBIENTAIS RELACIONADOS À
IMPLANTAÇÃO DO ATERRO SANITÁRIO OESTE**

FELIPE LEITE NISIYAMA

ORIENTADOR: LUIS FERNANDO MARTINS RIBEIRO

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM ENGENHARIA CIVIL

BRASÍLIA/DF: DEZEMBRO/2016

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**ASPECTOS GEOTÉCNICOS E AMBIENTAIS RELACIONADOS À
IMPLANTAÇÃO DO ATERRO SANITÁRIO OESTE**

FELIPE LEITE NISIYAMA

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL.

APROVADA POR:

**Luis Fernando Martins Ribeiro, D.Sc (ENC/FT/UnB)
(Orientador)**

**Cláudia Marcia Coutinho Gurjão, D.Sc (ENC/FT/UnB)
(Examinador Interno)**

**Paulo Celso dos Reis Gomes, D.Sc (EPR/FT/UnB e SLU)
(Examinador Externo)**

DATA: BRASÍLIA/DF, 14 de dezembro de 2016

FICHA CATALOGRÁFICA

NISYAMA, FELIPE LEITE

Aspectos geotécnicos e ambientais relacionados à implantação do Aterro Sanitário Oeste. [Distrito Federal] 2016.

vii, 111 p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Civil, 2016)

Monografia de Projeto Final - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

- | | |
|---------------------------|--------------------------------------|
| 1. Disposição final | 2. Aspectos geotécnicos e ambientais |
| 3. Aterro Sanitário Oeste | 4. Resíduos Sólidos |

I. ENC/FT/UnB

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

NISYAMA, F. L. (2016) Aspectos geotécnicos e ambientais relacionados à implantação do Aterro Sanitário Oeste. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 111 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DOS AUTORES: Felipe Leite Nisyama

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: Aspectos geotécnicos e ambientais relacionados à implantação do Aterro Sanitário Oeste.

GRAU/ANO: Bacharel em Engenharia Civil /2016

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. Os autores reservam outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final pode ser reproduzida sem a autorização por escrito dos autores.

Felipe Leite Nisyama

SMT Conjunto 9, Lote 3A

Taguatinga Sul

72023445 – Brasília/DF – Brasil

Sumário

RESUMO.....	vi
1. INTRODUÇÃO	7
1.1. Objetivos.....	8
1.2. Justificativa.....	8
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
2.1. A destinação final dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) no Distrito Federal.....	9
2.2. Impactos da disposição inadequada do RSU no DF.....	11
2.3. Desdobramentos da Política Nacional dos Resíduos Sólidos com relação à destinação final de RSU	12
2.4. Aterro sanitário como uma solução de engenharia para a questão da disposição final.....	13
2.5. Elementos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos	14
2.5.1. Revestimento de base	14
2.5.2. Sistema de drenagem, coleta e remoção de percolados.....	18
2.5.3. Sistema de coleta e controle de gases	23
2.5.4. Revestimento de cobertura	25
2.6. Sistemas de monitoramento e controle para um aterro sanitário.....	28
2.6.1. Sistema de controle e monitoramento geotécnico	28
2.6.2. Monitoramento ambiental.....	31
2.7. Resoluções CONAMA	34
2.8. Arcabouço normativo	37
2.8.1. NBR 13896: ABNT (1997)	38
2.8.2. NBR 8419:1992 Versão Corrigida: ABNT (1996)	40
2.9. Breve histórico do Aterro Sanitário Oeste até os dias atuais.....	41
3. METODOLOGIA.....	42
3.1. Levantamento e análise de estudos e documentos	43
3.2. Visitas de campo.....	44
4. RESULTADOS	44
4.1. Estudos e documentos que embasaram a escolha da área de locação do Aterro Sanitário Oeste.....	44
4.1.1. Relatório de investigações geotécnicas	45
4.1.2. Estudo de Impactos Ambientais (EIA).....	53

4.1.2.1. Escolha da área a ser estudada.....	54
4.1.2.2. Estudos geológico-geotécnicos específicos.....	56
4.1.2.3. Impactos potenciais com relação aos aspectos geotécnico-ambientais .	59
4.2. Soluções de controle de impactos ambientais adotadas no ASO	61
4.2.1. Documentação de projeto	61
4.2.1.1. Descrição do plano operacional de avanço.....	62
4.2.1.2. Drenagem subsuperficial	64
4.2.1.3. Impermeabilização.....	66
4.2.1.4. Diques	69
4.2.1.5. Drenagem de percolados na fundação	73
4.2.1.6. Células de resíduo e camada de cobertura.....	75
4.2.1.7. Drenagem interna de percolados e gases	77
4.2.1.8. Drenagem de águas pluviais	79
4.2.1.9. Monitoramento geotécnico e ambiental	82
4.2.1.10. Registro das soluções por visitas técnicas	90
4.2.1.11. Quadro síntese das soluções de controle de impactos ambientais.....	95
4.3. Soluções de controle de impactos ambientais adotadas em nível nacional.....	97
4.3.1. Aterro Sanitário Bandeirantes	97
4.3.1. Aterro Sanitário Caieiras	100
5. CONCLUSÃO.....	103
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	105

RESUMO

Assim como preconizado na legislação brasileira a disposição final da parcela dos resíduos que não pode ser reciclada, reutilizada ou tratada deve ser realizada em aterros sanitários. Portanto, tendo em vista que, no atual paradigma tecnológico, há uma incapacidade de processamento pleno dos resíduos por meio de processos que permitam seu aproveitamento ou tratamento, a demanda por aterros sanitários ainda é uma realidade. Um aterro sanitário é concebido por meio de conhecimentos de engenharia, principalmente àqueles relacionados às vertentes geotécnica e ambiental, e permitem a disposição final dos resíduos de uma maneira ambientalmente adequada. A disposição final de maneira irregular, por outro lado, é uma potencial causa de impactos nos diversos âmbitos – social, ambiental e econômico – e é uma realidade atualmente vivida pelo Distrito Federal, com o Aterro Controlado do Jockey ainda em pleno funcionamento. Tentando reverter isto o Distrito Federal hoje constrói o seu primeiro aterro sanitário, o Aterro Sanitário Oeste (ASO). O presente estudo teve como objetivo principal analisar os principais aspectos geotécnico e ambientais relacionados à implantação do ASO. Para tal foi realizado um levantamento e análise dos documentos (i) que permitiram a escolha da área para locação deste aterro e (ii) das soluções de controle de impactos ambientais específicas a serem executadas no ASO. Por meio de (i) foi possível realizar um delineamento do perfil ambiental, geotécnico e geológico da área e determinar os possíveis impactos de ordem geotécnica-ambiental da implantação do aterro nesta área. Face a este delineamento e às referências normativas e legislações ambientais concernentes à aterros sanitários e ao gerenciamento ambiental, os resultados obtidos em (ii) permitiram atingir o principal objetivo deste trabalho. Adicionalmente, foi efetuada visita técnica ao aterro em construção a fim de registrar algumas das soluções estudadas em (ii) e verificar o estado atual das obras do ASO, e também foram estudadas as soluções de controle de impactos ambientais adotadas pelos aterros sanitários Bandeirantes e Caieiras, de modo a se determinar o paradigma tecnológico relativo a estas soluções para os aterros brasileiros.

Palavras-chave: disposição final, aspectos geotécnicos e ambientais, Aterro Sanitário Oeste, resíduos sólidos.

1. INTRODUÇÃO

A gestão dos resíduos sólidos se baseia atualmente em diretrizes relacionadas a não geração, redução, reutilização e reciclagem, e estas atividades possuem prioridade em relação à disposição final ambientalmente adequada ou o tratamento destes resíduos. Ou seja, não sendo possível reduzir completamente a produção de resíduos por políticas que promovam uma maior conscientização ambiental ou implementem a logística reversa, faz-se necessário o tratamento destes resíduos. A parcela restante deste tratamento ou aquela para a qual não exista ainda disponibilidade tecnológica ou viabilidade econômica para ser tratada deve ser necessariamente destinada para uma unidade que promova disposição final ambientalmente adequada. Esta parcela recebe outra designação, não mais sendo designada como resíduo, e sim rejeito. Tal discussão é apresentada na Lei nº 12.305 (BRASIL, 2010), que institui a Política Nacional dos Resíduos Sólidos, e em seu texto fica evidente que a disposição de rejeitos em aterros sanitários e o conceito de disposição final ambientalmente adequada são correlatos. Portanto, no atual contexto os aterros sanitários são dispositivos que se prestam a realizar a disposição final daquela parcela dos resíduos que não pode ser reaproveitada ou tratada e que garantam que esta disposição estará isenta de danos ou riscos à saúde pública e à segurança e minimizará os potenciais impactos ambientais diversos.

Sob esta lógica torna-se evidente que um aterro deve ser dotado de elementos que garantam que os impactos adversos em sua região de influência sejam minimizados ou, no mínimo, estejam em acordo com as condições estabelecidas pelas legislações sanitárias e ambientais existentes. Estes elementos são concebidos baseando-se principalmente em conhecimentos de engenharia, mais especificamente àqueles relacionados às vertentes geotécnica e ambiental. Este é o principal aspecto que distingue um aterro sanitário das demais soluções inadequadas para a disposição final de rejeitos, que são o caso dos lixões e aterros controlados. Não obstante ao potencial impactante da disposição inadequada de rejeitos em dispositivos como estes é alarmante a constatação de que esta é a destinação ainda adotada para grande parte dos rejeitos gerados em nível nacional.

1.1. Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é estudar os aspectos geotécnicos e ambientais relacionados à implantação do Aterro Sanitário Oeste (ASO), implantação esta que atualmente encontra-se em fase de finalização. O atendimento a este objetivo geral se deu mediante à proposição dos seguintes objetivos específicos:

- Determinar o contexto geotécnico, geológico e ambiental da área escolhida para implantação do ASO bem como os impactos potenciais de ordem ambiental e geotécnica da implantação do ASO nesta área.
- Analisar as soluções de controle de impactos ambientais a serem adotadas pelo ASO face aos resultados obtidos pelo cumprimento do objetivo específico anterior e às referências normativas e legislações ambientais concernentes à aterros sanitários e ao gerenciamento ambiental.

Além destes objetivos específicos o presente estudo propõe como objetivos complementares:

- O registro *in loco* das soluções de controle ambiental a serem adotadas pelo ASO e do estado atual das obras deste aterro.
- A determinação do paradigma tecnológico quanto às soluções de controle de impactos ambientais adotadas em nível nacional.

O atendimento ao objetivo geral deste trabalho possibilitará o acesso às soluções e decisões adotadas no ASO levantadas e analisadas de maneira sistemática e vinculada ao arcabouço normativo e legislativo brasileiro. Portanto, espera-se que isto facilite o acesso a informações por aqueles que venham a realizar estudos específicos sobre este aterro.

1.2. Justificativa

O DF atualmente encontra-se aquém das exigências da legislação brasileira quanto a gestão dos resíduos sólidos. No que tange à disposição final, o Aterro Controlado do Jockey Club ainda recebe a completude dos resíduos gerados no DF, o que é reconhecidamente um fator gerador de impactos ambientais e sociais. Visando a implementação de uma disposição ambientalmente adequada, o DF está no presente

momento executando as obras do seu primeiro aterro sanitário, o Aterro Sanitário Oeste. Dada a natureza de uma obra de aterro sanitário é de grande relevância o estudo dos aspectos geotécnicos e ambientais relacionados à sua implantação.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. A destinação final dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) no Distrito Federal

O Distrito Federal, no ano de 2014, ocupava a primeira posição dentre os estados brasileiros quanto a quantidade de resíduos sólidos urbanos (RSU) coletada diariamente. Nesta data a quantidade era de 1,551 kg/hab/dia, ficando imediatamente a frente de São Paulo – com uma produção de 1,381 kg/hab/dia – o que resultava em uma produção total diária de 4.423 toneladas de RSU (ABRELPE, 2015). Aliando-se isto à inexistência de locais para disposição final ambientalmente adequada é notório que urgem iniciativas que visem a reversão deste panorama. A disposição final da maioria destes resíduos coletados se dá atualmente no Aterro Controlado do Jockey Club. A distinção entre um aterro controlado e um lixão reside no fato de que no primeiro efetua-se a cobertura do RSU e eventualmente sua compactação com solo (BOSCOV, 2008). Nota-se, portanto, que um aterro controlado, por não possuir dispositivos efetivos de contenção do fluxo de percolados, ainda é um potencial poluidor dos recursos hídricos. A Figura 2.1 apresenta a maneira como foi realizada a destinação de RSU no DF nos anos de 2013 e 2014, período no qual observou-se um acréscimo de cerca de 2,2% na quantidade de RSU total anual gerada, cuja destinação integral era um aterro controlado.

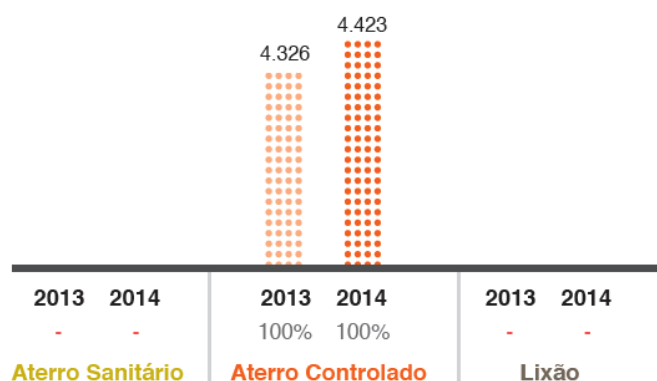


Figura 2.1 - Destinação final do RSU no Distrito Federal em toneladas/dia (ABRELPE, 2015)

Um fator agravante do panorama mencionado é a localização do Aterro Controlado do Jockey Club, fronteiro aos domínios do Parque Nacional de Brasília (PNB) e próximo às nascentes do Córrego do Acampamento e do Córrego Vicente Pires, como apresentado pela Figura 2.2, que divide ainda a área do aterro de acordo com a época de disposição. Além disso, o aterro se situa nas adjacências da SCIA-Estrutural, conhecida como Cidade Estrutural, que na realidade tem sua origem vinculada ao início da operação do próprio aterro, e que hoje carrega as mazelas de uma cidade que se desenvolveu às custas dos rejeitos de outras cidades. Apesar de que, para alguma parte dos que ali residem, o Aterro Controlado do Jockey ainda é um meio de subsistência, para a parte restante os impactos negativos são muito mais evidentes.

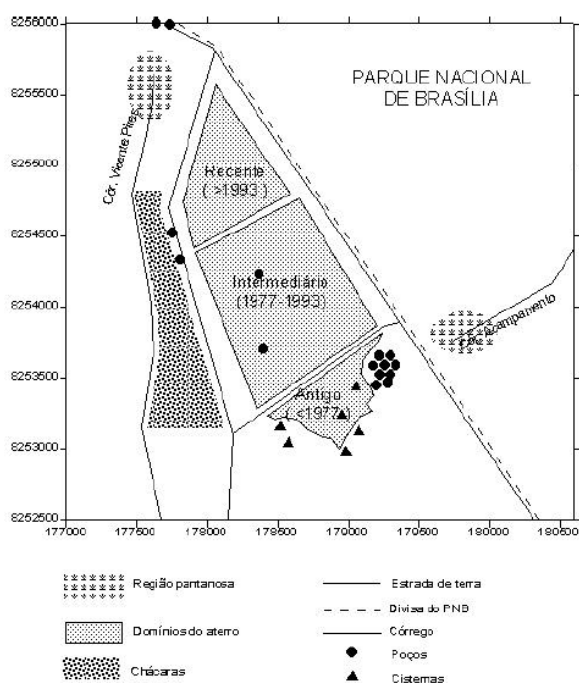


Figura 2.2 - Representação esquemática da localização do Aterro Controlado do Jockey (ARAÚJO *et al.*, 1997)

O Aterro Controlado do Jockey não dispõe de nenhum dispositivo que efetue o controle dos percolados, o que suscita diversas questões acerca dos impactos destes efluentes nos córregos Vicente Pires e do Acampamento, e uma eventual contaminação das águas subterrâneas. A Universidade de Brasília (UnB) cumpre papel essencial no estudo destes impactos, havendo uma série de trabalhos publicados que tratam desta questão (KOIDE & BERNARDES, 1998; FRANCO, 1996; CAVALCANTI, 2013).

2.2. Impactos da disposição inadequada do RSU no DF

Com a disposição inadequada de RSU no DF desde o estabelecimento de Brasília como capital, iniciativas foram tomadas no sentido de avaliar a extensão dos danos ambientais acumulados ao longo dos anos. As principais consequências da disposição inadequada de RSU compreendem a degradação de recursos hídricos, danos à saúde humana, destruição da fauna e flora e alterações climáticas, que estão diretamente vinculados a emissão de contaminantes para fora do local onde é feita a disposição (BOSCOV, 2008). Portanto, em meados dos anos 90, iniciaram-se pesquisas visando estudar a emissão destes contaminantes no que hoje é denominado de Aterro Controlado do Jockey Club (ACJB).

Visando a execução de um projeto de adequação da disposição de resíduos no ACJB, realizaram-se uma série de furos de sondagens ao redor e dentro da área do aterro com intuito de criar um banco de dados geológico-geotécnicos, e de instalar piezômetros (PEREIRA *et al.*, 1997). Amostras de água subsuperficiais foram coletadas tanto nestes piezômetros quanto em poços escavados pelos moradores locais, e, pela análise das mesmas, foram apontados como problemas mais críticos a possibilidade de contaminação do lençol freático por chumbo e uma provável propagação rápida de efluentes pelas camadas de solo saprolítico da rocha subjacente à base do aterro, sendo possível uma eventual contaminação do aquífero fissural ou dos corpos hídricos adjacentes (KOIDE; BERNARDES, 1998).

Estudos foram realizados por Franco (1996) utilizando ensaios geofísicos e geoquímicos na tentativa de mapear uma possível pluma de contaminação no subsolo do ACJB. Neste estudo foram primeiramente executados ensaios de eletrorresistividade almejando a detecção de anomalias na área do aterro e entorno. Na tentativa de investigar a ocorrência destas anomalias, conduziram-se então os ensaios de perfilagem eletromagnética, sondagem magnetotélgica e de geoquímica aquática. Pela análise conjunta dos resultados geoquímicos e de perfilagem eletromagnética foi possível confirmar a existência de uma pluma de contaminação rasa com mesma direção e sentido da nascente do Córrego do Acampamento, mostrado na Figura 2.2, cuja origem seria primordialmente devido à porção mais antiga do aterro.

Mais recentemente estudos geoeletricos e geoquimicos realizados por Cavalcanti (2013) permitiram um mapeamento da pluma de contaminação na região do entorno do ACJB. Após uma campanha inicial de análises físico-químicas efetuaram-se perfis de resistividade contornando o aterro, e pela análise conjunta dos dados obtidos em ambas as análises pôde-se correlacionar intervalos de resistividade com níveis de contaminação do subsolo. Foram propostos então dois intervalos de resistividade que correspondiam a duas intensidades de contaminação atestadas pelos ensaios físico-químicos: área contaminada (AC) e área levemente contaminada (ALC). A análise dos perfis evidenciou que o perfil localizado entre as áreas de disposição antiga e intermediária e no contorno oeste do aterro, como indicado Figura 2.2, encontram-se contaminados predominantemente com um grau AC, ao passo que o contorno que faz fronteira direta com o Parque Nacional de Brasília está predominantemente contaminado com um nível ALC.

É evidente que, de acordo com o exposto, a maneira com a qual se efetua a disposição final de RSU no DF está aquém do paradigma tecnológico atual o qual aplica conhecimentos de engenharia para mitigar os impactos acima citados desta disposição. Será visto adiante que a disposição final adequada de RSU já é hoje exigida por aparato legal específico.

2.3. Desdobramentos da Política Nacional dos Resíduos Sólidos com relação à destinação final de RSU

Atualmente o aparato legal que contempla a gestão dos resíduos sólidos é a Lei nº 12.305 (BRASIL, 2010), que institui a Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS), cujos desdobramentos afetam o momento presente no sentido da adequação do modo com o qual é realizada esta gestão ao que é preconizado nesta lei. Esta lei teve sua origem no Projeto de Lei nº 203, de 1991, que dispunha sobre o acondicionamento, a coleta, o tratamento, o transporte e a destinação final dos resíduos de serviços de saúde (BRASIL, 1991). Ao longo do seu período de tramitação outros projetos de lei foram anexados a este, aumentando assim sua abrangência além do âmbito dos resíduos de serviços de saúde, o que resultou na sua transformação na Lei nº 12.305, sancionada no dia 2 de agosto de 2010.

A gestão e o gerenciamento de resíduos, como apresentados no PNRS, devem seguir a seguinte ordem de prioridade: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento e, por fim, a disposição final ambientalmente adequada (BRASIL, 2010). Nota-se, portanto, que o mínimo que pode ser feito para se adequar a este modo de gestão proposto é o provimento de uma disposição final que seja ambientalmente adequada. Entende-se como disposição final ambientalmente adequada, segundo conceituação da própria lei, a “distribuição ordenada de rejeitos em aterros, observando normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos” (BRASIL, 2010). Este conceito de disposição, segundo o Art. 54 do PNRS, deveria ser implantado em quatro anos após a data de publicação da lei, no ano de 2014. O panorama do DF relativo a este ano mostra que a disposição final de RSU dava-se em sua totalidade em um aterro controlado, que não se adequa ao conceito apresentado.

2.4. Aterro sanitário como uma solução de engenharia para a questão da disposição final

O conceito de aterro sanitário é o que melhor se encaixa na definição de disposição final ambientalmente adequada proposta pelo PNRS. Apesar de, como já mencionado neste trabalho, esta legislação posicionar a disposição em aterros, de acordo com uma ordem de prioridade, como a última opção para destinação final do RSU é fato que a construção de aterros ainda se faz imprescindível devido a incapacidade atual, ou em curto prazo, de processamento pleno do RSU por processos físicos ou biológicos, como a reciclagem e a compostagem, respectivamente. Ressalta-se que isto é um fato que não se restringe aos países em desenvolvimento, uma vez que, por exemplo, os Estados Unidos ainda dispõem cerca de 75% dos resíduos produzidos em aterros, apesar de todos os esforços voltados para reduzir, reciclar e reutilizar estes resíduos (QIAN; KOERNER; GRAY, 2002). Neste contexto, os aterros sanitários são vistos como uma solução para a disposição final de RSU, que, baseado em critérios de engenharia e normas operacionais, promovem o seu armazenamento de maneira a conter a poluição ambiental e proteger a saúde pública, minimizando assim os seus impactos ao meio ambiente (IPT, 2000). Isto é o que o Distrito Federal atualmente almeja com a construção de seu primeiro aterro sanitário, o Aterro Sanitário Oeste, localizado nas imediações da Região Administrativa de Samambaia.

2.5. Elementos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos

Uma obra de aterro sanitário para disposição final de RSU é composta por elementos diversos que desempenham funções específicas dentro deste e que, quando corretamente dimensionados, permitem uma disposição final ambientalmente adequada. Uma representação esquemática destes elementos é apresentada na Figura 2.3. Nesta seção será feita uma apresentação e discussão apenas sobre os elementos que compõem o aterro em si, excluindo-se as unidades de apoio. Ressalta-se que os elementos aqui apresentados serão abordados prioritariamente quanto a sua funcionalidade no contexto geral do aterro, uma vez que, as especificações destes variam de acordo com as normas e legislações vigentes em cada país.

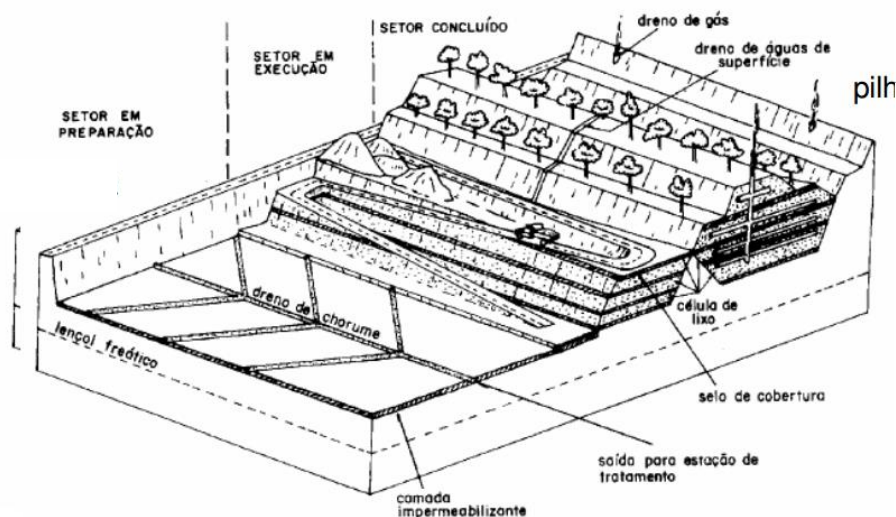


Figura 2.3 – Representação esquemática dos elementos constituintes de um aterro sanitário (IPT, 2000)

2.5.1. Revestimento de base

É tipicamente apontado como o elemento de maior importância, uma vez que aterros sanitários têm por princípio o confinamento dos resíduos, ou seja, um controle por contenção. O revestimento de base deve ser posicionado sobrejacente ao solo natural e se estende a todos os pontos onde há o contato com resíduos ou percolados gerados por estes, e o solo natural, sendo que sua principal função é agir como uma barreira contra o transporte advectivo e difusivo dos solutos do percolado (QIAN; KOERNER; GRAY, 2002). É importante ressaltar a impossibilidade de se ter um revestimento que seja completamente estanque, resultando na eventual chegada destes ao lençol freático com concentração não nula. Apesar disso, com o correto dimensionamento do revestimento de

base pode-se limitar esta concentração à níveis não prejudiciais à saúde humana e ao meio ambiente (BOSCOV, 2008). Ao longo do tempo a concepção do revestimento de base sofreu modificações que incorporaram novas tecnologias e experiências adquiridas com a execução dos aterros sanitários. A Figura 2.4 apresenta a evolução destas concepções segundo uma cronologia proposta por Qian, Koerner e Gray (2002).

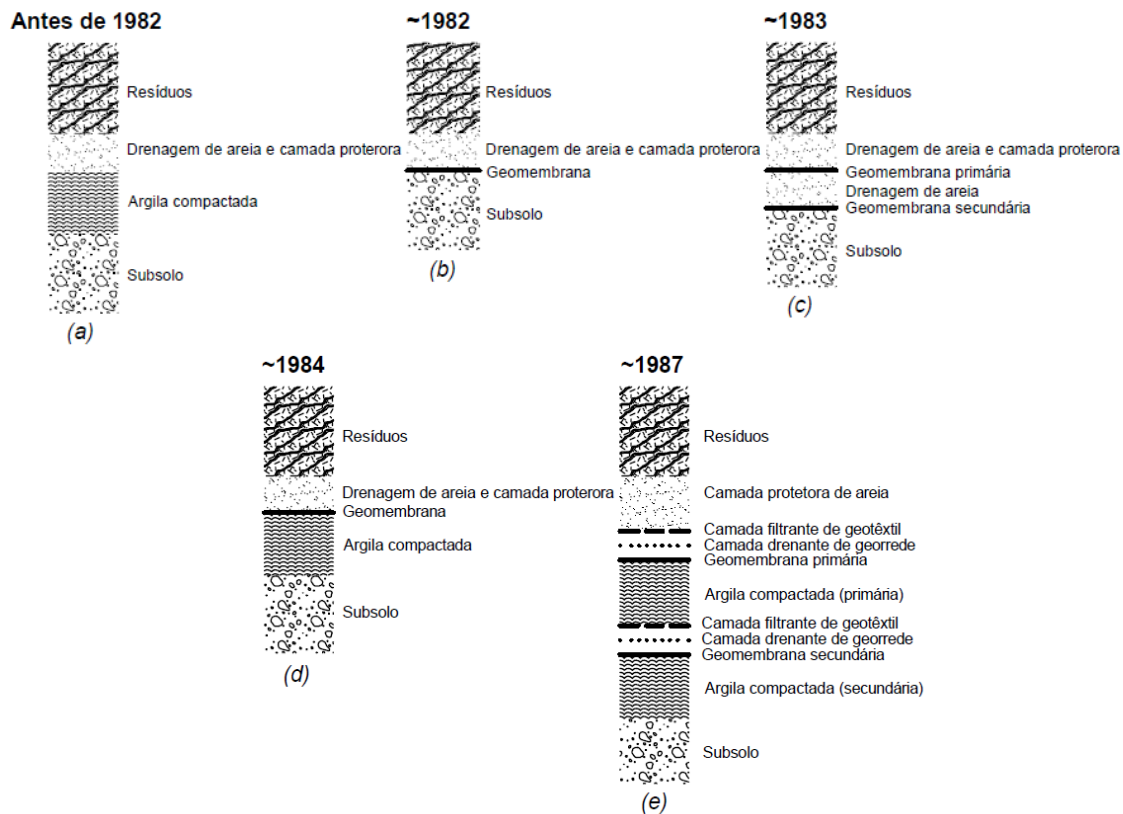


Figura 2.4 - Evolução temporal da camada de revestimento de base (a) Camada única de solo argiloso compactado (b) Camada única de geomembrana (c) Camada dupla de geomembrana (d) Camada composta simples (e) Camada composta dupla.

Modificado de Qian, Koerner e Gray (2002).

Na Figura 2.4 são mostrados elementos impermeabilizantes, filtrantes e drenantes, cuja ação conjunta é necessária para o correto desempenho do revestimento de base. Aspectos relativos aos elementos filtrantes e drenantes serão abordados nas seções 2.5.2 e 2.5.3, que tratam do sistema de coleta e remoção de percolados e gases, cabendo notar que tal divisão tem cunho puramente didático, uma vez que os sistemas trabalham conjuntamente. Protagonizam no revestimento de base os materiais impermeabilizantes pois são eles os responsáveis por prover a proteção ambiental por contenção dos percolados de um aterro sanitário.

Os materiais impermeabilizantes apresentados na Figura 2.4 podem ser distinguidos quanto a sua origem, que pode ser natural ou industrial. Estes caracterizam-se por possuir propriedades que minimizam o transporte de contaminantes para o lençol freático. Transporte este que ocorre pela combinação dos fenômenos de advecção e difusão, em que o primeiro é motivado por um gradiente hidráulico e o segundo por um gradiente de concentrações de soluto (SHACKELFORD, 1993). A escolha apropriada do material impermeabilizante é efetuada confrontando-se as propriedades do mesmo ao tipo do resíduo e operação do aterro (BAGCHI, 2004).

Os materiais destinados a contenção do transporte de contaminantes podem ser tanto naturais quanto frutos de um processamento industrial, e sua utilização pode ser feita de maneira associativa, como mostrado na Figura 2.4. No âmbito dos materiais de origem natural os solos argilosos são amplamente utilizados em aterros sanitários de resíduos (BAGCHI, 2004; O'LEARY; TCHOBANOGLOUS, 2002). A utilização de argilas deve-se, principalmente, a sua baixa condutividade hidráulica quando comparada aos demais solos. Segundo Daniel (1993) os materiais argilosos podem ocorrer em um revestimento de base sob três formas distintas: argilas de ocorrência natural, argilas compactadas (CCL) e geocompostos bentoníticos (GCL). Este último apesar de ter argila em sua constituição é um produto industrial.

A primeira destas formas é caracterizada como sendo formações naturais de solo rico em argila e com baixa condutividade hidráulica (DANIEL, 1993). Apesar da aparente vantagem econômica, por não necessitar transporte dos solos, tal utilização na realidade pode ser onerosa e ineficiente, uma vez que demanda um programa de investigações intensivo para que sejam atestadas a integridade – entendida como a continuidade da camada argilosa – e a baixa condutividade hidráulica desta camada (DANIEL, 1993).

Outra utilização de argilas como elementos impermeabilizantes é sob a forma de camadas compactadas, geralmente motivada pela não adequabilidade da camada natural existente (ROWE, 2001). O propósito de promover a compactação é a diminuição da permeabilidade do solo, e isto é obtido mediante a quebra do arranjo floculado das partículas transformando-o em disperso, o que diminui o tamanho dos poros e torna sua distribuição mais tortuosa (BAGCHI, 2004). Porém, a significância com que se processa

esta alteração do arranjo e a qualidade da camada compactada são dependentes de diversos fatores, dentre os quais pode-se mencionar, segundo Rowe (2001): características do solo utilizado, método de compactação, teor de umidade de compactação e proteção contra o fenômeno de ressecamento pós-compactação. Tais fatores são intervenientes em quaisquer obras de engenharia que envolvam a compactação de solos argilosos, porém, ressalta-se que no contexto específico de aterros sanitários ainda pode-se salientar a susceptibilidade à alterações das propriedades da camada compactada devido à composição química do percolado (BAGCHI, 2004), o atrito de interface com materiais subjacentes e sobrejacentes e a capacidade de deformar-se, devido à recalques, sem formação de fissuras (QIAN; KOERNER; GRAY, 2002). Devido ao desenvolvimento da indústria de polímeros surgiram novos materiais com potencial para aplicação como revestimento de base para aterros sanitários. No campo dos geossintéticos o principal material utilizado como camada impermeabilizante do revestimento de base é a geomembrana (KOERNER, 1993). Há uma ampla variedade de polímeros utilizados na fabricação de geomembranas e que diferem entre si com relação a suas propriedades mecânicas, resistência à agentes externos, sejam eles químicos, físicos ou biológicos, e trabalhabilidade (BAGCHI, 2004). Os fatores intervenientes na qualidade de uma camada compactada de argila têm estreita relação com o fato de solos apresentarem-se na natureza com características diversas. Em contrapartida, as geomembranas são produtos oriundos de um processo industrial que em geral possui excelentes padrões de controle de qualidade (KOERNER, 1993). Além disso, segundo Bagchi (2004), além de sua baixa condutividade hidráulica, suas propriedades quanto ao transporte difusivo de contaminantes são consideravelmente superiores quando comparadas a camadas de argila compactada.

Apesar de tanto as geomembranas quanto as camadas compactadas de argila já terem sido utilizadas como único elemento impermeabilizante de um revestimento de base a utilização associativa entre ambos é hoje a especificação mais frequente no projeto de aterros de resíduos (BOSCOV, 2008). Este uso associado permite agregar as vantagens intrínsecas de cada material e recebe a designação de camada composta, quando os materiais são associados durante a execução do revestimento de base, ou geocomposto bentonítico (GCL), quando a associação é oriunda de um processo industrial. Porém, a utilização mista destes materiais não se distingue apenas pela maneira com que são

associados, há diferenças substanciais quanto ao seu desempenho e comportamento. Os benefícios da utilização de camadas associadas em detrimento a uma camada simples de argila compactada se resumem a:

- Os possíveis defeitos de uma camada são amenizados pela existência da outra camada.
- A camada mineral pode ser isolada de fatores externos que possam afetar sua integridade.
- A incorporação de camadas sintéticas, por serem mais eficientes, permite uma redução da espessura do revestimento de base, e, portanto, um maior volume para disposição de resíduos.
- Melhor desempenho frente ao transporte do difusivo de contaminantes.

A associação entre materiais naturais e sintéticos se desenvolveu no sentido de agregar maior segurança à camada impermeabilizante, e chegou-se ao conceito de camada composta dupla, como mostrado na Figura 2.4 em que se nota a utilização de uma barreira dupla e composta de argila compactada e geomembrana associada ao sistema de drenagem de percolados, cuja disposição é favorável à detecção do desempenho dos materiais impermeabilizantes.

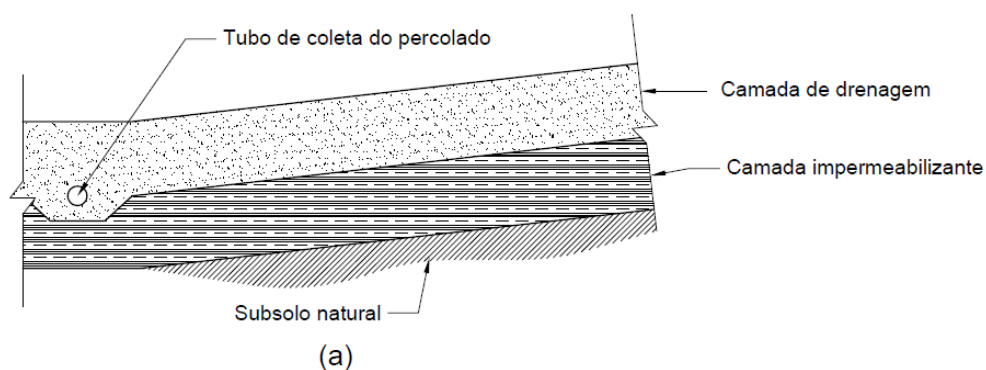
São diversas as maneiras de se garantir a contenção necessária à um aterro sanitário tendo em vista que atualmente há a disponibilidade de uma variedade de materiais e técnicas construtivas bem consolidadas. A escolha dos métodos e materiais recai inevitavelmente em aspectos econômicos e do grau de segurança que exige o aterro, o que está intimamente ligado, por sua vez, ao tipo de resíduo que será disposto (CHRISTENSEN; COSSU; STEGMANN, 1994).

2.5.2. Sistema de drenagem, coleta e remoção de percolados

Da mesma forma que o revestimento de base não é uma entidade única, e sim composta por elementos de outros sistemas, o sistema de coleta e remoção de percolados tem diversos componentes que estão distribuídos na área do aterro e desempenham cada um uma função específica que quando consideradas conjuntamente permitem a coleta dos percolados gerados, para tratamento ou disposição alternativa, e a redução da coluna de

percolado sobrejacente à camada impermeabilizante (MCBEAN; ROVERS; FARQUHAR, 1995).

A medida que se dá a geração de percolado no aterro, quer seja pela parcela infiltrada da precipitação ou pelo próprio conteúdo do resíduo, ou mesmo, por gravidade, pode eventualmente atingir a base da célula. Sendo assim, os principais elementos constituintes do sistema em questão são aqueles situados na base das células do aterro sanitário, e o seu adequado funcionamento está intimamente ligado à camada impermeabilizante de base anteriormente descrita. A Figura 2.5(a) mostra uma representação simplificada de um revestimento de base, no qual os elementos do sistema drenante foram alocados sobrejacentes à camada impermeabilizante. A principal característica da camada de drenagem é ter uma elevada condutividade hidráulica, de modo que o fluxo de percolado após atingir o topo inclinado da camada impermeabilizante seja predominantemente paralelo e na direção desta inclinação (MCBEAN; ROVERS; FARQUHAR, 1995), evitando o desenvolvimento de cargas hidráulicas elevadas e diminuindo o tempo de contato entre a camada impermeabilizante e o percolado. Um melhoramento da concepção mostrada na Figura 2.5(a) é representado na Figura 2.5(b), onde há uma camada de drenagem e de impermeabilização adicionais. Nota-se que neste caso é considerada a possibilidade da primeira camada impermeabilizante apresentar desvios de desempenho, e na eventual ocorrência disto, poder-se-ia detectar um fluxo de percolado anormal na tubulação coletora mais profunda. Porém, estes desvios de desempenho não acarretariam necessariamente na contaminação do subsolo natural dada a existência de uma segunda camada impermeabilizante.



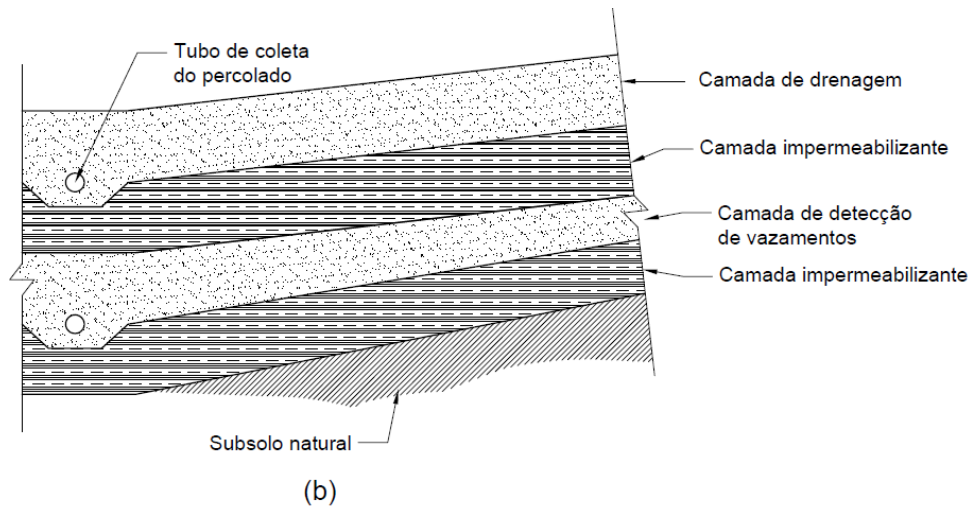


Figura 2.5 – Representação dos elementos típicos de drenagem contidos no revestimento de base. Sistema simples representado por (a) e mais sofisticado por (b). Adaptado de McBean, Rovers e Farquhar (1995).

Ambas as configurações mostradas na Figura 2.5 são do tipo tapete, em que as camadas drenantes recobrem toda a área impermeabilizada. Porém, podem ser encontradas outras configurações, como a espinha-de-peixe, em que os materiais drenantes são concentrados em trechos arranjados de maneira dendrítica (BOSCOV, 2008). A Figura 2.6 mostra configurações possíveis do sistema de drenagem e coleta de percolados.

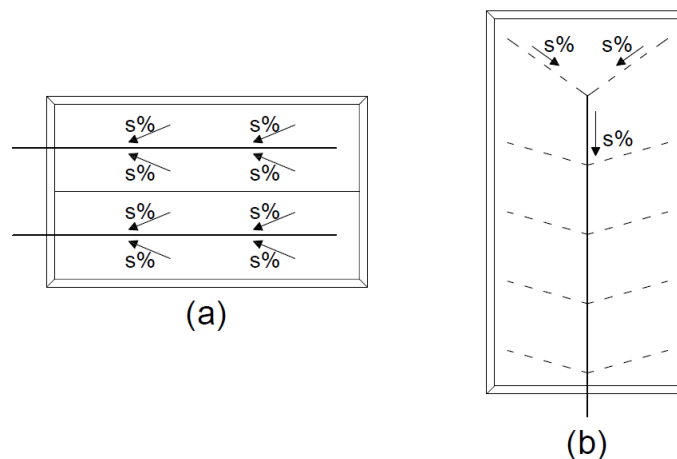


Figura 2.6 – Exemplo de configurações possíveis para os elementos de drenagem e coleta de percolados. (a) tapete (b) espinha de peixe. Adaptado de Boscov (2008) e McBean, Rovers e Farquhar (1995).

Vale ressaltar que nas configurações do tipo espinha-de-peixe - Figura 2.6(b) - os elementos tracejados estariam relacionados à drenagem do percolado, enquanto para um sistema do tipo tapete - Figura 2.6(a) - a drenagem se dá em toda a área do revestimento de base, sendo esta área como um todo o elemento de drenagem. As linhas cheias, por

sua vez, para ambas as configurações, representam elementos que se prestam a coletar os percolados drenados e que geralmente se apresentam na forma de trincheiras preenchidas com brita que envolve um tubo coletor, como apresentado na Figura 2.7.

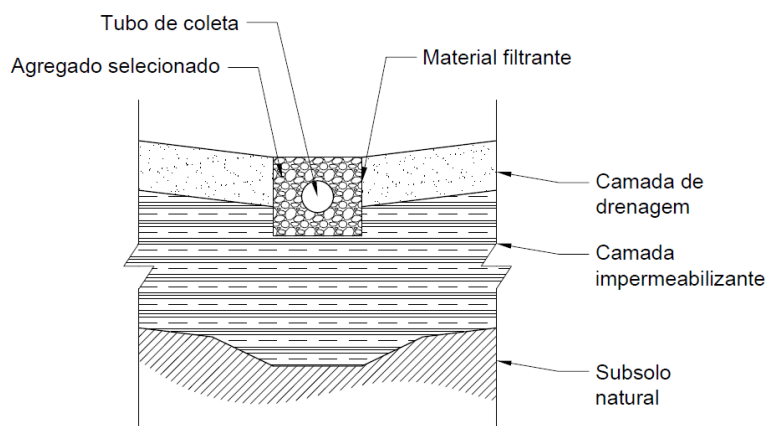


Figura 2.7 – Exemplo de trincheira coletora de percolados. Adaptado de Bagchi (2004)

O exemplo mostrado anteriormente diz respeito a uma trincheira usualmente utilizada em revestimentos de base cujo material impermeabilizante é argila compactada, sendo que, na existência de uma geomembrana, esta trincheira não adentra a camada impermeabilizante (BAGCHI, 2004). Segundo Qian, Koerner e Gray (2002) é normalmente exigido que a camada de argila compactada se estenda até maiores profundidades nas adjacências da trincheira, como observado na Figura 2.7, para que seja mantida a sua espessura mínima necessária nesta região. Ainda, segundo os mesmos autores, é essencial a alocação de materiais filtrantes nas interfaces da trincheira de brita e os demais materiais circundantes, evitando assim a entrada de partículas que acarretem a sua colmatção. A utilização de materiais naturais atuando como filtro deve se pautar nos critérios convencionais de filtro, em que há uma compatibilização das curvas granulométricas do material filtro e do material filtrado de modo a evitar os fenômenos de erosão retrogressiva (*“pipping”*) e garantir permeabilidade suficientemente grande, evitando o aparecimento de pressões hidrostáticas (KOERNER, 1993).

Utilizam-se tubos perfurados de material polimérico para tubulações de coleta, em que a furação deve estar localizada ao longo da metade inferior da seção do tubo, como mostrado na Figura 2.8, de modo que seja mantida a menor coluna de percolado possível,

e deve ter espaçamento tal que permita receber às vazões estimadas de percolado (QIAN; KOERNER; GRAY, 2002).

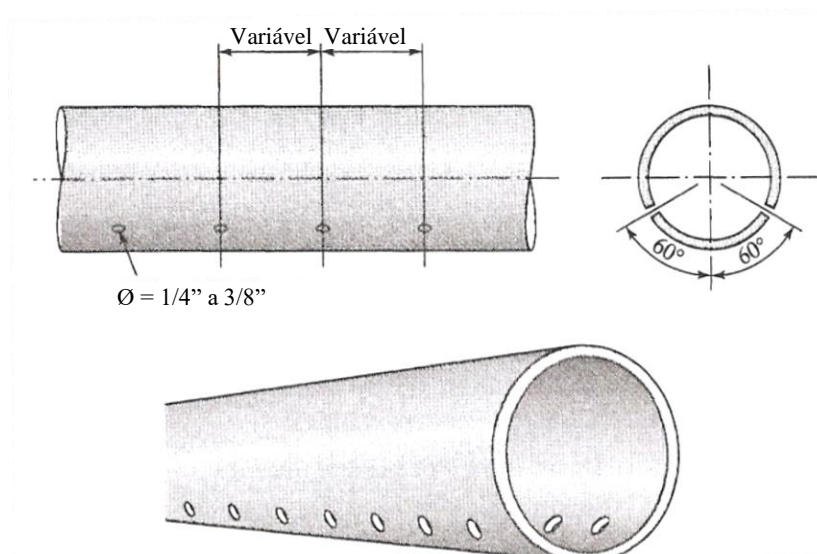


Figura 2.8 – Tubo perfurado utilizado em trincheiras de coleta de percolado. Modificado de Qian, Koerner e Gray (2002)

Assim como para as camadas impermeabilizantes a utilização de materiais sintéticos já é amplamente difundida para a criação de estruturas drenantes e filtrantes para o sistema em questão, e a opção por estas deve considerar as suas vantagens e desvantagens, assim como mostrado na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Vantagens e desvantagens do uso de geossintéticos em sistemas de drenagem e coleta de percolados. Adaptado de Koerner (1993)

Tipo	Vantagens	Desvantagens
<i>Meio drenante</i>		
Geomalha e Geocompostos	Economiza espaço vertical Transmissão rápida Raramente se entope Permanece imóvel	Intrusão Deformação lenta Necessita de filtro geotêxtil
<i>Meio filtrante</i>		
Geotêxtil	Economiza espaço vertical Fácil instalação Permanece imóvel	Entupimento por partículas Entupimento biológico Possíveis danos durante a instalação

Os elementos apresentados acima promovem a drenagem dos percolados gerados sendo necessário ainda elementos que o removam da área de disposição dos resíduos. Segundo Bagchi (2004) há duas maneiras com que tipicamente é promovida a retirada do

percolado: por gravidade ou bombeamento. Caso o nível da base do aterro for suficientemente raso pode-se optar por atravessar o revestimento de base dos taludes de contenção de resíduos com o próprio coletor principal, promovendo uma remoção por fluxo gravitacional. Por outro lado, caso o nível da base do aterro seja profundo torna-se impraticável a criação de um sistema que funcione por fluxo gravitacional, optando-se então pela criação de um sistema de bombeamento que colete o percolado no pé dos taludes de contenção e o transponha por cima destes. A remoção por fluxo gravitacional apresenta custos de implantação, operação e manutenção menores, porém, pelo fato desta penetrar na camada impermeabilizante de base criam-se, na interface, potenciais pontos vazamento de percolado, ainda que existam colares seladores especialmente projetados para amenizar tal problema. Portanto, é usual que, na adoção deste sistema, sejam minimizados os pontos de remoção – sendo comum a utilização de apenas um ponto de remoção – visando diminuir a probabilidade da ocorrência de vazamentos. Na remoção por bombeamento as chances de vazamento são mínimas, permitindo a criação de diversos pontos de remoção sem prejudicar o desempenho da camada impermeabilizante. Um maior número de pontos de remoção diminui a vulnerabilidade do aterro quanto às falhas nestes pontos, fato este que não é observado no sistema por fluxo gravitacional.

2.5.3.Sistema de coleta e controle de gases

Além dos percolados, a decomposição bioquímica dos resíduos dispostos é ainda responsável pela produção de diversos gases – com predominância de gás carbônico e metano – para os quais são empregados sistemas que previnam a movimentação descontrolada destes para a atmosfera (TCHOBANOGLIOUS, G., O’LEARY, P. R, 2002). Se por um lado o gás carbônico migra para a base do aterro, por ser mais denso que o ar, sendo eliminado juntamente com o percolado, o metano, por ser menos denso que o ar, tende a ter fluxo ascensional ou lateral (KOERNER, 1993). Portanto, os sistemas em geral são destinados à coleta e controle do metano, notando-se que a própria camada de impermeabilização de base atua como uma barreira para o gás carbônico.

Tchobanoglous e O’Leary (2002) classificam os sistemas em ativos ou passivos, sendo que a opção por um ou por outro pode depender da localização do aterro, e da quantidade de gás produzida. O sistema passivo, por exemplo, tem como princípio criar caminhos preferenciais para o fluxo de gás que, se produzido em taxas suficientes, é motivado pela

própria pressão no qual está acondicionado no interior do aterro. Eventualmente, a produção de gás pode ser limitada, e neste caso faz-se necessária a utilização de um controle ativo, que é responsável pela aplicação de um diferencial de pressões que promova a retirada de gases do interior do aterro.

A concepção do sistema de controle passivo está relacionada à criação de caminhos preferenciais pelos quais ocorrerá o fluxo dos gases. Estes caminhos preferenciais podem ser criados de maneiras diversas, e um modelo usual, segundo Boscov (2008), é pela criação de drenos verticais e camadas horizontais interligadas. Os drenos verticais são constituídos de tubos perfurados de concreto envoltos por material, granular, usualmente brita, que se estendem desde a superfície do aterro até sua base. A Figura 2.9 ilustra a instalação destes drenos. É essencial que existam camadas drenantes horizontais interligadas a estes drenos, promovendo o direcionamento dos gases.

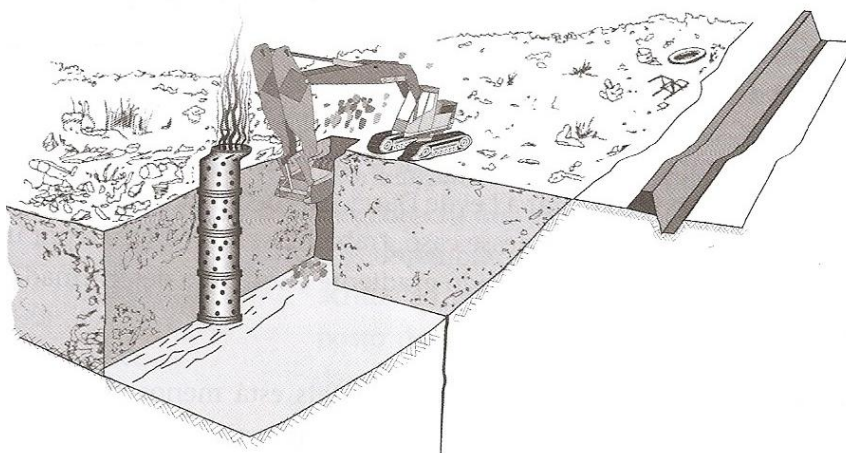


Figura 2.9 – Instalação de dreno vertical de gases (IPT, 2000)

Havendo a necessidade de utilizar um controle ativo devem ser instalados poços de extração aos quais é ligado um mecanismo hidráulico capaz de gerar vácuo e por sua vez induzir o fluxo de gases para estes poços (BAGCHI, 2004). A Figura 2.10 ilustra um sistema de controle ativo por poços de extração vertical. É usual que estes poços sejam dispostos desta forma, porém, é reportado na literatura a possibilidade de utilizar trincheiras horizontais, constituídas de tubulação perfurada envolta por brita, em associação com poços de extração verticais (TCHOBANOGLIOUS, G., O'LEARY, P. R., 2002).

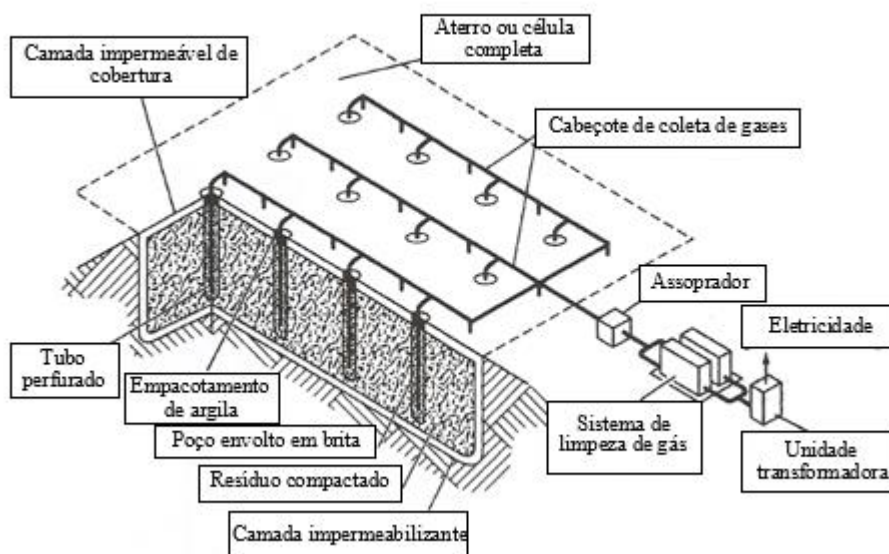


Figura 2.10 – Componentes do sistema ativo de captação de retirada de gás. Modificado de Tchobanoglous e O’Leary (2002).

Os gases tendo sido coletados do interior do aterro podem ter destinações distintas. A primeira delas diz respeito à combustão destes gases em uma unidade de combustão controlada. É reconhecido, como colocado por Qian, Koerner e Gray (2002), que a combustão destes gases é uma medida com maior adequação ambiental para o controle de odores do que a ventilação passiva. A queima destes gases deve ser realizada em unidades apropriadas, de maneira que sejam garantidas rigorosas especificações operacionais no sentido de garantir que a combustão efetiva dos gases, tanto os principais quanto os gases traço, seja obtida. Além disso, as unidades destinadas a este fim devem ser munidas de dispositivos de segurança capazes de isolar a chama de combustão dos coletores de gases e do meio externo (TCHOBANOGLIOUS, G., O’LEARY, P. R, 2002). Dado que o metano é um dos principais gases gerados no aterro têm-se a opção de aproveitar o poder calorífico deste. Neste sentido, podem-se alocar no próprio aterro plantas de reaproveitamento energético destes efluentes, onde, primeiramente, pode ser necessária uma purificação destes a fim de que tenham poder calorífico adequado para que sua combustão se preste a ser fonte primária de energia para geradores (QIAN; KOERNER; GRAY, 2002). A adoção por uma ou outra destinação está sujeita a estudos de viabilidade econômica e à requisitos da legislação ambiental local.

2.5.4. Revestimento de cobertura

Similarmente ao revestimento de base, o revestimento de cobertura é um elemento do aterro sanitário que possui funções múltiplas e, por sua vez, os materiais que o constituem estão usualmente relacionados a outros elementos e sistemas, mas que, por fim, desempenham, em conjunto, as funções para as quais o revestimento de cobertura é projetado. Estas funções, de acordo com Boscov (2008), consistem em: promover o isolamento entre os resíduos e o meio ambiente externo, controlar o fluxo de gases entrando e saindo do aterro, diminuir a produção de percolados por meio da redução da infiltração de água na massa de resíduos. O revestimento de cobertura, portanto, é usualmente concebido como na Figura 2.11. Porém, deve-se ressaltar que a constituição da cobertura pode ser extremamente variável e geralmente não pode ser generalizada para todos tipos de aterros, uma vez que é função direta do local de implantação e do tipo de resíduo a ser disposto (DANIEL; KOERNER, 1993).

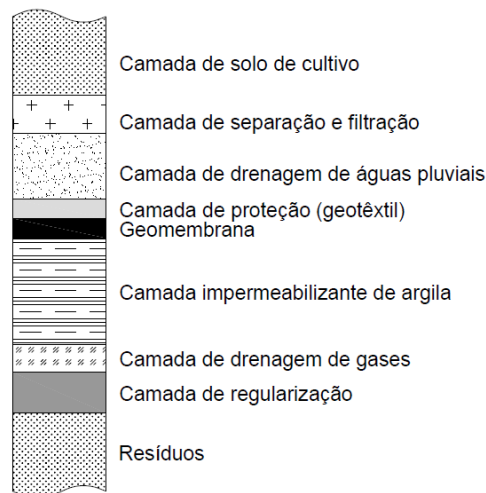


Figura 2.11 – Materiais constituintes do revestimento de cobertura. Adaptado de Boscov (2008)

Pela Figura 2.11 pode-se fazer uma análise da função individual de cada material, e também de sua função complementar, que por sua vez viabilizam o correto desempenho dos demais. A camada superior de solo de cultivo, por exemplo, presta-se a promover o crescimento de vegetação cuja finalidade é dupla, a de retornar água a atmosfera por meio da evapotranspiração e ainda promover certa estabilização do solo de cobertura, evitando a sua erosão (DANIEL; KOERNER, 1993). A camada inferior a esta, sendo denominada de separação e filtração, previne que as raízes da vegetação penetrem nas camadas subjacentes, o que pode eventualmente prejudicar o desempenho destas, e ainda tem o papel de evitar o carreamento de partículas do solo de cultivo para a camada drenante

subjacente. Este modo de disposição de camadas é adequado para certos tipos de aterros, como por exemplo, aqueles localizados em regiões cuja precipitação permita a manutenção da vegetação superficial. Para regiões áridas uma solução de projeto seria a substituição da camada de solo de cultivo por uma camada de seixos, e subjacente a esta, uma camada de solo que permitiria certo armazenamento de água e consequente perda de parcela desta água por evaporação (DANIEL; KOERNER, 1993).

Sendo que uma das principais funções do revestimento de cobertura é o de minimizar a infiltração de água para a massa de resíduos, faz-se necessária a associação de uma camada drenante associada a camada impermeabilizante, drenando então a água infiltrada e acumulada nesta região. Segundo Daniel e Koerner (1993), esta camada ainda tem as funções adicionais de reduzir as poropressões da região, o que confere maior estabilidade aos taludes, e de drenar as camadas superiores, aumentando assim a sua capacidade de armazenamento de água. Assim como na camada de drenagem de percolados, é comum a substituição ou associação entre materiais naturais e materiais sintéticos, sendo as geomalhas e os geocompostos drenantes de utilização mais correntes (BOSCOV, 2008). Uma vez que a água se infiltra e, é drenada por esta camada, esta deve ser direcionada à periferia do aterro onde então é realizada a sua coleta.

É usual que se considere a camada impermeabilizante como protagonista do esquema ilustrativo representado na Figura 2.11, e isto é coerente ao se constatar que as funções dos demais materiais, mencionados acima, estão relacionadas a remediação das consequências da existência desta e viabilização do seu correto funcionamento. Tipicamente, para resíduos sólidos urbanos, utiliza-se apenas a camada de argila compactada como material impermeabilizante do revestimento de cobertura, porém, a depender das características do resíduo pode ser necessária a adição de uma camada de geomembrana (DANIEL; KOERNER, 1993). A camada impermeabilizante de cobertura está sujeita a solicitações que não necessariamente estão presentes naquela localizada no revestimento de base do aterro. Pode-se mencionar como sendo a principal destas solicitações àquela devido aos recalques totais e diferenciais sofridos pela massa de resíduos que subjaz a camada de cobertura, podendo ocasionar a formação de trincas de tração que reduzem a estanqueidade da camada (BOSCOV, 2008). A adição de uma geomembrana entre as camadas superiores e a camada de solo compactado, como na

Figura 2.11, além de prover maior estanqueidade, pode ter ainda a função complementar de evitar a formação de trincas devido aos ciclos de molhagem e secagem (CORSER, CRANSTON, 1991 apud DANIEL; KOERNER, 1993).

A camada de drenagem de gases necessariamente subjaz as camadas de impermeabilização, uma vez que estas são responsáveis por reter o fluxo de gases e direcioná-los aos drenos verticais já mencionados na seção anterior. Portanto, sua composição deve ser necessariamente de material drenante. Quando natural, utiliza-se areia ou brita, e na existência de uma camada de argila compactada sobrejacente, um material com propriedades filtrantes é geralmente necessário (DANIEL, KOERNER, 1993). Em substituição aos materiais granulares são utilizados geotêxteis espessos, geomalhas ou geocompostos drenantes.

2.6. Sistemas de monitoramento e controle para um aterro sanitário

O aterro sanitário é por definição uma estrutura destinada à disposição ambientalmente adequada de resíduos sólidos por meio do funcionamento conjunto e complementar dos diversos elementos que o compõe, funcionamento este que demanda um monitoramento continuado ao longo de sua operação. Cabe salientar que, sob outra ótica, o aterro sanitário pode ser entendido como uma obra geotécnica e, como tal, necessita de monitoramento sistemático de sua estabilidade estrutural. Portanto, é conveniente realizar a classificação dos sistemas de monitoramento e controle em geotécnicos e ambientais. Não obstante, tal divisão é feita apenas de maneira didática, uma vez que, por exemplo, o monitoramento da estabilidade estrutural no âmbito geotécnico implica indiretamente na prevenção de impactos ambientais decorrentes de uma ruptura devido a instabilidades no maciço do aterro sanitário.

2.6.1. Sistema de controle e monitoramento geotécnico

O sistema de monitoramento geotécnico resume-se a instrumentação de um aterro sanitário possibilitando que esta forneça variáveis necessárias à avaliação da condição de estabilidade estrutural do aterro. Neste contexto, a instrumentação tipicamente instalada em aterros sanitários visa a obtenção de variáveis tais como os recalques e deslocamentos horizontais do maciço de resíduos, as pressões neutras e níveis de percolado, e aquelas relacionadas ao desempenho do sistema de drenagem de percolado (BOSCOV, 2008)

Em se tratando de resíduos sólidos o arcabouço teórico existente voltado para a descrição de suas propriedades mecânicas é consideravelmente mais restrito do que para solos. Os mecanismos que governam, por exemplo, os recalques e deslocamentos horizontais em solos já foram intensamente estudados e há um consenso sobre eles na comunidade científica. Apesar disso, não há na literatura certo consenso quanto aos mecanismos que regem estes mesmos fenômenos associados aos resíduos sólidos, e estes distinguem-se dos solos principalmente devido à pronunciada alteração físico-química e degradação bioquímica que sofrem com o tempo (QIAN; KOERNER; GRAY; 2002). A instrumentação típica utilizada para medir tais deslocamentos é geralmente constituída de marcos superficiais e instrumentos que permitem medir deslocamentos em profundidade, assim como apresentado na Tabela 2.2..

Tabela 2.2 – Instrumentação típica para monitoramento de deslocamentos. Adaptado de Affonso (2004).

Instrumentação	Tipo de medição	Vantagens	Desvantagens
Marco superficial	Deslocamentos verticais e horizontais totais	Baixo custo e facilidade de instalação	Fornece apenas os deslocamentos totais de superfície; devem estar visíveis
Inclinômetro	Perfil de deslocamentos horizontais	Obtenção de deslocamentos horizontais em profundidade	Alto custo de aquisição e instalação
Medidor magnético de recalque	Deslocamentos verticais em profundidade	Facilidade de construção e instalação e obtenção de medidas em número ilimitado de profundidades	Leitura relativamente demorada e com precisão limitada
Medidor telescópico de recalques	Deslocamentos verticais em profundidade	Simplicidade de construção e leitura e boa durabilidade	Número de medidas restrito ao número de placas, ou seja, no máximo 4 medidas

O controle e monitoramento dos recalques e deslocamentos horizontais evita que tais deslocamentos acarretem em um desempenho inadequado dos elementos do aterro, quando estes são susceptíveis a tais tipos de solicitação, como por exemplo o surgimento de trincas no revestimento de cobertura, devido à recalques diferenciais. Outra função do controle e monitoramento destas variáveis é a verificação da instabilidade do maciço de resíduos, apesar de que é comum se obterem deslocamentos superiores aos de solo sem que isso indique necessariamente a instabilidade do maciço (BOSCOV, 2008).

Complementar ao monitoramento dos deslocamentos do maciço de resíduos é de grande relevância o registro das poropressões e dos níveis de percolado no maciço de resíduos. Para este fim são utilizados piezômetros e medidores de nível d'água. A Figura 2.12 apresenta a instrumentação típica utilizada na obtenção destas variáveis. Ressalta-se que a utilização do piezômetro Casagrande quando em camadas de baixa permeabilidade pode estimar valores não representativos de pressões neutras devido ao fenômeno de dissipação temporal destas pressões na camada em questão.

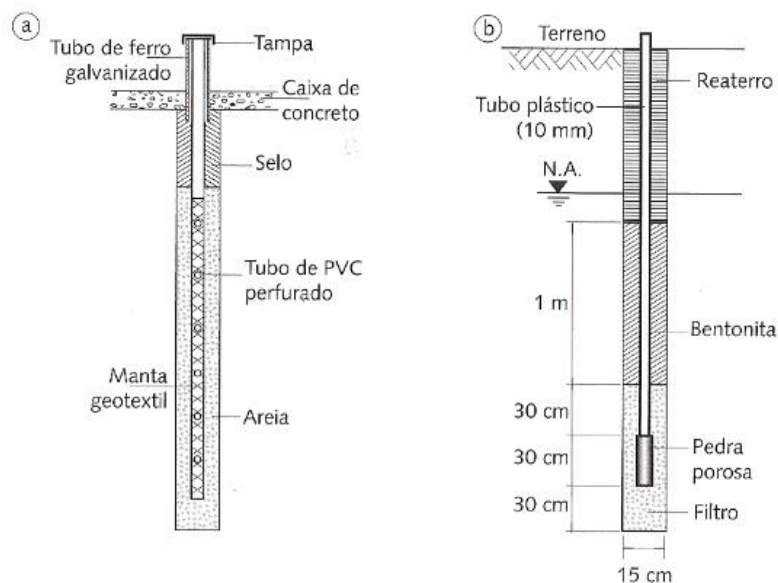


Figura 2.12 – Instrumentação utilizada no monitoramento geotécnico de aterros sanitários. (a) Medidor de nível d'água/percolado (b) Piezômetro Casagrande (BOSCOV, 2008).

Dada a heterogeneidade de um maciço de resíduos, e, portanto, do grau de incerteza acerca de suas propriedades hidromecânicas, é essencial o monitoramento in-situ destas variáveis, permitindo assim que se realize, por retroanálise, um aperfeiçoamento

continuado destas propriedades, que são usualmente estimadas nas fases de concepção e elaboração do projeto. Especificamente em aterros de resíduos as medidas de níveis de percolado e de pressões neutras podem ser de difícil interpretação, uma vez que podem ocorrer níveis diferenciados de percolado ao longo da profundidade, devido à possível estanqueidade das células, o que invalida também a hipótese de variação linear das pressões neutras com a profundidade (BOSCOV, 2008).

As poropressões e níveis de percolado estão indiretamente relacionados ao funcionamento do sistema de drenagem de percolado. O funcionamento inadequado deste, portanto, é um potencial causador de instabilidades do maciço de resíduos, podendo ocasionar sua ruptura, assim como já relatado na literatura (MÜNNICH; BAUER, 2006 apud BOSCOV, 2008). Logo, além de monitorá-lo de maneira indireta pelo monitoramento das poropressões e níveis de percolado, podem-se também monitorar as vazões de percolado conduzidas por ele, visando a identificação de situações patológicas como, por exemplo, a sua colmatação. É comum que este monitoramento se dê apenas no ponto de descarga do sistema de coleta no reservatório de percolado, o que permite inferir sobre a integridade do sistema de drenagem como um todo.

Além do monitoramento das variáveis acima mencionadas monitora-se ainda, de maneira menos usual, as tensões totais, por células de carga, os parâmetros de resistência e deformabilidade, por provas de carga, e as propriedades hidráulicas da camada de cobertura e dos resíduos, por ensaios *in-situ* (BOSCOV, 2008). Ressalta-se que este tipo de monitoramento não é normalmente realizado, devido a um custo mais elevado da instrumentação utilizada, porém, é fato que a sua realização permitiria obter parâmetros e variáveis que conduziram a obtenção de um panorama mais realista das condições do aterro.

2.6.2. Monitoramento ambiental

Dada a sua natureza potencialmente impactante do meio ambiente, um aterro sanitário deve realizar monitoramento que permita verificar que as soluções mitigadoras destes impactos estão sendo efetivas. Este monitoramento é denominado de monitoramento ambiental e compreende o controle da qualidade das águas subterrâneas e superficiais, do solo e do ar.

A proteção dos recursos hídricos na área de influência de um aterro sanitário é uma das principais diretrizes ambientais que justificam a adoção de sistemas de monitoramento das águas subterrâneas e superficiais. Para o monitoramento dos aquíferos, para a qual os percolados dos resíduos podem percolar em uma situação de desempenho inadequado do aterro, são usualmente utilizados poços de monitoramento. Em seções posteriores será visto que a locação e a quantidade destes poços é normatizada. Esta exige certa quantidade de poços a montante e a jusante do fluxo hidrogeológico. Os poços de montante permitem estabelecer os níveis de referência para a avaliação da qualidade observada nos poços de jusante. Detalhe importante, como apontado por Boscov (2008), é que a locação dos poços de montante deve ser realizada a uma distância tal que estes não sejam influenciados pela difusão dos poluentes, ao passo que os poços de jusante devem ser localizados o mais próximos possíveis da região de disposição de resíduos, visando a rápida detecção de desvios de qualidade da água. Porém, a locação destes poços não se restringe apenas à critérios de proximidade para com a área de disposição, uma vez que as condições hidrogeológicas são singulares à cada região. Pode-se citar, por exemplo, uma situação em que uma camada de considerável capacidade drenante situada acima do nível freático e apoiada em uma camada de solo com baixa permeabilidade, como indicado na Figura 2.13. Neste caso, a pluma de contaminação poderia assumir formato pouco disperso, dificultando assim sua detecção por poços de monitoramento. Portanto, eventualmente a pluma atingiria o aquífero empoleirado mostrado e seu efeito não poderia ser detectado por poços de monitoramento, que seriam perfurados até o nível freático. Propõe-se que a instalação de poços de monitoramento, em casos onde a hidrogeologia local é complexa ou desconhecida, seja conduzida em fases alternadas às campanhas de investigação do subsolo, situação na qual as investigações subsidiam a tomada de decisão quanto à locação dos poços, e vice-versa (KENT; HEMINGWAY, 1993).

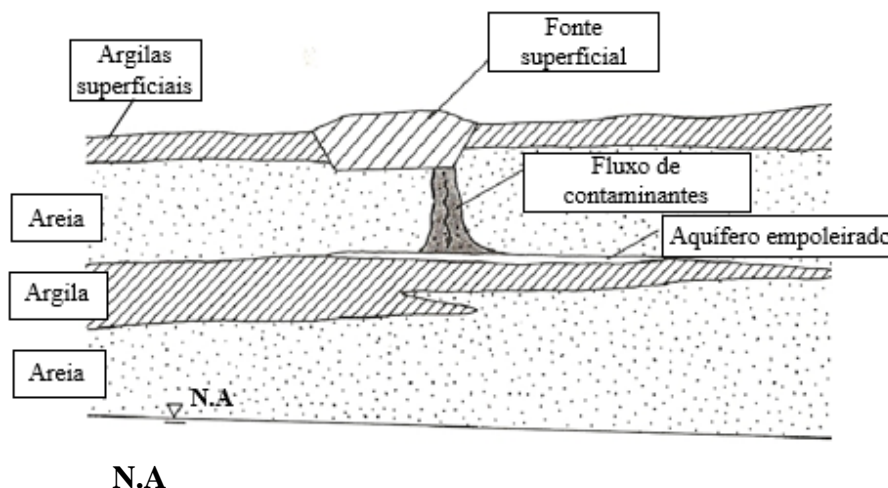


Figura 2.13 – Esquema representando a propagação dos contaminantes em uma camada rasa e não saturada de solo permeável. Modificado de Kent e Hemingway (1993)

Eventualmente, devido ao contexto hidrogeológico, os contaminantes podem atingir também as águas superficiais tanto pelos fluxos de base e subsuperficiais quanto pelo fluxo superficial, que de alguma forma esteve em contato com os resíduos dispostos. Logo, o monitoramento de cursos d'água ou reservatórios próximos ao aterro sanitário é também de grande relevância para o monitoramento ambiental do mesmo.

Em casos como o mostrado na Figura 2.13 a detecção da contaminação se faz ainda mais complexa devido ao fato da mesma restringir-se a zona vadosa. Os contaminantes neste caso não adentrariam os poços de monitoramento e poderiam se encontrar aderidos aos grãos de solo produzindo uma tensão de atração tal entre estes que seria necessária instrumentação específica para identificá-los. Nestes casos, podem ser utilizados lisímetros, que são instrumentos especialmente utilizados para a amostragem de fluídos em meios não saturados. Em geral, estes instrumentos constituem-se de um tubo ao qual acopla-se um segmento poroso, segmento este que quando colocado no solo entra em equilíbrio, quanto ao teor de fluído, com o solo. A aplicação de uma pressão negativa neste segmento, menor que aquela em que o fluído se encontra no solo, estabelece um fluxo deste fluído do solo para o interior deste, possibilitando assim sua coleta (EVERETT, 1993).

As amostras obtidas do monitoramento ambiental devem ser comparadas a padrões de qualidade ambiental estabelecidos pela legislação ambiental existente de modo que se

possa verificar a necessidade de se realizarem intervenções caso estas amostras não se adequem aos padrões estabelecidos.

2.7. Resoluções CONAMA

O Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) é um órgão colegiado de caráter deliberativo e consultivo. Diz-se que este é um órgão colegiado pois é constituído de representantes de diferentes segmentos e que estão diretamente interessados na temática ambiental, sendo estes o Governo Federal, os governos estaduais e municipais, o setor empresarial e a sociedade civil.

Na medida em que os aterros sanitários se situam na categoria de obras de engenharia com considerável potencial impactador do meio ambiente, principalmente dos recursos hídricos, é de interesse da federação e da sociedade civil determinar a realização de estudos de todas as alternativas e consequências possíveis da implantação de um aterro sanitário de modo a promover a manutenção da qualidade do meio ambiente e, uma vez que haja esta garantia, licenciar as atividades relacionadas a esta implantação. Neste sentido, compete ao CONAMA a elaboração de normas e critérios relativos à manutenção da qualidade do meio ambiente, em que se idealiza uma utilização racional dos recursos deste, e ao processo de licenciamento.

O regimento interno do CONAMA é composto por diversas instâncias que se relacionam segundo determinado modelo organizacional, cujo detalhamento está fora do escopo deste trabalho, em prol da emissão de resoluções, que são basicamente as matérias colocadas em discussão por estas instâncias e que por fim passam pela aprovação do Plenário e são publicadas no Diário Oficial da União. Serão apresentadas nesta seção as principais resoluções que estão relacionadas a implantação, execução e operação de um aterro sanitário, e os aspectos referentes a adequação destas etapas às resoluções mencionadas.

Atualmente um dos principais instrumentos pelo qual realiza-se a gestão ambiental de atividades, ou empreendimentos, nos quais atividades efetiva ou potencialmente poluidoras são desempenhadas é o licenciamento ambiental. A Resolução CONAMA n° 237/1997 (CONAMA, 1997) define os critérios e procedimentos necessários para tal. A

localização, construção, ampliação, modificação e operação destas atividades dependem de um prévio licenciamento do órgão ambiental competente. É proposta uma relação de atividades que são enquadradas como descrito anteriormente, por meio da qual infere-se que os aterros sanitários são empreendimentos sujeitos a licenciamento ambiental. A licença ambiental, por sua vez, só poderá ser garantida mediante a apresentação dos Estudos de Impacto Ambiental (EIA) e do Relatório de Impactos Ambientais (RIMA) resultante destes estudos. O conteúdo mínimo exigido destes documentos é regulamentado pela Resolução CONAMA n° 1/1986 (CONAMA, 1986). Mediante a apresentação destes documentos o poder público expedirá a licença ambiental, que é usualmente subdividida em partes, a depender da natureza, característica ou fase do empreendimento. Estas partes são representadas pela Licença Prévia (LP), Licença de Instalação (LI) e Licença de Operação (LO), e a obtenção destas está condicionada ao fornecimento de documentação específica, como apresentado na Figura 2.14. Estas documentações são aquelas exigidas segundo instrução técnica para requerimento de licenças para aterros sanitários proposta pelo Instituto Estadual do Ambiente do Rio de Janeiro (INEA-RJ, 1994).

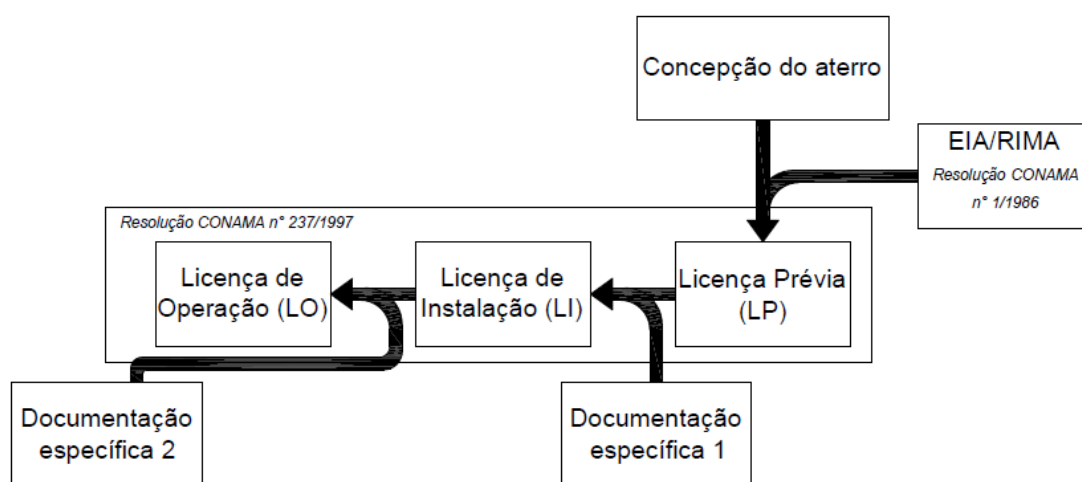


Figura 2.14 – Fluxograma do processo de licenciamento ambiental

Na obtenção da licença prévia faz-se necessária a apresentação do EIA/RIMA, assim como salientado na Figura 2.14. Para o caso de aterros destaca-se como um dos principais itens do EIA/RIMA a definição, dentre possíveis alternativas, de um lugar adequado para sua alocação. Esta definição deve ser balizada de acordo com a legislação ambiental

existente, cuja composição inclui certas Resoluções do CONAMA, e demais aspectos levantados pelos diagnósticos dos meios físicos, biológicos e sócio-econômicos das áreas em estudo. Usualmente as Resoluções CONAMA se prestam a embasar critérios eliminatórios na escolha das possíveis localizações do aterro sanitário. O CONAMA é o órgão consultivo e deliberativo por trás do Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza (SNUC) e, portanto, estabelece as diretrizes acerca da delimitação e utilização destas áreas. Por exemplo, a Resolução n° 12/1989 (CONAMA, 1989) determina a proibição de quaisquer atividades que possam colocar em risco a conservação de ecossistemas, a proteção especial a espécies de biota localmente rara e a harmonia paisagística em Áreas de Relevante Interesse Ecológico (ARIE), que compõem as unidades de conservação de uso sustentável. Constam também no arcabouço legislativo ambiental de autoria do CONAMA resoluções que promovem a delimitação e definição de diferentes tipos de unidade de conservação, que é o caso da Resolução n° 303/2002 (CONAMA, 2002), na qual se estabelecem os critérios para definir e limitar Áreas de Proteção Permanente (APP). A observância destas resoluções, e de legislações de âmbito municipal e estadual, durante os estudos de impacto ambiental da implantação do aterro, subsidiam uma primeira etapa da escolha da futura localização do aterro, que é a de eliminação das alternativas cujas localizações estejam em desacordo com as definições estabelecidas.

Definida a localização apropriada, os estudos de impacto ambiental devem avaliar a maneira com a qual a implantação e operação do aterro afetariam esta área e, pela comparação com padrões de qualidade ambiental exigidos e pelo tipo de resíduos que serão recebidos pelo aterro, propor uma concepção do projeto a ser implantado. Estes padrões são definidos por resoluções existentes que os fixam de modo a criar níveis de qualidade que devem ser respeitados pelas partes que desempenham atividades efetiva ou potencialmente poluidoras do meio ambiente. Em se tratando de aterros sanitários, estas resoluções, bem como os principais aspectos abordados por elas, são listadas na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Resoluções CONAMA, e seus principais aspectos abordados, relevantes à concepção e dimensionamento dos elementos do aterro.

Resolução	Aspectos abordados
Resolução nº 357, de 17/03/2005	<ul style="list-style-type: none"> · Padrões e condições de lançamento de efluentes · Classificação dos corpos d'água
Resolução nº 396, de 03/04/2008	<ul style="list-style-type: none"> · Classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento de águas subterrâneas
Resolução nº 1, de 08/03/1990	<ul style="list-style-type: none"> · Critérios e padrões da emissão de ruídos oriundos de atividades diversas
Resolução nº 358, de 29/04/2005	<ul style="list-style-type: none"> · Diretrizes relacionadas a disposição final de resíduos de saúde.
Resolução nº 420, de 28/12/2009	<ul style="list-style-type: none"> · Critérios e valores visando a orientação quanto a qualidade do solo na presença de substâncias químicas · Atividades de prevenção e controle da qualidade do solo · Diretrizes para o gerenciamento das áreas contaminadas

Estes aspectos supracitados eventualmente, além de condicionar a concepção dos elementos do aterro sanitário, podem influir no próprio dimensionamento destes elementos durante a elaboração do projeto executivo, que permitirá, mediante avaliação por parte do órgão ambiental competente, a emissão da licença de instalação. Vale ressaltar que a legislação ambiental não se restringe apenas às resoluções CONAMA e que é usual que estas resoluções deleguem aos órgãos ambientais locais a função de estabelecer os critérios e padrões a serem obedecidos por empreendimentos que pratiquem atividades efetiva ou potencialmente poluidoras.

2.8. Arcabouço normativo

Além das resoluções CONAMA anteriormente abordadas os aterros sanitários estão sujeitos a normatização proposta pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). As principais normas que abordam a questão da disposição final de resíduos em aterros e que se encontram em vigor segundo o sítio da ABNT são:

- *NBR 13896: ABNT (1997) - Aterros de resíduos não perigosos - Critérios para projeto, implantação e operação*

- *NBR 8419: ABNT (1992) Versão Corrigida:1996 - Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos – Procedimento*
- *NBR 10157: ABNT (1987) - Aterros de resíduos perigosos - Critérios para projeto, construção e operação - Procedimento*
- *NBR 15849: ABNT (2010) - Resíduos sólidos urbanos – Aterros sanitários de pequeno porte – Diretrizes para localização, projeto, implantação, operação e encerramento*
- *NBR 15113: ABNT (2004) - Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes - Aterros - Diretrizes para projeto, implantação e operação*

2.8.1. NBR 13896: ABNT (1997)

A norma em questão estabelece as condições mínimas exigidas para o projeto, implantação e operação de aterros de resíduos não perigosos, os quais, em razão de sua natureza, composição ou volume, podem ser equiparados à resíduos sólidos domiciliares. Segundo texto da mesma os aterros projetados segundo diretrizes que não sejam aquelas estabelecidas devem assegurar os mesmos níveis de segurança, proteção e eficiência. A norma propõe uma série de recomendações gerais e condicionantes específicos e que foram organizados em formato tabular na Tabela 2.4. Por meio de notas a norma ainda salienta certas especificidades destas recomendações e condições. Por exemplo, o monitoramento das águas subterrâneas é colocado como uma medida para garantir os padrões de qualidade apresentados na legislação vigente, porém, caso o aquífero apresente naturalmente parâmetros em desacordo com os limites apresentados por esta legislação caberá ao Órgão de Controle Ambiental (OCA) local o estabelecimento de padrões específicos para este aquífero. Compete também ao OCA avaliar projetos que possuam soluções alternativas que não necessariamente contemplam os sistemas de impermeabilização, drenagem e tratamento de percolados, desde que tais soluções possuam medidas de controle da qualidade ambiental cuja eficiência seja equivalente àquelas tradicionalmente utilizadas. Observa-se, portanto, considerável flexibilidade quanto à concepção do projeto, o que por um lado é um incentivo à geração e implementação de novas tecnologias de mitigação de impactos ambientais, mas por outro, quando não acompanhada de uma atuação adequada do OCA local, pode resultar na instalação e operação de aterros de desempenho deficitário.

Tabela 2.4 – Resumo das recomendações gerais e condições específicas apresentadas pela NBR 13896: ABNT (1997)

Recomendações gerais			
<i>Localização</i>	Topografia	Locais com declividade superior à 1% e inferior a 30%	
	Geologia	Existência de depósito natural extenso e homogêneo de solos com coeficiente de permeabilidade inferior a 10^{-8} m/s e cuja zona não saturada tenha espessura superior a 3,0 m	
	Recursos hídricos	Distância mínima de 200 m de qualquer coleção hídrica ou curso d'água	
	Vegetação	Vegetação que amenize o fenômeno de erosão e a propagação de particulados e odores decorrentes da operação	
	Vida útil	Vida útil mínima de 10 anos	
	Proximidade à núcleos populacionais	500 m no mínimo	
	Obrigatoriedades		Vedada a execução do aterro em áreas sujeitas a inundações, em períodos de recorrência de 100 anos.
			Distância de no mínimo 1,5 m entre o nível mais alto do lençol freático, na época de maior precipitação pluviométrica da região, e a superfície inferior do aterro.
		Predominância de material com coeficiente de permeabilidade de no mínimo $5 \cdot 10^{-7}$ m/s.	
	Respeitar a legislação local quanto ao uso do solo.		
Condições específicas			
<i>Monitoramento de águas subterrâneas</i>		No mínimo quatro poços de monitoramento, um a montante e três a jusante no sentido do fluxo das águas subterrâneas	
		Poços com diâmetro mínimo de 101,6 mm, revestidos e tampados na parte superior	
<i>Sistema de impermeabilização</i>		Elaboração de um programa de monitoramento, que deve ser aplicado durante a vida útil e após o seu encerramento	
		Resistir às solicitações externas (químicas, mecânicas), e assentar-se sobre solo de fundação competente	
<i>Sistema de drenagem de percolados</i>		Cobrir toda a área de disposição, de modo que o resíduo e o solo nunca entrem em contato direto.	
		Instalado imediatamente acima da camada de impermeabilização e deve ser dimensionado de modo a evitar a formação de uma coluna de percolado maior que 30 cm.	
<i>Sistema de tratamento de percolados</i>		Utilização de materiais resistentes ao percolado gerado e às solicitações mecânicas e projetado para não sofrer obstruções	
		Deve ser projetado, construído e operado de maneira que atender os padrões de emissão e a classe do corpo receptor	
<i>Drenagem de águas superficiais</i>		O monitoramento dos efluentes deve ser realizado pelo menos quatro vezes ao ano	
		Deve ser dimensionado para uma chuva de pico de cinco anos	
<i>Emissões gasosas</i>		O projeto deve prever a minimização da emissão de gases e garantir a captação e tratamento adequado destes	

Além disso, sendo que a operação de um aterro de resíduos envolve situações de risco à saúde humana e ao meio ambiente, são propostas diretrizes relacionadas à segurança no aterro. Estas diretrizes são contempladas pelo plano de emergência do aterro, cuja função é a minimização dos efeitos e impactos decorrentes de situações emergenciais e deve possuir, como detalhado em norma, determinado formato de apresentação. A fim de evitar a ocorrência de situações de risco e, eventualmente, a aplicação deste plano de emergência a norma propõe um modelo de plano de inspeção e manutenção, em que se propõe que os elementos constituintes do aterro devem ser inspecionados, com determinada regularidade, quanto a desvios de sua integridade, e ações corretivas devem ser sugeridas mediante a comprovação disto.

2.8.2. NBR 8419:1992 Versão Corrigida: ABNT (1996)

A garantia de que a instalação e operação de qualquer obra de engenharia será realizada tal qual foi projetada está em grande parte a depender do modo com o qual será feita a apresentação deste projeto. É natural, portanto, que obras de diferentes naturezas possuam exigências específicas com relação à apresentação de seus projetos. Neste sentido, a existência desta norma se justifica, onde são estabelecidas as condições necessárias mínimas para a apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos.

Da mesma forma que as demais obras de engenharia a apresentação dos projetos de aterros sanitários é constituída por memoriais descritivo e técnico, cronograma de execução e estimativa de custos, desenhos e eventuais anexos. As especificidades relativas aos projetos de aterros sanitários encontram-se principalmente no conteúdo do memorial descritivo. Como já mencionado, os aterros sanitários são obras que tipicamente demandam licenciamento ambiental, e, portanto, são diversos os estudos realizados previamente a elaboração de seu projeto. Ao contrário de obras de outra natureza a intenção de se instalar um aterro é normalmente anterior ao conhecimento de sua localização, e, portanto, grande parte dos estudos mencionados visam o subsídio de tal decisão e a comprovação de que o local selecionado é passível de receber o licenciamento ambiental. Apesar de haver uma resolução do CONAMA específica para a especificação dos aspectos que devem ser abordados por estes estudos (Resolução CONAMA nº 1/1996) a norma em questão também faz recomendações neste sentido. São exigidas também como parte do memorial descritivo as descrições e especificações dos

elementos de projeto, que no caso de aterros, são resultantes da aplicação de conhecimentos de engenharia para o dimensionamento dos elementos de projeto, balizando-se nos estudos prévios realizados e nos critérios e padrões estabelecidos pela legislação ambiental adequada ao local onde será instalado o aterro.

2.9. Breve histórico do Aterro Sanitário Oeste até os dias atuais

O Distrito Federal está atualmente em processo de implantar o seu primeiro aterro sanitário, que receberá o nome de Aterro Sanitário Oeste (ASO). Em fevereiro de 2016, baseando-se em dados da execução financeira do ASO, foi apontado que a primeira etapa do aterro estava 64% concluída, com previsão para o término da mesma em junho de 2016 (SLU, 2016). Porém, os primeiros esforços de implantação de um novo aterro que atenda a demanda do Distrito Federal e permita a desativação do Aterro Controlado do Jockey Club (ACJB) iniciaram-se há cerca de uma década atrás.

No ano de 2006, com recursos do Banco Mundial (BIRD) e do GDF, foi concebido o Programa Brasília Sustentável, que se situa no contexto da análise das vocações econômicas, ambientais e sociais da Região Integrada de Desenvolvimento do Entorno e do Distrito Federal (RIDE-DF) (ADASA, 2013). Este programa contemplava medidas voltadas ao planejamento e gestão territorial do DF, urbanização de assentamentos informais das populações pobres, saneamento ambiental e gestão de recursos hídricos. Com relação a este último aspecto, o programa apresentou como um item específico o fechamento do ACJB e a construção de um novo aterro sanitário. Como já relatado neste trabalho durante a década de noventa e posteriormente vários foram os trabalhos e estudos mostrando o ACJB como um potencial poluidor dos recursos hídricos próximos a ele, tendo sido reconhecido pelo programa que a sua existência não poderia ser mais admitida.

Com o encerramento do programa, em 31 de dezembro de 2011 – sendo esta a data para a qual o seu encerramento foi prorrogado – uma série de atividades programadas não puderam ser finalizadas, devido a problemas de mudança da cúpula do GDF (ADASA, 2013). Uma destas atividades foi o encerramento das atividades no ACJB, cuja condição essencial era a implantação do novo aterro, que à época recebia a designação de Central de Tratamento de Resíduos Sólidos do Distrito Federal (CTRS/DF). Visando a continuação de atividades de grande relevância, como a implantação do CTRS/DF, e a

ampliação do alcance das ações do programa uma segunda fase do mesmo foi proposta, denominada Brasília Sustentável II, financiado pelo Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID) e o GDF. Cabe ressaltar aqui que a elaboração do projeto executivo para a implantação da primeira etapa do CTRS/DF foi realizada na primeira fase do programa (Brasília Sustentável I), e é o projeto que hoje está sendo implantado. A segunda etapa do Brasília Sustentável colocou como uma das principais atividades de seu programa a implantação e operação do novo aterro sanitário.

No ano de 2012 o GDF lançou um edital o qual tinha como objeto a outorga de uma Parceria Público-Privada que basicamente assumiria as obrigações do governo quanto à gestão dos resíduos sólidos por um período de 30 anos. Adotar-se-ia a modalidade de concorrência pública com um critério de julgamento baseado no menor valor da contraprestação a ser paga pelo GDF. Os objetos deste edital são diversos e incluíam a implantação e operação do Aterro Sanitário Oeste. Apesar de os objetos exigidos e as especificações técnicas listadas no projeto básico estarem em geral condizentes com uma tentativa de instituir uma gestão integrada dos resíduos (CPD, 2012), os aspectos contratuais relativos à esta parceria foram alvo de duras críticas o que acarretou na revogação da abertura do processo licitatório. Concomitante a isto, em dezembro 2013, o Serviço de Limpeza Urbana do Distrito Federal (SLU) abriu processo licitatório para implantação e operação do Aterro Sanitário Oeste, cujo projeto executivo havia sido apresentado durante a vigência do Programa Brasília Sustentável I. Tal processo licitatório resultou na contratação do consórcio GAE/CONSTRURBAN/DBO para execução das obras de implantação e operação referentes a primeira etapa do ASO e que se estendem até os dias atuais.

3. METODOLOGIA

Notando-se que em breve o Distrito Federal virá a inaugurar o seu primeiro dispositivo que permitirá a disposição final ambientalmente adequada dos resíduos sólidos urbanos produzidos, pretende-se realizar um estudo dos aspectos geotécnicos e ambientais relacionados à implantação deste dispositivo em específico, que será intitulado Aterro Sanitário Oeste (ASO). Este estudo estará centrado nos aspectos concernentes somente a

implantação, uma vez que esta é a etapa atual na qual a obra do ASO encontra-se. A metodologia empregada neste estudo é apresentada nas subseções apresentadas a seguir.

3.1. Levantamento e análise de estudos e documentos

A principal ferramenta com a qual foi concebido o presente estudo consiste do levantamento e análise de estudos e documentos que, diretamente, dizem respeito à implantação do ASO e também de estudos cujo conteúdo permitiram complementar e auxiliar a análise daqueles relacionados diretamente a implantação do ASO.

Como principal fonte de pesquisa foram consultados os documentos, disponíveis no *website* da Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento do Distrito Federal (ADASA), do Programa Brasília Sustentável, que, dentre outras proposições, é o que apresenta a proposta original de implantação do aterro sanitário que hoje está em vias de ser inaugurado. Primeiramente, foi realizado um levantamento dos estudos e documentos existentes que permitiram as partes interessadas deliberar sobre a aptidão da área escolhida para a implantação do aterro. Os principais documentos levantados durante esta etapa foram:

- Relatórios contendo levantamentos topográficos, investigações geotécnicas e caracterização das águas subterrâneas da área do aterro, produzido pela SONDA - Engenharia Ltda.
- EIA/RIMA que possibilitou o licenciamento do ASO, produzido pela empresa PROGEA Engenharia e Estudos Ambientais

A análise destes documentos possibilitou o delineamento do perfil geológico, geotécnico e ambiental da área na qual está sendo implantado o ASO. Tal análise se deu mediante o emprego de ferramentas diversas, tais como o software RockWorks – para o processamento dos dados dos relatórios geotécnicos e topográficos, a consulta de bibliografias complementares, e o emprego dos conhecimentos das áreas correlatas adquiridos na realização de disciplinas durante a graduação.

Após a realização desta etapa foi possível obter informações suficientes sobre a área onde se implanta hoje o ASO para enquadrá-la em determinado contexto geotécnico e ambiental. Tal enquadramento possibilitou a realização da etapa subsequente, onde foi

estudada a documentação de projeto do ASO, pelo estudo dos desenhos de projeto e dos memoriais descritivos e de cálculo apresentados. Deste estudo obtiveram-se, detalhadamente, as principais soluções de controle de impactos ambientais adotadas, cuja apresentação foi feita face ao enquadramento geotécnico e ambiental realizado e às exigências de legislações ambientais e normas técnicas vigentes.

Em uma última etapa realizou-se o levantamento e estudo bibliográfico das soluções de controle ambiental de dois aterros sanitários brasileiros – Aterro Sanitário Bandeirantes e CTR-Caieiras – o que permitiu obter o paradigma tecnológico atual referente as soluções adotadas em nível nacional.

Vale ressaltar que, estando o ASO já em processo de implantação, os aspectos apresentados neste estudo não se prestaram a questionar a adequabilidade das decisões e soluções adotadas na implantação do ASO, e sim possibilitar a apresentação destas de uma maneira sistematizada e vinculada ao contexto geotécnico-ambiental específico do ASO, à legislação ambiental e ao referencial normativo existente, de modo a facilitar o acesso a tais informações por aqueles que venham a realizar estudos sobre este aterro.

3.2. Visitas de campo

Foi realizada visita técnica à obra de implantação do ASO, previamente à sua conclusão, permitindo a obtenção de registros *in loco* das soluções levantadas na documentação de projeto e que, na data da visita, já tinham sido executadas ou estivessem em processo de execução. Tendo em vista que a visita ocorreu em uma data anterior ao início da disposição dos rejeitos no aterro, certas soluções abordadas em etapas anteriores deste trabalho não puderam ser observadas quer seja por suas execuções estarem condicionadas a execução de etapas futuras, ou pelo fato de já terem sido executadas em profundidade e não estarem mais visíveis. Os registros foram obtidos por fotografias ou consultas junto ao engenheiro que acompanhou a visita.

4. RESULTADOS

4.1. Estudos e documentos que embasaram a escolha da área de locação do Aterro Sanitário Oeste

Em levantamento realizado foi possível a identificação dos principais documentos e estudos que subsidiaram a escolha da área na qual está sendo construído hoje o Aterro Sanitário Oeste (ASO). Em 2004, mediante o contrato realizado pelo Serviço de Ajardinamento e Limpeza Urbana (BELACAP), foi solicitada à empresa PROGEA Engenharia e Estudos Ambientais a realização dos Estudos de Impactos Ambientais (EIA) e respectivo Relatório de Impactos Ambientais (RIMA) para a implantação de um dispositivo para disposição final de rejeitos. Na ocasião foi indicada uma área no Setor P Sul (Ceilândia), próxima a que hoje é chamada de Usina Central de Tratamento de Lixo (UCTL), como objeto destes estudos. Porém, os termos de referência do contrato foram posteriormente alterados deixando em aberto o local de implantação do aterro sanitário. Portanto, o EIA a que se teve acesso propõe-se, em primeira instância, a apresentar os esclarecimentos acerca da inadequação da área que era objeto inicial deste documento e a apresentar locais alternativos. Em uma segunda etapa são apresentados os estudos ambientais específicos para a área que se julgou ser a mais apta para a construção do aterro, sendo esta a área a que hoje se constrói o ASO. O presente trabalho irá se ater principalmente a esta segunda etapa, visto que a atual área é o foco do mesmo.

No decorrer do ano de 2008 foram realizados levantamentos topográficos e sondagens geotécnicas - mediante um contrato entre o Governo do Distrito Federal e a empresa SONDA ENGENHARIA LTDA - na área objeto do EIA. As informações obtidas durante esta campanha visaram fornecer subsídios técnicos específicos para avaliar a possibilidade da construção do ASO na área em questão. Estas informações tratam-se dos laudos das investigações realizadas e que permitiram obter um panorama hidrogeotécnico mais aprofundado da área, sendo posteriormente utilizados pela empresa projetista para elaboração do projeto executivo do ASO. Utilização similar será feita aqui destes laudos, onde será realizado um aprimoramento na representação dos resultados neles contidos de modo a realçar os aspectos mais relevantes destes concernentes à aptidão da área para a instalação do ASO.

4.1.1. Relatório de investigações geotécnicas

Os relatórios de investigações geotécnicas são referentes às sondagens a percussão, sondagens a trado e aos poços de inspeção. As sondagens a percussão visaram a amostragem e caracterização do solo quanto a sua resistência a penetração do amostrador,

composição granulométrica e identificação do nível d'água subterrâneo. As sondagens a trado foram realizadas para coletar amostras deformadas para classificação tátil-visual e ensaios geotécnicos de laboratório, e foram realizadas até o impenetrável ao trado manual ou até o nível d'água. Para a retirada de amostras indeformadas foram abertos poços de inspeção de 1,10 m de diâmetro.

Os ensaios geotécnicos de campo realizados por meio das sondagens anteriormente mencionadas consistiram de ensaios SPT, nas sondagens a percussão, e os ensaios de infiltração, executados nos furos a trado, e tinham como principal objetivo a classificação geotécnica dos solos de ocorrência natural. Em laboratório, foram realizados ensaios de caracterização (granulometria, umidade, massa específica, índice de vazios, limites de Atterberg), com a utilização de amostras deformadas, e permeabilidade e compressão triaxial dos solos, nas amostras indeformadas.

A disposição espacial das sondagens a percussão foi realizada tal qual mostrado na Figura 4.1, em que os furos estão espaçados de cerca de 200 m. Para as sondagens realizadas foram medidas as resistências à penetração do amostrador (N_{SPT}) e retiradas amostras deformadas a cada metro sondado, adotando-se o critério $N_{SPT} \geq 15$ para 3 metros consecutivos como o critério de paralisação.

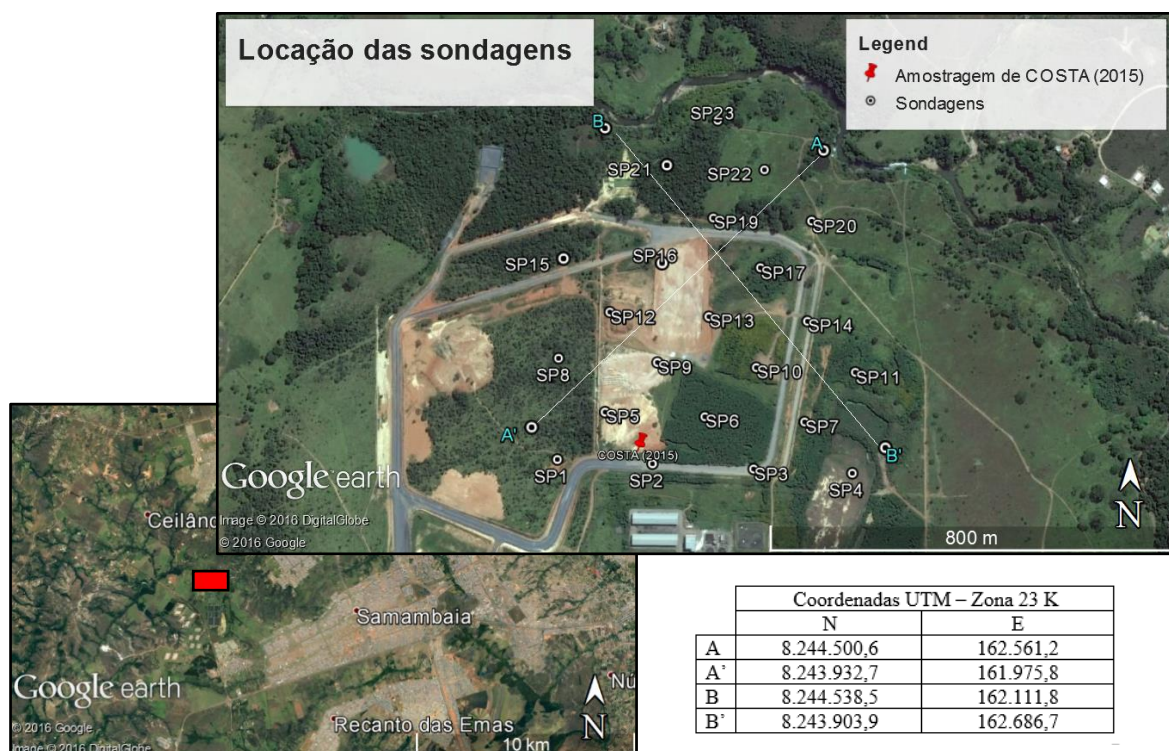


Figura 4.1 – Sondagens a percussão realizadas na área do ASO com a localização das seções estratigráficas A-A' e B-B'. Fonte: Google Earth e Sonda Engenharia Ltda. (2008)

A profundidade das sondagens situa-se entre 10,00m e 10,45m, sendo que apenas uma delas atingiu profundidade menor que 10m (6,10m) (SONDA, 2008). Os resultados obtidos para cada furo de sondagem contemplam, em profundidade, uma descrição geotécnica dos solos retirados do amostrador e os valores de resistência à penetração (N_{SPT}) deste amostrador. Por meio de interpolação gráfica espacial destes resultados na área onde foram realizadas as sondagens foi possível construir os perfis A-A' e B-B' tanto para a caracterização geotécnica quanto para o valor de N_{SPT} , permitindo uma análise conjunta destes resultados. Tal análise foi realizada por meio do software RockWorks16. A localização destes perfis, com relação as sondagens, é mostrada na Figura 4.1 enquanto que os perfis são apresentados na Figura 4.2.

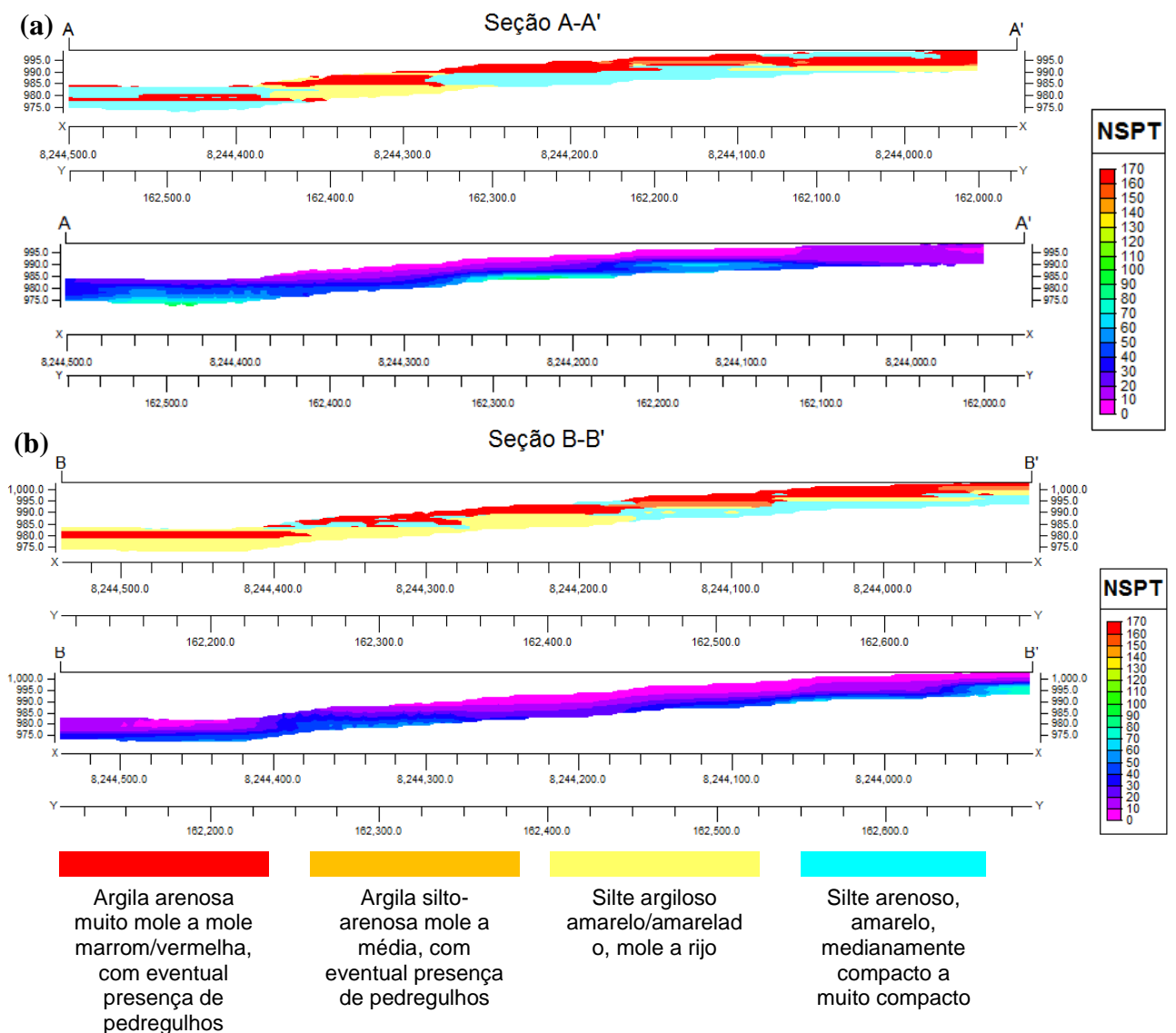


Figura 4.2 - Perfis estratigráficos e de resistência a penetração (NSPT) das seções (a) A-A' e (b) B-B' com exagero vertical de 2.

Os perfis A-A' e B-B' mostram que o terreno apresenta pequena declividade – cerca de 3,5% - em direção ao Rio Melchior e possuem um capeamento de argila arenosa marrom/vermelha muito mole a mole. Tal consistência é claramente evidenciada pelos baixos valores de N_{SPT} destas camadas superficiais. Na região em questão as camadas que capeiam o terreno podem ser pertencentes a duas classes de solo distintas, os Latossolos Vermelhos ou Cambissolos, classes estas que são predominantes na região do DF, ocupando cerca de 70% de sua área (EMBRAPA, 2004). Os Latossolos Vermelhos, que recebiam a designação de Latossolos Vermelho-Escuros em classificações pedológicas mais antigas, são solos com características físico-químicas que refletem a profunda intemperização sofrida por estes no seu processo de formação, resultando em solos – no âmbito das propriedades de interesse hidrogeotécnico – com alta porosidade, e permeabilidade, e, devido a sua baixa atividade, um menor potencial de expansão mineralógica (EMBRAPA, 1978). Os Cambissolos por sua vez são solos pouco desenvolvidos, com predominância de silte no horizontes intermediários e horizontes mais profundos alcançando o saprólito (EMBRAPA, 1978). Segundo o mapa pedológico local há ocorrência de Cambissolo apenas nas proximidades do Rio Melchior e a medida que a topografia se desenvolve na direção ascendente (em direção a B' e A') predominam os Latossolos Vermelhos.

Devido a sua macroestrutura porosa é uma característica de solos lateríticos que os seus primeiros metros possuam um baixo valor de N_{SPT} , e que, além disso, apresentem certo potencial de colapsividade e alta permeabilidade (10^{-3} a 10^{-6} m/s) (CONCIANI *et al.*, 2015). Este aspecto é evidenciado pela avaliação da permeabilidade natural em campo, realizada por meio de ensaios de infiltração conduzidos em furos promovidos por tradagem (STD), e ensaios laboratoriais – com permeômetros de carga constante – em amostras indeformadas retiradas de poços de inspeção (PI), cujos resultados são mostrados na Figura 4.3. As sondagens foram numeradas como 1, 7, 13 e 21. Estas sondagens foram locadas adjacentes às sondagens à percussão de mesmo número. Os valores de permeabilidade obtidos nas sondagens a trado (STD) e indicados no gráfico da Figura 4.3 não podem ser interpretados como referentes a uma profundidade pontual, e sim representativos de toda a camada subjacente a estes pontos, uma vez que a infiltração da água, durante a realização do ensaio, se dá em toda a extensão do furo, e não apenas em seu fundo. Portanto, estes valores são mais representativos da

permeabilidade horizontal do solo. Os resultados mostram que a permeabilidade – predominantemente horizontal – dos primeiros 7 metros da região oscila entre 10^{-6} m/s e 10^{-4} m/s, o que indica que, apesar de se tratarem de solos argilosos, estes possuem alta porosidade e comportam-se hidromecanicamente como solos granulares. Por outro lado os ensaios realizados nas amostras indeformadas, retiradas nas profundidades indicadas nas colunas estratigráficas, indicam, em geral, valores inferiores de permeabilidade, entre 10^{-7} m/s e 10^{-5} m/s. Tais discrepâncias entre resultados obtidos no laboratório e em campo podem ser explicadas pelos métodos utilizados em cada caso, já que a direção com que se mede a permeabilidade é diferente para ambos os casos, e os ensaios nos blocos indeformados são representativos de regiões pontuais ao contrário dos ensaios de infiltração, que medem uma permeabilidade média para toda a extensão do furo.

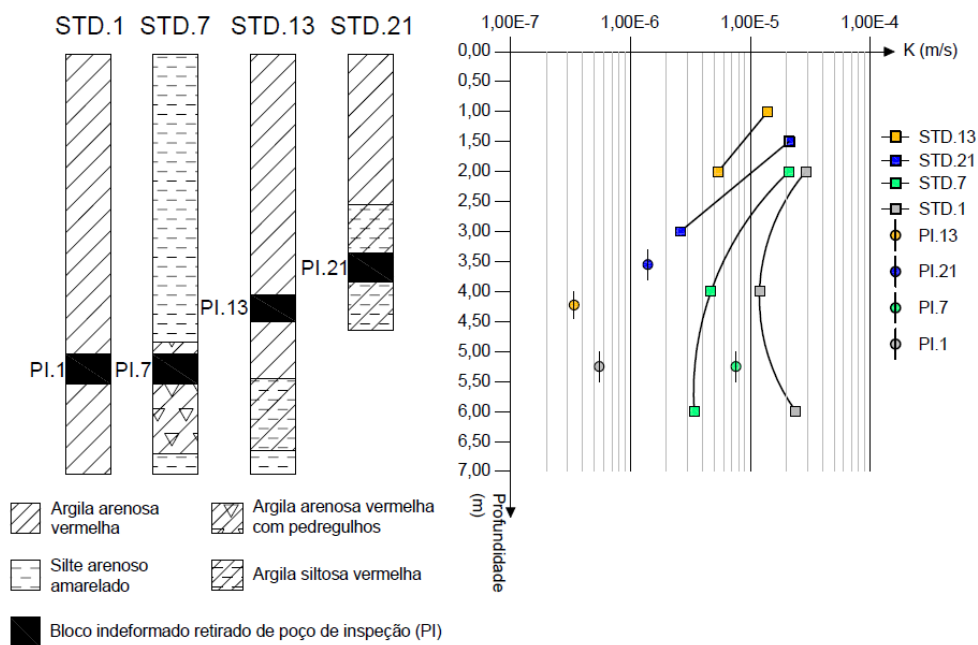


Figura 4.3 - Avaliação em campo da permeabilidade do solo em profundidade por meio de ensaios de infiltração. Adaptado de Sonda Engenharia Ltda (2008).

Disto conclui-se que não é desejável a sua utilização na condição natural como camada impermeabilizante ou de fundação para um aterro sanitário, devido a sua alta permeabilidade e baixa capacidade de carga – evidenciada pelos valores de $N_{SPT} \leq 10$. Porém, tal material torna-se apto para ser utilizado em aterros sanitários mediante algum processo que promova a quebra da macroestrutura responsável por conferir estas

propriedades hidrogeotécnicas. O processo de compactação geralmente fecha as macroporosidades naturais existentes nestes solos (VILLAR *et al.*, 2015).

A existência de duas camadas com propriedades hidrogeotécnicas distintas – um horizonte coluvionar superior macroporoso sobrejacente a um horizonte inferior residual e mais denso – tende a determinar o escoamento lateral do fluxo d’água descendentes no sentido da inclinação da interface entre estes materiais. A Figura 4.2 evidencia que a inclinação deste contato se dá em direção ao Rio Melchior e é praticamente paralelo à superfície do terreno, ou seja, o fluxo das águas subterrâneas na área ocorre no mesmo sentido que o escoamento superficial, que é governado pela topografia local (SONDA, 2008).

Nas sondagens a trado foram retiradas amostras deformadas a cada metro e estas amostras foram submetidas a ensaios laboratoriais de caracterização dentre os quais foram conduzidos os ensaios de limite de consistência – determinação dos limites de liquidez (w_L) e limites de plasticidade (w_P). O perfil em profundidades relativo aos resultados destes ensaios é apresentado na Figura 4.4 juntamente com as colunas estratigráficas de cada furo executado por tradagem e a localização dos blocos indeformados retirados dos poços de inspeção adjacentes.

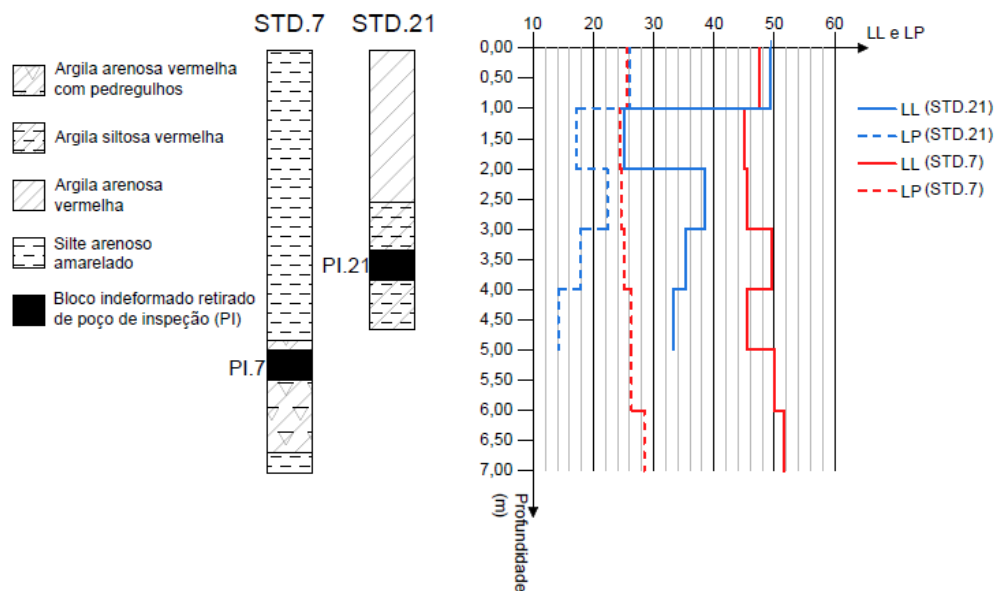


Figura 4.4 - Perfil dos limites de consistência das amostras retiradas metro a metro nas sondagens a trado. Adaptado Sonda Engenharia Ltda. (2008).

Por estes resultados, referentes aos limites de consistência e determinações realizadas nas amostras indeformadas dos poços de inspeção adjacentes, é possível obter indícios do potencial de colapso do solo. Tal avaliação se deu por meio do critério proposto por Gibbs e Bara (1962) sendo válido salientar que este é um critério orientativo e que existem ensaios laboratoriais ou de campo com aptidão para realizá-la de maneira direta e precisa. Portanto, os resultados aqui obtidos dão somente um indício deste potencial. O critério propõe o cálculo de um parâmetro R que relaciona a umidade necessária para a saturação do solo e o limite de liquidez, e caso este parâmetro seja superior a 1 há indícios de que o solo é colapsível.

$$R = \frac{w_{sat}}{LL} \quad (I)$$

Os valores de LL são mostrados no perfil da Figura 4.4 enquanto que w_{sat} pode ser determinado de acordo com uma formulação derivada das relações de fase do solo:

$$w_{sat} = \gamma_{agua} \left(\frac{1}{\gamma_d} - \frac{1}{\gamma_{graos}} \right) = \frac{\gamma_{agua}}{\gamma_d} - \frac{1}{G_s} \quad (II)$$

O peso específico aparente seco da amostra em seu estado natural, e, portanto, não deformada, é apresentado no relatório para as amostras retiradas em PI.7 e PI.21 e o peso específico dos grãos foi determinado em ensaios com picnômetro realizados metro a metro nas sondagens STD.7 e STD.21. Os resultados para o parâmetro R são mostrados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Avaliação do potencial de colapsividade do solo pelo critério de Gibbs e Bara (1962).

Sondagem/Profundidade	w_L (%)	γ_d (kN/m ³)	G_s	γ_{agua} a 20 °C (kN/m ³)	w_{sat} (%)	R
STD.7 e PI.7/5 m a 5,50 m	50	11,86	2.6780	9,789	45,2	0,90
STD.21 e PI.21/3,30 m a 3,80 m	35,3	15,75	2.7456	9,789	25,7	0,73

De acordo com o critério utilizado não há indícios de que o solo em questão seja colapsível. Porém, os parâmetros utilizados permitem avaliar apenas o potencial de

colapso sob o viés da variação da umidade, uma vez que na hipótese do parâmetro R ser superior a 1 isto é equivalente a dizer que $w_{sat} > w_L$, ou seja, caso o solo fosse levado a uma condição de saturação ele estaria com um teor de umidade superior ao limite de liquidez e, portanto, teria consistência fluída. Por outro lado, sabe-se que o potencial de colapso é também influenciado pelo tipo de permeante, devido a possíveis interações químicas entre este e o solo, o que eventualmente pode ocasionar a quebra dos elementos cimentantes das partículas dos solos macroporosos (VILAR & FERREIRA, 2015) e isto é de especial relevância no contexto de obras de aterro sanitário, uma vez que uma eventual falta de estanqueidade permitiria a percolação dos lixiviados de resíduos para os solos de fundação.

Realizaram-se ainda, mediante a moldagem de corpos de prova cilíndricos extraídos dos blocos indeformados, ensaios de determinação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento. Os ensaios realizados foram do tipo compressão triaxial, com consolidação isotrópica e não drenados (CIU). Tais ensaios permitem a obtenção dos parâmetros efetivos já que, apesar de serem realizados em uma condição não drenada, as poropressões são monitoradas durante sua execução. Os parâmetros foram determinados para os blocos indeformados retirados dos poços PI.7 e PI.21, nas profundidades mostradas tanto na Figura 4.4 quanto Figura 4.3.

Tabela 4.2 – Resultados dos ensaios triaxiais CIU para os corpos de prova retirados dos blocos PI.7 e PI.21. Adaptado de Sonda Engenharia Ltda. (2008).

Bloco	$\sigma_{adensamento}$	c'	φ'	Resistência não drenada - s_u
	kPa	kPa	-	kPa
PI.7	50	0	35,0	15
	100			27
	200			95
PI.21	50	11,3	29,4	72
	100			60
	200			174

Nota-se que os corpos de prova retirados do bloco PI.7 apresentaram envoltória puramente friccional, enquanto que aqueles retirados do bloco PI.21 apresentaram certa parcela devido a coesão. A diferença de comportamento quanto a resistência ao cisalhamento está vinculada a composição de cada um destes blocos. O bloco PI.7 – como

mostrado na Figura 4.3 e Figura 4.4 – foi retirado de uma camada que, apesar de predominantemente composta por argila arenosa, tem presença de pedregulhos, e que, por sua vez, governam a resistência ao cisalhamento desta camada. O bloco PI.21, por outro lado, foi retirado de uma camada de Argila Siltosa, e, portanto, possui certa parcela de sua resistência ao cisalhamento atrelada a coesão do material, e, além disso, possui valores superiores de resistência não-drenada s_u quando comparado ao bloco PI.7. A utilização de tais parâmetros como subsídio para a avaliação da estabilidade estrutural da fundação e taludes escavados do aterro deve ser realizada de maneira racional. Por exemplo, após a escavação do terreno serão formados taludes cuja estabilidade – medida em termos do fator de segurança – está vinculada às tensões induzidas devido ao descarregamento promovido por esta escavação. Estas tensões induzidas ocorrem principalmente pelas variações nas poropressões, e que no caso específico da escavação fazem com que o fator de segurança seja decrescente com o tempo, exigindo, portanto, uma análise de estabilidade a longo prazo utilizando-se os parâmetros drenados/efetivos das argilas. Por outro lado, com o início da disposição de rejeitos a fundação é submetida a um carregamento que mobiliza um excesso de poropressões nesta. Como a disposição dos rejeitos é feita em um tempo prolongado – equivalente a vida útil do aterro – este excesso de poropressões ao final deste período terá em grande parte se dissipado, ao contrário de obras como barragens, onde, pelo fato do alteamento se processar mais rapidamente, há um excesso de poropressões ao término do alteamento que condiciona a estabilidade do maciço. Portanto, os parâmetros efetivos apresentados na Tabela 4.2 possuem considerável importância nas avaliações da estabilidade estrutural do aterro.

Por fim e com base nos resultados acima concluiu-se que a área é topograficamente compatível com a destinação pretendida – uma vez que se apresenta levemente ondulada e com baixas declividades – e do ponto de vista geológico-geotécnico concluiu-se que as características do solo abaixo do horizonte de solo macroporoso coluvionar permitem a construção de obras civis em geral, como o aterro e as suas instalações de apoio, desde que adotadas as precauções pertinentes quanto as fundações, prevenção de erosões e impermeabilização (SONDA, 2008).

4.1.2. Estudo de Impactos Ambientais (EIA)

O Estudo de Impactos Ambientais para obtenção do licenciamento ambiental da área na qual está sendo construído o aterro é subdividido em duas partes distintas. Na primeira delas discutem-se áreas que tem o potencial para receber tal dispositivo. Tendo-se definido a região com maior aptidão para tal procede-se, em uma segunda etapa, a realização de estudos específicos desta área, que compõem o diagnóstico ambiental da área.

4.1.2.1. Escolha da área a ser estudada

A licença prévia, uma das partes necessárias ao licenciamento ambiental, é obtida mediante a apresentação de um Estudo de Impactos Ambientais (EIA) e o seu respectivo Relatório de Impactos Ambientais (RIMA). À época da elaboração destes documentos a BELACAP estabelecia nos termos de referência que a área a ser licenciada localizava-se ao lado da Usina de Compostagem e Tratamento de Lixo (SOUCTL) – que atualmente recebe a designação de Usina Central de Tratamento de Lixo (UCTL). A empresa contratada para realização destes estudos tendo concluído a inaptidão da área proposta pela BELACAP propôs alternativas a este. A seleção da alternativa mais adequada para a qual seriam conduzidos estudo mais específicos visando a obtenção da licença prévia se deu com base em critérios de ordem eliminatória e seletiva. Os critérios eliminatórios são embasados pelas restrições impostas pela legislação ambiental – principalmente quanto ao zoneamento ambiental – pela previsão de uso da área conforme o Plano de Ordenamento Territorial (PDOT). Por outro lado, para a análise comparativa entre as áreas propostas adotaram-se critérios embasados em aspectos ambientais, técnicos e econômicos.

Apresentam-se na Tabela 4.3 os aspectos de ordem ambiental e técnica utilizados na seleção da área. Os critérios de ordem econômicos, apesar de possuírem grande importância e serem determinantes, estão fora do levantamento a que este trabalho se propõe e não foram apresentados juntamente com os demais. Os critérios apresentados na Tabela 4.3 são de cunho seletivo e permitiram a comparação entre as áreas alternativas propostas. Quanto a área proposta pela BELACAP há vários condicionantes de ordem legal que não permitiriam a instalação do aterro nesta área, dentre os quais pode-se ressaltar: parte da área está inserida dentro da Área de Relevante Interesse Ecológico

(ARIE) do Parque JK, sendo que a porção que não está inserida neste apresenta taludes íngremes, com mais de 30° de inclinação e cobertos por vegetação, e que são também ambientalmente protegidas segundo o Código Florestal (PROGEA, 2005).

Tabela 4.3 - Aspectos ambientais e técnicos levados em consideração para a seleção da área para o aterro. Adaptado de PROGEA (2005).

Aspectos ambientais	Aspectos técnicos
i) Pouca interferência com a vizinhança ii) Áreas que apresentem alguma degradação ambiental por atividades diversas. iii) Proximidade à estações de tratamento de esgoto urbano. iv) Evitar proximidade à Áreas de Proteção Ambiental e Áreas de Proteção de Mananciais. v) Facilidade de monitoramento ambiental vi) Áreas com confinamento natural: anfiteatros naturais ou cercadas por reflorestamento vii) Áreas de fácil reintegração após a vida útil do aterro	i) Áreas com topografia pouco acidentada em forma de anfiteatros ii) Condições hidrogeológicas que dificultem potenciais contaminações iii) Solos de fundação com propriedades de deformação e resistência ao cisalhamento que não condicionem a estabilidade do maciço de rejeitos iv) Materiais naturais de construção de fácil obtenção nas proximidades do aterro – para a cobertura diária/final e para a camada impermeabilizante argilosa v) Baixa precipitação pluviométrica vi) Direções predominantes dos ventos contrárias à de aglomerações urbanas

Por fim, a área escolhida foi aquela cujos resultados dos laudos de sondagem foram apresentados na seção anterior. Ambientalmente a área em questão já sofreu desmatamento e possui certa degradação pela presença da ETE Melchior, e, além disso, não se registrou a ocorrência de nascentes. A proximidade com a ETE Melchior é também ambientalmente favorável pois pode-se prever a co-disposição do lodo gerado por esta no aterro, e a condução dos percolados gerados no aterro para serem tratados na ETE. Em termos técnicos a área apresenta-se com topografia pouco acidentada, havendo grande facilidade para execução da camada compactada de argila, para a qual a obtenção de solos poderá ser realizada prevendo-se a implantação do aterro em lotes – dividindo a área total em subáreas – de maneira que operação e escavação ocorram concomitantemente em subáreas adjacentes e, por sua vez, seja possível minimizar o transporte de material.

4.1.2.2. Estudos geológico-geotécnicos específicos

Após a definição da área com maior aptidão para receber o aterro sanitário o EIA prosseguiu com a apresentação dos estudos específicos da área, o que permitiu a obtenção diagnóstico ambiental da área. Salientam-se aqui os estudos no âmbito geológico geotécnico.

No âmbito geológico a área estudada situa-se assente sobre um substrato litológico composto por metarritmitos argilosos, unidade pertencente ao Grupo Paranoá (FARIA, 1985). Tal unidade caracteriza-se pela intercalação de camadas centimétricas de metassiltitos e metargilitos, e também de camadas de quartzitos feldspáticos muito finos a finos com coloração acinzentada e amarelada/rosada/avermelhada quando intemperizados (FARIA, 1985).

Os aspectos geotécnicos considerados no diagnóstico ambiental são aqueles que condicionam a concepção do projeto do aterro sanitário tais como: capacidade de suporte e permeabilidade dos solos naturais de fundação, avaliação da aptidão dos solos da área para sua utilização nas camadas impermeabilizantes e de cobertura, o nível do lençol freático. Os solos que recobrem a área estudada são argilosos e possuem considerável porosidade e permeabilidade, devido à presença dos óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, e em níveis mais profundos há a ocorrência de concreções lateríticas. Segundo o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS) estes são solos finos pertencentes aos grupos CL (argilas de baixa plasticidade) e CH (argilas de alta plasticidade), ou ML (siltes de baixa plasticidade), quanto mais siltosos, e pela classificação MCT, para solos tropicais, como LG' (argilas lateríticas) (PROGEA, 2005). Estudos realizados com os solos desta área confirmam as classificações mencionadas (COSTA, 2015; NISIYAMA *et al.*, 2016). Salienta-se ainda o potencial de colapsividade desses solos argilosos e que fica evidenciada pela existência de ravinamentos – na margem oposta do Rio Melchior – causados pelo colapso da estrutura deste solo devido ao lançamento, em declividades acentuadas, de águas pluviais provenientes da cidade de Ceilândia. Encontram-se também recobrimdo a superfície da área estudada, porém em menor quantidade, cambissolos argilosos com presença de lâminas de metarritmito – que forma o substrato litológico da área – e que capeiam os solos saprolíticos e saprolitos do substrato rochoso. Estes,

segundo a classificação geotécnicas do SUCS são classificados como ML (siltes de baixa plasticidade) e MH (siltes de alta plasticidade) e segundo a classificação MCT possuem comportamento não-laterítico, pertencendo ao grupo NS' (siltes e siltes arenosos não lateríticos) (PROGEA, 2005). Estes solos por possuírem um menor grau de evolução quando comparados aos latossolos possuem em sua constituição mineralógica argilo-minerais de maior atividade, e eventualmente expansivos (EMBRAPA, 1978), e, possuindo macrotextura menos desenvolvida, são menos permeáveis. Os solos saprolíticos subjacentes a fina camada de Cambissolo são adequados para a fundação por possuírem baixa permeabilidade e elevado potencial de sorção, o que mitigaria a rápida propagação de contaminantes em uma situação de falta de estanqueidade das camadas impermeabilizantes. Apesar disso, vale ressaltar que a avaliação da utilização destes materiais, tanto o Cambissolo quanto os solos saprolíticos, para execução das camadas de impermeabilização ou de cobertura não deve levar em consideração apenas o volume disponível destes, que é reduzido, mas também a inadequação deles para compactação (PROGEA, 2005).

Faz-se distinção dentro da área em estudo de duas subáreas, denominadas A e B - Figura 4.5. A subárea A, em cujo domínio está sendo construído o aterro sanitário, apresentou-se como detentora das características hidrogeotécnicas mais favoráveis em virtude de possuir uma maior espessura de solo argiloso com características adequadas para compactação – e execução das camadas impermeabilizantes de fundo e camadas de cobertura – e, além disso, uma maior espessura da zona não saturada (PROGEA, 2005). A subárea em questão é aquela cujos laudos de sondagem foram apresentados na seção 4.1.1. Evidentemente, a utilização deste solo, mediante a adequação de suas características por meio da compactação, como constituinte dos elementos do aterro eliminaria as camadas superficiais de baixa resistência a penetração e considerável porosidade e permeabilidade, como apresentado na Figura 4.2 e Figura 4.3. O solo saprolítico e o saprólito que subjazem esta argila laterítica apresentam características adequadas e favoráveis a sua utilização natural como fundação do aterro, devido a sua baixa permeabilidade e alto potencial de sorção pela presença de argilominerais de maior atividade. Em contrapartida a subárea B apresenta como principais fatores desfavoráveis a pequena profundidade do lençol freático e a não existência de material argiloso em

quantidade suficiente para a confecção dos elementos do aterro, sendo necessária a busca por áreas de empréstimo vicinais (PROGEA, 2005).

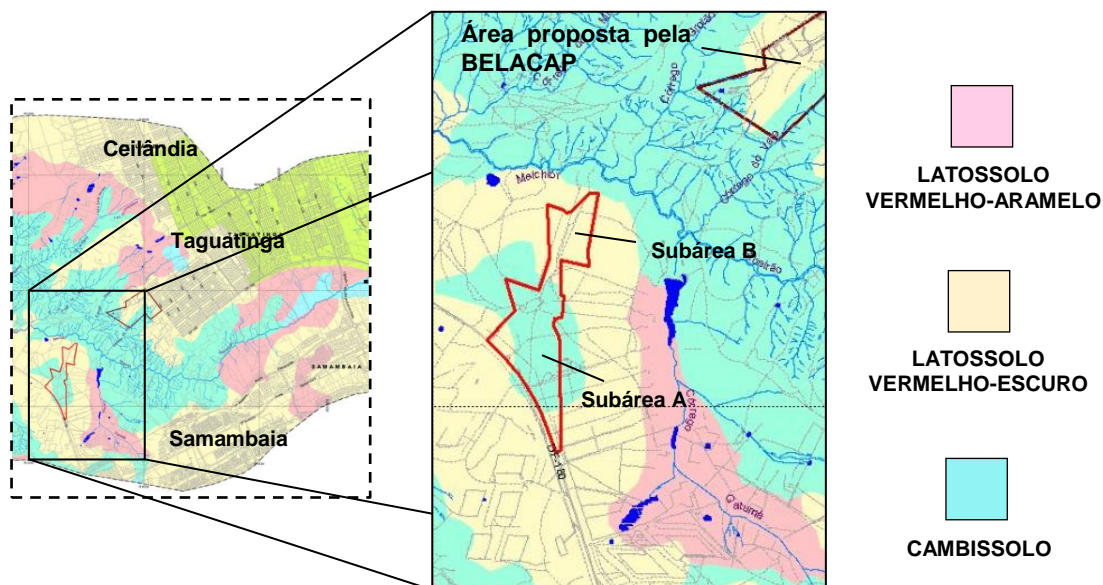


Figura 4.5 – Solos de cobertura da área estudada e adjacências. Modificado de PROGEA (2005).

Ambas as subáreas se situam em um contexto de topografia suave, sendo o desencadeamento de processos erosivos um aspecto que em uma análise preliminar é de menor relevância. Porém, deve-se ressaltar que durante a execução das obras do aterro são realizadas consideráveis modificações na topografia e na cobertura de solo do terreno o que, por sua vez, pode ocasionar em modificações na movimentação das águas superficiais e subsuperficiais. Soma-se a isto a construção das instalações de apoio e de drenagem que também atuam como elementos que impermeabilizam a superfície e alteram as condições de escoamento de equilíbrio da área, podendo ser fatores desencadeadores de processos erosivos.

O contexto hidrogeológico da área foi definido em termos das unidades estratigráficas presentes em profundidade na área estudada. Distinguem-se dois tipos de aquífero presentes nesta área, o do Domínio Poroso e do Domínio Fissural (PROGEA, 2005). O primeiro destes, do Domínio Poroso, é representado pelos espaços interanulares presentes nas camadas de solo argilosiltosos porosos e siltes argilosos oriundos da decomposição do substrato rochoso da área. A recarga deste aquífero está intimamente ligada a precipitação pluviométrica, e tendo sido saturado é estabelecido um regime de fluxo laminar em direção aos vales já que o a inclinação das superfícies das camadas

subjacentes de menor permeabilidade possui inclinação voltada a estes vales. Além de alimentar os corpos hídricos que escoam por estes vales parte desta vazão direciona-se aos aquíferos fissurais existentes nas descontinuidades do substrato rochoso subjacente. Devido as características supracitadas o Domínio Poroso é caracterizado por possuir considerável continuidade lateral, porém com um regime de fluxo fortemente condicionado pela pluviometria da área. Formado pelos maciços rochosos fraturados das rochas do Grupo Paranoá existentes na área – Metassiltitos e Ardósias – o aquífero do Domínio Fissural é outro componente do contexto hidrogeológico da área. As águas neste aquífero estão armazenadas nas descontinuidades (fraturas, juntas e planos), que interceptam as rochas mencionadas, sendo que a recarga do aquífero se dá tanto pelo meio poroso sobrejacente ou por meio dos afloramentos da própria rocha. Ao contrário do aquífero do Domínio Poroso o aquífero em questão tem caráter local, restringindo-se às zonas fraturadas do maciço. O fluxo se dá pelas descontinuidades e é predominantemente vertical e lento, existindo a peculiaridade de que este está limitado a determinada profundidade, uma vez que as descontinuidades se apresentam com menores aberturas quanto maior é a profundidade – em virtude da maior pressão litostática.

4.1.2.3. Impactos potenciais com relação aos aspectos geotécnico-ambientais

As alterações introduzidas ao meio e as solicitações impostas pela implantação/operação de um aterro sanitário levantam questionamentos acerca dos impactos potenciais a que a área estudada está sujeita. Dentro deste contexto, o Estudo de Impactos Ambientais (EIA) elenca os seguintes impactos relacionados aos aspectos geotécnico-ambientais:

- *Assoreamento dos canais naturais de drenagem:*

Fica evidente, pela existência de processos erosivos em áreas próximas a estudada, que a introdução de alterações na superfície da área estudada pode induzir mudanças na dinâmica hidrossedimentar da região. Exemplificando, tais alterações podem ser: mudanças das inclinações naturais do terreno, impermeabilização superficial do terreno pela construção de instalações de apoio ou tráfego de veículos e máquinas, retirada da vegetação natural que outrora fornecia proteção às camadas superficiais.

- *Recalques diferenciais devido ao colapso do solo, comprometendo o aterro e as estruturas adjacentes:*

O colapso na geotecnia é definido pela redução no volume do solo quando este é umedecido e está submetido às cargas naturais – solos verdadeiramente colapsíveis – ou à sobrecargas – solos condicionalmente colapsíveis (VILAR & FERREIRA, 2015). Apesar de terem sido apresentados indícios, segundo o critério de Gibbs e Bara (1962) de que o solo laterítico de cobertura da área não apresenta tal comportamento deve-se levar em consideração que as características deste solo se aproximam fortemente das características de solos tipicamente colapsíveis: solos não saturados, altos teores de óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio e que garantem a existência de uma macroestrutura porosa, solos cuja pedogênese se deu em regiões onde há alternância entre estações secas e chuvas intensas concentradas. Portanto, na hipótese da utilização deste solo em seu estado natural como fundação o fenômeno do colapso deve ser levado em consideração, principalmente devido às sobrecargas adicionais à medida que se dá o alteamento do corpo do aterro pela disposição dos rejeitos. Neste contexto, deve-se avaliar a susceptibilidade dos elementos do aterro e suas instalações de apoio ou estruturas adjacentes

- *Contaminação dos recursos hídricos subterrâneos e propagação da pluma de contaminação*

O contexto hidrogeológico da área indica a existência de aquíferos do Domínio Poroso e do Domínio Fissural. O aquífero do Domínio Poroso, na hipótese de um funcionamento deficitário dos elementos de impermeabilização e drenagem interna do aterro, seria imediatamente atingido e, devido às características do seu regime de fluxo, conduziria esta poluição aos corpos hídricos superficiais, às propriedades adjacentes e às águas contidas nos aquíferos do Domínio Fissural, uma vez que sua recarga está fortemente vinculada às águas presentes no aquífero do Domínio Poroso. Por outro lado, devido ao caráter localizado dos aquíferos do Domínio Fissural uma possível contaminação destes possuiria abrangência restrita e suscitaria uma maior atenção quanto aos impactos de ordem sanitária devido ao fato de que as águas

subterrâneas se constituem como importante fonte de abastecimento público do DF, contribuindo com mais de 25% desta (PROGEA, 2005).

· *Alteração nas recargas dos aquíferos subterrâneos devido a implantação do aterro e suas instalações de apoio*

Em virtude de as águas subterrâneas constituírem uma importante fonte de abastecimento de água para o DF a sua preservação, no que tange tanto à sua qualidade quanto a sua quantidade, deve ser garantida. Como visto a precipitação pluviométrica é o meio pelo qual ocorrem as recargas dos aquíferos dos Domínios Poroso (diretamente) e Fissural (indiretamente), portanto, a impermeabilização superficial do terreno, devido à implantação do próprio aterro e suas instalações de apoio, é um fator que limitará a recarga destes aquíferos.

4.2. Soluções de controle de impactos ambientais adotadas no ASO

Em virtude dos potenciais impactos a qual a área onde está sendo implantado o ASO está sujeita o projeto deste aterro contém diversos elementos destinados a promover o controle e a mitigação destes impactos. A concepção e o funcionamento destes elementos foram discutidos na seção 2.5 deste trabalho. A presente seção destina-se a apresentar as soluções de controle de impactos ambientais que serão implementadas no ASO e promover uma discussão acerca da sua aplicabilidade perante o contexto geotécnico-ambiental da área, apresentado pelos estudos e documentos que embasaram a escolha desta para locação do aterro – apresentados na seção 4.1 – e a legislação ambiental concernente a este tipo de infraestrutura. O levantamento de tais soluções se deu pelo estudo da documentação de projeto do ASO e complementarmente pelo registro em campo realizado por visitas técnicas.

4.2.1. Documentação de projeto

A documentação de projeto do ASO a qual se teve acesso foi obtida em formato digital diretamente do *website* da Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento do Distrito Federal (ADASA), que solicitou, por meio de um contrato com a CEPOLLINA ENGENHEIROS CONSULTORES LTDA, a confecção do projeto executivo para a implantação da primeira etapa do ASO – que no documento recebe a designação de Centro de Tratamento de Resíduos Sólidos do DF (CTRS-DF) – e o anteprojeto das

infraestruturas de apoio. O foco será dado à documentação referente à implantação do aterro que englobam os seguintes documentos:

- 27 desenhos de projeto que apresentam o detalhamento completo dos elementos do aterro sanitário.
- Relatório final da elaboração do projeto executivo de implantação da primeira etapa do novo aterro sanitário e do projeto básico da demais infraestruturas de apoio ao CTRS-DF.

4.2.1.1. Descrição do plano operacional de avanço

A CTRS-DF em implantação está prevista para operar em quatro etapas sequenciais de disposição de rejeitos. O projeto executivo ao qual se teve acesso é referente a primeira etapa (Etapa 1) sendo que nas duas etapas posteriores (Etapa 2 e 3) os rejeitos serão dispostos em áreas adjacentes àquela utilizada durante a Etapa 1. A última etapa (Etapa 4) é referente ao coroamento do aterro sanitário, e, portanto, nesta etapa a disposição dos rejeitos será realizada sobre as camadas anteriores. Nas Etapas 1, 2, 3 está previsto o alteamento de 4 células, ao passo que na Etapa 4 serão alteadas 5 células. Sob a hipótese de que a demanda de rejeitos irá progressivamente diminuir – sendo de 55.000 toneladas/mês inicialmente – devido a políticas que promovam um maior reaproveitamento dos resíduos coletados e que recalques conservadores, de cerca de 20%, ocorrerão podem-se apresentar as previsões de vida útil para a CTRS-DF, tal qual mostrado na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Previsão da vida útil da CTRS-DF (CEPOLLINA, 2012)

Etapa	Área (m²)	Capacidade (ton)	Vida útil (anos)
1	110.000	1.872.000	3,1
2	122.000	1.990.000	3,2
3	88.000	1.596.000	2,6
4 – Coroamento	-	2.672.000	4,4
Total	320.000	8.130.00	13,3

A Etapa 1, por sua vez, será executada em 4 fases, sendo que o tempo de operação de cada fase varia entre 7,0 e 12,5 meses. A evolução da operação do aterro é mostrada na Figura 4.6. Para iniciar a execução da camada do aterro de base está prevista a escavação

de cerca de 420.000 m³ de solo, correspondente ao volume de solo laterítico superficial que não apresenta aptidão para ser utilizado como fundação em seu estado natural. Parte deste volume de solo (85%) será utilizada para: execução da camada de fundo do aterro, execução dos diques ao redor da área de disposição, execução do aterro sobre o qual será instalada a estação de pré-tratamento de chorume (EPTC), e, por fim, execução das vias de acesso ao aterro. O restante deste solo será disposto em uma área para estocagem de solos. Além das demandas mencionadas, há também a demanda referente à cobertura dos resíduos à medida que se processa o alteamento do maciço de rejeitos. Esta demanda, por outro lado, será suprida pela escavação do terreno designado para a Etapa 2 permitindo então que a operação do aterro durante a Etapa 1 ocorra concomitantemente a preparação do terreno para a implantação da área de disposição de resíduos da Etapa 2.

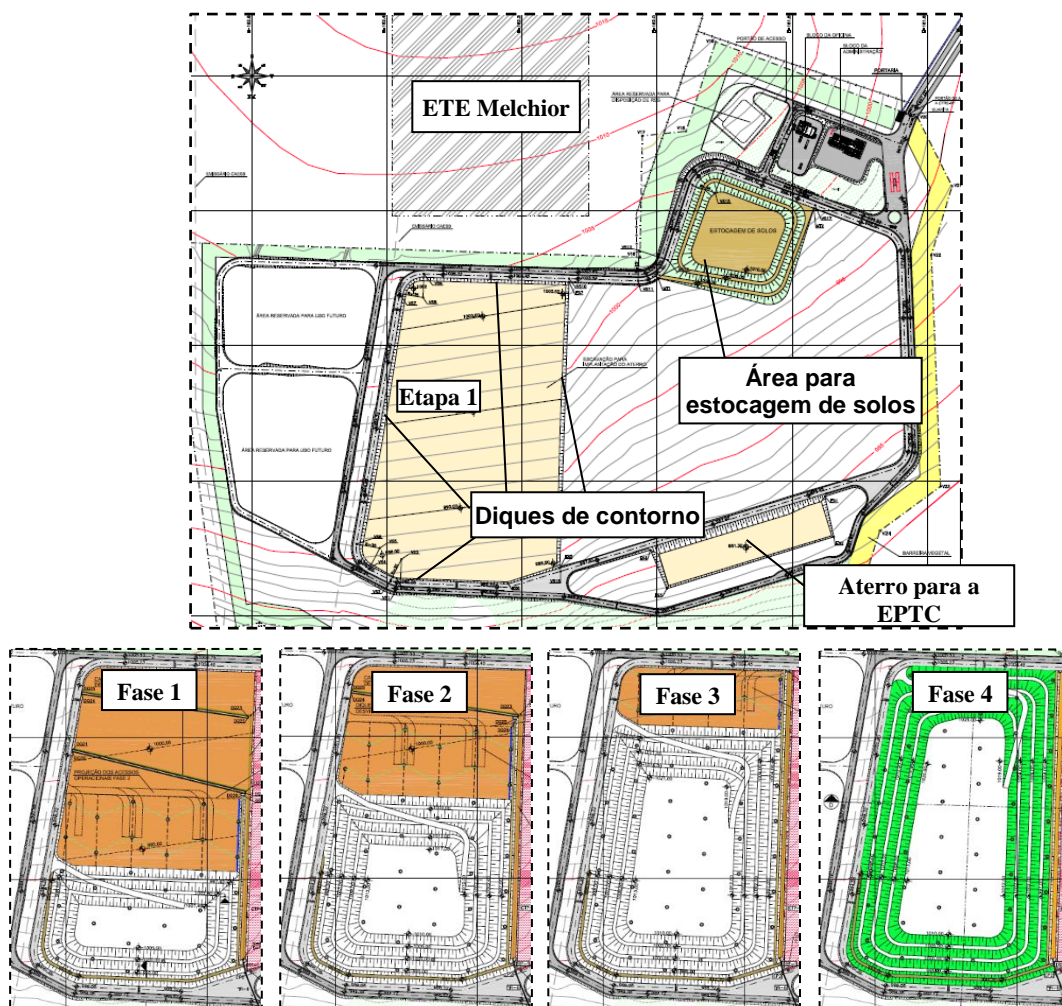


Figura 4.6 - Plano de avanço para a CTRS-DF. Modificado de Cepollina (2012)

Nota-se, portanto, que o plano de avanço designado para a CTRS-DF restringe as operações de corte à poligonal definida para a implantação desta, sendo este um aspecto positivo tanto do ponto de vista econômico quanto ambiental, uma vez que os gastos com movimentação de solos são minimizados e a adoção de áreas de empréstimo, que se traduzem em alterações geomorfológicas, não é necessária. Este aspecto é consequência direta da escolha de uma área cujos solos de cobertura apresentam aptidão para constituírem os elementos do aterro, como ressaltado na seção 4.1 deste trabalho.

4.2.1.2. Drenagem subsuperficial

A área onde irão ser depositados os rejeitos durante a Etapa 1 da operação da CTRS-DF, após os serviços de escavação e terraplenagem, receberá primeiramente um sistema de drenagem das águas subsuperficiais. Do ponto de vista geotécnico, este sistema desempenha função de grande relevância pois evita que, em uma eventual elevação do nível do lençol freático, a estabilidade do aterro seja condicionada pelas subpressões geradas na base do aterro. Ainda, do ponto de vista ambiental, a existência deste sistema permite o monitoramento da eficiência das soluções de confinamento da contaminação por meio da avaliação das propriedades físico-químicas e sanitárias por ele drenadas e comparação com os valores de referência estabelecidos para as águas subsuperficiais da região. As estruturas que compõem este sistema devem ter durabilidade condizente com as solicitações a que serão sujeitas durante sua operação e baixa demanda por manutenções, visto que a sua localização dificultaria a realização de intervenções.

O sistema em questão é composto por linhas de drenos subsuperficiais principais dos quais partem derivações, que representam os drenos subsuperficiais secundários, em um arranjo do tipo espinha de peixe, locados na base da escavação inicialmente realizada. Estas linhas são espaçadas de acordo com a capacidade drenante de cada tipo de dreno. As vazões coletadas pelos drenos principais são destinadas a um dreno coletor subsuperficial que, após o recebimento da vazão do dreno principal mais a jusante, destina a vazão total ao emissário subsuperficial. Este sistema, visto em planta, e o detalhamento de cada um de seus elementos são apresentados na Figura 4.7.

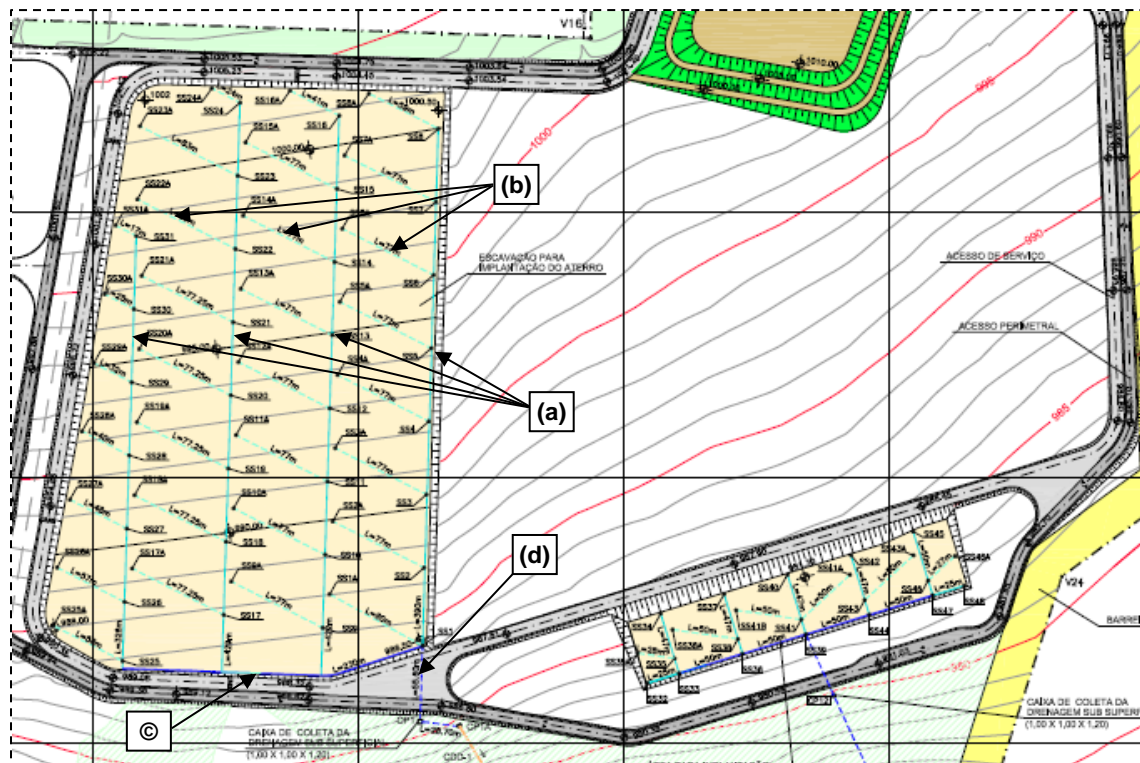
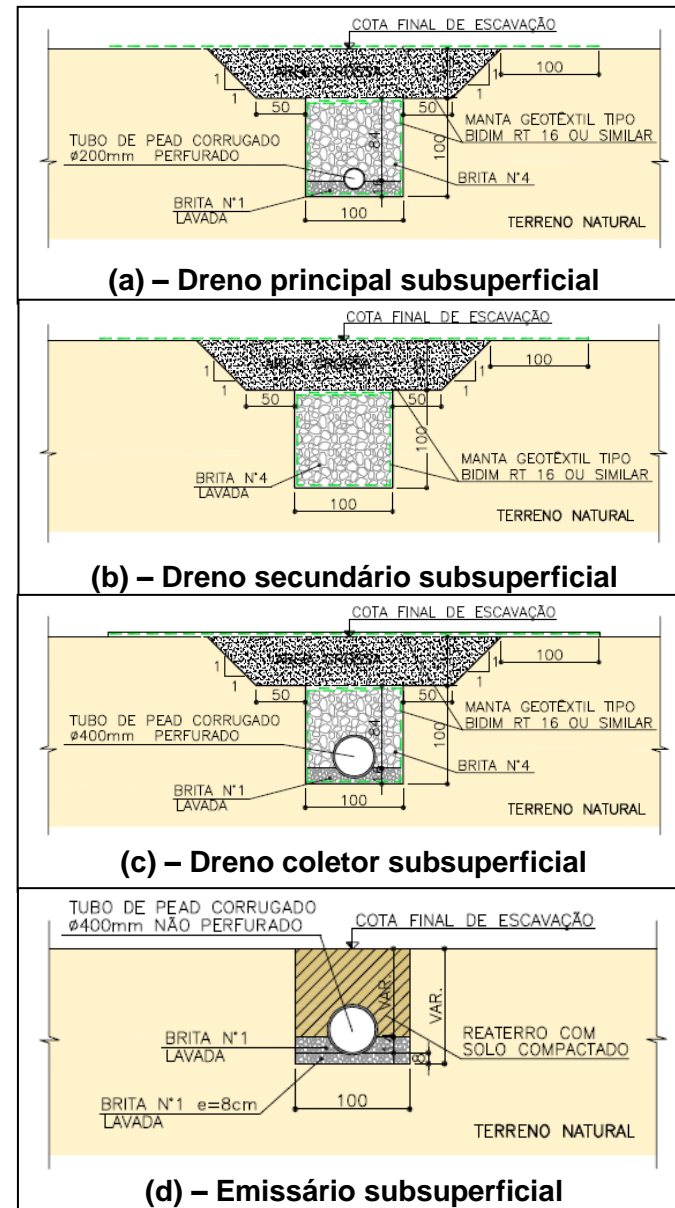


Figura 4.7 – Esquema em planta dos elementos de drenagem subsuperficial de águas da CTRS-DF e detalhamento destes. Modificado de CEPOLLINA (2012).



Nota-se, pelos detalhamentos dos elementos do sistema, que uma série de medidas foram adotadas visando garantir a sua eficiência e durabilidade perante as solicitações do aterro. Primeiramente, nota-se que os drenos A, B e C possuem, acima da seção drenante principal constituída pela brita nº4, uma camada de areia que se alarga em direção à base do aterro de rejeitos. Além de aumentar a capacidade drenante dos elementos como um todo, esta camada tem ainda como função promover uma maior distribuição das tensões oriundas do maciço de rejeitos e amenizar a diferença de rigidez entre as camadas constituintes da base do aterro sanitário e a seção drenante de brita nº4, amenizando assim o efeito de arqueamento de tensões sobre as linhas de dreno e possíveis comprometimentos à integridade da camada de fundo do aterro. Nota-se também a utilização de manta geotêxtil não-tecida nas interfaces entre a seção drenante principal e o solo de fundação, e entre a camada de areia e a camada de fundo do aterro sanitário. Esta aplicação evita o carreamento de solos com menor granulometria para o interior das seções drenantes, o que resultaria na perda da capacidade drenante destes elementos devido à sua colmatação física por estes solos (PALMEIRA, 2003). Por outro lado, além deste tipo de colmatação pode ocorrer ainda a colmatação interna do filtro de geotêxtil não-tecido, pela formação de gel de óxido de ferro quando os líquidos, possuindo elevada concentração de íons de ferro, que por ele percola, entram em contato com a atmosfera. Sabendo-se da elevada concentração de íons de ferro nos latossolos presentes na área pode-se evitar tal tipo de colmatação projetando os drenos para que operem de forma afogada e, portanto, permitindo que ela ocorra apenas na saída destes (PROGEA, 2005).

4.2.1.3. Impermeabilização

Um dos principais componentes aterros sanitários e que os distingue dos aterros controlados e lixões é o sistema de impermeabilização e que por sua vez é propriamente um tipo de solução para o controle dos impactos ambientais decorrentes da geração dos percolados de rejeitos. A solução específica adotada para a CTRS-DF é em camada composta simples, consistindo na associação de uma geomembrana a uma camada compactada de argila, tal qual na Figura 4.8. A camada de argila compactada terá ao final 1,5 m e será compactada em etapas. A parte inferior desta camada será compactada com o revolvimento e compactação do solo local e a superior pelo lançamento de camadas de solo com até 25 cm de espessura, gradeamento e compactação com rolo compactador do

tipo Tamping. A principal exigência, em termos de propriedades hidrogeotécnicas, é que a camada possua coeficiente de permeabilidade de 10^{-7} cm/s ou menor, que será garantido pelo controle de qualidade durante a compactação de cada camada, com exigência de 98% de grau de compactação, segundo a Metodologia Hilf, e teores de umidade variando entre $0,95 \cdot w_{opt}$ e $1,10 \cdot w_{opt}$. A execução deste controle é prevista para cada 2500 m³ de solo ou numa eventual mudança do solo utilizado no aterro. Deve-se ainda, de maneira direta, determinar a permeabilidade da camada compactada, por meio de ensaios laboratoriais, com permeômetros de carga variável, em corpos de prova retirados desta. Segundo os resultados dos ensaios de permeabilidade realizados em campo e em laboratório apresentados na seção 4.1.1 o solo empregado nesta camada possui, em seu estado natural, permeabilidade aquém daquela especificada para seu emprego como camada impermeabilizante.

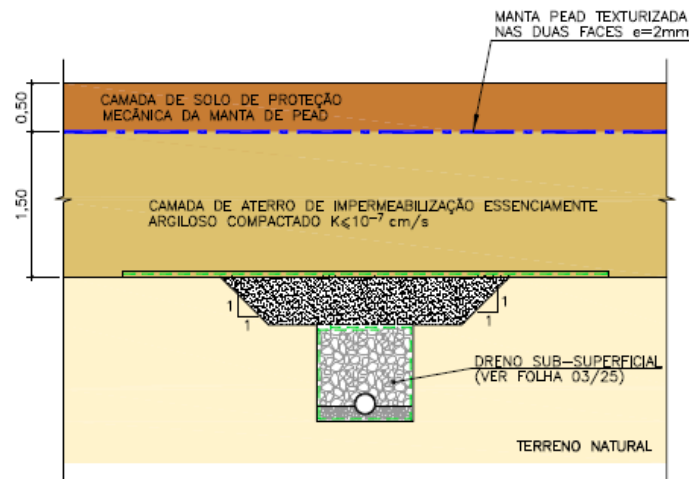


Figura 4.8 – Detalhamento da camada composta simples de impermeabilização da CTRS-DF (CEPOLLINA, 2012).

Sobrejacente a camada compactada será instalada uma geomembrana de Polietileno de Alta Densidade (PEAD) com espessura de 2 mm e texturizada em ambas as faces. Esta textura é responsável por atribuir melhores propriedades mecânicas à interface solo geomembrana, o que pode ser um condicionante da estabilidade dos taludes de contorno do aterro. Para manter a integridade desta geomembrana perante a existência de rejeitos que possam danificá-la quando em contato direto, está prevista uma camada de solo para proteção mecânica de 0,50 m acima desta. Nestes taludes, esta camada será executada imediatamente antes da disposição dos rejeitos, uma vez que as grandes declividades

dificultam a utilização de equipamentos como tratores esteira e similares. Portanto, nestes taludes a geomembrana permanecerá desprotegida até que se processe o alteamento do maciço de rejeitos, o que suscita questionamentos acerca de danos a sua integridade pelo processo de foto-degradação. Há outros possíveis mecanismos de degradação e que são mostrados na Tabela 4.5 bem como a resistência a estes mecanismos dos polímeros que comumente constituem as geomembranas.

Tabela 4.5 – Resistência dos polímeros constituintes de geomembranas à diversos tipos de mecanismos de degradação (JOHN, 1987; DEN HOEDT, 1988 apud REBELO, 2003).

Mecanismos de degradação	Polímero			
	PET	PP	PEAD	PA
Foto-degradação	3	3 a 1	3 a 1	2
Termo-oxidação	3	1	1	2
Hidrólise	1	2	2	1
Degradação biológica	3	3	3	3
Degradação química à álcalis	1	2 a 3	3	2
Degradação química à ácidos	2	3	3	1
Fluência	3	2	2	2

Resistência elevada (3), resistência média (2), resistência baixa (1)

A variação entre 3 e 1 para a resistência a fotodegradação depende se há o tratamento da geomembrana, por exemplo, pela aplicação de “negro de fumo” (JOHN, 1987; DEN HOEDT, 1988 apud REBELO, 2003). Além dos mecanismos comentados anteriormente vale ressaltar que a geomembrana estará ainda em contato com os percolados dos rejeitos e que tem o potencial de desencadear mecanismos de degradação de ordem química. Portanto, dentre as demais geomembranas, aquelas confeccionadas com PEAD são as que possuem melhores resistências aos mecanismos de degradação que podem potencialmente ocorrer na CTRS-DF.

As recomendações normativas – NBR 13896/ ABNT (1997) – correlatas às camadas impermeabilizantes de aterros de resíduos não perigosos possuem cunho generalista e resumem-se à:

- Possuir propriedades químicas compatíveis com o resíduo e ter espessura e resistência suficientes para evitar ruptura devido a: pressões hidrostáticas,

pressões hidrogeológicas, tensões de instalação e da operação diária, condições climáticas.

- Assentar-se sobre subsolo suficientemente competente, e suportar os gradientes de pressão oriundos deste subsolo e do maciço de rejeitos, evitando rupturas por soerguimento ou compressão na fundação.
- Recobrir a superfície do solo natural de maneira que os rejeitos ou o percolato gerado não entrem em contato com este solo.

Por outro lado, de acordo com a CETESB (1993), os solos com maior aptidão para serem utilizados na construção de camadas impermeabilizantes são aqueles que possuem as seguintes características:

- Classificação CH, CL, SC ou OH segundo o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS).
- pH maior ou igual a 7
- Porcentagem de finos, que passam na peneira nº 200, de no mínimo 30%.
- Coeficiente de permeabilidade menor que 10^{-9} m/s
- Limite de liquidez maior ou igual a 30% e Índice de Plasticidade de no mínimo 15%

4.2.1.4. Diques

Uma vez que nas etapas de preparação da área de implantação CTRS-DF foram executadas escavações dos horizontes superficiais do terreno há a necessidade da execução de diques de disparo no entorno da área escavada que será utilizada para a disposição dos rejeitos. Na face interna a área de disposição de rejeitos estes diques recebem a geomembrana, porém, como anteriormente salientado, a camada protetora desta será executada conjuntamente com o alteamento do maciço de rejeitos. Na crista desta face realiza-se a ancoragem da geomembrana tal como mostrado na Figura 4.9. Estes diques serão executados com as mesmas diretrizes de compactação apresentadas anteriormente, já que por eles pode haver fluxo de percolados.

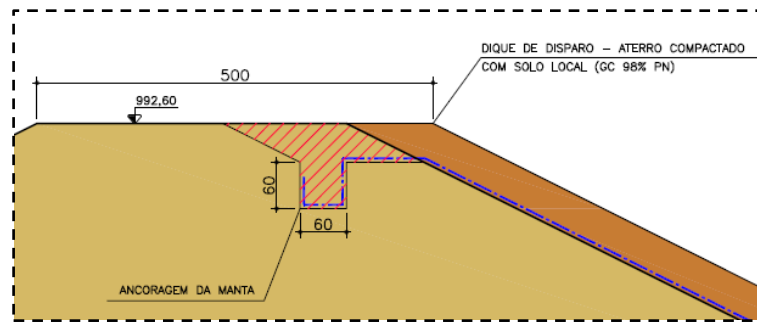


Figura 4.9 - Ancoragem da geomembrana na crista da face interna do dique (CEPOLLINA, 2012)

Estes diques, além de viabilizarem o completo confinamento dos rejeitos dispostos, ainda possuem a função de prover certa estabilidade ao maciço de rejeitos que será alteado. A avaliação desta estabilidade foi realizada para uma condição de alteamento pleno e para uma seção (C-C) considerada como a mais crítica. Para tal avaliação utilizou-se o Método de Bishop Simplificado, com a adoção de parâmetros de resistência conservadores, para rupturas por cunhas circulares e planas (CEPOLLINA, 2012). As poropressões no maciço, por serem desconhecidas, foram levadas em consideração a partir da adoção de um valor para o parâmetro R_u , que relaciona as poropressões existentes em um ponto à tensão vertical total atuante no mesmo ponto. Na Figura 4.10 nota-se que a superfície circular crítica está restrita ao maciço de rejeitos, o que indica que a fundação não condiciona a estabilidade do maciço. Em parte, isso é garantido pela existência do dique em aterro compactado que possui propriedades geotécnicas – quanto a resistência ao cisalhamento – melhores que a argila arenosa subjacente e atua como uma berma no pé do talude. Na hipótese de que a fundação condicionasse a estrutura do maciço a cunha de ruptura interceptaria a base do aterro sanitário, comprometendo então o sistema de impermeabilização e ocasionando o vazamento dos percolados para o meio externo. No caso das rupturas por superfícies planas, no contato entre a geomembrana e os rejeitos, nota-se que a inclinação da face interna do dique é contrária a tendência de deslizamento, auxiliando, portanto, na estabilidade do maciço. Os fatores de segurança obtidos estão de acordo com o fator de segurança mínimo exigido ($FS = 1,5$) para análises utilizando-se modelos matemáticos em taludes de alto risco local (ABNT, 1991).

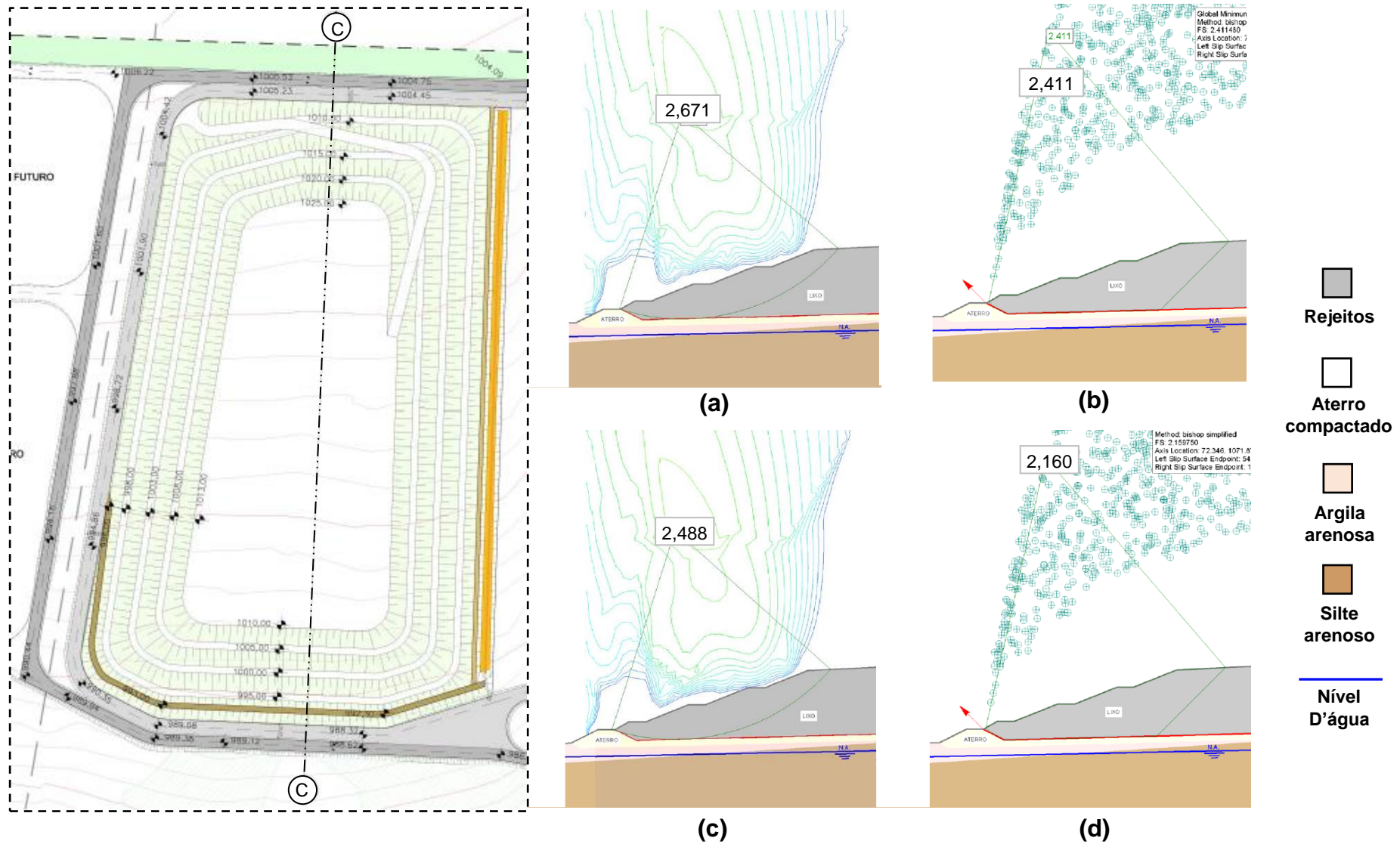


Figura 4.10 – Avaliação da estabilidade dos taludes para rupturas circulares (a) $R_u = 0,2$ (c) $R_u = 0,3$ e planares (b) $R_u = 0,2$ (d) $R_u = 0,3$
 Modificado de CEPOLLINA (2012)

Nota-se que foram utilizados valores de R_u de 0,2 e 0,3, este último representando um cenário de maior produção de percolados e conseqüente maiores poropressões no maciço de rejeitos, e, portanto, acarretando em menores fatores de segurança. A utilização dos parâmetros drenados do solo, mediante a inferência das poropressões tanto pelo nível d'água quanto pelo parâmetro R_u , está coerente com a avaliação que se almeja realizar – a longo prazo e supondo completa dissipação dos excessos de poropressão – já que o alteamento desta etapa do aterro se dá em um tempo suficiente para garantir tais hipóteses. A Figura 4.11 mostra o tempo ($t_{99\%}$) necessário para a dissipação de 99% das poropressões em função da espessura do caminho de drenagem e o tipo de solo. Vê-se que o tempo de 3 anos – aproximadamente o tempo para completa execução da Etapa 1 – é suficiente para que uma camada de aproximadamente 10 m de argila praticamente não possua mais excessos de poropressões.

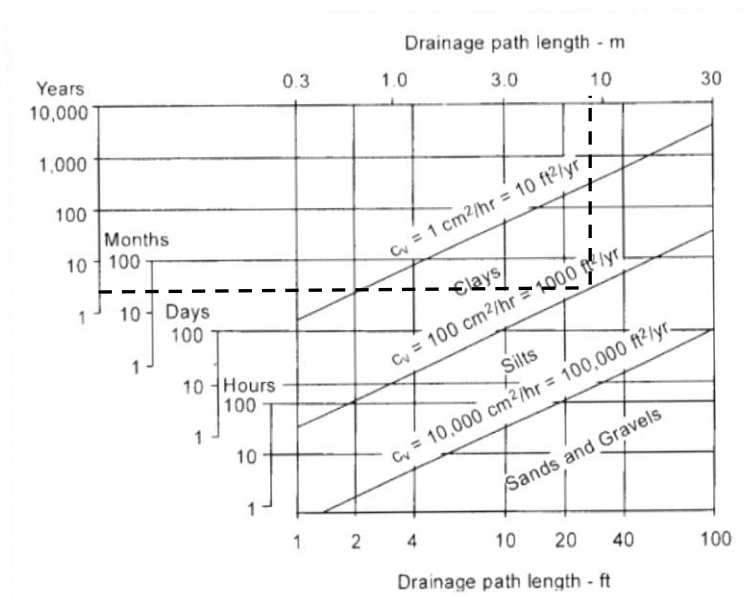


Figura 4.11 - Tempo necessário para 99% de dissipação das poropressões em função do caminho de drenagem e do tipo de solo (baseado na teoria do adensamento de Terzaghi). (DUNCAN; WRIGHT; BRANDON, 2014)

Além dos diques de disparo será executado ainda um dique intermediário que promove a separação entre o maciço de aterro executado na Etapa 1 do maciço que virá a ser alteado na área adjacente, durante a Etapa 2. Este dique, é executado sobrejacente à camada de proteção da mecânica da geomembrana e, portanto, não se faz necessária a sua impermeabilização.

4.2.1.5. Drenagem de percolados na fundação

Como parte integrante das soluções para mitigação dos impactos ambientais está previsto, na fundação do aterro e instalado superficialmente à camada de proteção da geomembrana, um sistema de drenagem dos percolados gerados no maciço de rejeitos. São quatro os componentes deste sistema: drenos principais, drenos secundários, drenos coletores e emissário de chorume. Os drenos principais e coletores interceptam os drenos verticais, que são instalados sobre estes drenos e conduzem o chorume drenado internamente do maciço aos drenos de fundação, como será visto posteriormente.

Os drenos constituem-se de linhas arranjadas sobre um esquema do tipo “espinha-de-peixe” em que os drenos secundários conduzem as vazões para os primários que, por sua vez, destinam as vazões coletadas para os drenos coletores. A eficiência deste sistema deve ser garantida já que, caso contrário, os maiores valores de poropressões no maciço poderiam induzir uma ruptura deste, como evidenciado na Figura 4.10 com a diminuição do fator de segurança por um aumento do parâmetro R_u . Nota-se, pela Figura 4.12, que um importante detalhe executivo para evitar a perda de eficiência dos drenos é a retirada da manta geotêxtil imediatamente antes da disposição de resíduos, indicando que a sua existência é necessária apenas para manter a geometria dos drenos enquanto os rejeitos não são dispostos sobre estes. Este detalhe é identificado como uma medida mitigadora da perda de eficiência do dreno uma vez que já se têm reconhecimento amplo na literatura científica de que a percolação de lixiviados de rejeitos por geotêxteis pode ocasionar a sua colmatção física, química e biológica. Estudos de laboratório indicaram que logo nos primeiros estágios da percolação – em um tempo menor que 1 dia – houve uma queda da permeabilidade entre uma e duas ordens de magnitude, a depender do geotêxtil utilizado (PALMEIRA *et al.*, 2008). Portanto, não é desejável que este material esteja submetido ao fluxo dos percolados durante a operação do aterro, visto que, com o tempo o sistema como um todo se tornaria ineficiente.

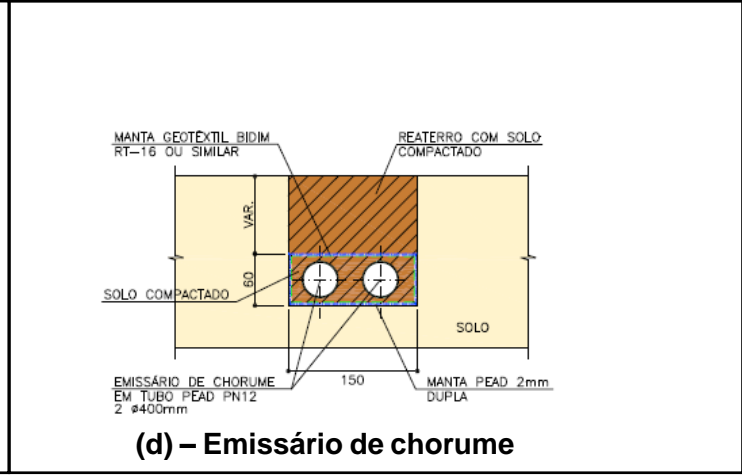
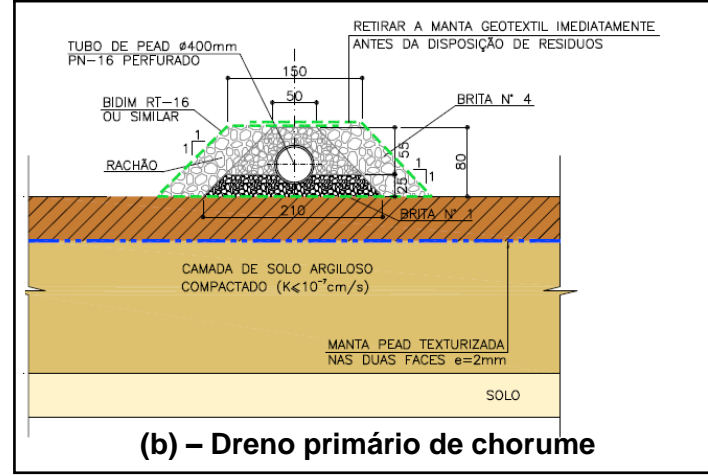
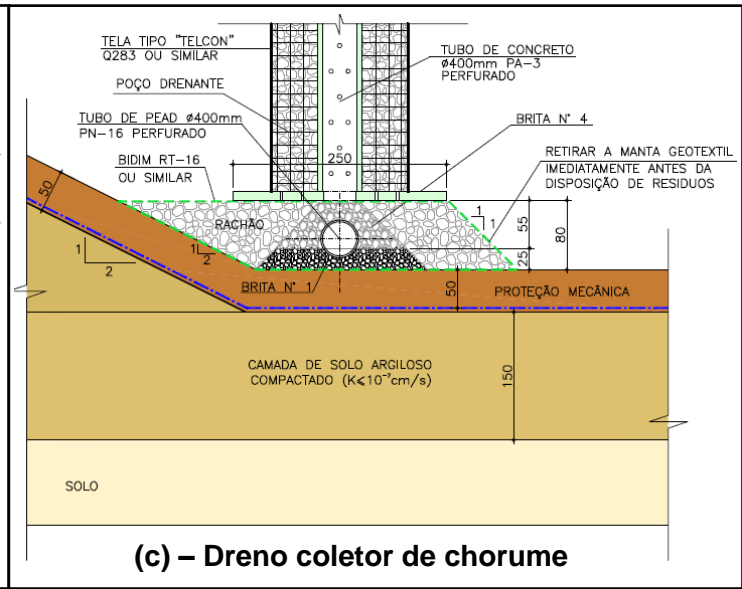
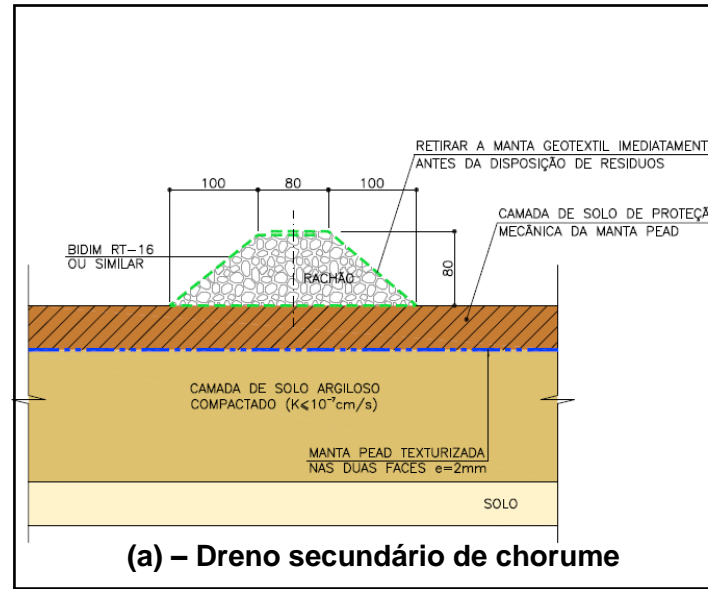
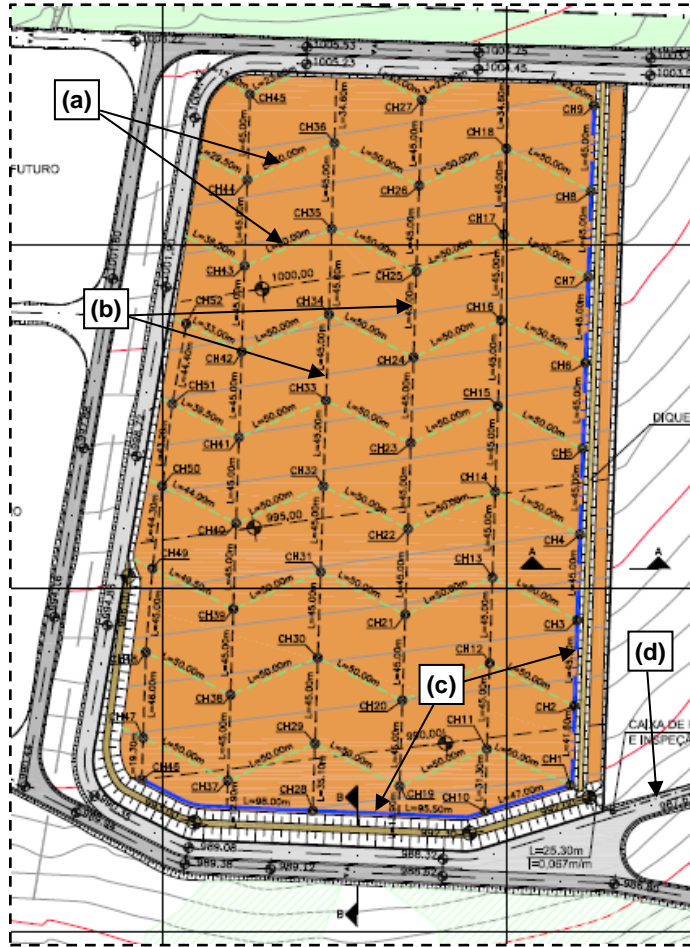


Figura 4.12 – Esquema em planta dos elementos de drenagem de percolados na fundação da CTRS-DF e detalhamento destes. Modificado de Cepollina (2012).

A principal referência normativa – NBR 13896/ ABNT (1997) – estabelece que a instalação deste sistema deve ser realizada diretamente acima da impermeabilização prevendo-se a formação de uma lâmina de percolado de no máximo 30 cm de profundidade. Além disso, os seus materiais constituintes devem ser apresentar resistência química aos resíduos e líquidos percolados e mecânica às pressões da maça de resíduo, de modo que possam operar sem obstruções durante a vida útil e após o fechamento do aterro.

4.2.1.6. Células de resíduo e camada de cobertura

Concluída a instalação do sistema de drenagem de percolados da fundação pode-se dar início à disposição dos rejeitos. Estes rejeitos serão descarregados ao pé da célula de disposição e serão compactados em sentido ascendente por meio de um trator de esteiras. Estas camadas estariam dispostas com espessuras entre 30 cm e 60 cm com uma cobertura sanitário ao fim do dia de no mínimo 20 cm de solo retirado da área onde será alteado o maciço referente a Etapa 2 ou de material inerte. Com a conclusão de cada célula – com espessura de 5 m – são implantados os sistemas de drenagem interna de chorume e gases, como será visto na seção seguinte. Está previsto o alteamento de quatro células e que seguem o plano de avanço mostrado previamente na Figura 4.6. Para a camada de cobertura final dos taludes, bermas e platôs está prescrita uma camada de no mínimo 50 cm de espessura de solo compactado, sendo que nos taludes e bermas será plantada grama, para proteção destes, e um sistema de drenagem das águas pluviais.

A camada de cobertura, sendo uma camada que se presta a múltiplas funções, como já discutido na revisão teórica deste trabalho, deve também possuir diretrizes executivas que viabilizem o cumprimento destas funções. Discutiu-se certa flexibilização, quanto às diretrizes executivas, da principal norma relacionada a aterros de RSU – NBR 13896/ ABNT (1997) – *Aterros de resíduos não perigosos – Critérios para projeto, implantação e operação* – podendo isto, por um lado positivo, ser um incentivo à inovação tecnológica, por meio da adoção de soluções alternativas. A norma categoriza a camada de cobertura final como um dos itens constituintes do plano de encerramento do aterro sanitário e que devem ser projetadas “de forma a minimizar a infiltração de água na célula, exigir pouca manutenção, não estar sujeita a erosão, acomodar assentamento sem fratura e possuir um

coeficiente de permeabilidade inferior ao solo natural da área do aterro” (ABNT, 1997). Considerando-se estes critérios uma necessidade primária desta camada é a sua estanqueidade visando assim a minimização da geração de percolados. Para este caso valem as recomendações da CETESB (1993) mencionadas na seção 4.2.1.3. Por outro lado, a camada de cobertura final está sujeita a solicitações – ciclos de molhagem/secagem, recalques diferenciais – que podem mobilizá-la a tração e, por sua vez, causar o seu fissuramento.

Estudos realizados por Costa (2015), em amostras de solo retiradas no local indicado na Figura 4.1 e moldadas em corpos de prova cilíndricos na umidade ótima com energia Proctor Normal, indicaram que apenas três ciclos de umedecimento e secagem foram suficientes para ocasionar um acréscimo da permeabilidade em cerca uma ordens de magnitude (de cerca de $3 \cdot 10^{-9}$ m/s para $4 \cdot 10^{-8}$ m/s) sem que, no entanto, estivessem presentes fissuras visíveis a olho nu no topo do corpo de prova. Isto indica que o fissuramento interno e o surgimento de microfissuras podem aumentar significativamente os volumes de água infiltrados em uma camada de cobertura sujeita a estes ciclos, aumentando o volume de percolado gerado. Não sendo possível amenizar estas alterações, deve-se, pelo menos, levá-las em conta para o dimensionamento das estruturas previamente apresentadas, principalmente os sistemas de drenagem de percolados. Em uma tentativa de minimizar a ocorrência de trincas e fissuras em camadas compactadas Costa (2015) estudou a utilização de misturas do solo da região da CTRS-DF com materiais alternativos – fibras produzidas com garrafas PET e resíduos da construção civil (RCC). Os resultados mostram que a incorporação de certos teores de RCC aumenta o tempo para o aparecimento das primeiras trincas em uma camada compactada sujeita a ciclos de molhagem e secagem. Além disso, houve tendência de regeneração de algumas fissuras ao longo dos ensaios quando da utilização do RCC.

Vê-se, portanto, que as características da camada de cobertura final condicionam o dimensionamento do sistema destinado a drenagem dos percolados, pois regulam uma maior ou menor geração destes no maciço. Além disso, esta camada pode também condicionar o desempenho de outros sistemas do aterro, como é o caso do sistema de drenagem e coleta de gases de um aterro, como será apresentado na seção seguinte.

4.2.1.7. Drenagem interna de percolados e gases

Concomitante ao alteamento das células do aterro e ao seu avanço pela área proposta para a Etapa 1 realiza-se a implantação dos elementos que compõem a drenagem interna de percolados e gases do aterro. Estes elementos constituem-se de drenos horizontais internos e poços drenantes verticais. Os drenos horizontais seguem o mesmo arranjo em planta dos drenos primários e secundários de fundação – Figura 4.12 –, porém, implantados na superfície das células finalizadas. Os poços drenantes verticais, por sua vez, são implantados conectando estes drenos internos aos drenos primários na fundação. Em planta, estes poços verticais estão localizados no ponto onde os drenos secundários de fundação encontram-se com os drenos primários. A instalação destes poços inicia-se com a instalação dos drenos de fundação e é gradualmente avançada à medida que se dá o alteamento das células de rejeitos, prevendo-se a sua conexão com os drenos internos nos pontos onde estes poços atingirem a superfície da célula alteada. Portanto, nota-se que este é um sistema de drenagem mista, uma vez que os drenos internos drenam tanto os percolados quanto os gases produzidos no interior do maciço, sendo que os poços drenantes verticais conduzem os gases para a atmosfera e os percolados aos drenos de fundação (CEPOLLINA, 2012)

A Figura 4.13(a) e Figura 4.13(b) apresentam o detalhamento dos drenos internos horizontais para dois momentos distintos.

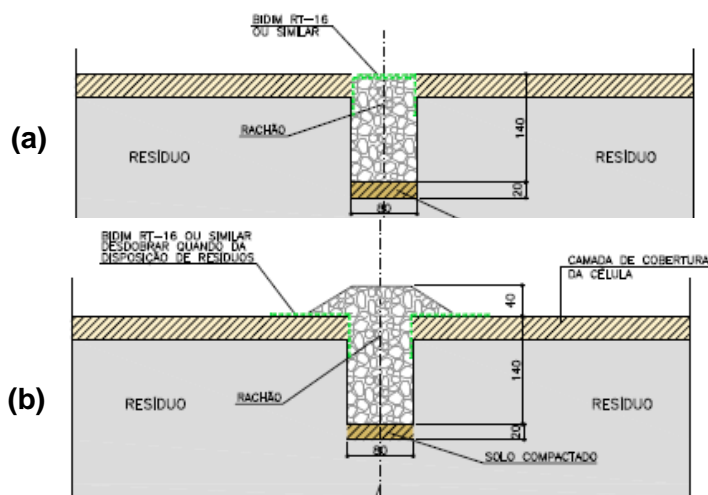


Figura 4.13 – Drenos internos horizontais (a) após a conclusão da célula (b) imediatamente antes da execução da célula de lixo sobrejacente. (CEPOLLINA, 2012)

Nota-se que, na interface entre o solo argiloso da cobertura da célula e o rachão, que compõe o dreno interno, foi alocado um geotêxtil não tecido do tipo Bidim[®], impedindo então o possível carreamento de finos para o interior do dreno granular. Por outro lado, na interface entre o dreno e os resíduos não se tem presente este geotêxtil visando evitar a sua colmatagem, pelos motivos já expostos na seção 4.2.1.5, e eventual perda de eficiência destes drenos. Não se faz necessária a aplicação de um filtro entre o dreno e a camada compactada que o sobrejaz dado que o sentido do fluxo em potencial se dá no sentido da camada compactada, e não do dreno. Em funcionamento conjunto e complementar a estes drenos os poços drenantes verticais os interceptam conforme mostrado na Figura 4.14.

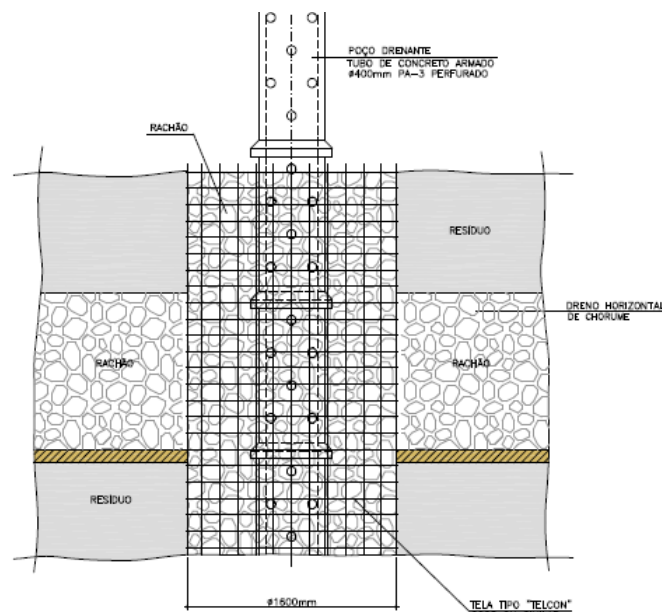


Figura 4.14 – Conexão entre os poços drenantes verticais e o dreno interno horizontal. (CEPOLLINA, 2012)

Nestes poços o fluxo de percolados se dá descendentemente no sentido dos drenos de fundação, que por sua vez, é destinado aos drenos primários e coletores de fundação, cuja conexão com estes se dá como apresentado na Figura 4.12(c). Os gases, por outro lado, ascendem por estes poços até a atmosfera e, visando amenizar a poluição do ar por estes, sofrem combustão nos queimadores existentes no topo da última célula executada, como detalhado na Figura 4.15. A drenagem destes gases se dá de maneira passiva, em que os drenos representam os caminhos preferenciais para a percolação destes para a atmosfera. Há de se ressaltar, porém, que a última célula de alteamento não possui os drenos horizontais em seu topo, e sim a camada de cobertura final – constituída basicamente por

uma camada de solo argiloso compactado – que na hipótese de apresentar-se consideravelmente fissurada, pode representar um caminho preferencial dos gases, permitindo o escape destes para a atmosfera.

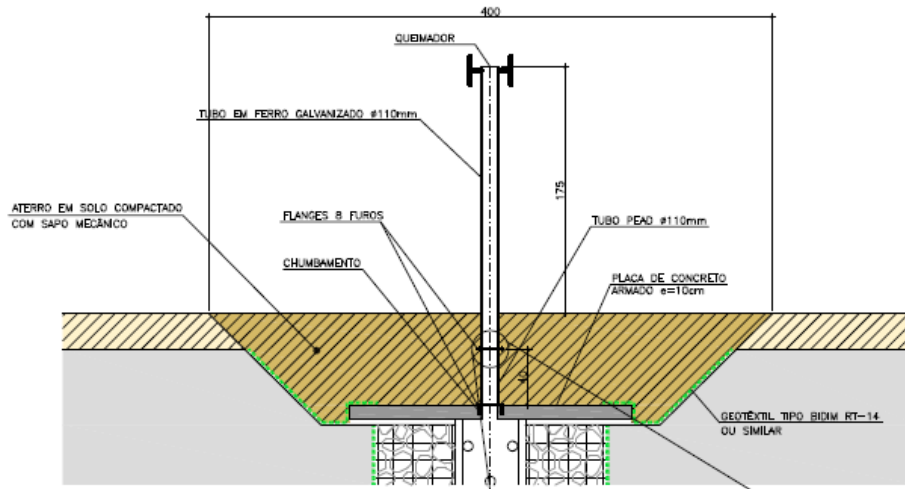


Figura 4.15 – Detalhe do queimador no topo da célula finalizada. (CEPOLLINA, 2012)

Uma possível solução que permitiria amenizar isto é a incorporação de camadas com características específicas à camadas de cobertura final da CTRS/DF. A colocação, por exemplo, de uma camada contínua de solo granular de alta permeabilidade, ou material inerte grosso como RCC, de alta permeabilidade entre os rejeitos e a camada compactada de argila, em que a interface desta camada e a camada compactada de argila esteja inclinada em direção aos poços drenantes verticais, direcionaria os gases a estes poços.

4.2.1.8. Drenagem de águas pluviais

Visando ainda, principalmente, a minimização das vazões infiltradas no maciço de rejeitos e o controle do escoamento superficial oriundo de precipitações. Este sistema é composto de elementos dispostos sobre o maciço do aterro e perimetral a este. Estes elementos resumem-se a: canaletas de pé de talude, descidas em colchão Reno[®], canais triangulares e canais retangulares (CEPOLLINA, 2012). A disposição espacial destes elementos é mostrada na Figura 4.16 bem como o detalhamento destas.

No topo da última célula de alteamento serão escavadas canaletas triangulares – Figura 4.16(c) – que receberão o escoamento superficial gerado nesta plataforma, e os conduzirá às descidas hidráulicas, localizadas nos taludes formados pelo maciço de rejeitos. É previsto o plantio de grama em toda a superfície destas canaletas, visando adequá-la do

ponto de vista da resistência à erosões (CEPOLLINA, 2012). No pé dos taludes está prevista a execução de canaletas triangulares superficialmente à camada de cobertura – Figura 4.16(d) – das bermas entre taludes consecutivos. Estas canaletas constituem-se de material granular (Brita 2) que é agulhado à superfície escavada na camada de cobertura, e drenam o escoamento superficial advindo dos taludes e das próprias bermas nas quais estão localizadas. Estas canaletas eventualmente interceptam as descidas hidráulicas em colchão Reno[®], e a estas destinam as vazões drenadas. A descida hidráulica mencionada é constituída basicamente de uma seção trapezoidal, escavada no talude de rejeitos, e revestida sobrepondo-se uma camada inferior de solo argiloso compactada, manta PEAD de 1,5 mm, outra camada de solo argiloso e, por fim, o colchão Reno[®]. Este colchão é formado por uma malha de arame em formato de paralelepípedo cujo interior é preenchido com material grosso. Estes colchões são instalados de maneira que os colchões consecutivos possuam certa sobreposição – Figura 4.16(a) –, arranjo que forma degraus responsáveis por dissipar a energia da água por eles conduzida. Disposto perimetral ao maciço de rejeitos, ao pé do talude da célula mais inferior, será executado o canal retangular em alvenaria – Figura 4.16(b) – que receberá, das descidas hidráulicas, as águas drenadas em toda a superfície do aterro e as destinam a um reservatório de qualidade e um reservatório de quantidade, nesta sequência.

Este sistema tem funções múltiplas e que se resumem a:

- Mitigar o desencadeamento de processos erosivos da camada de cobertura do aterro pelo encaminhamento controlado do escoamento superficial gerado na área deste devido a precipitação.
- Evitar o acúmulo de água na superfície do aterro, minimizando assim a quantidade de água infiltrada e que posteriormente se configuraria em lixiviados dos rejeitos.
- Conter os escoamentos superficiais que por vezes podem possuir propriedades físico-químicas ou regimes de vazões inadequados para serem lançados, sem tratamento prévio, a um corpo hídrico.

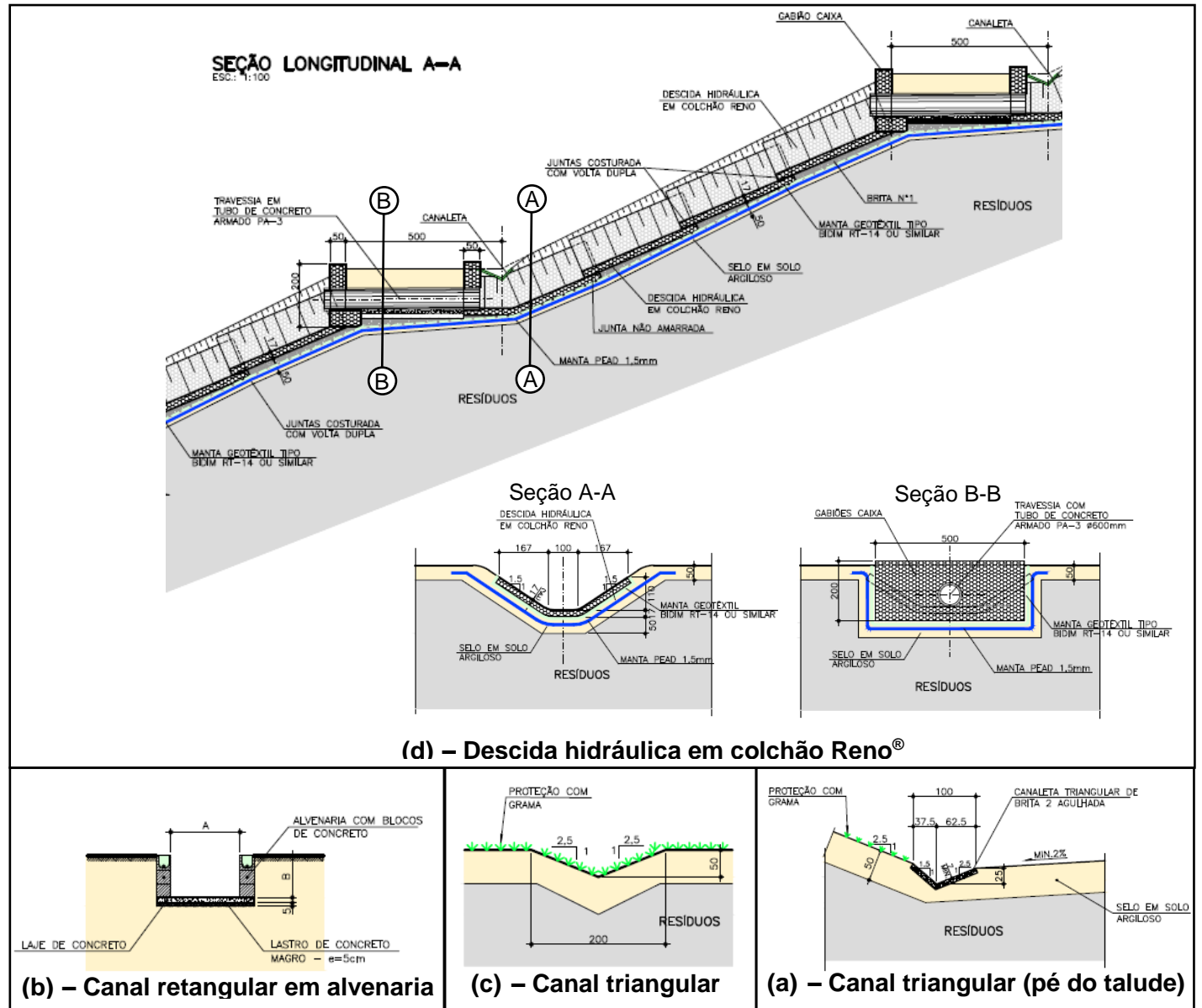
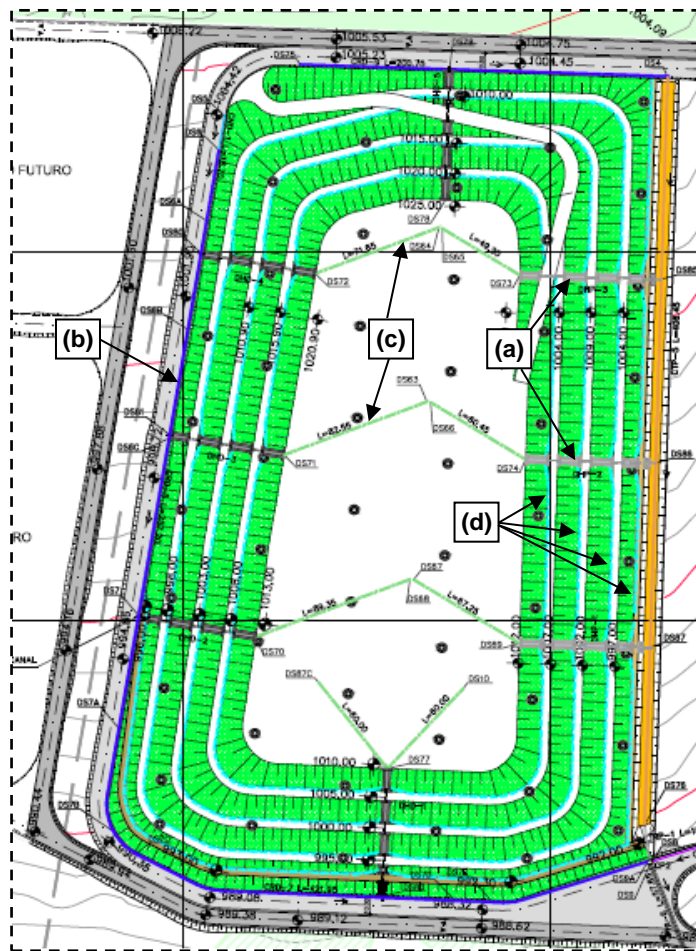


Figura 4.16 – Elementos de drenagem superficial de águas pluviais da CTRS/DF. Modificado de Cepollina (2012).

Para que esta última função seja garantida os escoamentos provenientes dos canais retangulares são destinados a reservatórios de qualidade e quantidade, assim como determinado pela Resolução nº 9/2011 da ADASA (ADASA, 2011). O reservatório de qualidade, segundo esta resolução, destina-se a amenizar a carga poluente a ser lançada nos corpos hídricos adjacente, pela retenção de certo volume de água oriundo do escoamento superficial devido a impermeabilização de determinada área (ADASA, 2011). O dimensionamento deste reservatório se dá em função da área que contribui com o escoamento superficial e tem como principal condicionante a vazão de saída deste reservatório, ficando implícito que é exigido certo tempo de detenção para que as propriedades físico-químicas destas águas estejam adequadas para lançamento no corpo hídrico adjacente, que no caso da CTRS/DF é o Rio Melchior. Por outro lado, não somente as propriedades físico-químicas do escoamento podem impactar o Rio Melchior, mas também o regime de vazões dos escoamentos captados pelo sistema. Para retardar este escoamento – proveniente da impermeabilização da área em questão – e reduzir as vazões de pico deste, pela retenção de certo volume de água, está previsto, a jusante do reservatório de qualidade, a implantação de um reservatório de quantidade. O seu dimensionamento, para uma área de contribuição inferior a 200 ha – sendo este o caso da CTRS/DF – é realizado levando-se em consideração esta área e o percentual de área impermeável do terreno (ADASA, 2011).

4.2.1.9. Monitoramento geotécnico e ambiental

As soluções adotadas anteriormente são adotadas com o intuito de promover o controle e mitigação dos impactos ambientais da instalação da CTRS/DF. A principal forma de aferir a efetividade destas soluções é por meio do monitoramento ambiental, que consiste em realizar um levantamento dos parâmetros e aspectos que são indicadores da alteração da condição natural do meio pelo conhecimento dos padrões naturais destes para o local em questão. Logo, na ausência deste monitoramento perde-se a capacidade de realizar intervenções em uma situação de funcionamento inadequado das soluções adotadas. Os elementos referentes ao monitoramento geotécnico e ambiental encontram-se dispostos no CTRS-DF como mostrado na Figura 4.17

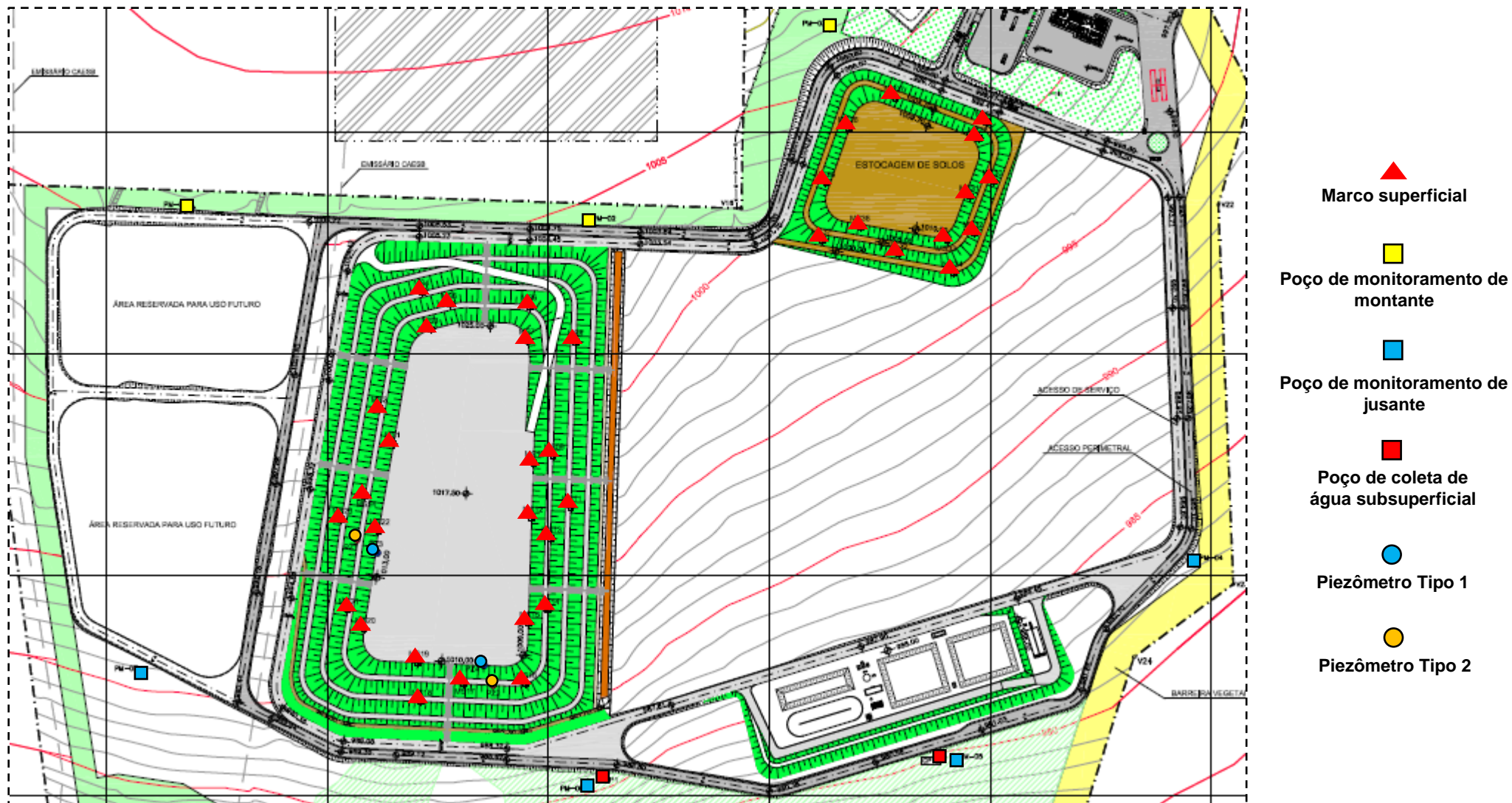


Figura 4.17 – Monitoramento ambiental e geotécnico da CTRS/DF. Modificado de Cepollina (2012).

Os elementos que constituem este monitoramento são as caixas de coleta de água subsuperficial, poços de monitoramento – mostrados e dispostos como na Figura 4.17 – e os pontos de coleta de água superficial. São sete o número de poços de monitoramento, sendo que três deles localizam-se a montante do sentido de fluxo das águas subterrâneas – em direção ao Rio Melchior como abordado na seção 4.1.1 – e quatro a jusante. Estes poços destinam-se ao monitoramento das águas subterrâneas do aquífero de domínio Domínio Poroso. O detalhamento deste dispositivo é fornecido na Figura 4.18(c) e nota-se que as suas dimensões variam de acordo com o nível freático local e a profundidade da camada impenetrável. O monitoramento das águas superficiais será realizado nas próprias caixas de passagem do sistema de drenagem subsuperficial do aterro, as quais chegam os emissários subsuperficiais. Como parte do monitoramento ambiental também serão instalados três poços de monitoramento das águas superficiais, que se localizam ao longo do leito do Rio Melchior (CEPOLLINA, 2012). Dois destes poços se encontram a montante dos pontos onde serão despejadas as águas superficiais – após a passagem pelos reservatórios de qualidade e quantidade – drenadas na área do maciço de rejeitos, e um a jusante. Nestes dispositivos de monitoramento – de águas superficiais e subterrâneas – será realizado um levantamento da qualidade das águas monitoradas com periodicidade trimestral, com possibilidade de redução deste tempo caso sejam verificados riscos sanitários ou ambientais (CEPOLLINA, 2012).

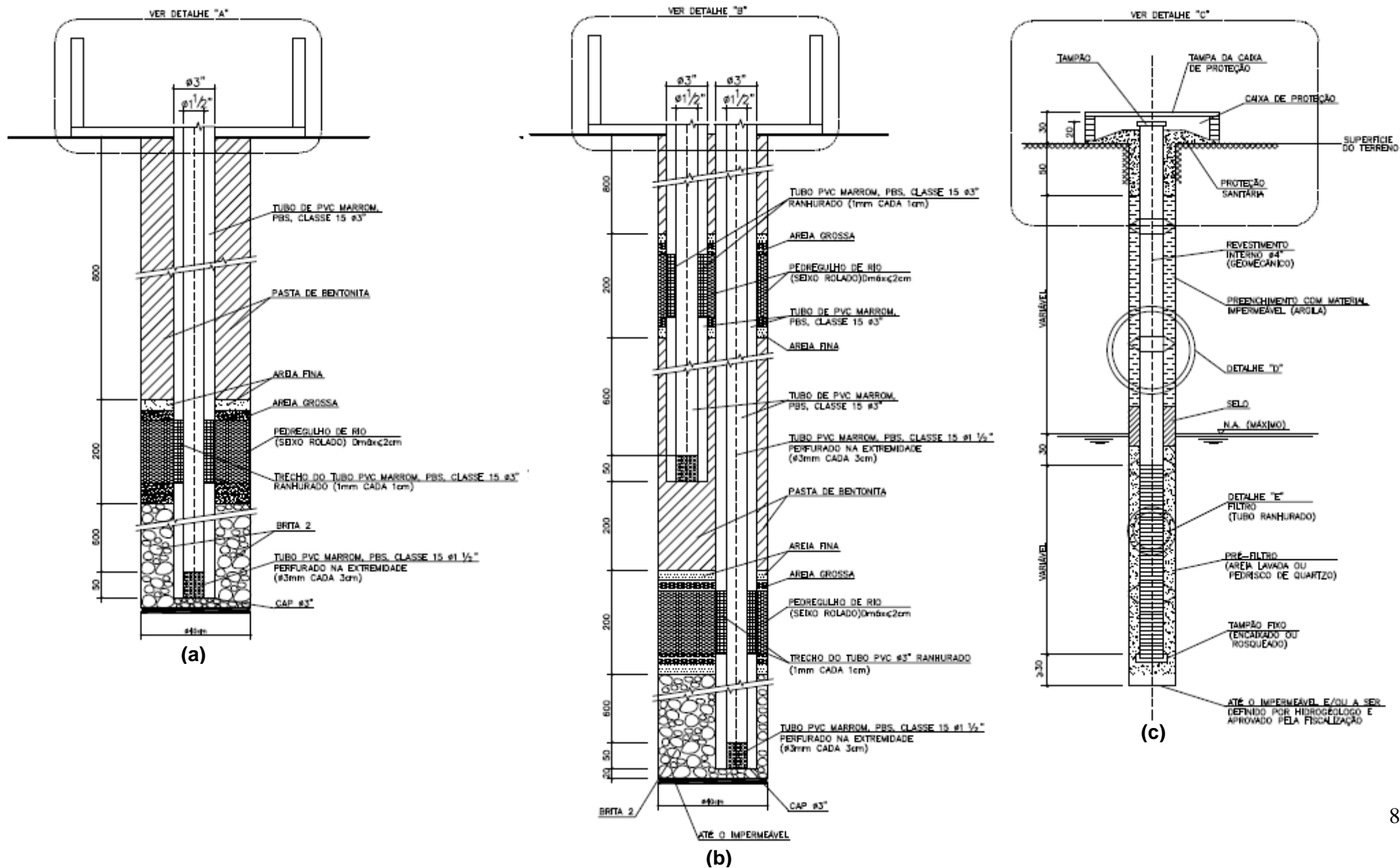


Figura 4.18 – Detalhamento do elementos do monitoramento geotécnico ambiental (a) Piezômetro Tipo 1 (b) Piezômetro Tipo 2 (Câmara dupla) (c) Poço de monitoramento. (CEPOLLINA, 2012)

A análise dos resultados obtidos pelo monitoramento se dá, segundo a legislação ambiental, por meio da comparação destes com os valores propostos para a classe de qualidade em que as águas superficiais ou subterrâneas se enquadram. Estas classes são definidas, tanto para as águas superficiais quanto subterrâneas, como o “conjunto de condições e padrões de qualidade de água necessários ao atendimento dos usos preponderantes, atuais ou futuros” (CONAMA, 2005, p. 65). No contexto da bacia do Descoberto o Rio Melchior, segundo a Resolução N° 02, de 17 de dezembro de 2014 do Conselho de Recursos Hídricos do Distrito Federal (CRH/DF), foi enquadrado segundo a classe de menor exigência (classe 4) da Resolução CONAMA n° 357/2005. Tal enquadramento tem como principais exigências que a concentração e oxigênio dissolvido (OD) seja no mínimo de 2 mg/L e o pH esteja compreendido entre 6,0 e 9,0, porém, ao contrário das classes mais exigentes (1, 2, e 3), não são propostas concentrações máximas para os diversos compostos inorgânicos e orgânicos. O monitoramento das águas superficiais nos poços localizados no Rio Melchior será feito pela avaliação, além da concentração de OD e do pH, dos parâmetros – Tabela 4.6 – que permitiriam a verificação do enquadramento deste rio em classes mais exigentes. Isto se justifica pois, na realidade, o enquadramento de um corpo hídrico em certa classe não diz respeito diretamente ao seu estado de qualidade atual, mas sim ao padrão de qualidade que estes deveriam possuir para atenderem as demandas da sociedade (BRITES, 2010 apud, SILVA, 2015). Logo, tal monitoramento estaria adequado mesmo em uma eventual mudança no enquadramento do rio devido a uma nova proposta de utilização do mesmo. Com relação ao monitoramento das águas subterrâneas serão analisados, nos poços de monitoramento, os parâmetros mostrados na Tabela 4.6, que são avaliados tendo como referência, além da Resolução CONAMA n° 396/2008 (CONAMA, 2008), a Decisão de Diretoria n°195-2005-E da CETESB, que propõe valores orientadores máximos para substâncias presentes em águas subterrâneas (CEPOLLINA, 2012). O DF ainda não possui um plano de enquadramento de suas águas subterrâneas e, portanto, não há valores de referência para o monitoramento dos parâmetros salientados da tabela. Os demais parâmetros podem ser avaliados segundo os valores orientadores máximos permitidos e que se aplicam independente da classe de enquadramento, valendo a ressalva que estes valores são referentes a um uso preponderante para consumo humano. Apesar de não ser possível o estabelecimento dos valores de referência para os demais parâmetros o monitoramento

destes parâmetros nos poços de monitoramento ainda se faz necessário uma vez que a sua distribuição – poços a montante e jusante – é favorável a identificação de possíveis alterações da qualidade das águas subterrâneas devido à presença do aterro de rejeitos, fornecendo indícios de algum desvio de desempenho no funcionamento da camada impermeável de fundo deste.

Tabela 4.6 - Parâmetros das águas superficiais e subterrâneas monitorados e seus valores de referência (CONAMA, 2005, 2008)

Águas superficiais – Classe 4		Águas subterrâneas	
Parâmetro monitorado	Valores de referência	Parâmetro monitorado	Valores de referência
Temperatura (°C)	-	Temperatura (°C)	
Alcalinidade total	-	Alcalinidade total	
Condutividade específica (µS/cm)	-	Condutividade específica (µS/cm)	
Turbidez (UNT)	-	Demanda Química de Oxigênio (mg/L)	
Oxigênio Dissolvido (mg/L)	> 2 mg/L de O ₂ , em qualquer amostra	Nitrogênio amoniacal (mg/L)	
Demanda Bioquímica de Oxigênio (mg/L)	-	Nitratos (mg/L)	< 10
Demanda Química de Oxigênio (mg/L)	-	pH	-
Nitrogênio amoniacal (mg/L)	-	Sólidos Totais Dissolvidos (mg/L)	-
Nitratos (mg/L)	-	Ferro (mg/L)	< 0,3
Nitritos (mg/L)	-	Cloreto (mg/L)	< 250
Nitrogênio Total (mg/L)	-	Manganês (mg/L)	< 0,1
Óleos e Graxas (mg/L)	Toleram-se iridescências	Dureza (mg/L)	
pH	6,0 a 9,0	Coliformes Totais – (NMP/100 ml)	
Fósforo Total (mg/L)	-	Coliformes Fecais (NMP/100 ml)	
Fósforo Reativo (mg/L)	-	<i>Escherichia coli</i> (NMP/100 ml)	
Sólidos Totais (mg/L)	-		
Sólidos Totais Dissolvidos (mg/L)	-		
Coliformes Totais – (NMP/100 ml)	-		
Coliformes Fecais (NMP/100 ml)	-		
<i>Escherichia coli</i> (NMP/100 ml)	-		

Além do monitoramento ambiental, será adotado ainda o monitoramento geotécnico, cuja funções primárias são fornecer dados que permitam inferir sobre a condição de estabilidade geotécnica da CTRS/DF e realizar previsões dos recalques futuros que permitam avaliar a vida útil do terro (CEPOLLINA, 2004). Serão instrumentados o maciço de rejeitos e a área de estocagem de solos, sendo que no primeiro serão instalados marcos superficiais e piezômetros e na segunda apenas marcos superficiais, como mostrado na Figura 4.17.

Os piezômetros a serem instalados são do tipo sifão e são especialmente utilizados para o monitoramento das poropressões e pressões de gases no interior do de maciço rejeitos. A principal peculiaridade deste tipo de piezômetro com relação ao piezômetro Casagrande é que, em vez da inserção de um único tubo, são introduzidos dois tubos concêntricos e de diâmetros de 3” e 1/2”. O tubo de maior diâmetro é ranhurado na profundidade onde serão medidas as poropressões e por estas ranhuras se dá a passagem dos percolados e dos gases gerados no aterro (SCHULER, 2010). Neste momento os percolados descem pelo espaço existente entre os tubos concêntricos e os gases ascendem, por este mesmo espaço, em direção ao topo do furo. Os percolados que se direcionam ao fundo deste espaço adentram o tubo de menor diâmetro pela sua base, que é perfurada, e isto se processa até que a altura da coluna de percolados no tubo interno seja equivalente às poropressões no ponto onde se deseja registrá-las. Portanto, tal arranjo evita a ocorrência de borbulhamentos durante a aferição dos níveis piezométricos e permite a medição tanto das pressões de gases quanto das poropressões no maciço (SCHULER, 2010). Aspecto fundamental para este funcionamento é o detalhamento da extremidade superior do piezômetro - Figura 4.19 – em que a redução em PVC promove o selamento entre o espaço entre tubos e o interior do tubo de menor diâmetro, permitindo assim que a pressão de gases seja medida. Na CTRS/DF serão instalados dois tipos (Tipo 1 e Tipo 2) de piezômetro, e ambos funcionam como descrito anteriormente. A principal diferença entre ambos é que o Tipo 2 acopla dois piezômetros em um mesmo furo, e que realizam medições de poropressões em profundidades diferentes do maciço de rejeitos.

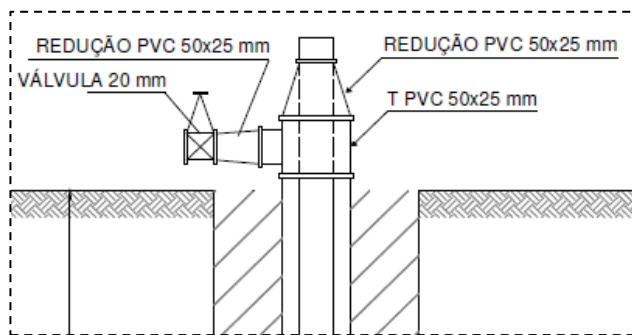


Figura 4.19 – Detalhamento da extremidade superior do piezômetro do tipo sifão instalado em aterro no Rio de Janeiro (SCHULER, 2010).

Compõem ainda o monitoramento geotécnico a instalação de marcos superficiais sobre o maciço de rejeitos - Figura 4.17. Estes marcos são compostos por uma base de concreto em cuja superfície se apoia um tubo PVC preenchido com concreto e com um pino de metal em sua extremidade superior. Esta estrutura é apoiada sobre a superfície dos rejeitos e reaterrada com solo compactado. O pino localizado no topo do marco é então monitorado topograficamente que possibilita obter movimentação vertical e horizontal para o ponto em que o marco está assente.

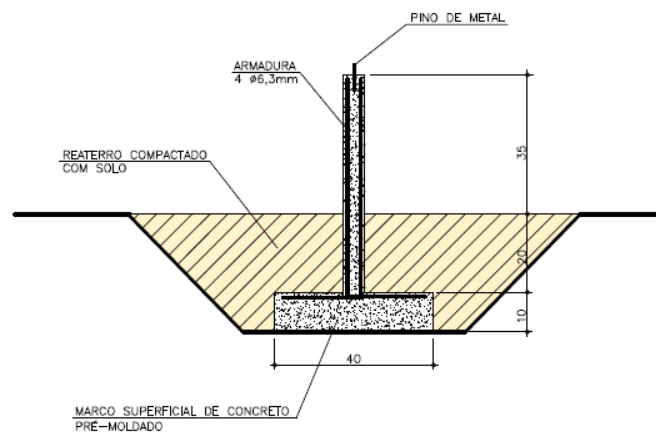


Figura 4.20 - Marco superficial para monitoramento de recalques na CTRS/DF (CEPOLLINA, 2012)

O emprego de marcos superficiais permite a obtenção apenas dos recalques referentes aos pontos superficiais onde os marcos são instalados. Relata-se que a utilização de instrumentação que permita medir os recalques ao longo da profundidade não é

geralmente empregada visto que um maciço de rejeitos está sujeito a níveis de deformações demasiadamente grandes e que acarretam na danificação de tal instrumentação, ou o percolado gerado no maciço pode ser agressivo a instrumentação utilizada, como no caso, por exemplo, da utilização de torpedos (CEPOLLINA, 2004). Não constam em normas ou resoluções de âmbito nacional critérios gerais que permitam realizar inferências acerca da estabilidade ou segurança de um maciço de rejeitos em função dos deslocamentos ou velocidades com que estes se processam. Devido a heterogeneidade e características peculiares ao rejeito deposto em diferentes aterros é natural que, com a obtenção de dados oriundos do monitoramento, sejam criados critérios próprios para cada aterro e que são representativos das características próprias destes (dimensão, plano operacional, características dos rejeitos, balanço hídrico regional), viabilizando assim uma melhor interpretação dos resultados obtidos por monitoramentos futuros (CEPOLLINA, 2004).

4.2.1.10. Registro das soluções por visitas técnicas

A fim de viabilizar um registro *in loco* das soluções ambientais de controle ambiental e das obras do Aterro Sanitário Oeste (ASO) foi realizada visita técnica a este no dia 29/11/2016. A principal peculiaridade da obra de um aterro sanitário e que os difere das demais obras de terra é que sua operação e execução se confundem, pois ocorrem concomitantemente até o fim da vida útil do aterro. Portanto, sabendo-se, previamente a data da visita, que a operação de disposição de lixo no Aterro Sanitário Oeste ainda não havia se iniciado, mas que em breve ela se iniciaria, a expectativa era de que algumas soluções de controle ambiental não poderiam ser observadas por estarem condicionadas ao início desta disposição ou por já terem sido executadas e estarem atualmente inacessíveis.

Na entrada do ASO, após a passagem por uma guarita, estão localizados o prédio administrativo e uma oficina para manutenção, que são instalações de apoio do ASO. Estas edificações encontram-se em fase de finalização do acabamento e execução das instalações prediais. Adiante, seguindo em direção às vias de acesso à área de disposição de rejeitos está alocada a balança do ASO, que, estando instrumentada apropriadamente,

permite a obtenção remota – dados enviados a sede do SLU – da quantidade de resíduos que adentra o ASO diariamente.

Notou-se que, como esperado, no trajeto até a área de disposição referente a Etapa 1 inicial, as áreas a serem utilizadas para etapas posteriores (Figura 4.6, pág. 63) estavam ainda recobertas com vegetação e pouco alteradas, em termos de movimentação de terra. Estas áreas – referente às etapas 2 e 3 – devem estar prontas para o recebimento dos rejeitos apenas após a conclusão da etapa presente (Etapa 1), cronograma este previsto como indicado na Tabela 4.4 (pág. 49).

Chegando na área referente a Etapa 1 de disposição nota-se que já se encontram concluídos todos os serviços referentes à implantação das camadas impermeabilizantes de base para a fase 1 desta etapa, apresentada na Figura 4.6(a), pág. 63, podendo-se inferir então que o sistema de drenagem subsuperficial também se encontra concluído – o que foi confirmado pelo engenheiro que acompanhou a visita. A área já está plenamente recoberta com a geomembrana e, nas partes planas, foi colocada a camada de proteção desta geomembrana. Vale ressaltar que a camada de proteção à geomembrana que recobre a face interna dos diques será feita à medida que se der o alteamento dos rejeitos. Foram observados também aspectos acerca da instalação da geomembrana, como a sua ancoragem ao dique de disparo Figura 4.22(a), conforme apresentado em projeto na Figura 4.9, pág. 70, e a execução da selagem entre painéis de geomembrana. Também foi registrada a textura superficial da geomembrana em PEAD empregada, que visa aumentar a resistência ao cisalhamento na interface entre esta e a camada de proteção mecânica em solo compactado, de modo que este não seja um condicionante à estabilidade estrutural do aterro. A área referente à implantação das demais fases (2, 3, 4) da Etapa 1 ainda se encontra em fase de conformação de solos.



Figura 4.21 - Aspecto geral da área referente a Etapa 1 de disposição de resíduos.



(a)



(b)

Figura 4.22 – Detalhes acerca da impermeabilização da área: (a) Ancoragem da geomembrana na crista da face interna do dique (b) Selagem dos painéis de geomembrana

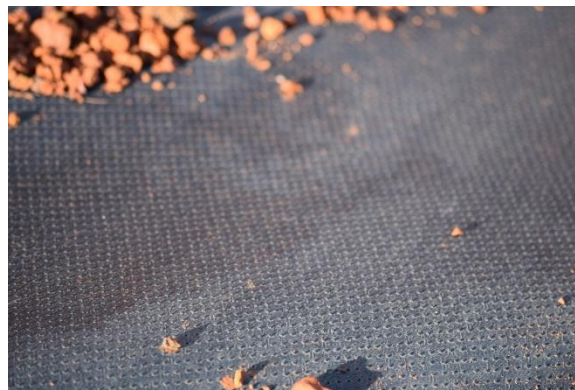


Figura 4.23 – Textura superficial da geomembrana em PEAD utilizada.

Com relação aos elementos de drenagem superficial nota-se que estão implantados elementos de drenagem periférica e que são menos robustos que aqueles empregados quando da finalização da disposição da Etapa 1. Por exemplo, a Figura 4.24 apresenta um canal em meia cana em concreto, utilizado para a drenagem apenas do escoamento superficial advindo da precipitação sobre a face externa dos diques de disparo, e também

da superfície pavimentada. Quando do recebimento das águas drenadas sobre o maciço da Etapa 1, e conduzidos pelas descidas em colchão do tipo Reno® – Figura 4.16(a) –, estes canais serão modificados para canais retangulares – Figura 4.16(b) – com maior capacidade de condução, de modo a comportar as águas drenadas em toda a superfície do maciço desta etapa. A drenagem tanto destas águas superficiais quanto daquelas drenadas pelos drenos subsuperficiais deve ter destinação adequada para reservatórios de quantidade e qualidade. Estes reservatórios encontram-se entre o aterro e o Rio Melchior, para o qual encaminharão as águas após suas vazões terem sido regularizadas e sua carga de sedimentos amenizadas e são mostrados na Figura 4.25.



Figura 4.24 – Drenagem periférica provisória da área referente a Etapa 1 de disposição.



Figura 4.25 – Reservatórios de qualidade e quantidade referentes às águas drenadas superficiais e subsuperficiais na área de implantação da Etapa 1 do ASO.

Apesar de ainda não terem sido implantados os drenos de chorume de fundação, outro elemento que já se encontra finalizado no ASO é uma das lagoas da estação de pré-

tratamento de chorume – Figura 4.26. A lagoa em questão foi identificada como a lagoa de emergência da estação, cuja principal função é realizar a equalização das vazões de chorume em um eventual enchimento das duas lagoas principais da estação devido à eventos pluviométricos históricos (CEPOLLINA, 2012). Esta lagoa já está impermeabilizada com lona de PEAD e encontrava-se no momento parcialmente preenchida com água oriunda de precipitação direta sobre este. Vale ressaltar que esta estação não tem a proposta de tratar completamente o chorume, mas sim promover um pré-tratamento deste de modo que as suas propriedades físico-químicas estejam adequadas ao padrão de recebimento da ETE Melchior, determinada pelos técnicos da CAESB. A localização próxima a esta ETE possibilitará ainda a codisposição dos lodos gerados nesta juntamente com os rejeitos dispostos no ASO, assim como informado pelo engenheiro que acompanhou a visita. Pode-se, inclusive, avistar os galpões de armazenamento de lodo da ETE das vias de acesso perimetral às células - Figura 4.27.



Figura 4.26 - Tanque de pré-tratamento de chorume do ASO.



Figura 4.27 – Galpão de armazenamento de lodo da ETE Melchior, vista de uma via de acesso do ASO

Sabendo-se previamente do estado em que as obras do ASO estariam era possível inferir que, no que diz respeito ao monitoramento geotécnico e ambiental da área, era provável que nenhum dos dispositivos de monitoramento geotécnico poderiam ser registrados pois a colocação dos marcos superficiais está condicionada ao completo alteamento das fases referentes a Etapa 1, e os piezômetros a, pelo menos, o início da disposição dos rejeitos. Por outro lado, esperava-se que certos dispositivos de monitoramento ambiental estivessem presentes mesmo antes do início da operação do aterro, uma vez que estes permitiriam registrar as condições ambientais em uma fase anterior ao início da operação e, portanto, estabelecer uma referência para amostragens futuras. Durante a visita foi possível registrar um dos poços de monitoramento posicionados à jusante da área de disposição de resíduos, em termos do fluxo hidrogeológico local. Segundo informações obtidas na visita já foram realizadas amostragens nestes poços.



Figura 4.28 – Poço de monitoramento de jusante (PM-06) instalado em abril de 2016.

Em geral notou-se que as obras necessárias ao início da disposição de rejeitos encontram-se praticamente finalizadas, e que as instalações de apoio já se encontram em estágio avançado. Segundo informações obtidas na visita o aterro receberá os primeiros rejeitos ainda no ano de 2016.

4.2.1.11. Quadro síntese das soluções de controle de impactos ambientais

Propõe-se nesta seção um quadro síntese, na Tabela 4.7, das soluções de controle de impactos ambientais anteriormente estudadas juntamente com as orientações de norma e aspectos da legislação ambiental que se relacionam a cada uma destas soluções.

Tabela 4.7 – Quadro síntese das soluções de controle de impactos ambientais adotadas no ASO.

Sistema	Soluções adotadas no ASO	Legislação ambiental	Recomendações normativas
Impermeabilização	<ul style="list-style-type: none"> - Camada composta simples constituída de 1,5 m de solo laterítico compactado com $k < 10^{-8} m/s$, geomembrana em PEAD com 2 mm de espessura e face texturizada e coberta por camada de proteção em solo laterítico compactado com 0,5 de espessura; - Cobrir toda a área de disposição; - Colocada sobre solo saprolítico local. 	-	<p><u>ABNT (1997):</u> Se o solo natural possui $k > 10^{-8} m/s$ adotar impermeabilização com as seguintes características:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Cobrir toda a área de disposição; - Ser colocada sobre base ou fundação competente; - Apresentar resistência química ao material percolado e resistência mecânica às solicitações diversas; - Deve ser testado durante a vida útil do aterro. <p><u>CETESB (1993):</u> - Classificação CH, CL, SC ou OH segundo o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS). - pH maior ou igual a 7 - Porcentagem de finos, que passam na peneira nº 200, de no mínimo 30%. - Coeficiente de permeabilidade menor que $10^{-9} m/s$ - Limite de liquidez maior ou igual a 30% e Índice de Plasticidade de no mínimo 15%</p>
Drenagem de percolados	<ul style="list-style-type: none"> - Drenos em material granular grosso (Brita 4, e rachão); - Precauções quanto à colmatção do geotêxtil não-tecido. 	-	<p><u>ABNT (1997):</u> - Instalado imediatamente acima da impermeabilização; - Evitar lâmina de percolado superior a 30 cm; - Resistência química ao resíduo e percolado e às pressões do maciço; - Eficiência deve ser garantida ao longo da vida útil e após o fechamento do aterro.</p>
Tratamento dos percolados	<ul style="list-style-type: none"> - Será realizado pela ETE Melchior e esta é responsável por adequar os efluentes para despejo no Rio Melchior. 	<ul style="list-style-type: none"> - Resolução Conama nº 357, de 17 de março de 2005 fornece os padrões de qualidade para os efluentes a serem lançados no Rio Melchior 	<p><u>ABNT (1997):</u> - Funcionar de modo a atender aos padrões de emissão e garantir a qualidade do corpo receptor.</p>
Drenagem de águas superficiais	<ul style="list-style-type: none"> - Utilizados tempos de retorno de no mínimo 10 anos; - Previstos dois reservatórios de qualidade e quantidade. 	<ul style="list-style-type: none"> - Destinadas aos reservatórios de quantidade e qualidade (ADASA, 2011) 	<p><u>ABNT (1997):</u> - É responsabilidade do proprietário projetar, construir e manter o sistema. Deve suportar uma chuva de pico de cinco anos de período de retorno</p>
Drenagem de gases	<ul style="list-style-type: none"> - Poços drenantes verticais com combustão dos gases nos queimadores no topo do maciço. 	-	<p><u>ABNT (1997):</u> - Deve minimizar as emissões gasosas e promover sua captação e tratamento adequado.</p>
Monitoramento ambiental e geotécnico	<ul style="list-style-type: none"> - Três poços de monitoramento a montante e quatro a jusante e poços de coleta de águas superficiais; - Piezômetros sifão e marcos superficiais nas faces dos taludes de rejeitos. 	<ul style="list-style-type: none"> - Resoluções Conama nº 357, de 17 de mar. 2005 e nº 396, de 17 de mar. 2005 e nº 396, de 3 de abr. 2008 fornecem os padrões de qualidade das águas superficiais e subterrâneas, respectivamente 	<ul style="list-style-type: none"> - No mínimo um poço de monitoramento a montante e 3 a jusante com diâmetro de no mínimo 101,6 mm (4"), revestidos e tampados; - Prever uma análise de todos os parâmetros pelo menos quatro vezes ao ano.

4.3. Soluções de controle de impactos ambientais adotadas em nível nacional

No Brasil a disposição final de resíduos sólidos em aterros sanitários ainda é incipiente. No ano de 2014 foi estimado que cerca de 41,6% dos resíduos sólidos produzidos tiveram destinação final inadequada, incluindo-se nesta porcentagem os resíduos destinados a lixões e a aterros controlados, que pouco se distinguem dos lixões no sentido de não possuírem os dispositivos necessários à mitigação dos principais impactos ambientais desta disposição, como por exemplo, a contaminação de corpos hídricos adjacentes pelo percolado da massa de resíduos (ABRELPE, 2015). Portanto, é de notório interesse um levantamento acerca da experiência brasileira no âmbito de projeto de aterros sanitários, de modo a identificar o atual paradigma tecnológico no que tange às soluções de controle de controle de impactos ambientais, permitindo, desta maneira, situar as soluções anteriormente levantadas neste contexto.

4.3.1. Aterro Sanitário Bandeirantes

A disposição de resíduos no Aterro Bandeirantes foi encerrada no ano de 2007, e este encontra-se atualmente em fase de monitoramento (AMLURB, 2016). O Aterro Bandeirantes foi gerido pela Prefeitura de São Paulo, através do Departamento de Limpeza Urbana (LIMPURB), e operado por empresa terceirizada. O aterro teve sua implantação no ano de 1978, e até o seu encerramento contava com cinco áreas de disposição encerradas – AS1 a AS5 – cujos elementos constituintes diferem entre si tanto devido à localização destas áreas quanto devido às especificações técnicas e ambientais existentes à época do alteamento de cada área (KAIMOTO; CEPOLLINA; ABREU, 1999).

Quanto às medidas de contenção de percolados Caseiro e Quitho (2004) relatam que nas subáreas AS1 e AS2, que são as mais antigas, utilizou-se apenas uma camada de solo argiloso compactado como barreira impermeabilizante da base do aterro. As três subáreas preenchidas subsequentemente – AS3, AS4 e AS5 – já possuem barreira impermeabilizante do tipo composta, onde além da camada de solo argiloso compactado foram adicionadas geomembranas de Policloreto de Vinila (PVC), na subárea AS3, e de Polietileno de Alta Densidade (PEAD), nas subáreas mais recentes AS4 e AS5. Uma

camada de solo da própria jazida do aterro foi por fim adicionada de maneira a prover proteção mecânica à geomembrana (CASEIRO; QUITHO, 2004).

Esta camada impermeabilizante se sobrepõe à camada de fundação, que abriga um sistema de captação e drenagem das nascentes existentes na área de implantação, consistindo em uma vala preenchida com brita e areia que drena o fluxo para um tubo coletor de concreto perfurado (TIVERON *et al.*, 1995 apud CARVALHO, 1999). O monitoramento das águas drenadas por este sistema pode ainda fornecer indícios do desempenho do revestimento de base quanto a sua estanqueidade.

Com relação a drenagem de percolados e gases, o Aterro Bandeirantes conta com um sistema de drenos sobrejacente ao revestimento da base, destinado primordialmente aos percolados, e um sistema de drenagem interna horizontal e vertical para a drenagem de ambos efluentes. Os drenos de percolado da fundação são constituídos por tubos de concreto perfurados e envoltos por uma camada de rachão (brita 4), ao passo que os drenos horizontais internos possuem seção retangular preenchida com rachão e localizam-se no topo da cobertura de solo das células de alteamento. A drenagem de gases é realizada pela conexão destes drenos horizontais aos drenos verticais, que por sua vez se estendem deste o topo do aterro até sua base, e, portanto, associam-se a todos os drenos horizontais das células de alteamento, e aos drenos de fundação. (CASEIRO & QUITHO, 2004, CARVALHO, 1999). A Figura 4.29 é uma representação geral dos elementos descritos anteriormente, em que fica evidente a maneira com a qual se dá a interconexão entre os sistemas de drenagem de gases e percolados.

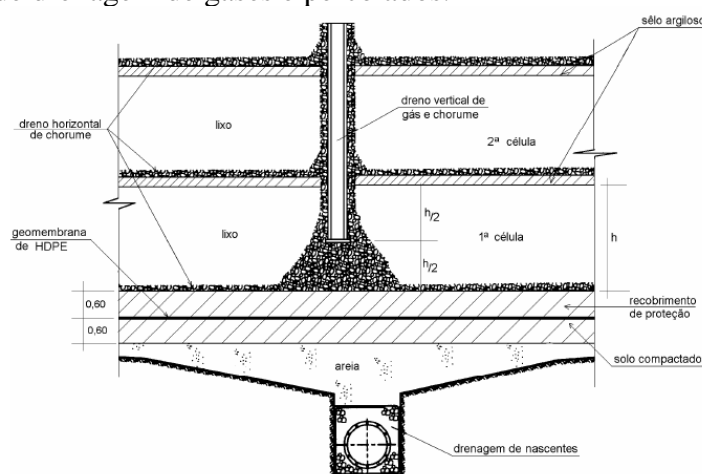


Figura 4.29 – Representação dos elementos do Aterro Bandeirantes (TIVERON *et al.*, 1995 apud CARVALHO, 1999)

A Figura 4.30 propõe um detalhamento dos elementos de drenagem de gases e percolados. Vale ressaltar que o sistema de drenagem de gases no Aterro Bandeirantes foi primordialmente projetado para funcionar passivamente, ou seja, a própria pressão do gás aprisionado internamente à massa de resíduos o conduzia por caminhos preferenciais formados pelos drenos horizontais, indicados na Figura 4.30(c), e drenos verticais, Figura 4.30(a), sendo sua queima feita na extremidade superior do dreno verticais.

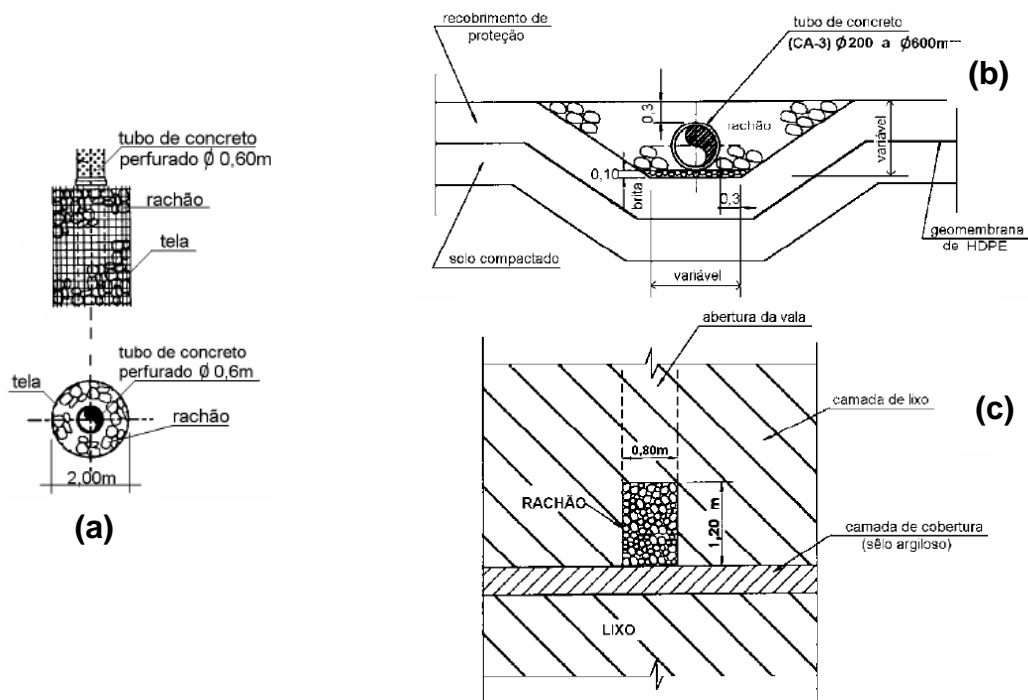


Figura 4.30 - Detalhamento dos elementos de drenagem: (a) dreno vertical de gases (b) drenagem de fundação (c) dreno interno horizontal (TIVERON *et al.*, 1995 apud CARVALHO, 1999)

Em setembro de 2003 iniciaram-se as obras para a instalação de um sistema de drenagem ativa e reaproveitamento energético do gás drenado, mediante estudos prévios que demonstravam a viabilidade técnica e financeira desta iniciativa (KAIMOTO *et al.*, 2006). Em 2003 inaugurou-se este sistema, que na realidade adaptou os antigos drenos verticais de modo que estes pudessem funcionar de maneira forçada. Tal adaptação consistia no arrasamento da extremidade superior do dreno vertical com posterior acoplamento do cabeçote de coleta, que por sua vez realizavam a conexão entre os drenos verticais e o sistema de sucção por meio de tubulações de Polietileno de Alta Densidade (PEAD) (KAIMOTO *et al.*, 2006). A Figura 4.31(a) e Figura 4.31(b) mostram esta

adaptação, e a Figura 4.31(c) a unidade de agrupamento das tubulações de PEAD conectadas aos drenos verticais, denominada de *manifold*.

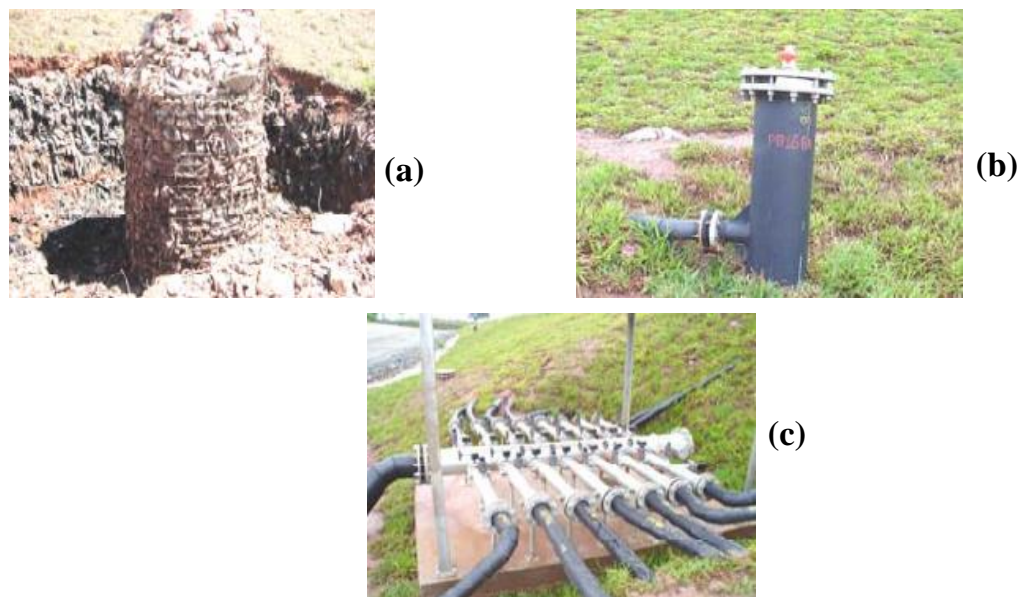


Figura 4.31 – Elementos da drenagem ativa adaptada para o sistema passivo: (a) arrasamento do dreno vertical (b) cabeçote de coleta (c) *manifold* (KAIMOTO; LEITE; COELHO, 2006)

Segundo Silva e Campos (2008), a adaptação do sistema passivo para um sistema ativo por sucção possibilitou o aumento das taxas com que o biogás é extraído em até cinco vezes, porém, o teor de metano do biogás retirado pelo sistema ativo é menor - diferença percentual de até 5% - do que o retirado passivamente.

4.3.1. Aterro Sanitário Caieiras

O Aterro Sanitário Caieiras, também denominado de Central de Tratamento de Resíduos (CTR) Caieiras, é um aterro privado que se localiza no estado de São Paulo, no município de Caieiras, e iniciou suas atividades de recebimento de resíduo doméstico e industrial no ano de 2002, resíduo este proveniente das cidades de São Paulo, Caieiras e outros municípios das proximidades. É esperado que o aterro tenha vida útil de aproximadamente 30 anos, período no qual terá sido completada a implantação de 6 fases de disposição (ESSENCIS, 2001, apud CANDIANI, 2011).

O sistema de impermeabilização adotado é composto por solo siltoso, com 2 m de espessura, de ocorrência natural compactado até atingir permeabilidade da ordem de 10^{-7} m/s, que subjaz uma camada de solo argiloso de 1 m de espessura, compactada até possuir

permeabilidade cerca de 10^{-9} m/s, uma camada sintética de geocomposto bentonítico e uma camada de geomembrana de PEAD (CANDIANI; CORTEZ; 2013). Há ainda uma camada de geotêxtil sobrepondo a geomembrana de PEAD, o que confere certa proteção a ela. A Figura 4.32 apresenta tal disposição de camadas.

Devido à escassez de argilas na região onde o aterro foi implantado pode-se observar que foi feita a opção por utilizar como parte da camada impermeabilizante mineral um solo siltoso de ocorrência natural e compactado. Este solo é um silte saprolítico de filito e que não possui permeabilidade adequada para ser usado como principal camada impermeabilizante de base (SOARES, 2012). Neste sentido este solo foi estudado visando analisar a maneira com a qual a mistura deste com bentonita alteraria as propriedades hidráulicas e mecânicas (FERRARI, 2005; SOARES, 2012) e permitiria uma melhor aplicação como parte do revestimento de base do CTR – Caieiras. Quanto aos aspectos hidráulicos, foi relatado que a adição de bentonita em um teor de 5% era capaz de abaixar a permeabilidade a valores da ordem de 10^{-10} m/s, com uma energia de compactação modificada.

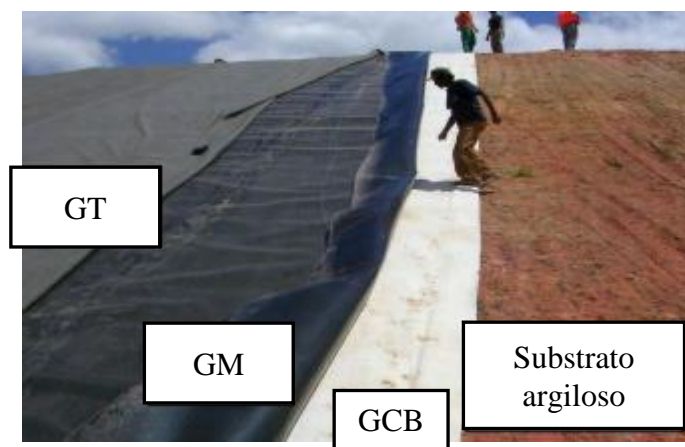


Figura 4.32 – Materiais que compõem a camada impermeabilizante da base do CTR – Caieiras: geotêxtil (GT), geomembrana de PEAD (GM), geocomposto bentonítico (GCB). Modificado de Hemsí (2011).

O sistema de drenagem de chorume consiste em um leito drenante – camada de brita 3, brita 1 e areia grossa, em ordem ascendente – colocado sobre a camada impermeabilizante, entre os quais há uma camada de geotêxtil a fim de proteger a geomembrana, e que drena o percolado para linhas principais e periféricas de tubulações de PEAD. Também há um sistema de drenagem interna, que se situa sobre a camada de

cobertura de cada célula, e constituem-se de drenos de rachão denominados de drenos de célula (CEPOLLINA, 2011, apud CANDIANI, 2011). Relata-se ainda a utilização durante a execução da fase 1 do aterro de geocomposto drenante nos taludes, que é constituído por um geoespaçador em cujas faces há geotêxteis não tecidos ligados termicamente (DI CREDDO & MAILLY, 2004). Os percolados drenados na base e nos taludes são transportados para tanques de armazenamento para que posteriormente recebam o devido tratamento pela Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP) (CANDIANI & SILVA; 2011).

Quanto ao sistema de drenagem de gases este possui funcionamento similar ao do aterro bandeirantes. É constituído por drenos verticais formados por tubos de concreto perfurados em suas laterais preenchidos com brita nº 4 e em cujo interior atravessa um tubo de PEAD também perfurado em suas laterais (CANDIANI, 2011). Estes drenos se estendem deste o topo até o leito drenante, associando-se aos drenos de célula descritos anteriormente, cuja função é a drenagem tanto dos percolados internos quanto dos gases produzidos. Parte dos gases drenados por estes drenos verticais são retirados por exaustão forçada realizada por sopradores que se conectam a estes drenos por uma rede de tubos, e outra parte é drenada passivamente (CANDIANI, 2011). Os drenos de gases ligados a ao sistema ativo são direcionados a uma unidade de combustão adequada do tipo *flare*.



Figura 4.33 – Unidades de combustão do tipo *flares* do CTR – Caieiras. Modificado de Candiani e Cortez (2013).

Em 2009 foi realizada a instalação de um conjunto motogerador de energia elétrica para aproveitamento do biogás gerado no CTR – Caieiras, e cujo projeto inicial almejava interligar esta energia na rede do aterro, porém, devido à custos consideráveis não previstos em projeto optou-se por direcionar esta energia para o abastecimento de um dos sopradores responsáveis por realizar a sucção do próprio biogás, o que reduz o consumo de energia da própria concessionária (FIGUEIREDO, 2011).

5. CONCLUSÃO

O gerenciamento de resíduos sólidos atualmente visa priorizar as diretrizes concernentes à não geração e redução da produção destes resíduos e, em segundo plano, ao aproveitamento do potencial destes por meio da reutilização e reciclagem. Entende-se, porém, que o atendimento pleno a estas diretrizes ocorre inevitavelmente precedido por um período de transição. Visualiza-se a instituição da Política Nacional dos Resíduos Sólidos, pela Lei nº 12.305 (BRASIL, 2010) como um marco do início deste período. Esta nova política tenta implementar este novo modo de se pensar o gerenciamento de resíduos sólidos. Em seu texto torna-se claro que, após a priorização de todas as diretrizes mencionadas anteriormente, e como última instância, aos resíduos sólidos deve ser dada uma destinação final ambientalmente adequada. Em outras palavras, não sendo possível não os gerar, e sendo insuficiente o processamento destes por meio da reutilização e reciclagem, a eles deve ser dada uma destinação que estará isenta de danos ou riscos à saúde pública e à segurança e minimizará os potenciais impactos ambientais diversos. Uma das formas de realizar a disposição destes resíduos de maneira ambientalmente adequada é por meio de aterros sanitários. O presente trabalho apresentou, por meio do levantamento e análise de estudos e documentos e visitas de campo, os principais aspectos geotécnicos e ambientais relacionados à implantação do Aterro Sanitário Oeste, o primeiro aterro sanitário a ser construído em Brasília, e que, juntamente com a implementação de outras medidas, permitirá a desativação do Aterro Controlado do Jockey.

Em uma primeira etapa foi realizado um levantamento e análise dos estudos e documentos existentes que permitiram deliberar sobre a aptidão da área escolhida para a implantação do aterro. Para tal apresentaram-se os resultados de relatórios topográficos de

investigações geotécnicas e caracterização das águas subterrâneas da área do aterro. A análise destes resultados consistiu em ressaltar e indicar os principais aspectos destes que influenciaram na escolha da área investigada, e que, sendo assim, influenciariam também no projeto e operação do Aterro Sanitário Oeste. Visto que a implantação do aterro sanitário deve, necessariamente, ser precedida por um Estudo de Impactos Ambientais (EIA), foram apresentados também os principais resultados deste estudo. Três foram os resultados levantados nesta etapa, e que fazem parte do escopo do EIA: estudos referentes à escolha da área objeto do estudo, estudos geológico-geotécnicos específicos para esta área e, por fim, um resumo dos potenciais impactos ambientais resultantes da implantação do aterro na área. Estes resultados permitiram determinar o contexto geotécnico, geológico e ambiental da área escolhida para implantação do ASO bem como os impactos potenciais de ordem ambiental e geotécnica da implantação do aterro nesta área.

A segunda etapa deste trabalho se propôs a realizar um levantamento e análise das soluções de controle de impactos ambientais propostas no projeto ASO frente aos resultados obtidos na etapa anterior e à legislação ambiental e referenciais normativos relacionados à aterros sanitários. A principal fonte de dados desta etapa foi a documentação do projeto executivo do ASO, que contempla os desenhos de projeto e o relatório deste projeto. A metodologia empregada permitiu o atendimento ao objetivo específico proposto para esta etapa.

Foi realizada ainda uma visita técnica ao ASO, de modo a complementar estes dados com registros *in loco* das soluções estudadas anteriormente e o fornecimento do panorama atual da situação das obras de implantação deste. Por fim, foram levantadas as soluções de controle de impactos ambientais de dois aterros sanitários brasileiros – Aterro Sanitário Bandeirantes e CTR Caieiras – que permitiram apresentar o paradigma tecnológico nacional atual referente a estas soluções.

Entende-se que, apesar de a disposição de resíduos em aterros sanitários representar uma solução temporária à questão do gerenciamento dos resíduos sólidos, o estudo dos aspectos geotécnicos e ambientais relacionados a sua implantação é de grande relevância dado o caráter potencialmente poluidor dos aterros sanitários. É importante, entretanto, mencionar algumas ressalvas quanto ao estudo realizado. A principal destas é que os

aspectos aqui apresentados têm o intuito primário de facilitar o acesso às informações acerca do processo de implantação ASO, de modo a auxiliar o acesso a tais informações em eventuais pesquisas futuras sobre o aterro. Outra ressalva a ser feita é que o levantamento e análise feitos para as soluções de controle de impactos ambientais são referentes apenas a Etapa 1 do aterro visto, e, lembrando, até o fim de sua vida útil ainda serão implantadas três etapas adicionais. Estas ressalvas, por sua vez, podem ser o ponto de partida para estudos futuros, tais como:

- Estudo do desempenho das soluções específicas de controle de impactos ambientais implantadas na primeira etapa, visando o aperfeiçoamento destas para as demais etapas.
- Estudos voltados para descrição do comportamento mecânico dos rejeitos do DF de modo a subsidiar o projeto das etapas seguintes ou de um possível novo aterro a ser construído.

Além disso, podem ser mencionadas outras sugestões e que se relacionam indiretamente com a implantação do ASO:

- Estudo de áreas com potencial para implantação de um possível novo aterro que virá a receber os rejeitos do DF quando da desativação do ASO.
- Estudo de alternativas para remediação da área onde hoje se situa o Aterro Controlado do Jockey e avaliação de alternativas de uso futuro da área.
- Estudo de alternativas para utilização futura da área onde se situa o ASO, após a sua desativação.
- Estudo de viabilidade da conversão do sistema de drenagem de gases passivo do ASO para um sistema ativo com aproveitamento do biogás para geração de energia.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRELPE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2014**. Brasil, 2015. Disponível em: <<http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2014.pdf>>

ADASA. Resolução nº 9, de 8 de abril de 2011. Estabelece os procedimentos gerais para requerimento e obtenção de outorga de lançamento de águas pluviais em corpos hídricos de domínio do Distrito Federal e naqueles delegados pela União e Estados. Brasília, DF, 8 abr. 2011.

- AFFONSO, H. M. M. *Instrumentação para medir deslocamentos em barragens de enrocamento*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de pós-graduação em Engenharia Civil, PUC-RIO, Rio de Janeiro, 2004.
- ARAÚJO, R. N. G.; KOIDE, S.; PIRES, A.C. B. **Monitoramento da contaminação da zona freática da área de aterro de lixo no Distrito Federal**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 9., Salvador, 1997, Salvador, 1997, p. 32-35.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 13896*. Aterros de resíduos não perigosos - Critérios para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 1997.
- _____. *NBR 8419:1992 Versão Corrigida:1996*. Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos – Procedimento. Rio de Janeiro, 1996.
- _____. *NBR 11682:1991*. Estabilidade de taludes. Rio de Janeiro, 1991.
- AUTORIDADE MUNICIPAL DE LIMPEZA URBANA (AMLURB). **Aterros Sanitários e Transbordos**. São Paulo: AMLURB. Disponível em: http://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/servicos/amlurb/aterros_e_transbordos/index.php?p=4633
- BAGCHI, A. **Design of landfills and integrated solid waste management**. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc. 2004.
- BOSCOV, M. E. G. **Geotecnia Ambiental**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.
- BRASIL. Presidência da República. Casa Civil. Subchefia para Assuntos Jurídicos. **Lei nº 12.305/2010**. Portal da Legislação, Brasília, ago. de 2010. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm
- BRASIL. Congresso Nacional. Câmara dos Deputados. Projeto de Lei nº 203/1998. **Diário do Congresso Nacional**, Brasília, ano 46, n. 27, 2 de abril de 1998, p. 2.765-2.766. Disponível em: <http://imagem.camara.gov.br/Imagem/d/pdf/DCD02ABR1991.pdf#page=37>
- CANDIANI, G. *Estudo da geração de metano em uma célula de aterro sanitário*. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Centro de Engenharia, Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas, Universidade Federal do ABC, São Paulo, 2011.
- CANDIANI, G.; CORTEZ, A. T. C.. Análise da implantação das medidas mitigadoras estabelecidas no estudo de impacto ambiental da central de tratamento de resíduos–Caieiras–São Paulo–doi: 10.4025/bolgeogr. v31i2. 13419. **Boletim de Geografia**, v. 31, n. 2, p. 115-130, 2013.

- CANDIANI, G.; DA SILVA, M. R. Análise do biogás no aterro sanitário Caieiras. **Seminário: Ciências Exatas e Tecnológicas**, v. 32, n. 1, p. 69-77, 2011.
- CARVALHO, M. F. *Comportamento mecânico de resíduos sólidos urbanos*. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.
- CASEIRO, A. H.; QUITHO, L. **Utilização de aterro sanitário para destinação final de resíduos sólidos gerados nos grandes centros urbanos: Aterro Bandeirantes**. *Exacta*, n. 2, p. 191-202, 2004.
- CAVALCANTI, M. M. *Aplicação de Métodos Geoelétricos no Delineamento da Pluma de Contaminação nos Limites do Aterro Controlado do Jockey Clube de Brasília*. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 2013.
- CEPOLLINA, M.; KAIMOTO, L. S. A.; MOTIDOME, M. J.; LEITE, E.F. Monitoramento em aterros sanitários durante a operação: Desempenho mecânico e ambiental”. In: RESID 2004 Seminário sobre Resíduos Sólidos. 2004
- CEPOLLINA – Engenheiros e Associados Ltda. Desenhos de projeto – Projeto executivo – Central de Tratamento de Resíduos Sólidos do DF (CTRS/DF). Brasília, 2012.
- CEPOLLINA – Engenheiros e Associados Ltda. Relatório final do projeto executivo – Central de Tratamento de Resíduos Sólidos do DF (CTRS/DF). Brasília, 2012.
- CHRISTENSEN, T. H.; COSSU, R.; STEGMANN, R. **Landfilling of waste: Barriers**. Londres: E & FN Spon. 1994.
- COMPANHIA PAULISTA DE DESENVOLVIMENTO (CPD). **Sistema de coleta, tratamento e destinação final dos resíduos sólidos: Projeto básico**. Brasília, DF, 2012.
- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução Conama n° 1, de 23 de janeiro de 1986. Dispõe sobre critérios básicos e diretrizes gerais para o Relatório de Impacto Ambiental – Rima. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 17 fev. 1986.
- _____. Resolução Conama n° 12, de 14 de setembro de 1989. Dispõe sobre a proibição de atividades em Área de Relevante Interesse Ecológico que afetem o ecossistema. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 18 dez. 1989.
- _____. Resolução Conama n° 237, de 19 de dezembro de 1997. Regulamenta os aspectos de licenciamento ambiental estabelecidos na Política Nacional do Meio Ambiente. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 22 dez. 1997.
- _____. Resolução Conama n° 303, de 20 de março de 2002. Dispõe sobre parâmetros, definições e limites de Áreas de Preservação Permanente. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 13 mai. 2002.

_____. Resolução Conama n° 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluente, e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 18 mar. 2005.

_____. Resolução Conama n° 396, de 3 de abril de 2008. Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 7 abr. 2008.

_____. Resolução Conama n° 358, de 29 de abril de 2005. Dispõe sobre o tratamento e a disposição final dos resíduos de serviços de saúde e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 4 mai. 2005.

_____. Resolução Conama n° 420, de 28 de dezembro de 2009. Dispõe sobre os critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 30 dez. 2009.

CONCIANI, W., BURGOS, P. C., BEZERRA, R. L. Origem e formação dos solos, perfis de intemperismo. In: CAMAPUM DE CARVALHO, J., GITIRANA JUNIOR, G. F. N., MACHADO, S. L., MASCARENHA, M. M. A., SILVA FILHO, F. C. **Solos não saturados no contexto geotécnico**. São Paulo: ABMS, 2015. p. 21 – 37.

COSTA, C. M. C. *Avaliação da fissuração por ressecamento em camadas de cobertura de aterros sanitários utilizando materiais alternativos*. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

DANIEL, D. E.; KOERNER, R. M. Cover systems. **Geotechnical practice for waste disposal**. Londres: Chapman & Hall. 1993. p. 455 – 496.

DI CREDDO, E. B.; MAILLY, F. Casos históricos de aplicação de geossintéticos em sistemas de disposição de resíduos sólidos. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, n. 4, p. 86-96, 2004.

DUNCAN, J. M.; WRIGHT, S. G.; BRANDON, T. L. **Soil strength and slope stability**. John Wiley & Sons, 2014.

EMBRAPA (1978). Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Levantamento de reconhecimento dos solos do Distrito Federal. Rio de Janeiro, 455p.

EVERETT, L. G. Vadose zone monitoring. In: DANIEL, D. E. **Geotechnical practice for waste disposal**. Londres: Chapman & Hall. 1993. p. 652-675

FARIA, A. **Mapa geológico do Distrito Federal** (Convênio DNPM/ IG- Universidade de Brasília), 1985. Escala 1:100.000.

- FERRARI, A. A. P. *Viabilidade da utilização de silte compactado como material de impermeabilização em aterros de resíduos*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.
- FIGUEIREDO, N. J. V. *Utilização de biogás de aterro sanitário para geração de energia elétrica – Estudo de caso*. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Programa de Pós-graduação em Energia, Universidade de São Paulo, 2011.
- FRANCO, H.A. *Geofísica e Química Aquática Aplicadas ao Estudo da Contaminação de Recursos Hídricos Subterrâneos no Aterro do Jockey Club, Brasília - DF*. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 1996.
- GDF/SEPLAN/CODEPLAN. **PDAD – Pesquisa Distrital por Amostra de Domicílios 2013-2014**. Brasília, Distrito Federal, 2014.
- GIBBS, H. J.; BARA, J. P. Predicting surface subsidence from basic soil tests. **Special Technical Publication**, N° 322, ASTM, Philadelphia, 1962.
- HEMSI, P. S. **Prevenção no projeto de aterros de resíduos**. Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), 2011. Disponível em: <http://www.civil.ita.br/noticias/2011/palestra_hemsi_aterros_pg.pdf>
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Lixo municipal: manual de gerenciamento integrado**. 2. ed. São Paulo, 2000, IPT Publicação 2.622.
- INSTITUTO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE (INEA-RJ). Instrução técnica para requerimento de licenças para aterros sanitários. *Diário oficial do Estado do Rio de Janeiro*, Rio de Janeiro, RJ, 09 dez. 1994.
- KAIMOTO, L. S. A.; CEPOLLINA, M.; ABREU, R. C. **Alguns aspectos sobre recalques e deslocamentos horizontais em aterros sanitários**. In: REGEO'99 – CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOTECNIA AMBIENTAL, 4., 1999, São José dos Campos. Anais... São José dos Campos: ABMS, 1999. p- 462-465
- KAIMOTO, L. S. A.; LEITE, E. F.; COELHO, M. G. **Considerações sobre aproveitamento do Biogás em Aterro Sanitário**. In: SITTRS – SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS, 2006, Rio de Janeiro. Anais... [S.I.: s.n.], 2006. p. 1-8
- KENT, B; HEMINGWAY, M. P. Monitoring Wells. In: DANIEL, D. E. **Geotechnical practice for waste disposal**. Londres: Chapman & Hall. 1993. p. 607-650

- KOERNER, R. M. Geomembrane liners. In: DANIEL, D. E. **Geotechnical practice for waste disposal**. Londres: Chapman & Hall. 1993. p. 164 – 186.
- KOERNER, R. M. Collection and removal systems. In: DANIEL, D. E. **Geotechnical practice for waste disposal**. Londres: Chapman & Hall. 1993. p. 187 – 213.
- KOIDE, S.; BERNARDES, R.S. **Contaminação do lençol freático sob a área do aterro do Jockey Club, Distrito Federal**. CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 10., 1998, São Paulo, 1998, São Paulo, p.1-11.
- MCBEAN, E. A.; ROVERS, F. A.; FARQUHAR, G. J. **Solid Waste Landfill – Engineering And Design**. Nova Jérsei: Prentice Hall PTR. 1995.
- NISYAMA, F. L.; FERREIRA, L. R.; CAMAPUM DE CARVALHO, J. **Aplicação da metodologia Mini-MCV em solo com alteração da fase aquosa**. In: III Simpósio sobre Sistemas Sustentáveis, 2016, Porto Alegre. III Simpósio sobre Sistemas Sustentáveis. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2016. v. 1.
- PALMEIRA, E. M. **Fatores condicionantes do comportamento de filtros geotêxteis**. In: IV Simpósio Brasileiro de Geossintéticos, Volume 1. Porto Alegre, p. 49-67, 2003.
- PALMEIRA, E. et al. A study on biological clogging of nonwoven geotextiles under leachate flow. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 26, n. 3, p. 205-219, 2008.
- PEREIRA, J. H. F.; PASTORE, E. L.; BERNARDES, R. S.; SOUZA, N. M.; e CARVALHO, J.C. Estudos Geológico-Geotécnicos para o Planejamento e Projeto de Disposição de Resíduos Urbanos de Lixo do Jóquei. Relatório Técnico, 1997.
- PROGEA. Engenharia e Estudos Ambientais. **Estudo de Impacto Ambiental para o Aterro Sanitário de Samambaia**. BELACAP. 2005
- QIAN, X.; KOERNER, R. M.; GRAY, D. H. **Geotechnical Aspects of Landfill Design and Construction**. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall, 2002.
- REATTO, A. et al. Mapa pedológico digital - SIG atualizado do Distrito Federal Escala 1:100.000 e uma síntese do texto explicativo. Documentos, Planaltina, DF, n. 120, p. 1-31, jun. 2004.
- REBELO, K. M. W. *Resistência de interface entre geomembranas e solos através do ensaio de “Ring Shear”*. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.
- ROCCA, A.C.C. (coord.) et al. **Resíduos sólidos industriais**. 2ª edição, São Paulo, CETESB. 1993.
- ROWE, R. K. Barrier Systems. In:_____. **Geotechnical and geoenvironmental engineering handbook**. Norwell: Kluwer Academic Publishers. 2001. p.739 – 788

- SCHULER, A. R. *Análise do comportamento de um aterro municipal de resíduos sólidos urbanos instrumentado*. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.
- SERVIÇO DE LIMPEZA URBANA (SLU). **Plano de trabalho: Construção do Aterro Sanitário de Brasília**. Brasília: SLU, fev. de 2016. Disponível em: http://www.slu.df.gov.br/images/Plano%20de%20trabalho%20-%20Apresenta%C3%A7%C3%A3o%20-%2029_02_2016.pdf
- SHACKELFORD, C. D. Contaminant transport. In: DANIEL, D. E. **Geotechnical practice for waste disposal**. Londres: Chapman & Hall. 1993. p. 33 – 65.
- SILVA, T. D. *Integração dos modelos QUAL2K e WEAP para modelagem da qualidade da água em corpos de água receptores de efluentes de ETEs em áreas de adensamento urbano no Distrito Federal*. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2015.
- SILVA, T. N.; CAMPOS, L. M. S. Avaliação da produção e qualidade do gás de aterro para energia no aterro sanitário dos Bandeirantes-SP. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 13, n. 1, p. 88-96, 2008.
- SOARES, V. *Utilização de mistura de solo saprolítico com bentonita na construção de revestimento de fundo de aterros sanitários*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.
- SONDA ENGENHARIA. **Relatório de Topografia e Investigações Geotécnicas – Áreas para Futuro Aterro Sanitário Localizada Entre Samambaia e Ceilândia**. Brasília, DF, 2008.
- TCHOBANOGLIOUS, G., O’LEARY, P. R. Landfilling. In: TCHOBANOGLIOUS, G., KREITH, F. **Handbook of solid waste management**. Nova Iorque: McGraw-Hill. 2002. p.14.1 – p. 14.93
- VILAR, O. M.; FERREIRA, S. R. M. Solos colapsíveis e expansivos. . In: CAMAPUM DE CARVALHO, J., GITIRANA JUNIOR, G. F. N., MACHADO, S. L., MASCARENHA, M. M. A., SILVA FILHO, F. C. **Solos não saturados no contexto geotécnico**. São Paulo: ABMS, 2015. p. 21 – 37.
- VILLAR, L. F. S., GUIMARÃES, R. C., RODRIGUES, J. K. G., AZEVEDO, R. F., CAMAPUM DE CARVALHO, J. Compactação dos solos: laboratório e campo. In: CAMAPUM DE CARVALHO, J., GITIRANA JUNIOR, G. F. N., MACHADO, S. L., MASCARENHA, M. M. A., SILVA FILHO, F. C. **Solos não saturados no contexto geotécnico**. São Paulo: ABMS, 2015. p. 21 – 37.