



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL  
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL**

**ANTÔNIO ÁTILA RAMOS BARBOSA**

**CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DA COBERTURA DO ATERRO SANITÁRIO  
DE CAUCAIA E ANÁLISE DOS RECALQUES UTILIZANDO MODELO  
HIPERBÓLICO DE LING ET AL. (1998)**

**FORTALEZA  
2016**

**ANTÔNIO ÁTILA RAMOS BARBOSA**

**CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DA COBERTURA DO ATERRO SANITÁRIO  
DE CAUCAIA E ANÁLISE DOS RECALQUES UTILIZANDO MODELO  
HIPERBÓLICO DE LING ET AL. (1998)**

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Anderson Borghetti  
Soares

**FORTALEZA  
2016**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca de Ciências e Tecnologia

- 
- B195c      Barbosa, Antônio Atila Ramos.  
              Caracterização geotécnica da cobertura do aterro sanitário de Caucaia e análise dos recalques utilizando modelo hiperbólico de LING *et al.* (1998) / Antônio Atila Ramos Barbosa. – 2016.  
              79 f. : il. color., enc. ; 30 cm.
- Monografia (Graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia,  
              Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Curso de Engenharia Ambiental, Fortaleza,  
              2016.  
              Orientação: Prof. Dr. Anderson Borghetti Soares,.
1. Aterro sanitário. 2. Resíduos sólidos urbanos. 3. Recalques. I. Título.

**ANTÔNIO ÁTILA RAMOS BARBOSA**

**CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DA COBERTURA DO ATERRO SANITÁRIO  
DE CAUCAIA E ANÁLISE DOS RECALQUES UTILIZANDO MODELO  
HIPERBÓLICO DE LING**

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Aprovado em: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

**BANCA EXAMINADORA**

---

**(PROFESSOR ORIENTADOR)**

---

**(MEMBRO)**

---

**(MEMBRO)**

A Deus.

Aos meus pais, Valquimar e Anair.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me dar saúde e tornar possível a realização deste objetivo.

Aos meus pais, pelo carinho, amor, suporte e apoio dados durante minha formação.

À minha irmã e sobrinhos.

À Mayra de Freitas, pelo companheirismo e compreensão durante esta etapa da minha vida.

Ao professor Anderson Borghetti, pela orientação, paciência e responsabilidade durante o processo de elaboração deste trabalho.

Ao professor Ronaldo Stefanutti, pelo intermédio feito entre eu e a equipe técnica do aterro sanitário de Caucaia.

Ao professor Alfran Sampaio, pelas sugestões dadas para melhoria do trabalho.

À equipe do laboratório de solos da UFC, no nome de Carlos Germano e Anselmo, pelo suporte dado na realização dos ensaios desenvolvidos.

À equipe técnica do aterro sanitário metropolitano Oeste de Caucaia, no nome de Priscila Siqueira, Hédio Alves e Gleydson Amorim, que contribuiu e apoiou o desenvolvimento do meu trabalho.

À minha amiga Joalana Macedo, pelo suporte na elaboração deste trabalho.

Aos meus amigos de faculdade, por tornarem mais suave a caminhada de formação de uma engenharia.

A todos meus amigos que contribuíram diretamente ou indiretamente para a realização deste trabalho.

## RESUMO

O presente trabalho tem por objetivo a caracterização do solo de cobertura final do aterro sanitário de Caucaia, através realização de ensaios geotécnicos de campo, para determinação da condutividade hidráulica e do peso específico *in situ*, e de laboratório, através de caracterização granulométrica, a partir de amostras coletadas em campo. Adicionalmente ao estudo da camada de cobertura final, foram feitos ajustes dos dados experimentais de recalques ao modelo hiperbólico de Ling et al (1998). Para a caracterização do solo da camada de cobertura foram utilizadas duas células experimentais, uma célula com aspersão de chorume e a outra sem aspersão de chorume. A caracterização granulométrica indicou que o solo de cobertura é predominantemente arenoso, e apresenta características bem variáveis entre os pontos analisados. O solo de cobertura apresentou uma permeabilidade da ordem de  $10^{-4}$  cm/s que indica alta permeabilidade, índice de plasticidade na faixa de 9 a 11%, valores de um solo medianamente plástico e resultados de densidade real variando de 2,65 a 2,70, os menores valores característicos de uma areia e os maiores de um silte-arenoso/argila. O modelo de Ling et al (1998) apresentou uma boa concordância aos recalques observados nos marcos M4 e M6 e uma menor concordância aos demais marcos analisados.

**Palavras chave:** Aterro sanitário, resíduos sólidos urbanos, recalques, camada de cobertura, caracterização.

## ABSTRACT

This study aimed to characterize the final soil cover used in caucaia's Landfill, using geotechnical tests in field, to find the hydraulic conductivity and field's density, and lab tests, for granulometric characterization, from samples collected in field. Additionally, adjustments were made to the experimental data to hyperbolic model repression by Ling et al (1998). For characterization of the final cover layer, experimental cells were used, one of the cells with slurry spraying and the other one without slurry spraying. The granulometric characterization indicated that the soil cover is predominantly sandy, and features well-variable characteristics in analyzed points. The soil covering had a permeability in order of  $10^{-4}$  cm/s, indicating a high permeability, plasticity index in the range from 9 to 11%, values from a plastic soil medium and true density ranging from 2.65 the results 2.70, the indicating a sandy soil / silty-sandy, within the limits of values found for clay. The model Ling et al (1998) showed good adherence to settlements observed in landmark M4 e M6 and a lower adherence to other landmarks analysed.

**Keywords:** Landfill, Urban solid waste, settlements, covering layer, characterization.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema ilustrativo da cobertura ou revestimento impermeável superior de um aterro sanitário .....	21
Figura 2 – Modelo de recalque proposto por Bjarngard e Edgers.....	27
Figura 3 – Representação gráfica do modelo proposto por YEN e SCALON (1975) .....	28
Figura 4 – Modelo hiperbólico de LING et al (1998) aplicado ao aterro de Meruelo. ....	30
Figura 5 – Ensaio de infiltração com duplo anel.....	32
Figura 6 – Funcionamento do Permeâmetro de Guelph.....	33
Figura 7 – Localização espacial do ASMOC .....	35
Figura 8 – Células constituintes do aterro sanitário de Caucaia.....	36
Figura 9 – Croqui de localização não georreferenciado das áreas de estudo dos ensaios de campo e das amostragens para ensaios de laboratório. ....	38
Figura 10 – Escavação do furo para determinação da massa específica “in situ” pelo método de frasco de areia. ....	40
Figura 11 – representação física do limite de liquidez. ....	46
Figura 12 - Aparelho de Casagrande utilizado em laboratório.....	47
Figura 13 – Rolagem, sobre a superfície de vidro, da amostra de solo até que se atinja o cilindro padrão .....	48
Figura 14- Representação da densidade real. ....	50
Figura 15 - Picnômetros utilizados nos ensaios laboratoriais.....	51
Figura 16 - Planta de localização do marco de referência e dos marcos utilizados no acompanhamento dos recalques: .....	54
Figura 17– Exemplo de curva de distribuição granulométrica no solo. ....	67

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – representação gráfica do limite de liquidez. Amostra 01 – Furo 03.....	58
Gráfico 2 – representação gráfica do limite de liquidez. Amostra 02 – Furo 09.....	59
Gráfico 3 – representação gráfica do limite de liquidez. Amostra 03 – Furo 08.....	59
Gráfico 4 – Distribuição granulométrica das amostras: .....	66
Gráfico 5 – Pontos experimentais e reta de ajuste da área sem aspersão de chorume. ....	69
Gráfico 6– Pontos experimentais e reta de ajuste da área com aspersão de chorume .....	70
Gráfico 7 – Curva recalque x tempo dos marcos superficiais utilizados para análise.....	72
Gráfico 8– Recalques observados x Recalques calculados: Marcos M1A, M2A e M3A. ....	72
Gráfico 9– Recalques observados x Recalques calculados: Marcos M4 e M6. ....	73

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Peneiras utilizadas nos peneiramentos grosso e fino.....	45
---	----

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação do solo quanto a plasticidade.....	49
Tabela 2 – Densidades reais de acordo com o tipo de solo. ....	50
Tabela 3 – Recalques obtidos com o tempo com base nos marcos superficiais.....	53
Tabela 4 – Dados geotécnicos obtidos na área sem aspersão de chorume. ....	55
Tabela 5 – Valores médios de umidade, densidade do solo úmido, densidade do solo seco e porosidade.....	56
Tabela 6 – Dados geotécnicos obtidos na área com aspersão de chorume.....	56
Tabela 7 – Valores médios de umidade, densidade do solo úmido, densidade do solo seco e porosidade.....	56
Tabela 8 – Comparativo dos valores de densidade “in situ” e umidade com valores da literatura.....	57
Tabela 9 – Limite de liquidez amostra 01 – furo 03.....	57
Tabela 10 – Limite de liquidez amostra 02 – furo 09.....	58
Tabela 11 – Limite de liquidez amostra 03 – furo 08.....	58
Tabela 12 – Limite de plasticidade. Amostra 01 – Furo 03. ....	60
Tabela 13 – Limite de plasticidade. Amostra 02 – Furo 09. ....	60
Tabela 14 – Limite de plasticidade. Amostra 03 – Furo 08 .....	60
Tabela 15 – classificação do solo de acordo com o índice de plasticidade. ....	61
Tabela 16 – Comparação entre os valores obtidos para os limites de Attenberg e os valores encontrados na literatura.....	62
Tabela 17 – Classificação das amostras de acordo com os valores de densidade real encontrados.....	63
Tabela 18 – Comparação entre os valores de densidade real obtidos e os encontrados na literatura.....	63
Tabela 19 – Porcentagem de material passante para o referido diâmetro. ....	65
Tabela 20 – Limite das frações de solo pelo tamanho dos grãos segundo a ABNT. ....	66
Tabela 21– Comparativo dos valores de distribuição granulométrica dos ensaios e os encontrados na literatura:.....	67
Tabela 22– dados de infiltração obtidos na área sem aspersão de chorume.....	68
Tabela 23– dados de infiltração obtidos na área com aspersão de chorume. ....	69
Tabela 24– coeficiente de ajuste obtidos a partir dos dados de infiltração .....	70
Tabela 25– Dados obtidos pelo modelo hiperbólico a partir dos dados observados.....	73

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
2	OBJETIVOS.....	15
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
3.1	O solo.....	16
3.2	Tipos de solos.....	16
3.3	Fração de argila nos solos.....	17
3.4	Estrutura básica dos minerais argilosos.....	18
3.5	Resíduos Sólidos Urbanos (RSU).....	18
3.6	Aterros sanitários.....	19
3.7	Composição de um aterro sanitário.....	20
3.8	Recalques e compressibilidade em aterros sanitários de RSU.....	22
3.9	Modelos de previsões de recalques.....	24
3.9.1	Modelos tradicionais.....	24
3.9.2	Modelos convencionais.....	30
3.10	Ensaio de determinação da infiltração:.....	31
4	ÁREA DE ESTUDO.....	35
5	METODOLOGIA UTILIZADA.....	37
5.1	Ensaio.....	37
5.1.1	Ensaio de campo.....	39
5.1.2	Ensaio laboratoriais.....	42
5.2	Previsão de recalques.....	51
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	55
6.1	Frasco de areia.....	55
6.2	Limite de liquidez.....	57
6.3	Limite de plasticidade:.....	59
6.4	Índice de plasticidade.....	61
6.5	Densidade real:.....	63
6.6	Análise granulométrica.....	64
6.7	Ensaio de infiltrômetro de duplo anel.....	68
6.8	Previsão de recalques:.....	70
7	CONCLUSÕES:.....	75
7.1	Caracterização da camada de cobertura:.....	75
7.2	Monitoramento dos recalques e calibração do modelo de recalque:.....	77

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS ..... 79

## 1 INTRODUÇÃO

O aumento populacional aliado ao desenvolvimento da indústria e o crescente consumismo fez com que houvesse um aumento muito grande na quantidade de resíduos gerados e conseqüentemente a degradação do meio ambiente.

Existem algumas maneiras de diminuir a quantidade de resíduos dispostos inadequadamente no meio ambiente. A reciclagem de alguns materiais, a compostagem de materiais orgânicos e a incineração de materiais em altas temperaturas são algumas técnicas que visam eliminar os resíduos sólidos (DENARDIN,2013, p11). Quando não há a possibilidade de realizar uma das técnicas citadas anteriormente, os resíduos devem receber uma correta destinação final.

Uma das maneiras de dispor corretamente os resíduos e diminuir os efeitos negativos que os mesmos podem trazer a natureza, é utilizar como destinação final os aterros sanitários.

Porém, como relatado anteriormente, é cada vez maior a quantidade de resíduos gerados. O aumento do número de habitantes, serviços, processos, entre outros fatores contribuem para esse aumento. Além desses fatores, o crescimento da produção de resíduos por habitante ao dia é outra característica que contribui significativamente para o aumento gradativo da produção de resíduos.

Dessa forma, torna-se muito importante buscar maneiras de aumentar a vida útil de um aterro sanitário. Deve ser aproveitado o máximo de espaço do aterro existente e buscar tecnologias que imprimam maiores densidades aos resíduos. A estes aspectos, deve ser acrescentada a importância para a recuperação e reaproveitamento de antigas áreas de disposição, as quais demandam o conhecimento das condições geomecânicas do maciço, assim como a previsão do seu comportamento futuro (MARQUES, 2001, p2).

Segundo Pessin et al. (2000) apud Comparin (2011, p14), a maioria dos aterros sanitários no Brasil não possuem critérios para implantação, operação e monitoramento, dificultando a quantificação e controle de chorume e gases produzidos no processo de degradação da matéria orgânica. A preocupação com a contaminação dos recursos hídricos, do solo e ar fez com que houvessem mudanças significativas no projeto e operação de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos, através de Normas Técnicas e Regulamentos que visam assegurar uma maior proteção do meio ambiente (ALCÂNTARA,2007, p26).

Como os resíduos destinados aos aterros sanitários possuem uma grande heterogeneidade, é necessário que se façam estudos específicos em cada unidade e tentar entender o comportamento da massa de resíduos no presente e ao longo do tempo. Além de

entender o comportamento dos resíduos dentro do maciço, é essencial avaliar a eficiência de todas as camadas componentes do aterro sanitário, com ênfase para a camada de cobertura final e seu papel no encaminhamento das águas pluviais para os dispositivos de drenagem existentes no aterro sanitário e controle de gases produzidos na degradação da matéria orgânica.

## **2 OBJETIVOS**

O objetivo da pesquisa é fazer uma caracterização geotécnica preliminar da camada de cobertura final de uma das células do aterro sanitário de Caucaia, com o objetivo de fornecer dados de entrada que permitam posteriores análises de desempenho da cobertura no que se refere a mitigação do fluxo de água para o interior resíduos sólidos, como por exemplo, por meio de modelagem numérica. A metodologia constou da realização de ensaios em campo para a determinação de parâmetros geotécnicos, amostragem do solo da cobertura e ensaios laboratoriais. Adicionalmente à análise da cobertura, foi feita uma análise da evolução dos recalques ao longo do tempo através de ajuste dos dados de campo com modelo de hiperbólico para previsão de recalques.



### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 O solo

O solo é o produto obtido a partir da alteração e decomposição do material rochoso, a partir de agentes físicos, químicos e biológicos, a ação dos mesmos sobre a rocha chamamos respectivamente de intemperismo físico, químico e biológico.

Segundo Carvalho (2009, p19) O intemperismo origina os solos, os quais são identificados por designação factual mais genérica, ou seja, por sua composição e características físico-químicas, definida por genes imutáveis, próprios de sua origem – a rocha matriz.

#### 3.2 Tipos de solos

Existem basicamente na natureza três tipos de solos, o residual, que ocorre quando a ação do intemperismo forma um perfil de solo sobrejacente à rocha matriz, o transportado, quando ocorre o transporte de partículas para outras áreas e o orgânico quando há a predominância de agentes biológicos.

##### 3.2.1.1 Solos residuais

Os solos residuais são solos que provém do produto final da rocha sã intemperizada pelo processo químico, permanecendo no local de origem, constituindo assim o manto do intemperismo. Em decorrência do intemperismo a rocha passa por quatro etapas, sendo elas: rocha matriz, rocha alterada, solo residual jovem e solo residual maduro. Ao atingir essas duas últimas etapas o solo já pode ser considerado residual, sendo que na última etapa o solo já não apresenta mais os caracteres da rocha matriz.

Os solos residuais apresentam uma grande heterogeneidade, pois dependem da rocha matriz e do agente de intemperismo. A água desempenha um papel muito importante na formação de solos residuais, uma vez que pode alterar os minerais do solo e provocar o carreamento dos finos, formando um solo com um alto teor de vazios, o que irá gerar problemas quando o mesmo for submetido a esforços.

### 3.2.1.2 Solos transportados

Os solos transportados são solos que sofrem a ação dos agentes do intemperismo, os quais erodem o solo, e transporta suas partículas por distâncias que podem chegar até quilômetros.

O transporte por longas distâncias causa o rearranjo das partículas do solo e conseqüentemente a alteração de algumas propriedades mecânicas tais como: densidade, granulometria, índice de vazios, gravimetria, entre outras.

Os solos transportados podem ser classificados de acordo com o agente que fez o seu transporte. Solos são denominados aluviais quando o agente de transporte é a água corrente, coluviais quando o agente é a gravidade, marinhos quando o seu transporte é feito pelas correntes marítimas e marés, eólico e glaciais, quando os agentes são respectivamente os ventos e as geleiras Carvalho (2009, p29).

### 3.3 Fração de argila nos solos

A argila é a porção do solo que apresenta um diâmetro menor do que 0,005 mm (ABNT), sendo um dos principais componentes do solo, principalmente por sua plasticidade marcante (capacidade de se deformar sem grandes variações de volume) e elevada resistência quando seca. Tendo assim uma grande importância nas propriedades mecânicas do solo.

Pelo fato de ser composta por partículas muito pequenas, as argilas só podem ser identificadas de maneira direta através de microscópios eletrônicos. Esses microscópios usam feixes de elétrons em vez de feixes de luz que permitem a visualização de objetos menores que dois micrômetros de diâmetro. Outra maneira de identificação de argilas é a utilização dos procedimentos descritos na NBR 7250. Segundo a norma 7250/1982, as argilas têm algumas características facilmente identificadas tais como: Aparência de um pó quando secas e de sabão quando úmidas, são moldáveis quando úmidas, apresentam resistência a pressão dos dedos, quando inseridas em uma proveta com uma certa quantidade de água a solução fica turva e a argila demora a sedimentar, entre outras características. Uma terceira maneira de identificação de um solo argiloso seria pelo cálculo da atividade da fração de argila que é função do índice de plasticidade.

Quando falamos em construção de barragens, os solos argilosos têm uma função muito importante. Primeiramente pela sua baixa permeabilidade, podendo ser usado como material impermeável. Porém, as micropartículas constituintes de um solo argiloso apresentam uma

elevada complexidade sob o ponto de vista físico, químico e mecânico. Portanto, para se trabalhar com solos argiloso é preciso entender além de seu comportamento mecânico, aspectos descritos apenas na físico-química e/ou na química coloidal.

As argilas quando apresentam partículas com dimensões inferiores que uns micrômetros são considerados partículas coloidais. As partículas coloidais são caracterizadas por uma grande área superficial em relação a sua massa, predominando forças superficiais sobre as forças gravitacionais (CARVALHO, 2009, p33).

### **3.4 Estrutura básica dos minerais argilosos**

Os minerais argilosos possuem basicamente duas estruturas: Sílica/Tetraédrica e Alumina/Octaédrica. As unidades básicas associam-se formando lâminas e essas lâminas formam camadas.

A unidade sílica é formada por quatro átomos de oxigênio que ficam equidistantes de apenas um átomo central de Silício. Quando esta unidade dá origem a uma argila, ocorre a formação de placas com a seguinte configuração estrutural -  $n(\text{Si}_2\text{O}_5)$

A unidade Alumina é formada por um átomo de alumínio equidistante de seis átomos de oxigênio ou Hidroxilas (OH). Quando o mineral possui alumínio e hidroxilas o mineral é chamado de gibbsita. Quando o mineral é constituído por átomos de alumínio e oxigênio, ele é chamado de brucita. A associação desses minerais com hidroxilas, ferro e outros minerais que se intercalam entre as lâminas formam diferentes tipos de argila.

### **3.5 Resíduos Sólidos Urbanos (RSU)**

Os resíduos sólidos urbanos são os materiais oriundos das atividades antrópicas os quais são considerados inúteis, indesejados e/ou descartáveis. Os resíduos podem se apresentar no estado sólido, semissólido ou semilíquido, no caso dos lodos. (TAPAHUASCO,2009, p.4)

De acordo com a NBR 10.004/2004 os resíduos podem ser classificados quanto ao tipo como:

Classe I (perigosos) e classe II (Não perigosos). Os resíduos classe I são resíduos perigosos ou apresentam umas das seguintes características: Inflamabilidade, toxicidade, patogenicidade, corrosividade e/ou reatividade. Os resíduos classe II são divididos em IIA (Não inertes) e IIB (Inertes). Os resíduos classe IIA não podem ter as seguintes propriedades: biodegradabilidade, combustibilidade e solubilidade em água. Os resíduos classe IIB devem passar por uma amostragem significativa segundo as NBR's (10.006/04 e 10.006/05).

Ainda segundo a NBR 10.004/04 os resíduos sólidos são classificados de forma geral como:

Resíduos no estado sólido ou semissólido, que resultam de atividades de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, agrícola de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistema de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento em rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face a melhor tecnologia disponível.

Os resíduos sólidos urbanos são aqueles advindos das atividades exercidas nas cidades, sendo elas comerciais ou domiciliares. Nessa categoria são incluídos também os resíduos provenientes de logradouros públicos como ruas e praças, denominado lixo de varrição. O resíduo sólido urbano (RSU) é caracterizado pela elevada heterogeneidade, podendo conter metais, vegetação, plásticos, papéis, vidros, galhos, terra, resíduos industriais não perigosos, entre outros (DENARDIN,2013, p44).

O aumento populacional associado a uma crescente gama de atividades, produtos e serviços fez com que houvesse um crescimento muito grande da quantidade de resíduos sólidos urbanos gerados. Diante dessa nova realidade, torna-se cada vez mais importante a implantação de ações que abranjam os “3 Rs” i). Reduzir a quantidade gerada ii). Reutilizar e iii). Reciclar quando for possível. Os “3 Rs” fazer parte de um novo tipo de gestão integrada dos resíduos sólidos, onde há uma parceria entre poder público e população. Na gestão integrada busca-se a correta segregação, acondicionamento, coleta, manipulação, transporte e destinação final dos resíduos. Atividades como compostagem, digestores anaeróbios, reciclagem, entre outras, contribuem para uma redução no volume de resíduos destinados aos aterros sanitários, contribuindo para um aumento na sua vida útil.

### **3.6 Aterros sanitários**

De acordo com a NBR 8419 (1992):

Aterros sanitários constituem uma forma de disposição de resíduos no solo que, fundamentada em critérios de engenharia e normas operacionais específicas, permite o confinamento seguro em termos de controle de poluição ambiental e proteção à saúde pública, minimizando os impactos ambientais.

O aterro sanitário de resíduos sólidos urbanos é um local onde ocorre a correta disposição final e tratamento dos resíduos produzidos pelos habitantes de uma cidade ou consórcio de cidades, de forma a garantir o mínimo de impactos ambientais e sanitários.

Um aterro sanitário de resíduos sólidos geralmente tem vida útil de aproximadamente vinte anos, prevendo-se seu monitoramento por mais alguns anos após o seu encerramento, devido ao processo de decomposição da matéria orgânica. Além dos rebaixamentos causados pela decomposição da matéria orgânica, outro processo que deve ser observado e monitorado é a produção de gases advindo desse procedimento.

### **3.7 Composição de um aterro sanitário**

O aterro sanitário deve ser construído em células, as quais recebem resíduos, sendo estes previamente compactados in situ, para melhoria das propriedades mecânicas da massa de resíduos. Ao atingir a cota pré-estabelecida uma célula de RSU é encerrada e disposta sobre ela uma cama de cobertura intermediária na qual é posicionado um sistema de drenagem da célula sobrejacente.

Os resíduos são cobertos diariamente por uma camada de cobertura de solo ou outro material inerte com o objetivo de reduzir a geração de vetores (baratas, ratos, urubus), odores e evitar o contato do resíduo com os seres humanos.

Na base do aterro sanitário deve-se projetar um revestimento de fundo, com objetivo de reduzir o transporte de poluentes para as zonas insaturadas do solo e/ou aquífero subjacentes, evitando que o acúmulo desses poluentes gere concentrações prejudiciais do ponto de vista ambiental e sanitário.

De acordo com (Boscov, 2008, p125) revestimento da base segue a seguinte composição de baixo para cima:

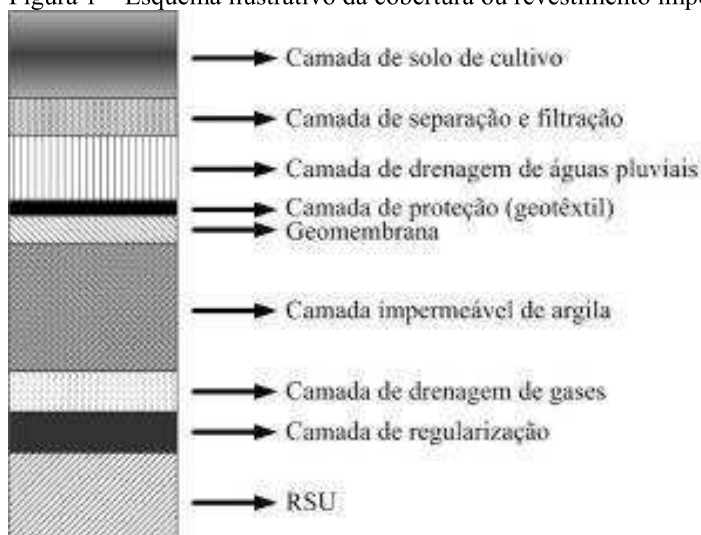
- a) Camada de argila compactada com coeficiente de permeabilidade muito baixo, inferior à  $10^{-9}$  m/s.
- b) Geomembrana, para complementar a impermeabilização.
- c) Camada de proteção da geomembrana, para prevenir os danos causados pela instalação da drenagem, solicitação ocasionada pelo peso dos resíduos e principalmente punção e rasgos.
- d) Camada drenante do percolado, de material granular, para permitir a coleta do percolado e reduzir a carga hidráulica.

e) Camada de separação e filtração, para evitar o contato direto dos resíduos com a camada drenante e o carreamento das partículas dos resíduos ou de sólidos suspensos do chorume para os vazios do material drenante.

O percolato gerado pelos resíduos deve ser coletado e tratado a fim de evitar a migração desse poluente para o solo e água subjacente, além de diminuir as pressões neutras no maciço. Segundo Boscov (2008, p129) O sistema de drenagem do percolato é constituído por uma camada de material granular de alta permeabilidade, como é o caso da brita. Essa camada é protegida por uma camada de material filtrante, areia ou geotêxtil. E dentro da camada de material granular é colocada uma tubulação perfurada resistente as condições químicas e físicas dos resíduos, PEAD (Polietileno de alta densidade).

O percolato captado é levado até um reservatório ou trincheira, onde é removido por bombeamento ou ação da gravidade até o local de tratamento. O fechamento do aterro é feito com a execução de camadas de cobertura de baixa permeabilidade colocado sobre a última leva de resíduos dispostos no aterro. Essa última camada (Figura 1) tem como função isolar os resíduos, evitar a entrada de águas pluviais (aumento do volume de percolato) e associado a uma cobertura de camada vegetal (gramíneas) controlar a entrada e saída de gases.

Figura 1 – Esquema ilustrativo da cobertura ou revestimento impermeável superior de um aterro sanitário



Fonte: Modificado de Boscov (2008)

Boscov (2008, p133) apresentou exemplos de revestimento impermeável superior, que é composto pelas seguintes camadas, de baixo para cima:

- a) camada de regularização do solo não nobre;
- b) camada de drenagem para gases (Quando há a formação de gases);

- c) camada de argila compactada com coeficiente de permeabilidade muito baixo; “K” menor ou igual a dez elevado a menos nove metros por segundo;
- d) geomembrana com limitação de declividade transversal e longitudinal após recalques;
- e) camada de proteção da Geomembrana, geotêxtil;
- f) camada drenante de águas pluviais, material granular;
- g) camada de separação e filtração;
- h) camada de solo para cultivo.

O sistema de drenagem de gases é usado para captar principalmente o gás metano e dióxido de carbono. Este sistema é formado basicamente por drenos horizontais e verticais interligados. As camadas horizontais ficam na cobertura enquanto as verticais estão presentes em todo o aterro. Os drenos verticais são construídos de tubo de concreto perfurados e envoltos por material granular, já os drenos horizontais podem ser de areia, geomalhas, entre outros. Os gases mais densos são coletados juntamente com o percolado enquanto os menos densos (metano e gás carbônico) sobem até a superfície pelos drenos verticais. Ao chegar na superfície esses gases são queimados em queimadores (“flares”) ou utilizados para geração de energia.

O sistema de drenagem superficial tem como função evitar a entrada das águas pluviais dentro da massa de resíduos e conseqüentemente o aumento da geração de chorume e a erosão interna dentro do maciço. A drenagem superficial é constituída por tubulações, escadas hidráulicas, canaletas de concreto e estruturas de amortecimento de energia. De acordo com Boscov (2008, p139), em decorrência dos elevados recalques que ocorrem no maciço de resíduos nos aterros sanitários, são utilizados elementos flexíveis como gabiões e colchões Reno.

### **3.8 Recalques e compressibilidade em aterros sanitários de RSU**

De acordo com Carvalho et al. (2000, p4), os aterros de resíduos sólidos urbanos (RSU), ao contrário dos maciços de solos compactados, são constituídos por diferentes tipos de resíduos (metais, plásticos, papéis, vidros, madeiras, têxteis, resíduos orgânicos, pedras, solos) que, quando depositados, interagem formando um maciço heterogêneo e poroso com comportamento peculiar. Por conta dessa composição, os mecanismos que governam os recalques desses aterros são muitos, e em geral, complexos, pois além de cada material apresentar suas próprias características de compressibilidade, deve-se considerar os processos de degradação que ocorrem ao longo do tempo.

Segundo Boscov (2008), a estimativa dos recalques e das velocidades de recalques dos maciços sanitários é importante para determinar a sua vida útil, permitindo estimar a quantidade de resíduos que serão depositadas ao longo do tempo e sua capacidade de armazenamento de resíduos.

A compressão sofrida pela massa de resíduos de um aterro sanitário ocorre em decorrência de carregamentos externos e alterações dos resíduos presente no maciço. Os principais mecanismos de compressão em aterros de RSU são: (a) devido a carregamentos externos: Solicitação mecânica, dissipação das pressões neutras e (b) devido ao meio: creep, ravinamento interno, biodegradação e alteração de características físico-químicas.

A previsão dos recalques de maciços sanitários deveria ser baseada nos mecanismos atuantes, mas alguns são muitos complexos e de difícil quantificação. O ravinamento interno, por exemplo, é ignorado ou agregado aos demais processos, embora seja significativa a migração de grãos de solo de cobertura diária para os vazios dos resíduos: as camadas de solo ocupam inicialmente cerca de 20% do volume total de um aterro sanitário e apenas 5% após o carregamento das camadas superiores (Morris e Woods, 1990 apud Boscov (2008)).

De forma geral, a avaliação de recalques em aterros de resíduos sólidos urbanos pode ser dividida em duas fases principais: Adensamento primário e adensamento secundário. O adensamento primário ocorre após a aplicação de cargas externas o que resulta em uma compactação do solo e dissipação das pressões neutras. Depois do término das atividades no aterro sanitário, o adensamento primário cessa e dá-se início ao adensamento secundário, resultante da degradação biológica dos materiais putrescíveis (matéria orgânica). O entendimento do adensamento secundário e sua previsão é de fundamental importância para determinação do tempo de estabilização do aterro sanitário e de sua vida útil.

A literatura técnica (e.g. Sowers, 1973; Wall & Zeiss, 1995; Farias, 2000 APUD Melo et al, 2006, p312) descreve o mecanismo dos recalques em aterros de RSU ocorrendo em três etapas distintas. Inicialmente acontece o recalque imediato, logo após a disposição de resíduos, quando há a acomodação destes resíduos devido ao peso das camadas sobrejacentes e equipamentos de compactação podendo ser calculado pela teoria da elasticidade. Na segunda etapa ocorre o recalque primário devido ao incremento de tensões causado pelo peso dos próprios resíduos finalmente o chamado recalque secundário que engloba a parcela de recalques sob tensões constantes provenientes da degradação biológica e deformação lenta dos componentes (creep). Apesar da classificação separada, as três etapas devem ocorrer simultaneamente.



### 3.9 Modelos de previsões de recalques

Em decorrência grande heterogeneidade dos resíduos que são destinados a um aterro sanitário, é muito complexo determinar qual será o recalque sofrido pela massa e todos os fenômenos envolvidos. Para resolução desse problema têm-se desenvolvido vários estudos e pesquisas com base em métodos empíricos ou teóricos. Dos modelos de previsão de recalques que encontramos na literatura, a maior parte é baseada em equações empíricas

De acordo com Abreu (2000) apud Denardin (2013, p32) não há um modelo aplicável que considere todas as variáveis envolvidas no processo de recalque de resíduos sólidos urbanos. Obviamente, são necessárias algumas simplificações que devem ser incorporadas de alguma forma nos modelos de previsão de recalques. Estes, por sua vez, podem ser empíricos ou teóricos, dependendo da forma de abordagem do problema adotada.

Segundo Nascimento (2007, p58) A maioria dos modelos existentes podem ser divididos nas seguintes categorias: i) modelo de consolidação, no qual a teoria do adensamento de Terzaghi normalmente é utilizada; ii) modelos reológicos, como por exemplo, o modelo exponencial de creep de Gibson e Lo; iii) modelo de biodegradação, onde observa-se a degradação da matéria orgânica podendo ser avaliada através de modelos de geração de gás; iv) Modelos baseados em regressões (por exemplo, logarítmicas, hiperbólicas, bi-linear, multilinear), obtidas através de dados de recalques no aterro. De forma mais simples, os modelos podem ser considerados como tradicionais ou convencionais:

#### 3.9.1 Modelos tradicionais

Segundo Tapahuasco (2009, p49) desde a década de 1970 até os dias de hoje muitos pesquisadores tentam desenvolver modelos matemáticos para expressar os recalques ocorridos em aterros sanitários. Os modelos tradicionais são predominantemente empíricos, ou seja, desenvolvidos a partir da observação de aterros sanitários e estudos de caso, sem considerar as propriedades e fatores que causam os recalques ocorridos no maciço.

##### 3.9.1.1 Modelo de Sowers

Segundo Mendes (2009, p7), Sowers (1973) foi quem primeiro idealizou um modelo de previsão de recalques para os aterros de resíduos sólidos, considerando a compressão inicial, primária e secundária.

O modelo de Sowers (1979), foi feito utilizando o modelo clássico de Terzaghi para solos adaptando-as para resíduos sólidos urbanos (TAPAHUASACO, 2009, 49).

No modelo de Sowers, os recalques são divididos em duas etapas: Recalques primários e secundários. Os recalques primários podem ser determinados pela teoria clássica da mecânica dos solos, pois esses recalques são ocasionados pelo peso da massa de resíduos e pela eliminação das pressões intersticiais, durante aproximadamente trinta dias (MELO,2003, p11). A magnitude da primeira etapa pode ser determinada pela seguinte expressão:

$$S_{t_1} = \frac{H}{1 + e_0} \times \left( C_c \times \log \frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma}{\sigma'_0} \right) \quad (1)$$

Onde:

$S_t$  = recalque ao final da compressão primária;

$\sigma'_0$  = pressão vertical inicial;

$H_0$  = espessura inicial da camada;

$\Delta\sigma$  = acréscimo de pressão vertical;

$C$  = coeficiente de compressão primária;

$e_0$  = índice de vazios inicial.

Com o fim da primeira etapa, inicia-se a segunda etapa, a qual é caracterizada pelo desenvolvimento de mudanças físico-químicas, decomposição biológica e a deformação mecânica do tipo viscoso, possuindo uma relação linear com o logaritmo do tempo (TAPAHUASACO,2009, 49). A magnitude da segunda etapa pode ser determinada pela seguinte expressão:

$$S_{t_1} = \frac{H}{1 + e_0} \times \left( C_\alpha \times \log \frac{t}{t_1} \right) \quad (2)$$

Onde:

$S_{t_1}$  = recalque da camada devido à compressão secundária;

$H$  = espessura inicial da camada;

$C_\alpha$  = coeficiente de compressão secundária;

$t$  = tempo de estimativa de recalques;

$t_1$  = tempo para completar a compressão inicial.

Apesar da simplicidade de sua aplicação, o modelo de Sowers é inadequado para a estimativa de recalques em RSU por não considerar diretamente os parâmetros de recalque que ocasionam o fenômeno da biodegradação e por se utilizar de suposições simplificadoras da teoria de Terzaghi, que não são válidas para o caso dos RSU (Validade da lei de Darcy, solo saturado, sólidos incompressíveis, fluxo unidimensional). Por esta razão deve-se ter muitas ressalvas na aplicação deste modelo.

### 3.9.1.2 Modelo de Bjarngard e Edgers

O modelo de Bjarngard e Edgers (1990) foi proposto a partir da compilação e análise de 24 casos históricos de monitoração de aterros sanitários (PARK et al., 2002 apud DENARDIM, 2013, p38). Através do monitoramento e análise dos dados foi observado que a compressão secundária era dividida em duas fases distintas (Figura 2). A primeira ocorria em prazo intermediário e a segunda parte a longo prazo (COMPARIN, 2011, p45). A equação proposta continha parâmetros referentes a compressão primária e secundária, ou seja, considerava a compressão mecânica dos vazios e a redução dos vazios existentes, o que elimina a necessidade de determinação do índice de vazios inicial (SIMÕES, 2000, p136). O modelo segue a seguinte equação:

$$\frac{S_t}{H} = C'_c \times \log \frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma}{\sigma'_0} + C'_{\alpha_1} \times \log \frac{t_2}{t_1} + C'_{\alpha_2} \times \log \frac{t_3}{t_2} \quad (3)$$

Onde:

$S_t$  = recalque no tempo  $t$ ;

$H$  = Altura inicial da camada sob análise;

$\sigma_0$  = tensão vertical efetiva inicial ao meio da camada sob análise;

$\Delta\sigma$  = incremento de tensão vertical ao meio da camada sob análise;

$t_1$  = tempo, em dias, para conclusão da compressão inicial;

$t_2$  = tempo, em dias, para conclusão da compressão intermediária;

$t_3$  = tempo, em dias, para o qual é feita a previsão do recalque;

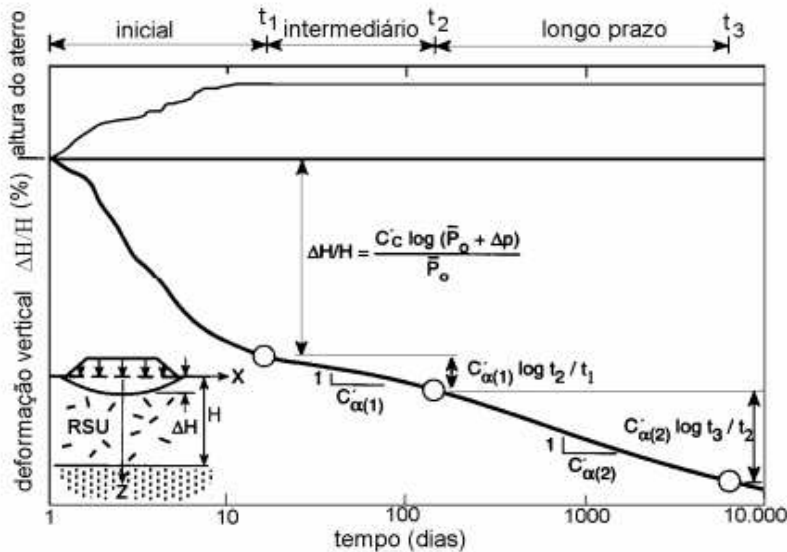
$C_c$  = coeficiente de compressão primária;

$C_{\alpha_1}$  = coeficiente de compressão secundária intermediária;

$C_{\alpha_2}$  = coeficiente de compressão secundária de longo prazo.

\* $C_{\alpha_1}$  variando entre 0,003 e 0,038;  $C_{\alpha_2}$  variando entre 0,017 e 0,51.

Figura 2 – Modelo de recalque proposto por Bjarngard e Edgers



Fonte: Stulgis et al (1995) apud Mirian (1999, p83).

Segundo Tapahuasco (2009, p 51), o modelo de Bjarngard e Edgers (1990) apresenta um melhor comportamento para estimar os recalques do que o modelo de Sowers (1971), mas o modelo é inconsistente devido a dois fatores: As duas primeiras parcelas (Compressão inicial e secundária) são baseadas na teoria da consolidação primária e secundária de solos e por considerar um comportamento homogêneo dos fatores de degradação que influenciam os recalques.

### 3.9.1.3 Modelo de Yen e Scanlon (1975)

O modelo foi obtido a partir dos resultados obtidos no monitoramento de três aterros sanitários distintos, durante um período de nove anos (SIMÕES, 2000, p38). No modelo, as taxas de recalques crescem com a altura do aterro e decrescem linearmente com o logaritmo do tempo (Figura 3). O modelo só é aplicável a recalques secundários, ou seja, recalques em um longo prazo e é representado pela seguinte equação:

$$m = \frac{\Delta H}{\Delta t} \text{ ou } m = a - b \times \log t_1 \quad (4)$$

Com:

$$t_1 = t - \frac{t_0}{2} \quad (5)$$

Onde:

$m$  = Velocidade de recalque;

$\Delta H$  = recalques medidos;

$\Delta t$  = intervalo de tempo entre as medidas;

$t$  = tempo a partir do início da construção;

$t_1$  = Tempo em que se deseja medir o recalque;

$t_0$  = tempo da construção do aterro;

$a$  e  $b$  = parâmetros que variam com a espessura do aterro e com o tempo de construção

\*\* Os parâmetros podem ser adotados como:  $a = 0,00095H_f + 0,0985$ , e  $b = 0,00035H_f + 0,0509$ ;  $H_f$  = Espessura final, em metros.

Figura 3 – Representação gráfica do modelo proposto por YEN e SCALON (1975)



Fonte: Marques (2001, p66).

De acordo com Simões (2000, p38) os dados de recalque obtidos devem ser ajustados de acordo com os dados de campo e o modelo apresenta-se inconsistente para tempos muito grandes, uma vez que dependendo da combinação das constantes o recalque poderia tornar-se negativo.

### 3.9.1.4 Modelo hiperbólico de Ling et al (1998):

O modelo hiperbólico de Ling et al. (1998) foi formulado através da análise das limitações dos modelos de Yen e Scanlon (1975). No modelo hiperbólico as compressões primária e secundária foram dispostas em uma única equação. O tempo inicial corresponde ao início das medidas de recalque, podendo ser arbitrado em  $t = 0$ , ou em algum outro tempo de interesse (MARQUES,2001, p72). A magnitude dos recalques pode ser determinada pela seguinte equação:

$$\Delta H = \frac{\Delta t}{\left(\frac{1}{\rho_0} + \frac{\Delta t}{\Delta H_{ult}}\right)} \quad (6)$$

Onde:

$\Delta t$  = Diferença entre o tempo de interesse e o tempo inicial ( $t_i - t_o$ );

$\Delta H$  = Recalque medido entre  $t_i$  e  $t_o$ ;

$\Delta H_{ult}$  = Recalque último esperado em  $t_o$ ;

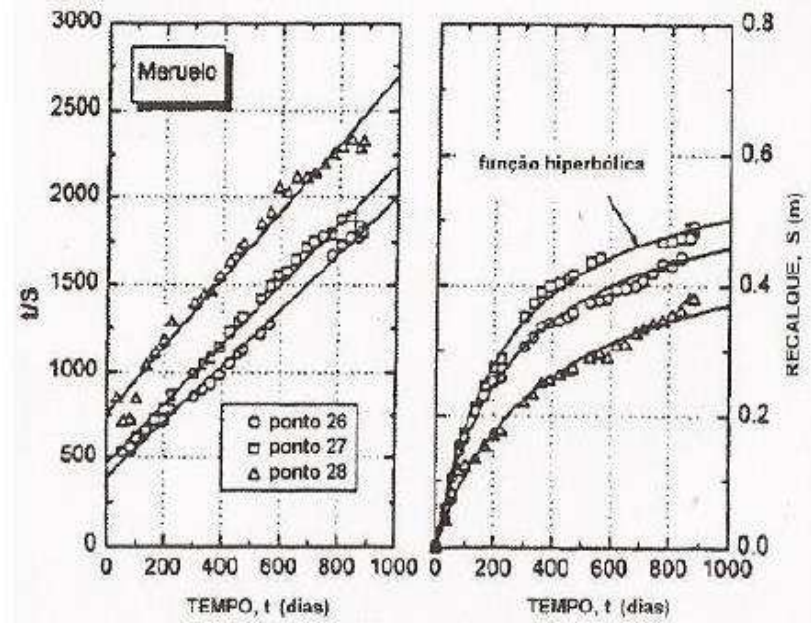
$\rho_0$  = Taxa de recalque inicial em  $t_o$ .

Os parâmetros  $\rho_0$  e  $\Delta H_{ult}$  podem ser determinados pela relação de  $t/\Delta H$  versus  $t$ , através de uma análise de regressão linear. Logo, os inversos do intercepto e da inclinação fornecem os parâmetros  $\rho_0$  e  $\Delta H_{ult}$ . A relação pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\frac{t}{\Delta H} = \frac{1}{\rho_0} + \frac{t}{\Delta H_{ult}} \quad (7)$$

De acordo com Tapahuasco (2009, p52) a aplicabilidade do modelo é função das taxas (velocidade) dos recalques, as melhores correlações são obtidas quando as taxas diminuem com o tempo. Outro fator importante é que os parâmetros das equações são próprios e característicos ao comportamento de cada curva de recalque. A Figura 4 apresenta os resultados da aplicação do modelo no aterro Meruelo (Espanha).

Figura 4 – Modelo hiperbólico de LING et al (1998) aplicado ao aterro de Meruelo.



Fonte: Marques (2001, p 73).

### 3.9.2 Modelos convencionais

Devido a importância dos fenômenos de biodegradação nos recalques ocorridos nos maciços sanitários, alguns pesquisadores desenvolveram modelos matemáticos de previsão de recalques, levando em consideração este processo (Tapahuasco, 2009). Os principais modelos foram desenvolvidos levando em consideração os fatores mais importantes que interveem no processo de biodegradação da matéria orgânica e serão citados a seguir.

#### 3.9.2.1 Modelo de Meruelo (1995)

Em aterros sanitários, geralmente, a maior parte dos resíduos dispostos nas células não são biodegradáveis (orgânicos), quando comparados ao montante inservíveis mais recicláveis. De acordo com Palma (1995), a quantidade de material degradado, poderia ser determinada pela diferença de material acrescido e a quantidade de material remanescente em um certo tempo “t”, ou seja, a quantidade total de material adicionada ao maciço, subtraída da quantidade de material que sofreu o processo de degradação por meio da ação de microrganismos.

O modelo de Meruelo (1995) foi elaborado considerando os principais parâmetros que determinam a biodegradação da matéria orgânica: tempo, teor de matéria orgânica nos resíduos, umidade, ritmo de desenvolvimento dos processos de degradação, entre outros (DENARDIN, 2013, p41\_42).

Segundo Melo (2003, p14), o aterro é considerado como uma massa homogênea, com densidades constantes, em qualquer tempo e em qualquer célula de estudo do aterro sanitário. Os recalques ocorridos são representados pela seguinte equação:

$$\Delta H = \alpha \times H \times COD \times \left[ 1 - \left( \frac{1}{K_h \times t_c} \right) \times (e^{-k_h \times (t - t_c)} - e^{-k_h \times t}) \right] \quad (8)$$

Onde:

$\Delta H$  = Recalques (mm);

$\alpha$  = Coeficiente de massa perdida transformada em recalques;

H = Altura do aterro (mm);

COD = Quantidade de matéria orgânica biodegradável presente nos resíduos por ano;

$t_c$  = Tempo de construção do aterro (dias);

$K_h$  = Coeficiente de hidrólise ( $dia^{-1}$ );

t = Tempo no qual se deseja medir os recalques.

A principal hipótese adotada traz o coeficiente de hidrólise como agente limitante do processo de biodegradação, uma vez que a hidrólise é o processo/mecanismo mais frequentemente utilizado pelos microrganismos para transformar compostos orgânicos complexos em composto mais simples, fornecendo condições favoráveis a decomposição total da matéria orgânica nos estágios sucessivos de construção e operação de um aterro sanitário. A hidrólise é um parâmetro que depende principalmente das condições de umidade e segundo os próprios autores pode variar em até quatro ordens de grandeza. (SIMÕES,2000, p44).

O modelo de Meruelo se aplica melhor a células sanitárias com períodos de construção pequenos (menores que 150 dias) Tapahuasco (2009, p53) e em aterros sanitários antigos, onde os mecanismos de solicitação mecânica e dissipação das pressões neutras tem pouca ou nenhuma influência (Palma 1995, apud Tapahuasco,2009, p51)

### 3.10 Ensaios de determinação da infiltração:

A infiltração pode ser classificada basicamente como o processo pelo qual a água penetra no solo. O processo de infiltração é, em grande parte, responsável pela alteração das rochas e formação dos solos. Conhecer a taxa de infiltração dentro de um aterro sanitário é imprescindível para avaliar a eficiência das camadas impermeáveis e previsão da quantidade de



chorume que será tratada. A infiltração pode ser obtida a partir de alguns ensaios descritos a seguir.

### 3.10.1.1 *Método Infiltrômetro de anel:*

A técnica consiste em enterrar dois anéis concêntricos de 25 e 50 centímetros de diâmetro, a uma profundidade de 15 centímetros no solo, com auxílio de uma marreta. Coloca-se água ao mesmo tempo nos dois anéis e acompanha-se a infiltração vertical no cilindro interno, com auxílio de uma régua graduada. O anel externo tem a função de garantir que a infiltração ocorrerá apenas verticalmente. São aferidas medidas em tempos pré-estabelecidos e deve ser mantida uma altura da lâmina d'água de 5cm nos anéis com oscilação máxima de cinco (5) centímetros. No fim do processo obtêm-se uma curva de infiltração acumulada x tempo. O método pode ser observado na Figura 5.

Figura 5 – Ensaio de infiltração com duplo anel.



Fonte: Mellek (2015, p56)

### 3.10.1.2 *Permeâmetro de Guelph*

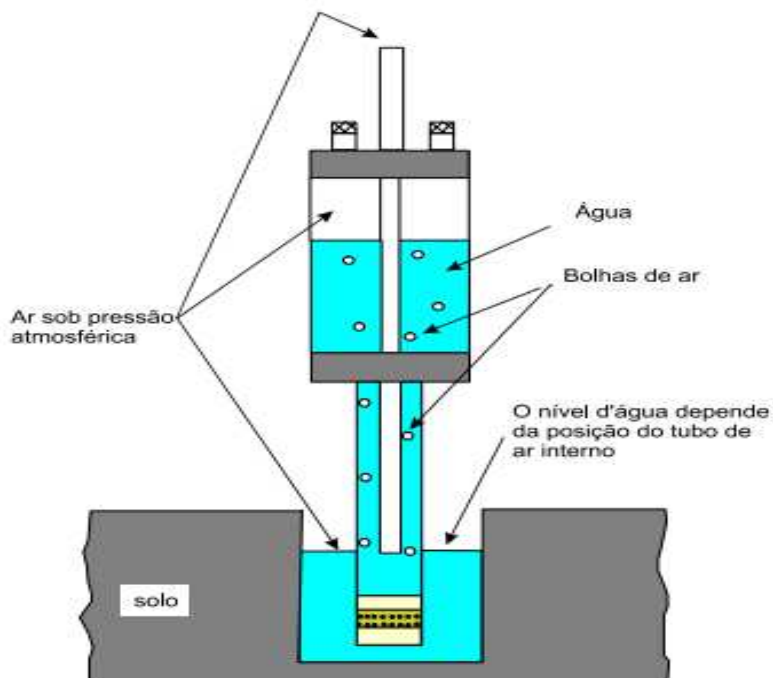
O Permeâmetro de Guelph é um Permeâmetro de furo e de carga hidráulica de carga constante que mede a condutividade hidráulica saturada de campo acima do lençol freático Aguiar (2001, p24). O Permeâmetro de Guelph é um aparelho utilizado para determinar, além da condutividade hidráulica saturada de um solo ( $K_s$ ), mais dois fatores: o coeficiente de armazenamento (Porcentagem gravimétrica de água que existe em uma porção de solo + água) e a capacidade de absorção de água no solo por capilaridade.

O aparelho é composto de uma garrafa de Mariotte que controla a carga constante de água dentro do furo, um tubo de acrílico com uma régua graduada onde a água é introduzida e um tripé que permite adaptar o aparelho a terrenos irregulares Aguiar (2001, p24). É interessante salientar cada componente na Figura 5 entre as vantagens desse método:

- a) Leveza do aparelho;
- b) Facilidade de operação;
- c) Rapidez dos ensaios.

O ensaio tem início com a montagem do aparelho e realização de um furo, com auxílio de um trado, de pelo menos trinta (30) centímetros de profundidade no solo. Posteriormente é injetada água no Permeômetro (Figura 6), uma coluna de cinco (5) centímetros de coluna em um primeiro momento, deverá ser estabelecido um nível d'água (carga hidráulica) no interior do furo a trado, originando um bulbo de saturação d'água a partir da base do solo (SANTOS, 2005 apud CELLIGOI et al, 2006, p9). O procedimento tem seu fim quando a taxa de infiltração (Volume de água infiltrado por tempo) fica constante. Depois da constância da taxa de infiltração, o procedimento deve ser repetido para dez (10) centímetros de coluna d'água (CELLIGOI,2006, p10).

Figura 6 – Funcionamento do Permeômetro de Guelph.



Fonte: Santos (2005) apud Celligoi et al, (2006, p9)

A condutividade hidráulica é determinada em função da taxa de infiltração obtida e das dimensões do furo e da altura da coluna d'água no interior do Permeômetro. A condutividade hidráulica pode ser determinada pelas seguintes equações:

$$K = [(0,0041) \times (X) \times (R_2) - (0,0054 \times (X) \times (R_1))] \quad (9)$$

$$K = [(0,0041) \times (Y) \times (R_2) - (0,0054 \times (Y) \times (R_1))] \quad (10)$$

Onde:

K = Condutividade hidráulica em (cm/s);

R<sub>1</sub> e R<sub>2</sub> = Taxas de infiltração (após a constância) correspondentes a H1 (5cm) e H2 (10cm);

X e Y = Constantes correspondentes a área do tubo (reservatório utilizado), em cm<sup>2</sup>.

#### 4 ÁREA DE ESTUDO

O ASMOC está situado no município de Caucaia, cujo acesso pode ser feito pela na rodovia BR 020 ou pela BR 222, o acesso ao aterro sanitário é realizado por uma estrada situada à margem da rodovia, com extensão de 1,6km, estando próxima à comunidade Carrapicho.

O terreno onde foi implantado o aterro sanitário possui uma área de 120ha, com relevo predominante plano. Posição geográfica a 3° 55' e 16'' de Latitude Sul e 38° 23' e 31'' de Longitude Oeste.

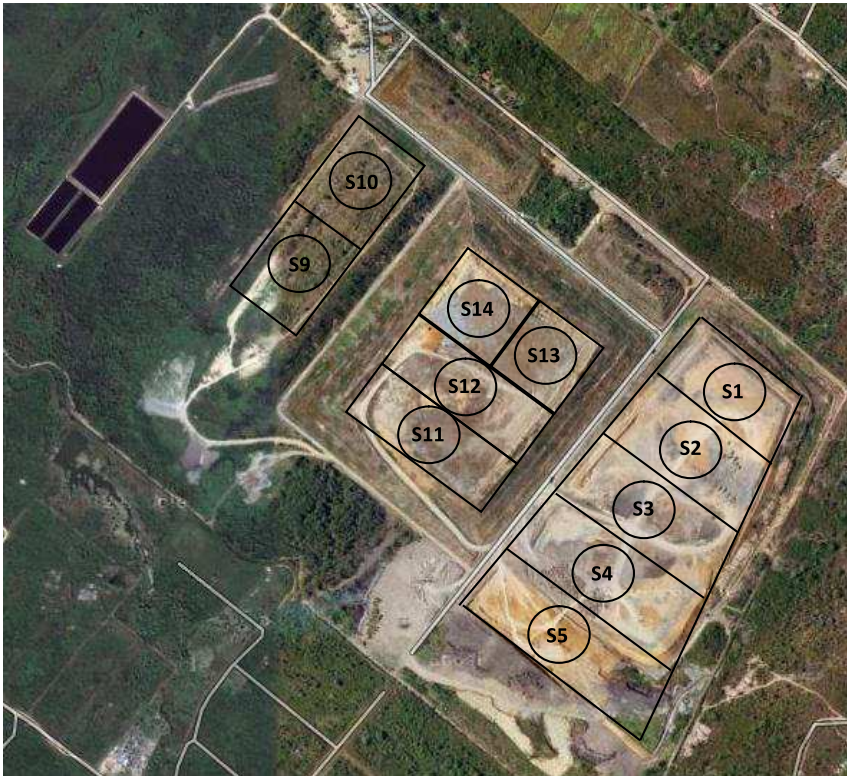
Todos os resíduos sólidos (classe II, B) gerados na região de Caucaia e Fortaleza provenientes da coleta domiciliar, comercial, varrição, capinação, entre outros, são encaminhados para o aterro sanitário. As Figuras 7 e 8 mostram a localização espacial do ASMOC e as células nas quais o aterro é dividido, respectivamente.

Figura 7 – Localização espacial do ASMOC



Fonte: Google Earth, 2013.

Figura 8 – Células constituintes do aterro sanitário de Caucaia.



Fonte: Google earth, 2013/Relatório de acompanhamento de acompanhamento dos maciços,2015.

A ocupação da área útil do terreno do Aterro Sanitário é basicamente pelo método de trincheira, combinado com o método da área, ou seja, a combinação se dá pela necessidade de superposição de camadas de lixo das trincheiras.

A camada de fundo do aterro sanitário é composta por uma camada argilosa impermeabilizante, presente no terreno de fundação, e sistemas de drenos (construídos por pedra tipo rachão), tipo espinha de peixe, que conduzem os líquidos percolados (chorume) para um poço de bombeamento. O RSU é depositado sobre as camadas de fundo em camadas de 5 a 6 metros de altura. A permeabilidade do solo de fundação foi determinada por meio de testes de infiltração in situ.

Para o controle da migração dos gases, o aterro consta de um sistema de drenagem de gases, constituídos por drenos verticais, executados com tubos de concreto, que conduzem o biogás até chaminés na parte superior do aterro. O sistema de drenagem de gases está sendo executado com tubos de concreto com 60cm de diâmetro, perfurados com furos de cerca de 3cm, os quais são colocados um sobre o outro, a medida que se executam as células. O espaçamento entre as chaminés é de 40m. Todo o gás captado é queimado para a realização da combustão do gás metano e transformá-lo em CO<sub>2</sub>, reduzindo assim a poluição ao meio ambiente.

## 5 METODOLOGIA UTILIZADA

A metodologia constou de dois procedimentos: No primeiro, foram realizados ensaios em campo (solo de cobertura e solo de cobertura sujeito à aspersão de chorume) e coleta de material para elaboração de ensaio laboratoriais (apenas no solo sem chorume do maciço) e posterior comparação com valores obtidos em norma e materiais bibliográficos. A segunda parte foi composta pela análise de dados de recalque do aterro sanitário fornecidos pela equipe técnica da equipe que gere o ASMOC. Os dados de recalque foram utilizados para ajustar um (calibrar) modelo empírico existente na literatura para descrever a evolução de recalques em maciços sanitários.

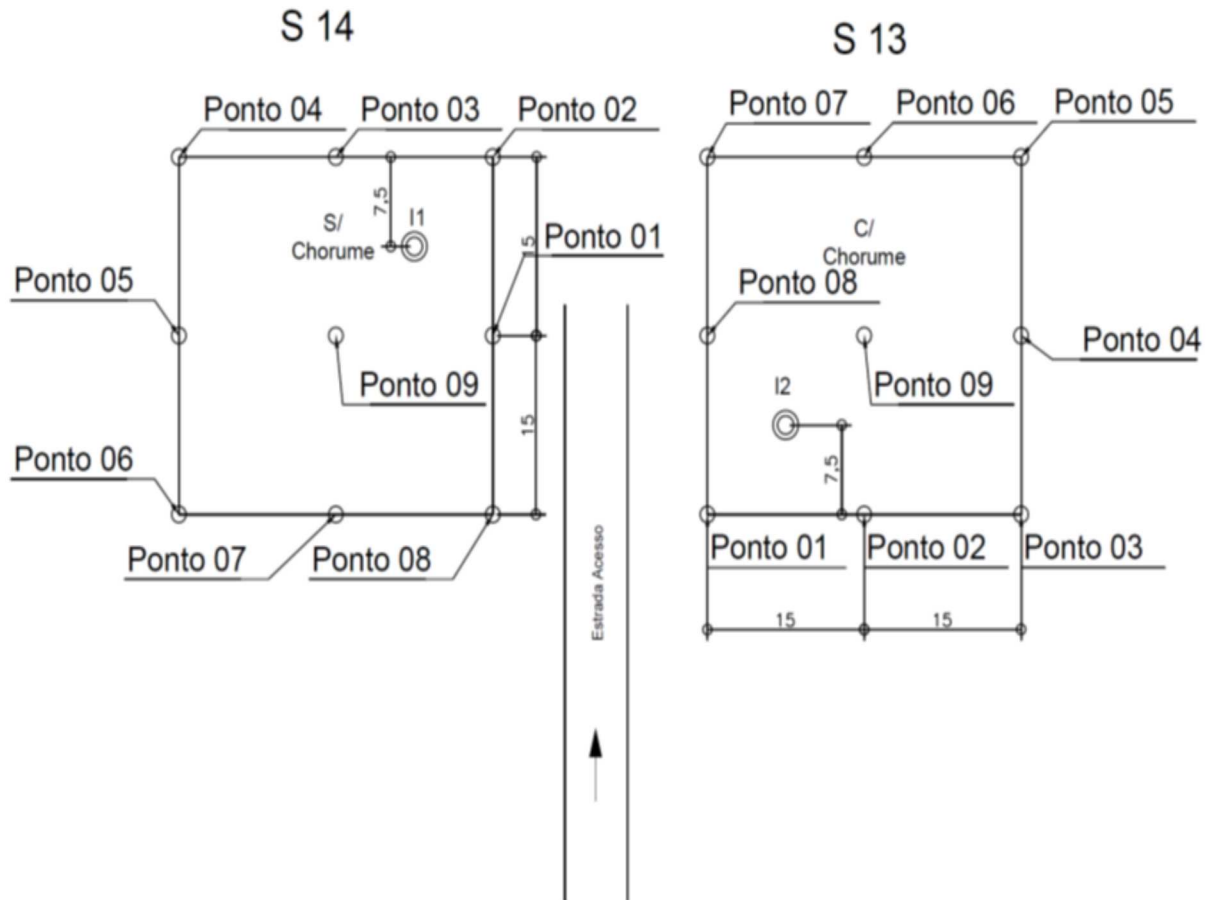
Os ensaios de caracterização dos solos foram feitos, segundo as seguintes normatizações:

- a) preparação de amostra e umidade – NBR 6457/86.
- b) granulometria – NBR 7181/84.
- c) limite de liquidez – NBR 6459/84.
- d) limite de plasticidade – NBR 7180/84.
- e) densidade real dos solos – DNER-ME 9364/86.
- f) peso específico aparente “IN SITU” – NBR 7185/86.

### 5.1 Ensaios

Os ensaios e as amostragens foram realizados na célula S14 (sem aspersão de chorume) e na célula S13 (com aspersão de chorume), em áreas que perfazem aproximadamente 900m<sup>2</sup> cada uma. A Figura 9 apresenta o croqui de localização não georreferenciado dos pontos onde foram realizados as amostragens e os ensaios de campo.

Figura 9 – Croqui de localização não georreferenciado das áreas de estudo dos ensaios de campo e das amostragens para ensaios de laboratório.



### 5.1.1 Ensaios de campo

#### 5.1.1.1 Peso específico aparente “IN SITU” – Método do frasco de areia

O ensaio de peso específico aparente “in situ” é aplicado para solos de qualquer granulometria que possam ser escavados com ferramentas de mão, sem que haja desmoronamentos; com vazios naturais que impeçam a penetração da areia utilizada no ensaio e não exista percolação de água na cavidade. Tem por objetivo fazer o controle dos padrões da massa específica do solo nos mais diversos tipos de obras de engenharia: barragens, aterros sanitários, entre outros.

O ensaio consta de escavação de uma cavidade no solo (com profundidade de cerca de quinze (15) centímetros) no local onde se deseja determinar o peso específico natural ( $\gamma_{solo}$ ), com posterior pesagem do material úmido escavado ( $P_{solo}$ ). Amostras de solo úmido são retiradas para a determinação da umidade gravimétrica ( $w$ ), permitindo calcular o peso específico aparente seco do solo ( $\gamma_d$ ). Posteriormente o furo é completamente preenchido com areia uniforme, de peso específico conhecido ( $\gamma_{areia}$ , previamente calibrada em laboratório), contida dentro de um funil denominado de frasco de areia. O peso da areia preenchida no furo ( $P_{areia}$ ) é determinado pela diferença de peso do frasco, antes e após o após o preenchimento do furo. A densidade do solo pode ser facilmente obtida pelas seguintes relações:

$$\gamma_{solo} = \frac{P_{solo} \gamma_{areia}}{P_{areia}} \quad (11)$$

$$\gamma_d = \frac{\gamma_{solo}}{1 + w} \quad (12)$$

A Figura 10 mostra a etapa de escavação de um furo para a determinação do peso específico com o uso do frasco de areia, que foi feito no aterro sanitário de Caucaia. Uma parcela do solo foi retirada do material escavado para a determinação da umidade gravimétrica.



Figura 10 – Escavação do furo para determinação do peso específico “in situ” pelo método de frasco de areia.



#### 5.1.1.2 Condutividade hidráulica saturada de campo - Infiltrômetro de duplo anel

O teste consiste na cravação de dois anéis concêntricos, sendo o menor com 25 cm de diâmetro e o maior com 50 cm, ambos com 30cm de altura. Os dois anéis são cravados no solo em uma profundidade de aproximadamente 10 cm.

Após a cravação dos anéis, os mesmos foram preenchidos com água proveniente de um reservatório disponível no local. A água que preencheu o anel externo serviu apenas para manter a verticalidade do fluxo no anel interno.

Durante o ensaio são feitas medições do rebaixamento da lâmina d'água no anel interno, mediante a leitura do nível da água (h) com uso de uma régua graduada disposta verticalmente dentro do anel interno. Os tempos das leituras (t) foram de 30s, 1min, 2min, 4min, 5min, 10min, 20min, 30min, 45min e 60min. A infiltração da lâmina d'água (h') foi medida a partir da diferença entre as duas leituras consecutivas. A partir dos dados de infiltração e tempo medidos foi possível plotar um gráfico de infiltração (eixo das ordenadas) versus tempo (eixo das abcissas). A partir dos pontos experimentais foi possível ajustar uma curva de infiltração versus tempo a qual indica o decréscimo da infiltração com o tempo, até que se atinja um equilíbrio (que a infiltração pouco se modifica), definida como a condutividade hidráulica saturada de campo (k). Os dados para ajuste do gráfico podem ser obtidos pelas seguintes relações:

$$I = a \times t^n \quad (13)$$

Onde:

I = Infiltração acumulada (cm);

a = Constante função do tipo de solo;

n = Constante função do tipo de solo (Varia entre 0 e 1);

A velocidade de infiltração pode ser obtida pela derivada, em relação ao tempo, da infiltração acumulada.

$$VI = \frac{dI}{dt} \quad (14)$$

Ou seja,

$$VI = a \times n \times t^{(n-1)} \quad (15)$$

Para determinação das constantes, aplica-se o logaritmo na função de infiltração:

$$\log(I) = \log(a) + n \times \log t \quad (16)$$

Ou

$$Y = A + B.X \quad (17)$$

Com:

$$Y = \log (I);$$

$$A = \log (a);$$

$$B = n;$$

$$X = \log (t);$$

Aplicando regressão linear obtém-se:

$$B = \frac{\sum(X.Y) - \frac{\sum X \cdot \sum Y}{N}}{\sum X^2 - \frac{(\sum X)^2}{N}} \quad (18)$$

$$A = Y_{\text{médio}} - BX_{\text{médio}} \quad (19)$$

Onde:

$Y_{\text{méd}} = \text{Média dos logs de (I)}$ ;

$X_{\text{méd}} = \text{Média dos logs de (t)}$ ;

$N = \text{Número de dados de infiltração vs tempo}$ ;

Desta forma, obtêm-se:

$n = B$ ;

$a = A^{10}$

Por fim, de acordo com Nunes et al (2012), a velocidade básica de infiltração (coeficiente de permeabilidade) pode ser obtida pela seguinte equação:

$$K = VIB = 60 \times a \times n \times \left[ \frac{-0,01}{60 \times a \times n \times (n - 1)} \right]^{\frac{(n-1)}{(n-2)}} \quad (20)$$

### 5.1.2 Ensaios laboratoriais

#### 5.1.2.1 Preparação de amostras

A preparação de amostras pode ser compreendida como todo o procedimento desde a coleta de amostras, seu encaminhamento para o laboratório e adequação do solo em termos quantitativos e qualitativos para realização dos ensaios. Para o ensaio de análise granulométrica, a preparação de amostras consta da retirada de solo e sua disposição em sacos plásticos com a devida identificação. Posteriormente, o material é deixado para secagem ao ar até próximo de sua umidade higroscópica (Wigro). O material então é destorroado, disposto em prancha metálica para quarteamento manual, de onde foram retirados dois (02) quilogramas da amostra (Mt). O material foi passado na peneira #10 (2mm), e o material retido utilizado para o peneiramento grosso. O material passante na peneira #10 foi utilizado para o peneiramento fino, sedimentação e os demais ensaios de caracterização (Limite de liquidez, limite de plasticidade, densidade real). Para a determinação dos limites de Atterberg, utilizou-se o material passante na peneira #10 (2mm), passando este na peneira # 40 (0,42mm) sendo retiradas aproximadamente cem (100) gramas para realização dos ensaios.

### 5.1.2.2 Análise granulométrica

Neste ensaio uma amostra do solo passa pelo processo de peneiramento grosso, sedimentação e peneiramento fino. O material é pesado ( $M_t$ ), passado na peneira #10 (2mm). O material retido na peneira #10 é lavado para que não contenha grãos finos. Da porção passante (finos) retira-se uma porção de solo para determinação da umidade higroscópica ( $W_{higro}$ ), a qual vai ser usada para cálculo da massa total da amostra seca ( $M_s$ ), e uma porção de solo de peso ( $M_h$ ), a qual é utilizada para o processo de sedimentação.

Para a sedimentação, a porção de massa ( $M_h$ ) é disposta em um béquer de 250cm<sup>3</sup> onde ocorre a adição do defloculante hexametáfosfato de sódio e a mistura fica em repouso por aproximadamente doze (12) horas. Posteriormente a porção de solo é vertida dentro do copo de dispersão, onde será agitada por cerca de quinze (15) minutos. Após a agitação, o solo é transferido para a proveta, a qual é preenchida com água destilada até a marca de 1000 cm<sup>3</sup>. Nos tempos ( $t$ ) pré-determinados, o densímetro é colocado na água de onde são retiradas as leituras ( $L$ ) e a temperatura do meio dispersor ( $T$ ). Após vinte e quatro (24) horas é possível calcular as porcentagens de solo em suspensão ( $Q_s$ ) e o diâmetro das partículas de solo em suspensão ( $d$ ), utilizando a Lei de Stokes, pelas seguintes relações:

$$Q_s = N \times \frac{\delta}{(\delta - \delta_d)} \times \frac{V \times \delta_c \times (L - L_d)}{\frac{M_h}{(100 + W_{higro})} \times 100} \quad (21)$$

Onde:

$\delta$  = Massa específica dos grãos do solo (g/cm<sup>3</sup>);

$\delta_d$  = Massa específica do meio dispersor (g/cm<sup>3</sup>);

$\delta_c$  = Massa específica da água, à temperatura de calibração do densímetro (20° C) (g/cm<sup>3</sup>);

$V$  = Volume de suspensão (1000cm<sup>3</sup>);

$L_d$  = Leitura do densímetro no meio dispersor, na mesma temperatura de suspensão.

$$d = \sqrt{\frac{1800 \times \mu}{\delta - \delta_d}} \times \sqrt{\frac{a}{t}} \quad (22)$$

Onde:

$\mu$  = Coeficiente de viscosidade da água no meio dispersor, à temperatura de ensaio (g/s.cm<sup>2</sup>);

$a$  = Altura de queda das partículas correspondente a leitura do densímetro (cm).

Após o processo de sedimentação, o material é disposto e lavado na peneira # 200 (0,075mm). As amostras retidas nas peneiras de números 10 (peneiramento grosso) e 200 (peneiramento fino) são secas em estufa numa temperatura em torno de 105 – 110° e após a secagem pesa-se o material retido na peneira de número 10 (Mg).

Para o peneiramento grosso, a amostra passa por um conjunto de peneiras de 50mm a 4,8mm e são pesadas as massas retidas em cada peneira (Mi) e as porcentagens de material passante em cada peneira (Qg). As porcentagens de solo passantes no peneiramento grosso podem ser obtidas pelas seguintes relações:

$$M_s = \frac{(M_t - M_g)}{(100 + W_{higro})} \times 100 + M_g \quad (23)$$

$$Q_g = \frac{(M_s - M_i)}{M_s} \times 100 \quad (24)$$

Para o peneiramento fino, o material que foi utilizado na sedimentação passa por um conjunto de peneiras de 1,2mm a 0,075mm e são pesadas as massas retidas em cada peneira (Mi) e as porcentagens de material passante em cada peneira (Qf). Como o material analisado é uma amostra representativa do todo, o resultado será em função da porcentagem de material que passou na peneira de 2mm (N). As porcentagens de solo passantes no peneiramento fino podem ser obtidas pela seguinte equação:

$$Q_f = \frac{M_h \times 100 - M_i \times (100 + W_{higro})}{M_h \times 100} \times N \quad (25)$$

As peneiras utilizadas para o peneiramento grosso e as peneiras utilizadas para o peneiramento fino estão dispostas no quadro 1.

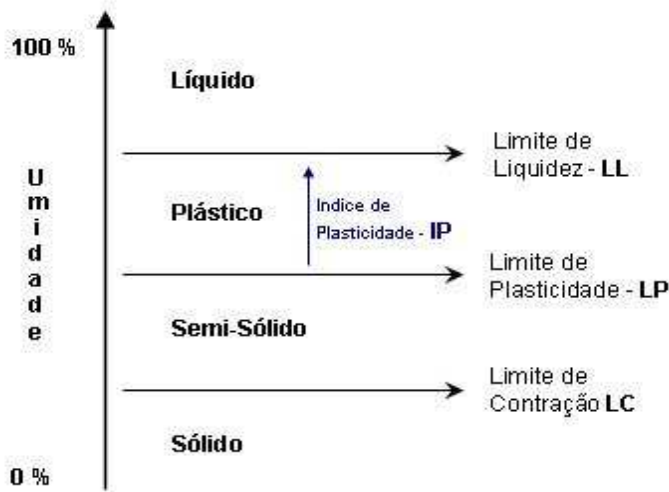
Quadro 1 – Peneiras utilizadas nos peneiramentos grosso e fino.

Peneiramento grosso – Diâmetros (mm)	Peneiramento fino – Diâmetros (mm)
50	1,2
38	0,6
29	0,42
25	0,25
9,5	0,15
4,8	0,075
2,0	_____

### 5.1.2.3 Limite de liquidez:

O limite de liquidez pode ser entendido como o teor de umidade (w) do solo para qual um sulco feito na concha do aparelho de Casagrande, requer vinte e cinco golpes para fechar. O objetivo do ensaio é obter parâmetro para determinação do índice de plasticidade. O limite de liquidez também pode ser compreendido, fisicamente, como o teor de umidade que separa o estado plástico do estado líquido (Figura 11).

Figura 11 – representação física do limite de liquidez.



Fonte: <http://www.tudoengcivil.com.br/2015/04/ensaio-de-limite-de-liquidez-e.html> Acesso em 03/01/2016.

Para determinação do limite de liquidez utiliza-se o aparelho de Casagrande, o qual consiste em uma concha metálica sobre um suporte de madeira (Figura 12). Após preparação da amostra (item a), o ensaio é realizado colocando-se uma porção do material passante na peneira 40 (0,42mm) em uma bacia, adicionando água destilada ao material e deixando-o descansar por cerca de vinte minutos. A mistura é então disposta na concha do aparelho de Casagrande, onde é feita uma ranhura na massa de solo com a utilização do cinzel e o ensaio deve ser realizado de acordo com o procedimento descrito a NBR 6459/84. Após o fechamento da ranhura feita, retira-se uma porção do solo para determinação da umidade em estufa ( $w$ ) e o restante material é disposto novamente na bacia de vidro na qual adiciona-se aproximadamente dois (2) mililitros de água destilada para repetição do procedimento. Para cada umidade foi relacionado um número de golpes ( $N$ ) para fechamento da ranhura, totalizando quatro umidades ( $w$ ) para cada amostra. A norma preconiza que devam ser realizados no mínimo quatro relações umidade/golpes para cada amostra, e que os números de golpes encontrados estejam na faixa de 15 a 35 golpes.

O limite de liquidez é o valor de umidade referente a 25 golpes, representado em gráfico. O eixo das abcissas (Número de golpes), em escala logarítmica e o eixo das ordenadas (Umidade), em escala aritmética.

Figura 12 - Aparelho de Casagrande utilizado em laboratório.





#### 5.1.2.4 Limite de plasticidade:

O limite de plasticidade é representado pelo teor de umidade ( $w$ ) no qual o solo começa a se fraturar, quando é feito um cilindro de 3mm de diâmetro e de 10cm de comprimento, de acordo com a NBR 7180/84. O ensaio é realizado manualmente e consiste no rolamento do cilindro sobre uma superfície de vidro (Figura 13) até o cilindro quebre. Após a quebra do cilindro, uma porção do solo fraturado é levado para estufa para determinação de sua umidade ( $w$ ). São realizados quatro rolamentos para cada amostra e o resultado do limite de plasticidade, juntamente com o resultado do limite de liquidez, fornecem o valor do índice de plasticidade.

Figura 13 – Rolagem, sobre a superfície de vidro, da amostra de solo até que se atinja o cilindro padrão



Fonte: <http://www.ebanataw.com.br/terrapleno/limiteplasticidade.htm>\_Acesso em 02/01/2016

#### 5.1.2.5 Índice de plasticidade:

O índice de plasticidade é representado pela diferença entre os limites de liquidez e plasticidade, pode ser entendido como a zona em que o terreno se encontra no estado plástico, máximo para argilas e nulo para areias. Quanto maior o valor do índice de plasticidade maior será a plasticidade do solo em estudo. A Tabela 1 apresenta a classificação quanto a plasticidade de acordo com os valores de índice de plasticidade encontrados:

Tabela 1 – Classificação do solo quanto a plasticidade.

Índice de plasticidade (IP)	Classificação
$1 < IP < 7$	Solo fracamente plástico
$7 < IP < 15$	Solo medianamente plástico
$IP > 15$	Solo altamente plástico
$IP = NP$	Impossibilidade de determinar LL ou LP

Fonte: Manual de práticas da UFC – Laboratório de solos.

#### 5.1.2.6 Densidade real:

A densidade real pode ser compreendida como a razão entre o peso da partícula sólida e o peso de igual volume de água pura a 4°C (Figura 14). O ensaio de densidade real é feito, após o material fino passar na peneira de número 10 (2mm), com a utilização do picnômetros, seguindo os procedimentos descritos na DNER-ME 9364. O ensaio consta da pesagem de um picnômetro limpo e seco (P1) no qual são adicionados dez (10) gramas do material do qual se deseja obter a densidade real ( $\rho_t$ ). Pesa-se o conjunto picnômetro + solo (P2). Posteriormente, água destilada é adicionada ao conjunto até que o solo seja coberto e o picnômetro seja levado ao forno por cerca de quinze (15) minutos, sendo agitado, para que não haja superaquecimento do conjunto. Feito isso, o conjunto é esfriado em temperatura ambiente e o volume do picnômetro é completamente preenchido com água destilada. O picnômetro é colocado em banho d'água a temperatura ambiente, anotando a temperatura da água (t). O conjunto é enxugado e feita novamente a sua pesagem (P3). Por fim o material é retirado do picnômetro, o qual é completamente preenchido com água destilada e é feita uma pesagem do picnômetro + água destilada (P4).

Para a maioria dos solos o valor da densidade real varia entre 2,65 e 2,85, diminuindo para os materiais com alto teor de matéria orgânica e cresce para os solos ricos com óxido de ferro (Caputo,1988). A densidade real pode ser obtida pela seguinte equação.

$$\delta_t = \frac{P2 - P1}{(P4 - P1) - (P3 - P2)} \quad (26)$$

O valor da densidade real deve ser referido a temperatura de vinte (20) graus, ou seja, deve ser adequado pela equação abaixo. A Tabela 2 apresenta os valores de densidade real de acordo com o tipo de solo e a Figura 15 apresenta os picnômetros utilizados em laboratório.

$$\delta_{20} = K_{20} \times \delta_t \quad (27)$$

Onde:

$K_{20}$  = Razão entre a densidade relativa da água à temperatura (t) e a densidade relativa da água a 20°C;

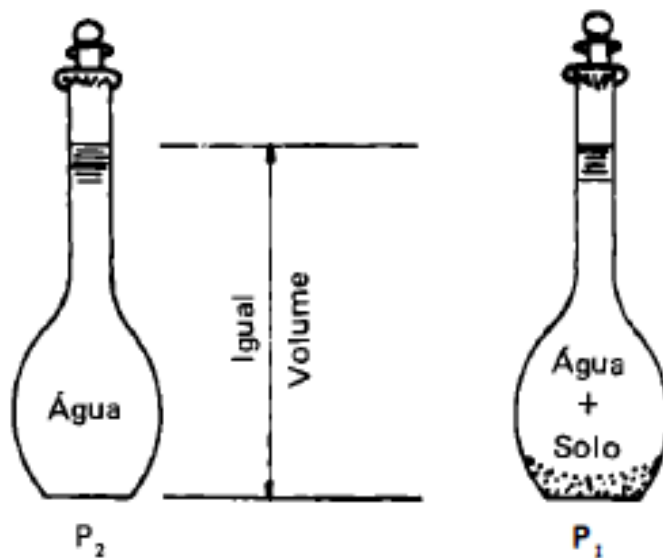
$\delta_{20}$  = Densidade real do solo a 20°C.

Tabela 2 – Densidades reais de acordo com o tipo de solo.

Tipo de solo	Densidade real
Areia	2,65 a 2,67
Areia siltosa	2,67 a 2,70
Argila inorgânica	2,70 a 2,80
Solos com mica e ferro	2,75 a 2,80
Solos orgânicos	Menor que 2,0

Fonte: Manual de ensaios do laboratório de solos da UFC.

Figura 14- Representação da densidade real.



Fonte: Caputo (1988, p22) .

Figura 15 - Picnômetros utilizados nos ensaios laboratoriais.



## 5.2 Previsão de recalques

A pesquisa teve como base a análise do monitoramento do aterro sanitário de Caucaia (ASMOC). A partir de informações obtidas junto a equipe técnica do aterro sanitário, foram feitos ajustes dos dados de recalques com modelos empíricos disponíveis na literatura.

Os dados de recalque medidos em campo compreendem um período de julho de 2012 a novembro de 2015 e foram obtidos através da aplicação padrão da técnica de nivelamento geométrico de primeira ordem por meio de um marco de referência e marcos superficiais de concreto e utilização do conjunto topográfico (estação total, tripé de alumínio e prisma óptico).

Como referência foi tomado o marco zero ( $M_0$ ), localizado no cruzamento da rua A com rua C, disposto sobre o meio fio como pode ser visto na Figura 15. O trabalho de monitoramento foi dividido em três grandes etapas:

- a) a primeira etapa foi à construção e definição do local para implantação dos marcos de concreto de acordo com a planta do aterro, levando em consideração os setores existentes no aterro;
- b) a segunda fase foi o levantamento das cotas dos marcos implantado nos referidos setores dos maciços;
- c) a terceira e última etapa foi realizar a medição das cotas dos marcos fixadas nos maciços.

Após a realização destas três grandes etapas o monitoramento foi feito pelo comparativo entre as cotas do marco de referência (RN) e os marcos de concreto instalados nos maciços. O

resultado desse comparativo tornou possível analisar os deslocamentos verticais em cada setor do maciço ao longo do tempo.

O monitoramento geotécnico do aterro sanitário de Caucaia (ASMOC) foi realizado através de um marco de referência (M-0) e treze (13) marcos superficiais principais dispostos em dois maciços diferentes. No maciço mais antigo foram instalados seis (6) marcos: M1A, M1, M2A, M2, M3A e M3. Já no maciço mais novo foram dispostos sete (7) marcos superficiais: M-4, M-5, M-6, M-7, M-8, M-9 e M10. A disposição dos marcos no aterro pode ser vista na Figura 16.

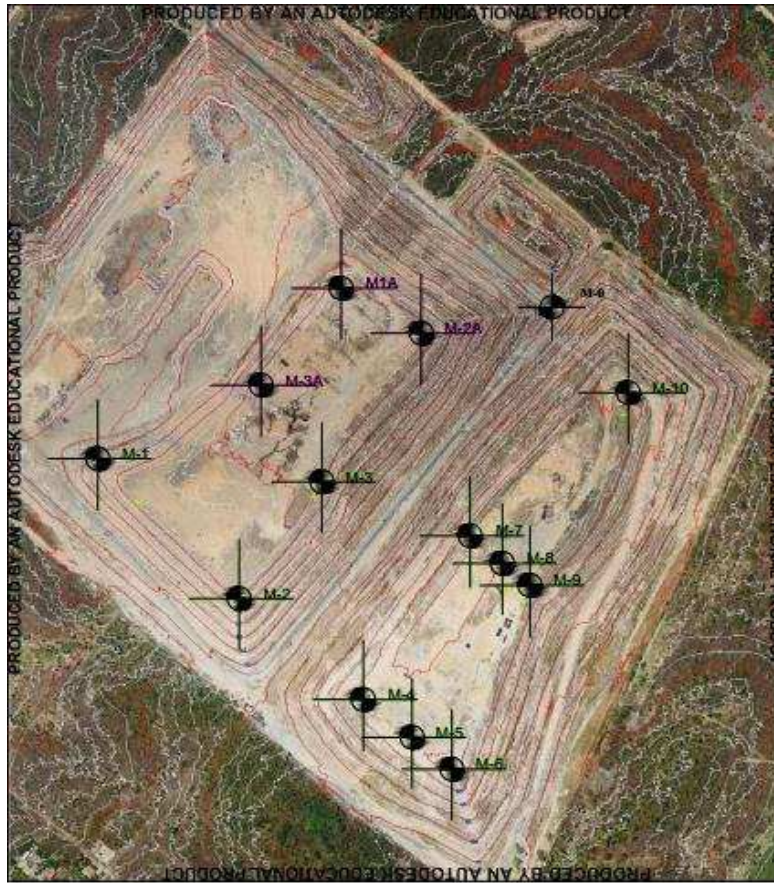
A leitura dos marcos M1A, M2A, M3A foram realizados do período de 15/11/2012 a 25/11/2015 sempre que o operador julgou necessário. Já nos marcos M-4 e M-6, as leituras foram realizadas no período de 15/02/2014 a 25/11/2015) nos mesmos dias da leitura feita nos marcos M1A, M2A, M3A. E nos demais marcos M1, M2, M3, M-5, M-7, M-8, M-9 e M-10, as leituras foram feitas no período de 03/08/2015 a 25/11/2015, sempre nos mesmos dias das leituras feitas nos demais marcos. A Tabela 3 apresenta os dados de recalque obtidos no tempo em cada marco superficial.

Tabela 3 – Recalques obtidos com o tempo com base nos marcos superficiais.

Marco	15/11/ 2012	15/06/ 2013	15/02/ 2014	01/06/ 2014	31/10/ 2014	23/02/ 2015	03/08/ 2015	25/11/ 2015	Deslocamento (cm/dia)
M1A	73,92	73,84	73,81	73,78	73,74	73,70	73,67	73,63	0,000262
M2A	74,22	74,16	74,13	74,12	74,11	74,07	74,01	74,00	0,000199
M3A	74,23	74,17	74,16	74,12	74,12	74,07	74,02	73,99	0,000217
M1							67,75	Destruído	*****
M2							68,13	67,89	0,00211
M3							73,82	73,70	0,00105
M-4			72,68	72,61	72,57	72,50	72,42	72,42	0,000401
M-5							72,39	72,34	0,000439
M-6			73,08	73,02	72,95	72,88	72,79	72,79	0,000309
M-7							72,85	72,85	0,00000
M-8							70,57	70,57	0,00000
M-9							70,99	70,64	0,00307
M-10							68,08	68,08	0,00000

Em virtude do processo operacional, alguns marcos tiveram que ser destruídos ao longo do tempo para que fosse possível dar continuidade no processo construtivo e de recebimento de resíduos do maciço.

Figura 16 - Planta de localização do marco de referência e dos marcos utilizados no acompanhamento dos recalques:



Fonte: Google Earth, 2013/ Relatório de acompanhamento dos maciços, 2015.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 6.1 Frasco de areia

Os resultados das análises dos ensaios de frasco de areia contemplam dezoito (18) furos, sendo nove (9) no lado onde ocorre a aspersão de chorume e os outros nove (9) na área sem chorume. Para agilizar o processo, foram utilizados dois frascos de areia, operados por dois colaboradores distintos. Além do peso específico “in situ”, foram retiradas informações adicionais: Índice de vazios e porosidade. Dos valores obtidos foi calculada uma média e observou-se o desvio padrão dos dados obtidos. As Tabelas 4 e 5 trazem os dados da área sem aspersão de chorume e as Tabelas 6 e 7 trazem os dados da área com chorume.

Tabela 4 – Dados geotécnicos obtidos na área sem aspersão de chorume.

Furo	Peso específico solo úmido (KN/m <sup>3</sup> )	Peso específico do solo seco (KN/m <sup>3</sup> )	Índice de vazios	Porosidade
01	17,27	16,80	0,55	0,36
02	17,80	17,32	0,51	0,34
03	23,25	22,51	0,16	0,14
04	16,88	16,42	0,59	0,37
05	15,72	15,29	0,71	0,41
06	13,33	12,96	1,01	0,50
07	16,96	16,49	0,58	0,37
08	16,41	16,18	0,63	0,39
09	17,79	17,15	0,51	0,34

Os dados obtidos no furo 03 e 06 apresentaram resultados discrepantes dos demais, que parecem indicar erros durante a execução do ensaio. Por esta razão, os resultados de tais ensaios foram descartados para o cálculo dos valores médios.



Tabela 5 – Valores médios de umidade, peso específico do solo úmido, peso específico do solo seco e porosidade.

Índice	Médias	Desvio padrão
Umidade (%)	0,03	0,012201774
Dens. Solo. Úmido (KN/m <sup>3</sup> )	16,98	0,075915363
Dens. Solo. Seco (KN/m <sup>3</sup> )	16,52	0,068863988
Porosidade	0,37	0,027248545

Tabela 6 – Dados geotécnicos obtidos na área com aspersão de chorume.

Furo	Peso específico solo úmido (KN/m <sup>3</sup> )	Peso específico do solo seco (KN/m <sup>3</sup> )	Índice de vazios	Porosidade
01	20,44	19,20	0,37	0,27
02	16,03	15,07	0,74	0,43
03	4,84	4,55	4,77	0,83
04	13,89	13,05	1,01	0,50
05	14,16	13,73	0,91	0,48
06	16,36	15,37	0,71	0,41
07	16,24	15,55	0,69	0,41
08	16,73	14,99	0,75	0,43
09	16,95	15,92	0,65	0,39

Os dados obtidos nos furos 01 e 03 apresentaram resultados discrepantes dos demais, que parecem indicar erros durante a execução do ensaio. Por esta razão, os resultados de tais ensaios foram descartados para o cálculo dos valores médios.

Tabela 7 – Valores médios de umidade, peso específico do solo úmido, peso específico do solo seco e porosidade.

Índice	Médias	Desvio padrão
Umidade (%)	0,06	0,04565977
Dens. Solo. Úmido (KN/m <sup>3</sup> )	15,77	0,20458429
Dens. Solo. Seco (KN/m <sup>3</sup> )	14,81	0,18630165
Porosidade	0,42	0,06951554

Os ensaios de peso específico “in situ” para a camada de cobertura apresentaram valores da ordem de 16,52 KN/m<sup>3</sup> e 14,81 KN/m<sup>3</sup> e valores de umidade da ordem de 3,0% e 6,4% de umidade para as áreas sem aspersão de chorume e com aspersão de chorume, respectivamente. Os valores de umidade obtidos foram bem próximos dos encontrados por Pablllo et al (2014) e por Araújo e Monteiro (2012) apud Pablllo (2014), já os resultados de peso específico do solo seco ficaram um pouco abaixo dos valores observados nos outros aterros sanitários.

Tabela 8 – Comparativo dos valores de densidade “in situ” e umidade com valores da literatura.

	Umidade (%)	Dens. Solo. Seco (KN/m <sup>3</sup> )
Sem aspersão de chorume	3,0	16,52
Com aspersão chorume	6,4	14,81
Pablllo	11,05	19,5
Araújo e Monteiro	4,2	19,6

## 6.2 Limite de liquidez

Os resultados das análises dos ensaios de limite de liquidez contemplam três amostras (furo 03, furo 08 e furo 09) e serviram, juntamente com o limite de plasticidade, densidade real do solo, e o ensaio de análise granulométrica para caracterização física dos solos. As Tabelas 9, 10 e 11 apresentam os resultados obtidos dos furos 03, 08 e 09. A representação gráfica dos resultados é feita nos gráficos 1, 2 e 3.

Tabela 9 – Limite de liquidez amostra 01 – furo 03.

	Número de golpes	Umidade – w (%)	Limite de liquidez
Amostra 01 – Furo 03	37	12,57	13,52
	27	13,11	
	16	14,29	
	12	0,1516	

Tabela 10 – Limite de liquidez amostra 02 – furo 09.

	Número de golpes	Umidade – w (%)	Limite de liquidez
Amostra 02 – Furo 09	35	11,27	0,1361
	27	12,58	
	16	14,00	
	13	15,56	

Tabela 11 – Limite de liquidez amostra 03 – furo 08.

	Número de golpes	Umidade – w (%)	Limite de liquidez
Amostra 03 – Furo 08	37	10,60	12,45
	26	12,23	
	19	13,48	
	14	14,78	

Gráfico 1 – representação gráfica do limite de liquidez. Amostra 01 – Furo 03

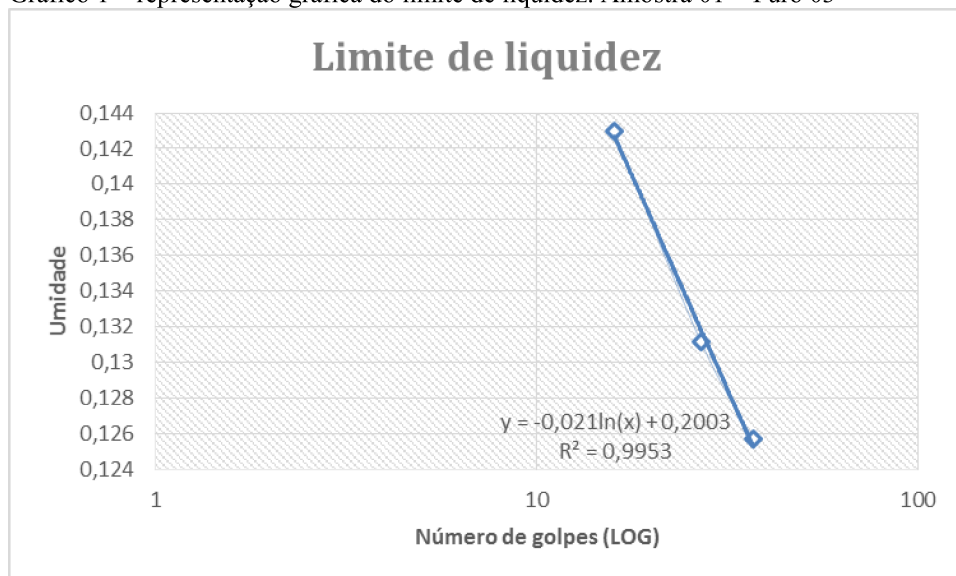


Gráfico 2 – representação gráfica do limite de liquidez. Amostra 02 – Furo 09

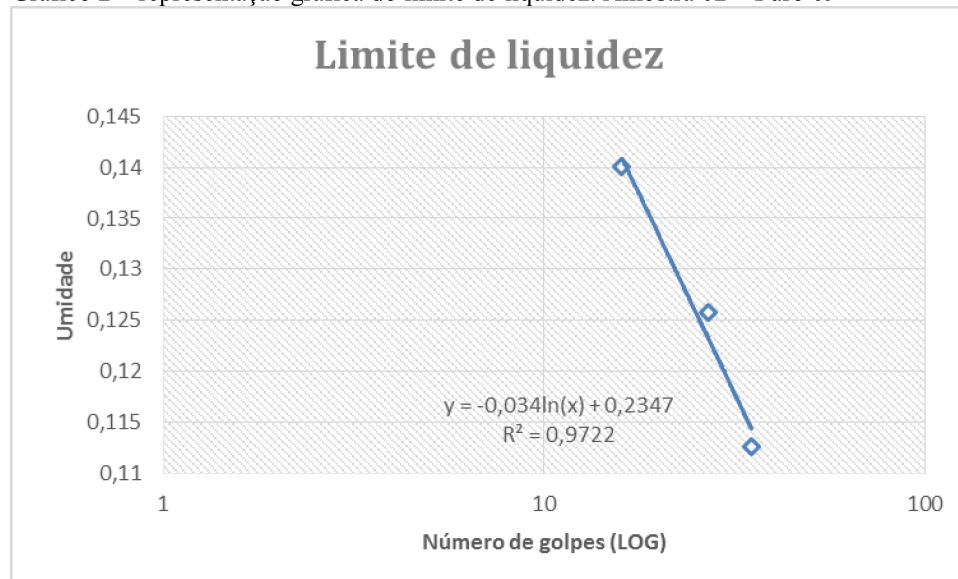
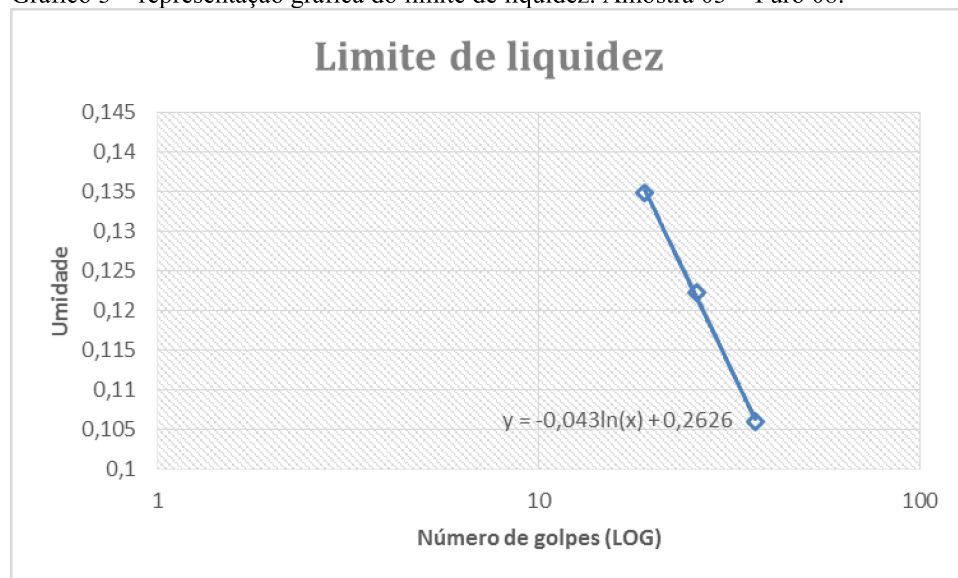


Gráfico 3 – representação gráfica do limite de liquidez. Amostra 03 – Furo 08.



Os resultados grifados em vermelho não atenderam o intervalo pré-estabelecido em norma, ou seja, não atenderam a faixa de 35 a 15 golpes, logo foram desprezados.

### 6.3 Limite de plasticidade:

Os resultados do limite de plasticidade foram obtidos a partir das mesmas amostras do limite de liquidez e foram expressos nas Tabelas a seguir:

Tabela 12 – Limite de plasticidade. Amostra 01 – Furo 03.

Cápsula	Umidade (%)	Umidade média	Limite de plasticidade
22	2,07	2,07	2,07
74	2,06		
31	2,05		
112	2,09		

Tabela 13 – Limite de plasticidade. Amostra 02 – Furo 09.

Cápsula	Umidade (%)	Umidade média	Limite de plasticidade
15	1,91	2,04	2,08
513	2,13		
11	2,04		
36	2,08		

O valor obtido na cápsula quinze (15) apresentou um valor 6,17% diferente da média, logo, por recomendação da norma, o valor foi descartado para cálculo do limite de plasticidade.

Tabela 14 – Limite de plasticidade. Amostra 03 – Furo 08

Cápsula	Umidade (%)	Umidade média	Limite de plasticidade
112	3,06	3,19	3,19
114	3,29		
53	3,24		
67	3,18		

#### 6.4 Índice de plasticidade

O índice de plasticidade foi obtido para as três amostras em análise pelo resultado da subtração entre os limites de liquidez e os limites de plasticidade encontrados. A Tabela 15 apresenta os resultados encontrados e a classificação de acordo com o tópico 4.1.

Tabela 15 – classificação do solo de acordo com o índice de plasticidade.

Amostra	Limite de liquidez (%)	Limite de plasticidade (%)	Índice de plasticidade (%)	Classificação
01 – Furo 03	13,52	2,07	11,45	Solo medianamente plástico
02 – Furo 09	13,61	2,08	11,53	Solo medianamente plástico
03 – Furo 08	12,45	3,19	9,31	Solo medianamente plástico

Os resultados obtidos para os limites de liquidez e plasticidade apresentaram valores abaixo dos encontrados em literatura, porém os valores de índice de plasticidade foram bem próximos dos valores encontrados por Catapreta (2008, p132) e Pires (2007) apud BARROSO (2008, p85). O comparativo pode ser observado na Tabela 16. Estes resultados indicam que o solo utilizado como cobertura final no aterro sanitário de Caucaia é menos plástico comparado com outras regiões.

Tabela 16 – Comparação entre os valores obtidos para os limites de Attenberg e os valores encontrados na literatura.

Amostra	LL (%)	LP (%)	IP (%)
01 – Furo 03	13,52	2,07	11,45
02 – Furo 09	13,61	2,08	11,53
03 – Furo 08	12,45	3,19	9,31
AM1C – Catapreta	49	29	20
AM2C – Catapreta	45	30	15
AM3C – Catapreta	43	30	13
Nº 02 – Barroso	28,13	20,65	7,5
Nº 03 – Barroso	56,57	39,08	17,5

## 6.5 Densidade real:

No ensaio de densidade real foram analisadas as mesmas amostras que nos limites de Attenberg e os ensaios serviram de complemento para caracterização física do solo encontrado no maciço do aterro sanitário de Caucaia. A Tabela 17 apresenta os resultados encontrados de densidade real das partículas e a sua classificação.

Tabela 17 – Classificação das amostras de acordo com os valores de densidade real encontrados.

Amostra	Densidade real	Classificação
01 – Furo 03	2,65	Areia
02 – Furo 09	2,7	Argila inorgânica/Silte arenoso
03 – Furo 08	2,68	Silte arenoso

Os resultados mostram que os solos encontrados nos furos nove (09) e oito (08) estão próximos do material que se esperava para a camada de cobertura, já o material encontrado no furo 03 apresentou propriedades de areia, o que pode ser associado a uma pequena camada de cobertura composta de areia sobre a camada de argila ou a utilização de material inadequado para cama de cobertura no ponto.

Os valores encontrados de densidade real foram bem próximos dos valores encontrados por BARROSO (2008, p86). A Tabela 18 apresenta os resultados obtidos na literatura.

Tabela 18 – Comparação entre os valores de densidade real obtidos e os encontrados na literatura.

Amostra	Densidade real
01 – Furo 03	2,65
02 – Furo 09	2,7
03 – Furo 08	2,68
Nº1 – Barroso	2,63
Nº2 – Barroso	2,67
Nº - Barroso	2,58



## 6.6 Análise granulométrica

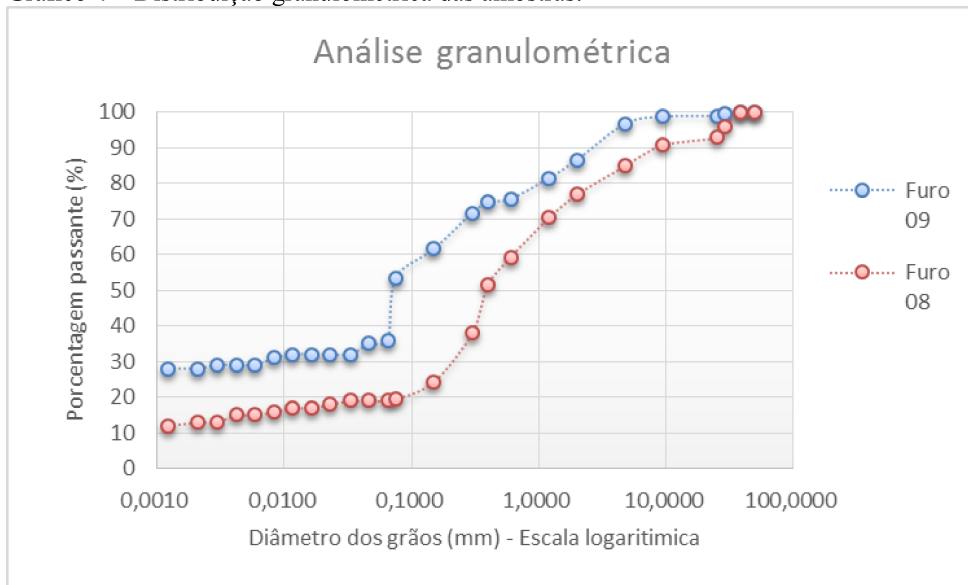
O ensaio foi realizado com o objetivo de determinar o tamanho das partículas encontradas nas amostras coletadas de solo dentro do aterro sanitário e a sua graduação. A camada de cobertura final de um aterro sanitário devem ser compostas por partículas finas (argilas), para minimizar o fluxo de água para o interior dos resíduos e a saídas do biogás gerados pela degradação do RSU. A utilização de solos dotados de partículas maiores pode diminuir a eficiência da drenagem de água da camada de cobertura final, uma vez que irá reduzir a impermeabilização da área. Para a realização das análises granulométricas foram utilizadas as amostras 02 – furo 09 e 03 – furo 08. A Tabela 19 apresenta os resultados obtidos para cada amostra, ou seja, a quantidade, em porcentagem, de material passante em cada peneira de acordo com seus respectivos diâmetros.

Tabela 19 – Porcentagem de material passante para o referido diâmetro.

Peneira (mm)	% Passante – Amostra 02 (Furo 09)	% Passante – Amostra 03 (Furo 08)
50	100	100,00
38	100	100,00
29	99,56	95,92
25	98,85	92,87
9,5	98,56	90,73
4,8	96,56	84,96
2	86,47	76,85
1,2	81,33	70,30
0,6	75,46	59,27
0,4	74,68	51,59
0,3	71,52	38,03
0,15	61,51	24,36
0,075	53,31	19,38
0,0650	36	19
0,0463	35	19
0,0331	32	19
0,0226	32	18
0,0164	32	17
0,0117	32	17
0,0083	31	16
0,0059	29	15
0,0042	29	15
0,0030	29	13
0,0021	28	13
0,0012	28	12

A partir do quadro de porcentagens, pode-se traçar um gráfico (4) com as curvas de distribuição granulométrica das duas amostras.

Gráfico 4 – Distribuição granulométrica das amostras:



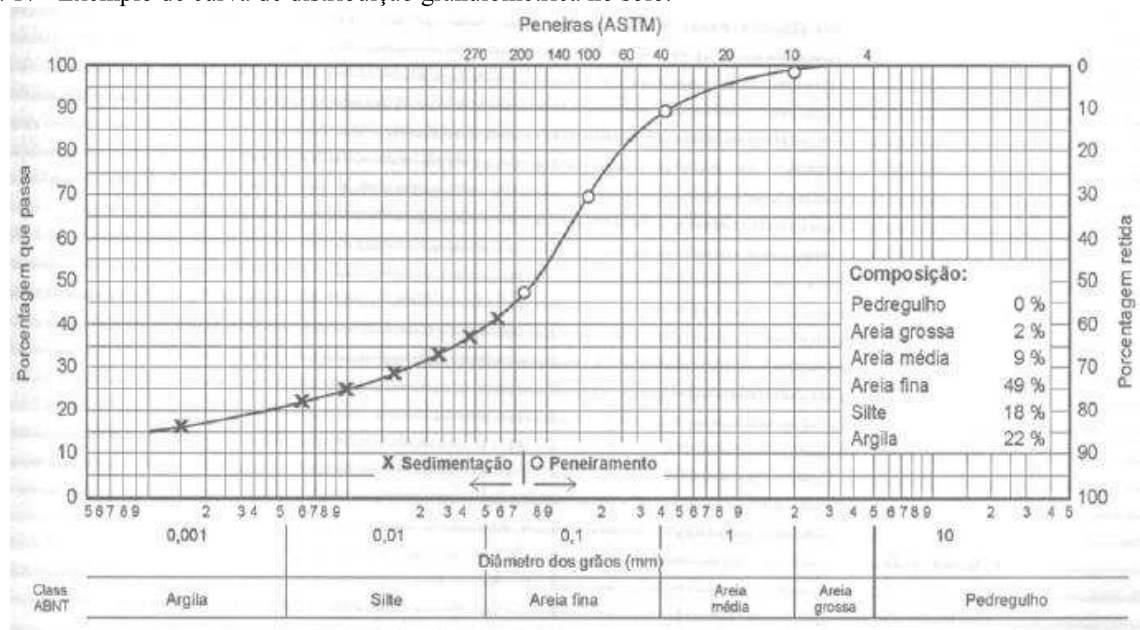
Observando os gráficos gerados é possível observar que as duas amostras são predominantemente solos arenosos, com cerca de 15% a 20% de material grosseiro, e silto-arenosos e que o furo 09 tem um maior percentual de material argiloso. Observa-se que para um diâmetro de 0,012 milímetros, aproximadamente 30% do material do furo 09 é passante, enquanto que para o furo 08, esse valor cai para cerca de 10%. Utilizando como exemplo a curva granulométrica da Figura 17, e de acordo com os limites das frações pelo tamanho segundo a ABNT (Tabela 20), observou-se que o solo utilizado é formado por uma faixa contendo, para o solo extraído do furo 8: 15,04% material grosseiro, 65,96% areia, 4% de silte e 15% de argila. Para o solo do furo 09: 3,4% material grosseiro, 61,6% areia, 6% de silte e 29% de argila. A Tabela 21 compara os valores obtidos com os valores obtidos por BARROSO (2008, p83\_85) e CATAPRETA (2008, p132).

Tabela 20 – Limite das frações de solo pelo tamanho dos grãos segundo a ABNT.

Faixa	Classificação
25cm – 4,8mm	Material grosseiro
4,8mm – 0,05mm	Areia
0,05mm – 0,005mm	Silte
Inferior a 0,005	Argila

Fonte: Fonte: <https://pt.scribd.com/doc/17348138/9/Tabela-1-1-%E2%80%93-Limites-das-fracoes-de-solo-pelo-tamanho-dos-graos> – Mecânica dos solos, SCHIMTZ.

Figura 17– Exemplo de curva de distribuição granulométrica no solo.



Fonte: Souza Pinto (2002)

Tabela 21– Comparativo dos valores de distribuição granulométrica dos ensaios e os encontrados na literatura:

Amostra	Mat. Grosseiro (%)	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)
02 – Furo 09	3,4	61,6	7	29
03 – Furo 08	15,04	65,96	4	15
AM1C- Catapreta	5	23	24	48
AM2C- Catapreta	8	19	27	46
AM3C- Catapreta	4	17	30	49
Nº1-Barroso	23	53	11	13
Nº2-Barroso	4	58	19	19
Nº3-Barroso	1	40	20	39

## 6.7 Ensaio de infiltrômetro de duplo anel

Os resultados das análises dos ensaios utilizando o infiltrômetro de duplo anel contemplam dois pontos: Um localizado na área com aspersão de chorume e o outro na área sem aspersão de chorume. As Tabelas 22 e 23 apresentam os dados obtidos e os gráficos 5 e 6 os pontos experimentais e as retas de ajuste para as áreas sem e com aspersão de chorume, respectivamente.

Tabela 22– dados de infiltração obtidos na área sem aspersão de chorume.

Tempo (min)	Leitura (h)	Taxa de infiltração	X = Log(t)	Y = Log(I)	X.Y	X <sup>2</sup>
0	18,00	-	-	-	-	-
1	17,40	36	0	-0,22184875	0	0
2	17,00	24	0,301029996	0	0	0,090619058
3	16,80	12	0,477121255	0,079181246	0,037779055	0,227644692
4	16,60	12	0,602059991	0,146128036	0,087977844	0,362476233
5	16,40	12	0,698970004	0,204119983	0,142673745	0,488559067
10	16,00	4,8	1	0,301029996	0,301029996	1
20	15,70	1,8	1,301029996	0,361727836	0,470618765	1,69267905
30	15,30	2,4	1,477121255	0,431363764	0,637176585	2,181887201
45	14,80	2	1,653212514	0,505149978	0,835120265	2,733111616
60	14,20	2,4	1,77815125	0,579783597	1,030942927	3,161821869

Tabela 23– dados de infiltração obtidos na área com aspersão de chorume.

Tempo (min)	Leitura (h)	Taxa de infiltração	X = Log(t)	Y = Log(I)	X.Y	X <sup>2</sup>
0	18	-	-	-	-	-
1	17,6	24	0	0,397940009	0	0
2	17,5	6	0,301029996	0,301029996	0,090619058	0,090619058
3	17,4	6	0,477121255	-0,22184875	0,105848754	0,227644692
4	16,8	36	0,602059991	0,079181246	0,04767186	0,362476233
5	16,7	6	0,698970004	0,113943352	0,079642985	0,488559067
10	16,3	4,8	1	0,230448921	0,230448921	1
20	16	1,8	1,301029996	0,301029996	0,391649054	1,69267905
30	15,6	2,4	1,477121255	0,380211242	0,561618106	2,181887201
45	15	2,4	1,653212514	0,477121255	0,788782829	2,733111616
60	14,4	2,4	1,77815125	0,556302501	0,989189987	3,161821869

Gráfico 5 – Pontos experimentais e reta de ajuste da área sem aspersão de chorume.

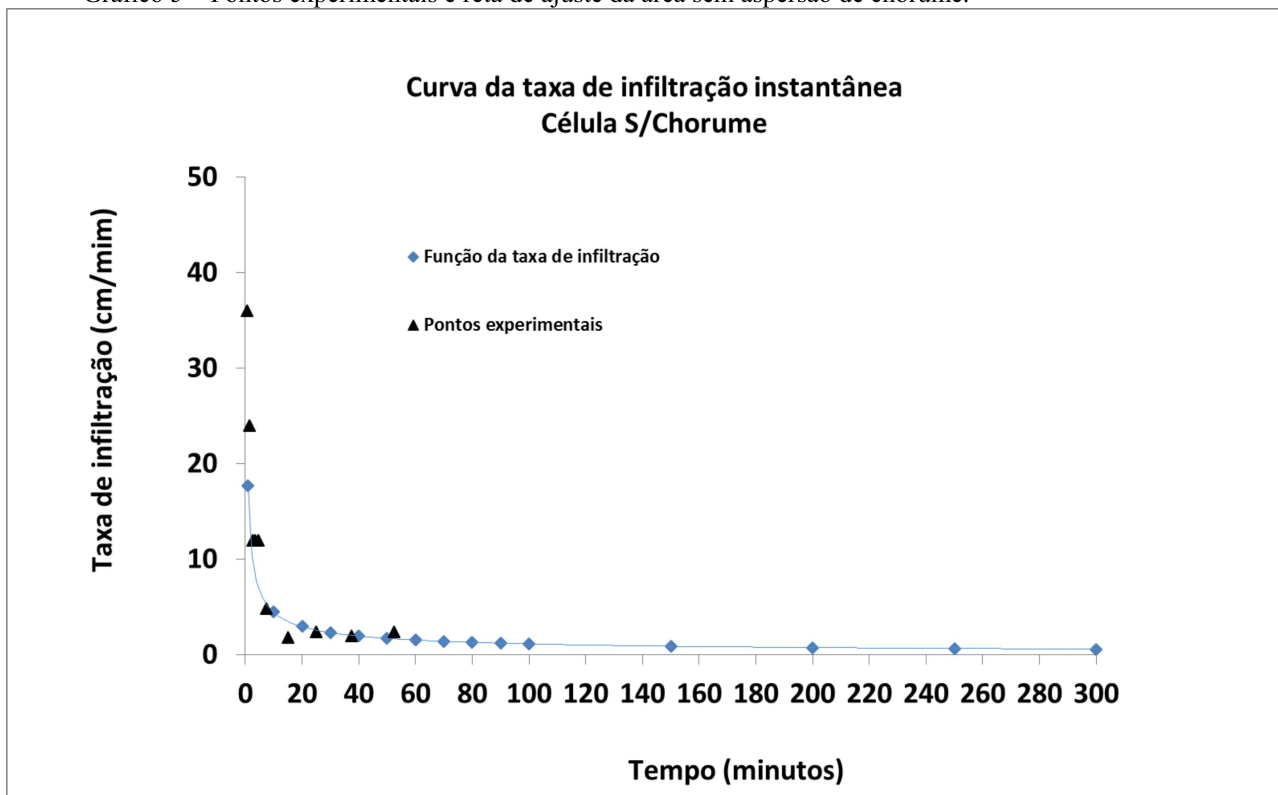
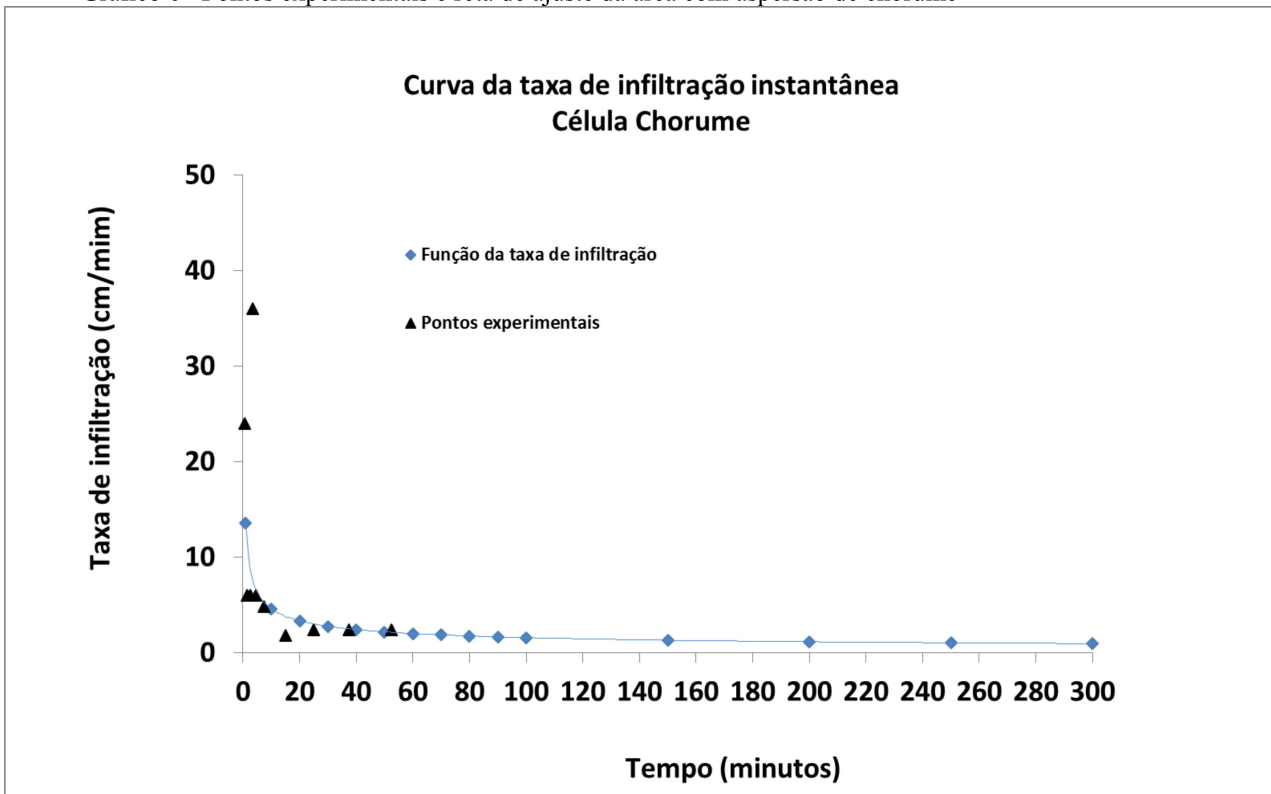


Gráfico 6– Pontos experimentais e reta de ajuste da área com aspersão de chorume



A partir desses dados foi possível obter os coeficientes de ajuste (Tabela 24):

Tabela 24– coeficiente de ajuste obtidos a partir dos dados de infiltração

Infiltrômetro	A	n	VIb = K (cm/s)
S/chorume	0,74	0,40	$3,6 \times 10^{-4}$
C/chorume	0,42	0,53	$4,8 \times 10^{-4}$

De acordo com Caputo (1988, p71), solos que apresentam o coeficiente de permeabilidade na casa de  $10^{-4}$  cm/s podem ser classificados como areias muito finas e siltes, mistura de ambos e argila. O coeficiente de permeabilidade obtido é considerado alto para camada de cobertura, podendo influenciar na quantidade de líquido que percola no maciço e entra em contato com o montante de resíduos, ou seja, o volume de resíduos gerado.

## 6.8 Previsão de recalques:

Em função das limitações apresentadas por alguns modelos como Sowers (1973) e Bjarngard e Edgers (1990), e a necessidade de obtenção das mais diversas variáveis (Tensão vertical inicial, coeficiente de compressão primária e secundário, entre outras) para determinação dos recalques obtidos em alguns modelos listados, a calibração dos recalques

obtidos no aterro sanitário de Caucaia, foi feita a partir do modelo hiperbólico de Ling et al (1998), o qual obtém seus parâmetros a partir da curva “t x t/s” dos próprios dados de recalque obtidos no maciço em estudo.

Para calibração, foram utilizados dados apenas dos marcos M1A, M2A, M3A, M4 e M6, uma vez que esses marcos apresentam dados de recalque x tempo em quantidades significativas para análise e os demais marcos só apresentam dois pontos para estudo.

Para análise de desempenho do modelo utilizado para calibração dos dados obtidos nos cinco (5) marcos superficiais, foi utilizada a fórmula desenvolvida por Marques (2001), a qual compara os resultados obtidos e calculados, verificando o desvio (D) entre eles, como pode ser observado na equação abaixo:

$$D_{i,j} = \left( \frac{\Delta H_{calc(i,j)} - \Delta H_{obs(i,j)}}{\Delta H_{obs(i,j)}} \right) \quad (28)$$

Onde:

$D_{i,j}$  = Desvio de recalque no tempo j, baseados nas leituras do tempo i (%);

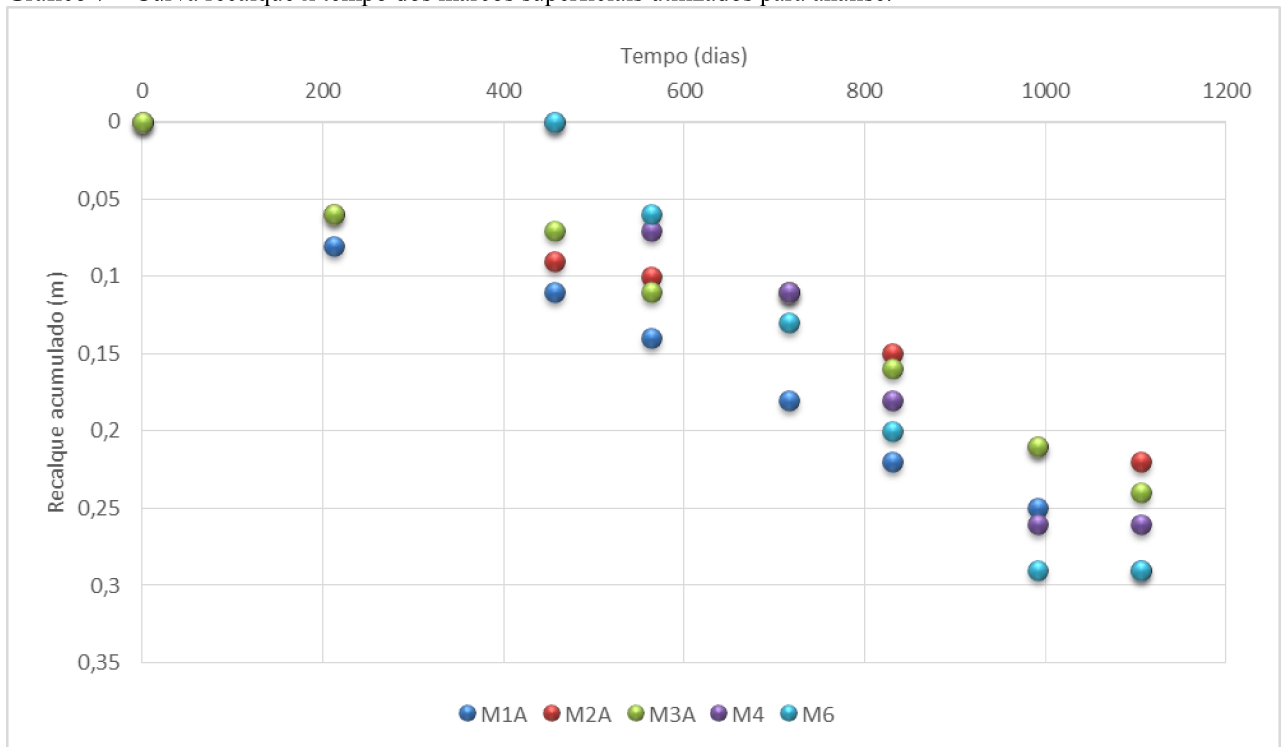
$\Delta H_{calc(i,j)}$  = Recalque calculado no tempo j, baseado nas leituras do tempo i;

$\Delta H_{obs(i,j)}$  = Recalque observado no tempo j.

O gráfico 7 apresenta a curva de recalque versus tempo dos marcos utilizados neste trabalho. Os recalques variaram aproximadamente de 0,22 a 0,29 metros e os marcos 4 e 6 apresentaram uma velocidade de recalque um pouco superior aos demais (Tópico 4.2 – Tabela 3).



Gráfico 7 – Curva recalque x tempo dos marcos superficiais utilizados para análise.

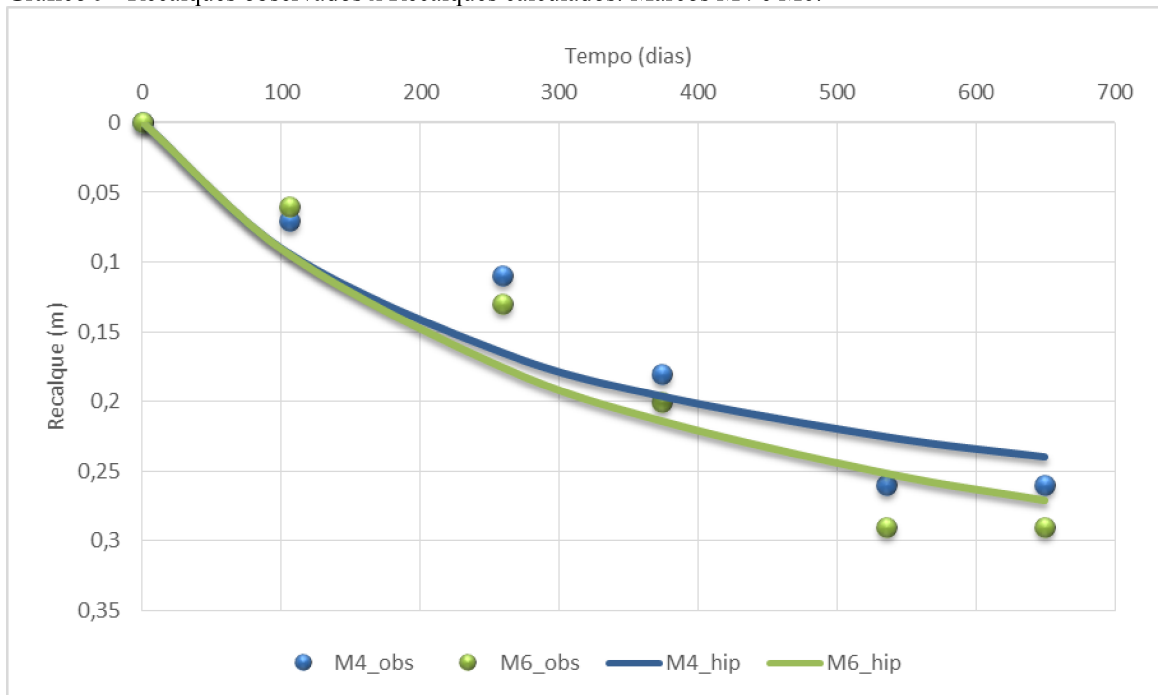


O gráfico 8 apresenta o comparativo dos recalques observados e calculados pelo modelo hiperbólico de Ling obtidos nos marcos M1A, M2A e M3A, e o gráfico 9 apresenta para os marcos M4 e M6.

Gráfico 8– Recalques observados x Recalques calculados: Marcos M1A, M2A e M3A.



Gráfico 9– Recalques observados x Recalques calculados: Marcos M4 e M6.



A Tabela 25 apresenta dos dados encontrados para cada marco superficial estudado: O recalque último esperado em  $t_0$  ( $\Delta H_{ult}$ ), a taxa de recalque inicial em  $t_0$  ( $\rho_0$ ), ambos obtidos por regressão linear, o desvio medido entre o recalque observado e calculado no tempo final (D) e o desvio médio (Dm) observado ponto a ponto para cada marco superficial.

Tabela 25– Dados obtidos pelo modelo hiperbólico a partir dos dados observados.

Marco	Altura inicial	Altura final	$\rho_0$	$\Delta H_{ult}$	D (%)	Dm (%)
M1A	73,92	73,63	0,000623	0,361	-18,4	10,4
M2A	74,22	74,00	0,000450	0,267	-21,0	10,2
M3A	74,23	73,99	0,000395	0,306	-25,1	11,1
M4	72,68	72,42	0,00123	0,343	-7,9	14,5
M6	73,08	72,79	0,00116	0,424	-6,5	16,3

O modelo hiperbólico apresentou uma boa concordância com os dados experimentais para os Marcos M4, e M6, com erros de até 7% no recalque final calculado e erros maiores, para os marcos M1A, M2A, M3A, entre 18% e 25%. Os desvios médios observados foram da ordem de 10% a 16,3%, valores bem próximos para todos os marcos estudados. O ajuste foi bom, pois as diferenças são milimétricas, precisaria verificar mais dados de recalque no tempo.

De um modo geral o modelo Hiperbólico conseguiu estimar a evolução dos recalques com o tempo, com relativa precisão para alguns marcos medidos (M4 e M6). No entanto, como há poucos dados de recalque, análises mais criteriosas sobre o uso do modelo podem ser feitas a partir de um maior conjunto de dados experimentais, o modelo deve ser aplicado para uma maior quantidade de pontos “recalque x tempo” e devem ser observados os parâmetros obtidos ( $\Delta H_{ult}$ ,  $\rho_0$ , D e Dm) a partir desta aplicação.

## 7 CONCLUSÕES:

Este trabalho constou de uma caracterização da camada de cobertura final do aterro sanitário de Caucaia e da calibração dos recalques medidos em seus maciços ao modelo hiperbólico de Ling et al (1998). Quanto à caracterização da camada de cobertura obtém-se os seguintes resultados:

### 7.1 Caracterização da camada de cobertura:

A camada de cobertura final tem algumas funções de grande importância: Assegurar a proteção à saúde humana e meio ambiente, encaminhamento das águas pluviais para o sistema de drenagem e minimização do processo de erosão e do fluxo de gases para a atmosfera. A caracterização da camada de cobertura foi feita a partir de ensaios de campo (Peso específico in situ e infiltrômetro de anéis concêntricos) e laboratoriais (Limites de Attenberg, densidade real e análise granulométrica).

#### a) Análise granulométrica:

O solo da cobertura final do aterro sanitário apresentou um baixo percentual de material argiloso, 29% para o furo 09 e apenas 15% para o furo 08. No caso do material obtido no furo 08, a quantidade de pedregulhos encontrados na amostra, foi cerca de 15% do total. De forma geral foi encontrado nas amostragens um material predominantemente arenoso, superando os 60% para os dois furos. Tais resultados indicam um material mais permeável do que os normalmente usados como cobertura final em aterros sanitário. Tal fato pode não ser um problema, pois o local onde foi instalado o aterro sanitário, caracteriza-se por ser uma região de baixa pluviosidade e a performance da cobertura é dependente dos materiais e da condição climática.

#### b) Limites de Attenberg:

As amostras apresentaram resultados na faixa de 12,45% - 13,52% de limites de liquidez, 2,07% - 3,19% para os limites de plasticidade, resultando em valores de índice de plasticidade em uma faixa de 9,31% - 11,45%, indicando um solo medianamente plástico, ou seja, um solo com um teor de argila baixo.

c) Densidade real:

As amostras apresentaram resultados de: 2,65 g/cm<sup>3</sup> para o furo 03, 2,68g/cm<sup>3</sup> para o furo 08 e 2,70g/cm<sup>3</sup> para o furo 09, o que remete a valores de densidade real de um solo arenoso e silto/arenoso. A densidade real encontrada no furo 09 foi um valor bem próximo da esperada para um material argiloso, podendo ser classificado com um material intermediário.

d) Peso específico in situ:

As amostras apresentam valores médios de 14,81KN/m<sup>3</sup> e 16,52KN/m<sup>3</sup> de peso específico in situ, 6% e 3% de umidade e porosidade de 0,42 e 0,37, para o lado com aspersão de chorume e sem aspersão de chorume, respectivamente. Os valores observados de peso específico in situ, apresentaram valores abaixo dos encontrados na literatura, o que pode representar uma falha no material utilizado ou no processo de compactação. A área com aspersão de chorume apresentou valores superiores de umidade, como era esperado, e de porosidade. Deve ser avaliada a relação entre os parâmetros encontrados e a presença de chorume no solo.

e) Infiltrômetro de duplo anel:

As amostras apresentaram valores da ordem de 10<sup>-4</sup> cm/s, tanto para o ensaio realizado na área sem aspersão de chorume, quanto na área com aspersão de chorume, não havendo diferenças significativas entre os resultados. A alta permeabilidade encontrada pode aumentar a quantidade de líquidos que entram em contato com os resíduos e por consequência, a quantidade de chorume gerado, podendo comprometer o sistema projetado para tratamento desse líquido. A alta permeabilidade também pode contribuir de forma significativa para o escape de gases advindos da decomposição biológica dos resíduos para a atmosfera.

f) Caracterização de forma geral:

Pelos ensaios realizados, conclui-se que o material utilizado na camada de cobertura final do maciço do aterro sanitário de Caucaia apresenta características gerais de um solo arenoso, logo a utilização deste tipo de solo pode prejudicar a funcionalidade da camada de

cobertura final. O furo 09 da área sem chorume apresentou os resultados mais satisfatórios quanto as características que se desejava encontrar.

Não foram encontradas diferenças muito significativas entre a área sem aspersão e com aspersão de chorume.

Sugere-se a realização de novos ensaios, em pontos diferentes, tanto na área com e sem aspersão de chorume e a comparação com os valores obtidos neste trabalho. Outra sugestão seria a análise do solo de cobertura em diferentes profundidades, a fim de obter esse comparativo.

## **7.2 Monitoramento dos recalques e calibração do modelo de recalque:**

Neste trabalho foram apresentados os dados de monitoramento de recalques ocorridos no aterro sanitário de Caucaia e a calibração dos dados ao modelo hiperbólico de Ling et al (1998).

A aplicação do modelo hiperbólico de Ling et al (1998) para os recalques obtidos nos marcos superficiais do aterro sanitário apresentou resultados bem consistentes para os marcos M4 e M6, resultando em desvio finais (D), inferiores a 7% e apresentou uma menor concordância para os demais marcos, desvio (D) em uma faixa de 18% a 25%. Os desvios médios observados (Dm), considerando todos os pontos “recalque x tempo” de cada marco superficial, apresentaram valores entre 10% e 17%, resultados bem próximos e com uma boa concordância.

Os marcos superficiais M1A, M2A e M3A, os quais apresentam menores velocidade médias de recalques (Tópico 4.2 – Tabela 3), apresentaram valores de recalque próximos dos reais no tempo de aproximadamente 800 dias, com valores calculados maiores que os observados no início e menores no final. Os marcos superficiais M4 e M6, os quais apresentaram velocidades de recalque médias (Tópico 4.2 – Tabela 3) bem superiores aos demais, mostraram recalques calculados bem próximos aos reais no período de 300 – 400 dias, com valores calculados maiores que os observados no início e menores no final, assim como os outros marcos.

Sugere-se que haja a calibração dos dados de recalque obtidos no aterro sanitário de Caucaia a outros modelos existentes na literatura e com o modelo hiperbólico utilizando dados em períodos de tempo maiores, a fim conseguir prever os recalques ocorridos no ASMOC e que estes dados sirvam como ferramenta de gestão e planejamento pela equipe técnica do aterro

sanitário. No entanto os resultados preliminares obtidos pelo modelo hiperbólico podem servir para uma estimativa para a evolução dos recalques em períodos de tempo relativamente curtos, como os estudados neste trabalho.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, Adriana Briggs de. **O emprego do permeâmetro de Guelph na determinação da permeabilidade do solo, de camadas de lixo e sua cobertura** (Tese de mestrado). Universidade federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro - RJ. 2001. 24p.

ALCÂNTARA, P. B. **Avaliação da influência da composição de resíduos urbanos no comportamento de aterros simulados**. (Tese Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco. Recife - PE 2007. 26p.

BARROSO, Isabela Maria. **Camadas de cobertura de aterro de resíduos sólidos**. (Tese de mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia ambiental) – Universidade do estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro – RJ. 2008. 85, 86p.

BOSCOV, Maria Eugênia Gimenez. **Geotecnia ambiental**. 1 ed. São Paulo – SP. Oficina de textos. 2008. 125,129,133,139p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT): **NBR 6457**: Amostras de solos – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 1986.

\_\_\_\_\_. **NBR 6459** – Determinação do Limite de Liquidez. Rio de Janeiro, 1984.

\_\_\_\_\_. **NBR 7180** – determinação do Limite de Plasticidade. Rio de Janeiro, 1984.

\_\_\_\_\_. **NBR 7181** – Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, 1984.

\_\_\_\_\_. **NBR 7185** – Determinação da Massa Específica Aparente, “IN SITU”, com emprego do frasco de areia. Rio de Janeiro, 1986.

\_\_\_\_\_. **NBR 7250** – Identificação e descrição de amostras de solos obtidas em sondagens de simples reconhecimentos de solo. Rio de Janeiro, 1982.

\_\_\_\_\_. **NBR 8419** – Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro, 1992.

\_\_\_\_\_. **NBR 10004** – Resíduos sólidos: Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. **NBR 10006** – Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

CAPUTO, Homero Pinto. **Mecânica dos solos e suas aplicações: Fundamentos**. 6 ed. Rio de Janeiro – RJ. LTC. 21\_22p.

CARVALHO, Luiz Hernani de. **Patologia dos solos nas barragens de terra**. Única ed. Fortaleza – CE. Cap. I – 19 a 31p e Cap. II – 33 a 54p.

CARVALHO, *et al.* **Estudo da compressibilidade dos resíduos sólidos urbanos**. Solos e Rochas. São Paulo, v. 23, n. 1, 4 – 6p. abril. 2000.



CATAPRETA, Cícero Antônio Antunes. **Comportamento de um Aterro Sanitário Experimental: Avaliação da Influência do Projeto, Construção e Operação.** (Tese de mestrado do Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – universidade Federal de Minas Gerais. Minas Gerais – MG. 2008. 132p.

CELLIGOI, André *et al.* Utilização do permeâmetro de Guelph na determinação da condutividade hidráulica da zona não-saturada do aquífero freático nas imediações do lixão de Londrina – PR. XIV congresso brasileiro de águas subterrâneas. Paraná – PR. P9-10. 2006.

COMPARIN, Isadora. **Estudo do comportamento de resíduos sólidos urbanos em lisímetro de caráter experimental.** (Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de engenharia ambiental) – Universidade de Passo Fundo. Passo Fundo – RS. 2011. 14, 45p.

DENARDIM, Gabriela Pippi. **Estudo dos recalques do aterro sanitário da central de resíduos do recreio – Minas do leão/RS.** (Tese de mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil) – Universidade federal de Santa Maria. Santa Maria – RS. 2013. 11, 32, 38, 41\_42 e 44p.

\_\_\_\_\_. **DNER 093/94** – Determinação da Densidade Real dos solos. 1994.

AMORA, *et al.* **Manual de Irrigação.** 8º ed. Minas Gerais - MG. UFV.

MARQUES, Afonso Celso Moruzzi. **Compactação e compressibilidade de resíduos sólidos urbanos.** (Tese para obtenção do título de doutor em geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos – SP. 2001. 2, 66, 72-73p.

MELLEK, José Elias. **Análise hidrológica e aplicação do método de curva número em bacia vertente sob cobertura florestal.** (Tese de doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal) – Universidade federal do paraná. Paraná – PR. 2015. 56p.

MELO, Marcio Camargo de. **Uma análise de recalques associada a biodegradação no aterro de resíduos sólidos de Muribeca.** (Tese de mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil) – Universidade federal de Pernambuco. Recife – PE. 2003. 11, 14, 312p.

MENDES, Pablo Michael Rodrigues. **Recalque do maciço dos resíduos no aterro sanitário do município de Foz do Iguaçu.** (Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de engenharia ambiental). – Faculdade dinâmica das Cataratas. Foz do Iguaçu – PR. 2009. 7p.

NASCIMENTO, Júlio César Fialho do. **Comportamento mecânico de resíduos sólidos urbanos.** (Dissertação para obtenção do título de mestre em geotecnia) – Universidade de São Carlos – SP. 2007. 58p.

PABLLO *et al.* **Estudo geotécnico para impermeabilização de aterro sanitário em escala experimental.** Universidade Federal de Campina Grande. COBRAMSEG – Goiânia – GO. 2014.

SIMÕES, Gustavo Ferreira. **Modelo para avaliação de recalques em aterros de disposição de resíduos sólidos urbanos.** (Tese de doutorado no programa de pós-graduação em Engenharia Civil. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2000, 38, 44, 136p.

TAPAHUASCO, Wilber Feliciano Chambi. **Análise do comportamento e maciços sanitários e proposta de um novo modelo de previsão de recalques considerando a parcela de biodegradação.** (Tese de doutorado no programa de pós-graduação em Engenharia Civil). Universidade de Brasília – DF. 2009. 4, 49, 51-53p.