

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

**AVALIAÇÃO DE MONITORAMENTO GEOTÉCNICO DO**  
**ATERRO SANITÁRIO DE BRASÍLIA**

**THIAGO KOPPE DO CARMO**

**ORIENTADORES: RAFAEL CERQUEIRA SILVA**  
**JOSÉ FERNANDO THOMÉ JUCÁ**

**MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM ENGENHARIA**  
**AMBIENTAL**

**BRASÍLIA/DF: MAIO/2021**

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

**AVALIAÇÃO DE MONITORAMENTO GEOTÉCNICO DO  
ATERRO SANITÁRIO DE BRASÍLIA**

**THIAGO KOPPE DO CARMO**

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

**APROVADA POR:**

---

**RAFAEL CERQUEIRA SILVA, DSc. (ENC/UnB)  
(ORIENTADOR)**

---

**JOSÉ FERNANDO THOMÉ JUCÁ, DSc. (UFPE)  
(ORIENTADOR)**

---

**CLÁUDIA MÁRCIA COUTINHO GURJÃO, DSc. (ENC/UnB)  
(EXAMINADOR INTERNO)**

---

**DOUGLAS PEREIRA DA COSTA, MSc. (VALE)  
(EXAMINADOR EXTERNO)**

**DATA: BRASÍLIA/DF, 19 DE MAIO DE 2021**

## FICHA CATALOGRÁFICA

CARMO, THIAGO KOPPE  
AVALIAÇÃO DE MONITORAMENTO GEOTÉCNICO DO ATERRO SANITÁRIO  
DE BRASÍLIA.

[Distrito Federal] 2021.

xiii, 87 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Ambiental, 2021)

Monografia de Projeto Final - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Aterro Sanitário
  2. Monitoração
  3. Parâmetros de Resistência
  4. Análises de Estabilidade
  5. Carta de Risco
- I. ENC/FT/UnB  
II. Título (Bacharel)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

CARMO, T.K. (2020). *Avaliação de Monitoramento Geotécnico de Aterro de Resíduos Sólidos Urbanos*. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 100 p.

## CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Thiago Koppe do Carmo

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: Avaliação de Monitoramento Geotécnico do Aterro Sanitário de Brasília

GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Ambiental / 2021

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta Monografia de Projeto Final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta Monografia de Projeto Final pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

---

Thiago Koppe do Carmo  
thiago.koppe19@gmail.com  
Brasília/DF – Brasil

## AGRADECIMENTOS

No primeiro semestre de 2016, ao ingressar na engenharia ambiental, não imaginei que traçaria um caminho tão longo, com diversos desafios e surpresas. Mal sabia eu que tudo valeria a pena e a trajetória seria incrível.

Primeiramente, agradeço aos meus pais, Ricardo e Andréa, formados pela Universidade de Brasília, que sempre fizeram de tudo para me incentivar nos estudos. Ao meu irmão, Felipe, que por muitas vezes foi minha válvula de escape dos momentos ruins.

À minha namorada, Natália, por sempre me incentivar e acreditar em mim, me mostrando que o caminho pode ser bem mais leve quando compartilhado com alguém.

Aos meus grandes amigos de longa data, Bia Leite, Bia Seixas, Lari, Madu, Matheusinho e Teixeira, que me ensinaram que amizade é um amor que aprendeu a crescer e se ramificar em nossas vidas.

Ao Egídio, por me mostrar que uma amizade pode ser eterna, sendo cúmplice e leal até mesmo nos momentos mais difíceis.

Aos meus amigos da Ambientale, Amanda, Ikaro e Matheus, que foram responsáveis pelo meu maior momento de crescimento pessoal e profissional.

À Concreta, especialmente aos meus amigos Adriane, Ana Michirefe, Carol, Erik, Marcelo e Gabriel, além da Direx, DAF e DGP, que me ensinaram, me guiaram e foram pacientes, me mostrando que liderança e amizade são conceitos que vem dos dois lados.

Aos meus companheiros de Adasa/SRS, onde pude ter meu primeiro contato com o mercado de trabalho e que, acima de tudo, me incentivaram a seguir com o tema deste projeto.

Ao meu time de logística na Ambev, que me mostram todos os dias que o segredo de um grande sucesso está no trabalho de uma grande equipe.

À banca presente neste projeto, especialmente aos meus orientadores, Profs. Rafael e Jucá. Sem eles, nada deste projeto teria sido possível. O convívio com Rafael me serviu como um exemplo de docente durante meus 2 últimos anos na graduação.

Por fim, agradeço à UnB, Programa de Iniciação Científica – ProIC/UnB e ao curso de Engenharia Ambiental, que acrescentaram e guiaram no meu processo de formação profissional, me mostrando o impacto que pequenas ações têm na sociedade.

## RESUMO

Aterros de resíduos sólidos urbanos (RSU) apresentam natureza complexa, cujas propriedades dos materiais são alteradas ao longo do tempo, afetando seu estado de tensão-deformação. Dados de ensaios e monitorações são fontes importantes para auxiliar na compreensão do comportamento geotécnico. No trabalho são apresentados e discutidos os resultados de monitorações de alguns instrumentos instalados no Aterro Sanitário de Brasília (ASB). Foram avaliadas possíveis correlações entre os parâmetros monitorados e valores de parâmetros de resistência. Verificou-se que não há correlação entre precipitação, piezometria e deslocamentos. No particular, para o ASB, a pluviometria não afeta a piezometria, devido ao bom funcionamento do sistema de drenagem interna, cuja vazão de chorume drenado varia com a chuva de forma muito consistente. Não houve uma relação direta entre pluviometria e deslocamentos. Entretanto, com a estiagem, após 10 dias do término das chuvas, a velocidade de deslocamento reduz. Como esperado, os deslocamentos horizontais foram superiores aos verticais e a relação entre os deslocamentos variou de 10% a 20%. Os valores de ângulo de atrito ( $\phi$ ) e coesão ( $c$ ) foram estimados com base na hipótese que o maior nível piezométrico registrado corresponderia a um fator de segurança (FS) baixo. Verificou-se a importância da coesão na condição de estabilidade, sendo esta influenciada pelo efeito de fibra, que tem sua contribuição reduzida pelos processos de degradação do RSU. Considerou-se que os valores do limite inferior são razoáveis para o RSU, quando comparados com dados da literatura. Foi elaborada uma carta de risco, que permitisse conhecer a condição de segurança do aterro sanitário, por meio da monitoração piezométrica, sendo, portanto, um recurso para auxiliar nas tomadas de decisão de forma preventiva. Os parâmetros de resistência foram conservadores, haja visto que já ocorreram níveis piezométricos superiores ao que levaria a um FS unitário. Entretanto, considerando que a resistência ao cisalhamento reduz com o tempo, os valores de  $\phi$  e  $c$  podem ser representativos para RSU maduro, que corresponde à fase de encerramento de um aterro sanitário.

Palavras Chave: Aterro Sanitário de Brasília, Carta de Risco, Análise de Estabilidade, Deslocamentos e Fator de Segurança.

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO .....	1
1.1	JUSTIFICATIVA.....	2
1.2	OBJETIVOS.....	3
1.1.1	Objetivo Geral .....	3
1.1.2	Objetivos Específicos .....	3
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	4
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	4
2.1	ATERROS SANITÁRIOS .....	4
2.2	CARACTERÍSTICAS DOS RESÍDUOS SÓLIDOS .....	7
2.2.1	Gravimetria dos Resíduos Sólidos Urbanos .....	9
2.2.2	Caracterização Granulométrica .....	10
2.2.3	Massa Específica .....	11
2.2.4	Umidade .....	13
2.2.5	Temperatura.....	15
2.2.6	Permeabilidade .....	16
2.2.7	Resistência ao Cisalhamento .....	17
2.2.8	Compressibilidade .....	24
2.3	CONDIÇÃO DE EQUILÍBRIO DE ATERROS SANITÁRIOS .....	25
2.4	ANÁLISE E ESTABILIDADE DE TALUDES .....	27
2.4.1	Método de Análise (GeoRio, 2014).....	30
2.5	INSTRUMENTAÇÃO E MONITORAÇÃO .....	35
2.5.1	Pluviometria .....	36
2.5.2	Piezometria .....	37
2.5.3	Inclinometria.....	40
2.5.4	Marcos Topográficos .....	42
2.5.5	Medição de Vazão de Chorume.....	44

3.	METODOLOGIA .....	45
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	51
4.1	PIEZOMETRIA .....	51
4.2	ANÁLISE DAS VELOCIDADES DE DESLOCAMENTO .....	57
4.3	ANÁLISE DAS RELAÇÕES ENTRE OS DESLOCAMENTOS .....	60
4.3.1	Deslocamentos horizontais e verticais (recalques) .....	60
4.3.2	Recalque e velocidade de deslocamento vertical .....	62
4.3.3	Deslocamento vertical e precipitação acumulados .....	65
4.3.4	Relação entre deslocamentos vertical e horizontal ( $\delta_v/\delta_h$ ) .....	66
4.4	ESTUDO DE ESTABILIDADE .....	66
4.4.1	Pesquisa dos Parâmetros de Resistência (coesão e ângulo de atrito) .....	67
4.4.2	Carta de Risco.....	70
5.	CONCLUSÃO .....	73
5.1	SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS .....	74

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Depósito de aterro de resíduos sólidos urbanos (Jucá, 2020).....	5
Figura 2.2 - Aterro sanitário como um biorreator (Jucá, 2020).....	6
Figura 2.3 - Balanço de massa (Jucá, 2020).....	6
Figura 2.4 - Acumulação a longo prazo (Jucá, 2020).....	7
Figura 2.5 - As quadri-fases dos RSU (Beaven et al., 2009).....	8
Figura 2.6 - Efeito da perda de massa dos RSU (Schuler, 2010 adaptado de Machado et al., 2009).....	8
Figura 2.7 - Gráfico da composição gravimétrica dos resíduos sólidos domiciliares produzidos no Distrito Federal – resultados médios da coleta convencional no DF (PDGIRS, 2018).....	9
Figura 2.8 - Modelo esquemático da composição de RSU (Jessberger et al., 1995). ....	10
Figura 2.9 - Curva de distribuição do tamanho das partículas do RSU (Carvalho, 1999 adaptado de Jessberger, 1994).....	11
Figura 2.10 - Peso específico para o resíduo sólido urbano (Carvalho, 1999 adaptado de Kavazanjian et al., 1995). ....	12
Figura 2.11 - Variação do teor de umidade dos RSU com a profundidade (Jucá et al., 1997). ....	14
Figura 2.12 - Variação da coesão aparente com a umidade (Gabr e Valero, 1995).....	15
Figura 2.13 - Variação da temperatura do RSU com a profundidade, comparação Grécia e Brasil (Coumoulos et al., 1995 adaptado por Mariano e Jucá, 1998). ....	16
Figura 2.14 - Relação entre coesão aparente e ângulo de atrito do RSU (Singh e Murphy, 1990 adaptado por Wojnarowicz et al., 1998).....	18
Figura 2.15 - Curva tensão x deformação do RSU (Kölsch, 1993).....	19
Figura 2.16 - Curva Teórica de compressibilidade do RSU (Grisolia & Napoleoni, 1996 adaptado por Schuler, 2010).....	24
Figura 2.17 - Efeito da degradação nos parâmetros de resistência dos RSU (Gao et al., 2015 adaptado por Daciolo, 2020). ....	27
Figura 2.18 - Tipos de rupturas possíveis em aterros de RSU (Dixon & Jones, 2004 adaptado por Schuler, 2010). ....	29
Figura 2.19 - Tensão vs. deformação de um material rígido-perfeitamente-plástico.....	30
Figura 2.20 - Método das fatias: a) massa instável dividida em fatias e b) forças que atuam na i-ésima fatia.....	31



Figura 2.21 - Pluviômetro tipo Ville de Paris (GeoRio, 2014) e pluviógrafo empregado para mitigação de riscos de deslizamentos de talude rodoviários (Ehrlich et al., 2018).....	37
Figura 2.22 - Piezômetro sifão - dimensões em cm (Schuler, 2010).....	38
Figura 2.23 – Vista superior do piezômetro sifão (Schuler, 2010). ....	39
Figura 2.24 – Piezômetro do tipo sifão utilizado em aterros sanitários (Schuler, 2010): (a) vista superior; (b) leitura do nível piezométrico com torpedo; e (c) leitura da pressão de gás no manômetro.....	39
Figura 2.25 - Partes de um inclinômetro: torpedo, rolo de cabo elétrico, unidade de leitura (tablet, via bluetooth), tubos de acesso e início da leitura (condução do torpedo até o fim da vertical inclinométrica, cota definida no tubo ranhurado (Silva, 2019). ....	40
Figura 2.26 - Perfil de deslocamentos horizontais em profundidade indicando uma superfície de ruptura de um talude sujeito a movimentação lenta de rastejo (Silva <i>et al.</i> , 2018). ....	41
Figura 2.27 - Inclínometria registrada por Schuler (2010) no aterro de resíduos sólidos localizado no estado do Rio de Janeiro. ....	42
Figura 2.28 - Esquema de benchmark profundo (Schuler, 2010).....	43
Figura 2.29 - Detalhes de um Marco Superficial (Adaptado de Schuler, 2010). ....	43
Figura 2.30 - Detalhes da Calha Parshall (Azevedo Neto, 1998) e fotos de uma calha e sensor ultrassônico para medição da lâmina d'água, por consequência da vazão (Fotos: Digiflow e Hidrometer, respectivamente) .....	44
Figura 2.31 - Calha Parshall utilizada no ASB (Jucá e Fernandes, 2020).....	45
Figura 3.1 – Vista aérea do Aterro Sanitário de Brasília (ASB). ....	46
Figura 3.2 - Planialtimetria do ASB e localização dos instrumentos utilizados no estudo. ....	47
Figura 3.3 - Seções de Estudo do ASB.....	48
Figura 3.4 - Localização do Pluviômetro #1548034. ....	49
Figura 3.5 - Representação do cálculo do parâmetro de poro pressão ru (Schuler, 2010)..	51
Figura 4.1 - Relação entre PZG02 e PZG06 com precipitação diária. ....	53
Figura 4.2 - Relação entre PZ01, PZ02, PZ03 e PZ04 com precipitação diária.....	53
Figura 4.3 - Extravasamento de lixiviado pelo maciço do ASB (08/04/2019).....	54
Figura 4.4 - Chaminé em período crítico do Aterro. ....	55
Figura 4.5 - Relação entre PZ02 e PZG02 com precipitação diária. ....	56
Figura 4.6 - Relação entre PZG02 com precipitação diária para o mês de fevereiro de 2020. ....	56

Figura 4.7 - Geração de lixiviado com contribuição das lagoas "CCL" e sem contribuição das lagoas "SCL" referente ao mês de fevereiro de 2020 no ASB (Jucá e Fernandes, 2020). .....	57
Figura 4.8 - Relação das velocidades de deslocamento do MS-19 com precipitação diária. .....	59
Figura 4.9 - Relação das velocidades de deslocamento do MS-19 com poro pressão. ....	59
Figura 4.10 - Deslocamentos acumulados MS-19.....	60
Figura 4.11 - Deslocamentos Acumulado MS-62. ....	61
Figura 4.12 - Deslocamentos acumulados MS-60.....	61
Figura 4.13 - Recalque (deslocamento vertical) registrado no MS-19.....	63
Figura 4.14 - Recalque (deslocamento vertical) registrado no MS-60.....	63
Figura 4.15 - Recalque (deslocamento vertical) registrado no MS-62.....	64
Figura 4.16 - Recalques registrados por um marco superficial instalado em Aterro Vila Albertina/SP – MS 56 (DE JORGE et al., 2004) .....	64
Figura 4.17 - Recalque (deslocamento vertical) x Precipitação Acumulada no MS-60.....	65
Figura 4.18 - Recalque (deslocamento vertical) x Precipitação Acumulada no MS-62.....	65
Figura 4.19 - Razão entre deslocamentos verticais e horizontais.....	66
Figura 4.20 – Parâmetros de poro pressão observados nas monitorações dos piezômetros das seções C-C' e D-D' .....	67
Figura 4.21 - Faixa de valores de parâmetros de resistência para resíduo sólido urbano recomendada para projetos (Sánchez-Alciturri et al., 1993). ....	68
Figura 4.22 – Plotagem dos valores de ângulo de atrito e coesão encontrados na literatura. .....	68
Figura 4.23 - Parâmetros de cisalhamento para o Lixo (adaptada de Turckzynski, 1988). 69	
Figura 4.24 – Possíveis valores de coesão e ângulo de atrito obtidos pelas hipóteses adotadas nos estudos de estabilidade.....	70
Figura 4.25 - Análise de estabilidade da seção C-C' para $r_u = 0,8$ (FS=1).....	72
Figura 4.26 - Análise de estabilidade da seção C-C' para $r_u = 0,5$ (FS~1,5). ....	72
Figura 4.27 - Carta de risco para seção C-C'. ....	73

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Peso específico de alguns aterros de RSU não pré-tratados (Calle, 2007).....	13
Tabela 2.2 - Coeficientes de permeabilidade de aterros sanitários (Calle, 2007). ....	17
Tabela 2.3 - Análise da tração de acordo com a fase. ....	19
Tabela 2.4 - Parâmetros geotécnicos de aterros de Resíduos Sólidos Urbanos - RSU de diversas literaturas. Fonte: Modificado por Norberto et al. (2020), de Strauss (1998), Silveira (2004), Borgatto (2010) e Remédio (2014). ....	20
Tabela 2.5 - Parâmetros geotécnicos de aterros de RSU considerando o efeito de fibra. ...	26
Tabela 2.6 – Tipologias de ruptura em massas de RSU (Koerner & Soong, 1999). ....	30
Tabela 2.7 - Algumas formulações baseadas no método das fatias.....	33
Tabela 2.8 – Nível de segurança desejado contra a perda de vidas humanas.....	34
Tabela 2.9 – Nível de segurança desejado contra danos materiais e ambientais.....	35
Tabela 2.10 – Fatores de segurança mínimos para deslizamento recomendados pela norma brasileira NBR 11682 – Estabilidade de Encostas (2009).....	35
Tabela 4.1 – Dados dos Piezômetros.....	52
Tabela 4.2 - Dados dos marcos superficiais. ....	58
Tabela 4.3 - Relação de Recalque em porcentagem.....	62
Tabela 4.4 - Dados utilizados nas análises de estabilidade. ....	69

## **LISTA DE NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES**

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais

ADASA – Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento do Distrito Federal

ANA – Agência Nacional de Águas

ASB – Aterro Sanitário de Brasília

CCL – Com Contribuição das Lagoas

ETE – Estação de Tratamento de Esgoto

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada

PDGIRS – Plano Distrital de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos do Distrito Federal

PZ – Piezômetro

PZG – Piezômetro Geotech

RHN – Rede Hidrometeorológica Nacional

RSU – Resíduos Sólidos Urbanos

SCL – Sem Contribuição das Lagoas

SLU – Serviço de Limpeza Urbana do Distrito Federal

SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento

SNIRH – Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos

SRS – Superintendência de Resíduos Sólidos

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\delta_v$  – Deslocamento Vertical

$\delta_h$  – Deslocamento Horizontal

$\phi$  – Ângulo de Atrito

$c$  – Coesão

$\gamma$  – Peso Específico

$F_s$  – Fator de Segurança

$M_a$  – Massa de Ar

$M_{inst}$  – Momento do Peso da Massa Instável

$M_{res}$  – Momento de ao Cisalhamento ao Longo da Superfície

$M_{w-d}$  – Massa de Água Drenável

$M_{w-r}$  – Massa de Água Retina

$M_s$  – Massa de sólidos

$r_u$  - Poro pressão

$V_a$  – Volume de Ar

$V_t$  – Volume Total

$V_s$  – Volume de Sólidos

$V_v$  – Volume de Vazios

$V_a$  – Volume de Ar

$V_p$  – Relação entre o Volume da pasta e Volume Total dos RSU

$V_{sf}$  – Volume de fibras do RSU

$V_{sp}$  – Volume da pasta sólida (matriz) do RSU

$V_w$  – Volume de Água Total

$V_{w-d}$  – Volume de Água Drenável

$V_{w-r}$  – Volume de Água Retida

$V_v$  – Volume de Vazios

$\Delta V_s$  – Parcela de Volume do RSU que varia (matriz)

# 1. INTRODUÇÃO

A concentração da população próxima aos centros urbanos, somada ao impacto da crescente demanda de bens de consumo na geração de resíduos sólidos, tem contribuído para que a disposição final dos resíduos sólidos urbanos (RSU) se torne um problema de engenharia desafiador. A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), aprovada em 2010, obriga aos municípios planejar e executar a disposição final ambientalmente adequada dos resíduos gerados. Nesse sentido, após a política de máximo aproveitamento de resíduos, por meio de técnicas como, por exemplo, reciclagem e compostagem, destacam-se os aterros sanitários.

Segundo a NBR 8.419/1992, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos consistem na técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, não causando danos ou riscos à saúde pública e à segurança, com objetivo de minimizar os impactos ambientais, método no qual utiliza os princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos ao menor volume permissível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho ou a intervalos menores se for necessário.

Conforme Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2019) no ano de 2018 havia 607 aterros sanitários em operação no Brasil. Além do mais, de acordo com Jucá (2019), menos da metade das cidades brasileiras, um total de 2.239, seguem a legislação destinando os resíduos a aterros sanitários. Estes dados revelam a quantidade significativa de aterros sanitários que o Brasil ainda precisa implantar.

Em linha gerais, as propriedades mecânicas dos RSU são avaliadas empregando os métodos convencionais de ensaios de campo e laboratório desenvolvidos para solos. Entretanto, deve-se ter cuidado ao se estender os conceitos e as teorias clássicas da mecânica dos solos para os RSU, pois existem diferenças significantes entre estes dois materiais. Na geotecnia interessam a massa específica, resistência ao cisalhamento, permeabilidade, umidade, compressibilidade e deformabilidade dos resíduos, que são modificadas ao longo do tempo, em função principalmente dos processos químicos e biológicos e da conseqüente mudança no estado de tensão induzido pelo alteamento e redução do volume do aterro.

Com um conhecimento mais apurado do comportamento geotécnico dos maciços de RSU pode-se definir melhor os parâmetros a serem empregados nas análises, visando a execução

de aterros novos ou ampliações dentro de padrões mais seguros e econômicos. Também é possível antecipar uma condição de equilíbrio indesejável, a tempo de executar ações preventivas, que evitem um deslizamento. Com este intuito, resultados de ensaios e monitorações de aterros de RSU são fontes importantes para auxiliar na compreensão do seu comportamento, que tem relação com muitas variáveis, por exemplo, mudanças de propriedades dos materiais, tensões, deformações e produção de lixiviados e gases.

A implantação de grandes aterros só se tornou possível quando os conhecimentos técnicos de engenharia passaram a integrar as rotinas de planejamento, construção e operação dos aterros sanitários. Porém, principalmente no campo geotécnico, a aplicação direta dos conhecimentos existentes pela simples analogia entre as teorias clássicas e os materiais que compõem os maciços sanitários demonstrou certas limitações, haja vista que muitas destas obras romperam (Campi, 2011). Assim, a grande dificuldade reside na compreensão do comportamento geotécnico da massa de RSU, cujas tensões, deformações e propriedades dos materiais são alteradas ao longo do tempo, afetando sua condição de equilíbrio.

## **1.1 JUSTIFICATIVA**

Devidos aos problemas ambientais resultantes de contaminação, poluição e rupturas, a geotecnia se responsabilizou pela busca dos conhecimentos técnicos e práticas de engenharia apropriadas para implantação e operação dos aterros sanitários. A grande dificuldade reside na compreensão do comportamento geotécnico da massa de RSU, de natureza altamente complexa e heterogênea, cujas propriedades dos materiais são alteradas ao longo do tempo, afetando seu estado de tensão-deformação e, por consequência, sua condição de equilíbrio.

No Brasil, Benvenuto (2008) cita registros de acidentes envolvendo grandes volumes de resíduos em diversos municípios, tanto em aterros sanitários de grande porte, quanto em vazadouros mal operados e sem as devidas licenças ambientais, como no aterro de Bandeirantes no município de São Paulo, na qual 65.000 m<sup>3</sup> do maciço de resíduos escorregaram em direção à Rodovia dos Bandeirantes (1991) e no antigo lixão do Morro do Bumba em Niterói/RJ no ano de 2010, onde uma grande ruptura em um antigo lixão localizado em uma encosta deixou cerca de 48 mortos e mais de 50 casas soterradas (Schuler, 2010).

Por isso, considerando que as movimentações e mudanças no estado de tensão fazem parte da vida útil dos aterros de RSU, é imprescindível entender o comportamento destes e as variáveis que influenciam, para que se possa identificar sinais que se aproximem de uma condição de equilíbrio precária, a tempo de executar ações preventivas, que evitem um deslizamento. Neste contexto, no presente projeto apresentam-se resultados de monitoração de um aterro sanitário e análises com base nesses dados. Os dados foram fornecidos pela Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento do Distrito Federal (ADASA), que vem monitorando o Aterro Sanitário de Brasília (ASB) desde sua inauguração em janeiro de 2017. Os dados de monitoração referem-se às movimentações, variações dos níveis piezométricos, precipitações e vazões de percolados. Tem-se ainda os levantamentos plani-altimétricos (*as built*) realizados periodicamente para associação dos resultados da monitoração com a materialização do avanço do alteamento do aterro.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.1.1 Objetivo Geral**

A pesquisa tem como objetivo apresentar e avaliar os resultados de monitoração geotécnica do Aterro Sanitário de Brasília (ASB), envolvendo diferentes estações climáticas (períodos seco e chuvoso) e apresentando uma Carta de Risco para seção mais crítica.

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

Com base nas informações da monitoração geotécnica do aterro sanitário buscaram-se:

- Relações entre os parâmetros medidos (piezometria, pluviometria e deslocamentos horizontais e verticais);
- Estimativa de parâmetros de resistência com base em análises de estabilidade referenciadas nos resultados de monitoração piezométrica e de dados existentes na literatura; e
- Elaboração de carta de risco, para fins de tomadas de decisão, por meio de relação entre fator de segurança e parâmetros de poro pressão, obtidos por monitoração piezométrica.



### **1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO**

A sequência de apresentação do trabalho foi estruturada em cinco capítulos, sendo o primeiro a presente introdução. O segundo refere-se à revisão bibliográfica, estruturada a partir da leitura de artigos e teses, apresentando características e propriedades de resíduos sólidos e aterros sanitários, fundamentados nos conceitos da geotecnia. O terceiro capítulo apresenta a metodologia adotada para elaboração dos estudos. O quarto capítulo apresenta os resultados das monitorações, análises e discussões. No quinto capítulo apresentam-se as conclusões do Projeto de Final de Curso e sugestões de futuras pesquisas.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 ATERROS SANITÁRIOS**

No mundo inteiro, com poucas exceções, os aterros sanitários são a principal destinação final dos resíduos sólidos, mesmo com todo esforço em se reduzir, reutilizar e reciclar (Jucá, 2003). De acordo com Hilger e Barlaz (2002), o aterro é a alternativa predominante devido ao seu baixo custo em relação à incineração. No Brasil, como citado por Jucá (2020), a dependência de aterros sanitários é grande, já que 97% de todos os resíduos gerados são dispostos nesses locais.

Cada aterro possui sua particularidade, tendo características referente aos resíduos, clima e da operação completamente diferentes de local para local. Antigamente, no Brasil, era comum adotar os conceitos e os parâmetros da Europa e dos EUA para dimensionamento de aterros sanitários. Entretanto, devido à diferença nas características dos RSU, a adoção destes conduziu a situações críticas de instabilidade nos aterros (Schuler, 2010).

O aterro é um ecossistema utilizado para a disposição de resíduos sólidos no solo, onde processos físicos, químicos e biológicos promovem a degradação da fração orgânica de RSU com geração de efluentes líquidos e gasosos, modificando a pressão no interior da massa de resíduos, que é contida por sistema de impermeabilização de base e de cobertura (Alcantara, 2007). De acordo com Jucá (2020), aterros de resíduos sólidos urbanos (RSU) são caracterizados por serem um sistema dinâmico que envolve reações físico-químicas e microbiológicas formando um sistema complexo, sob a influência de agentes naturais - clima e microrganismos.

Jucá (2020) diz que a massa de lixo de um aterro sanitário é diferente para cada local. Dentro do sistema de um aterro sanitário (Figura 2.1) há atividade microbiana e geração de gás e chorume - que ao longo do tempo vai alterando os parâmetros geotécnicos com a diminuição da fração orgânica e aumento da quantidade de partículas mais estáveis. Por fim, em aterros sanitários existe a necessidade de captação de gases e líquidos para tratamento e para melhorar o comportamento dessa massa de resíduos já que, caso os resíduos fiquem saturados de lixiviado e gases, há uma maior probabilidade de ruptura no aterro sanitário.



Figura 2.1 - Depósito de aterro de resíduos sólidos urbanos (Jucá, 2020).

De acordo com Jucá (2020), os aterros sanitários são biorreatores (Figura 2.2) que recebem água da chuva (que infiltram no maciço), rejeitos e ar. Posteriormente, são liberados gases ( $CH_4$ ,  $CO_2$ , etc.) e lixiviado. Caso a camada de base não funcione bem, ocorre o escoamento de lixiviado para o subsolo, contaminando todo o ambiente inferior; e caso a camada superior também não funcione bem, ocorre a emissão de gases de efeito estufa. Essa massa que tem uma entrada e uma saída (Figura 2.3) fica acumulada ao longo do

tempo – o que posteriormente chamamos de aterro. O acúmulo depende da entrada, da saída e da degradação da massa de um aterro.

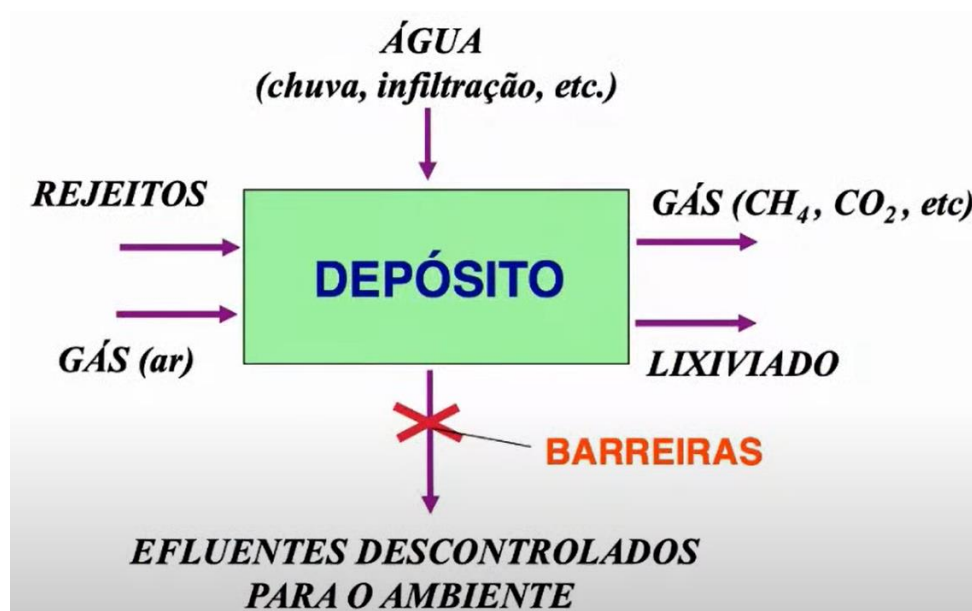


Figura 2.2 - Aterro sanitário como um biorreator (Jucá, 2020).



Figura 2.3 - Balanço de massa (Jucá, 2020).

Por fim, Jucá (2020) cita que um aterro sanitário convencional leva anos para se estabilizar – em torno de 20 e 30 anos – resultando em um pós-encerramento de alto custo, época em que o proprietário do empreendimento tem prejuízo, já que ele precisa continuar tratando os resíduos mesmo sem entrada de novos no local (Figura 2.4). Os aterros sustentáveis, que controlam a biodegradação por exemplo, têm um tempo de pós-encerramento mais curto, gerando um custo de pós-encerramento menor quando comparado aos aterros convencionais. Por isso, para minimizar o passivo ambiental, é de suma importância entender as propriedades dos resíduos como: composição física, propriedades químicas,

constituintes dos resíduos aterrados, biodegradação e biogás, caracterização dos lixiviados etc.

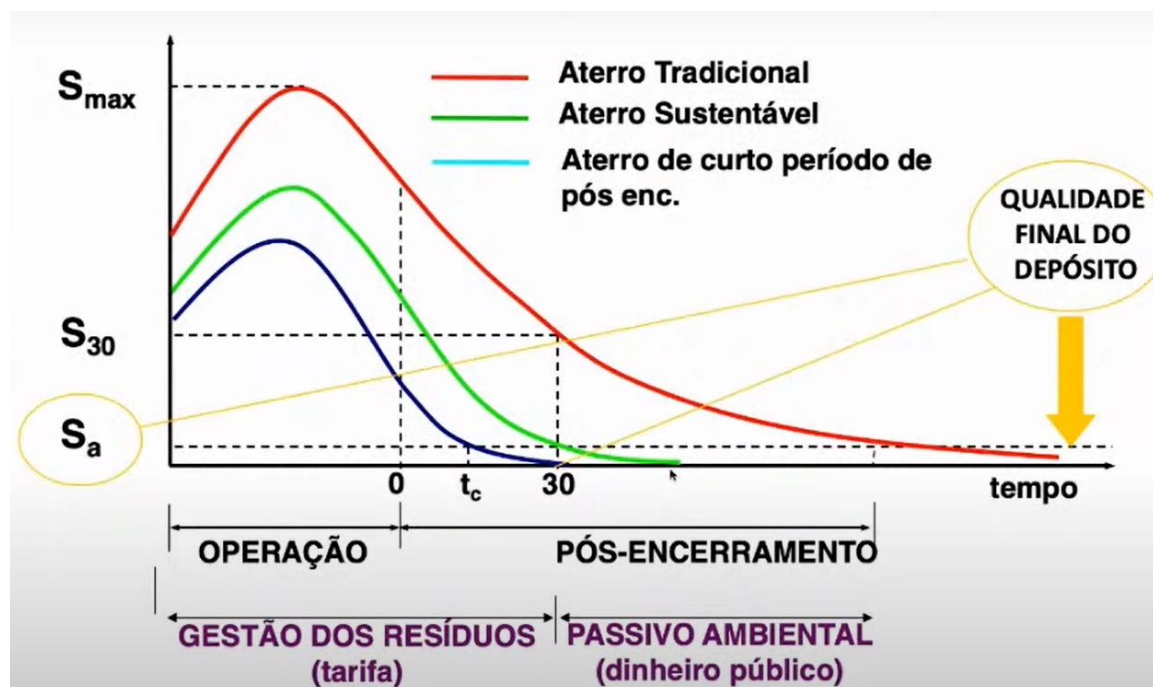


Figura 2.4 - Acumulação a longo prazo (Jucá, 2020).

## 2.2 CARACTERÍSTICAS DOS RESÍDUOS SÓLIDOS

De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004), os resíduos sólidos são “resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornam inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível”.

Quando falamos em aterros sanitários e suas características, é essencial que os conceitos referentes aos resíduos sólidos sejam entendidos. O RSU, denominado vulgarmente de lixo, é conhecido por ser um material bastante heterogêneo, variando em função de diversos fatores (atividade dominante do local, hábitos da população, clima, nível educacional, etc.), sendo possível distingui-lo em quatro diferentes fases, como apresentado na Figura 2.5.

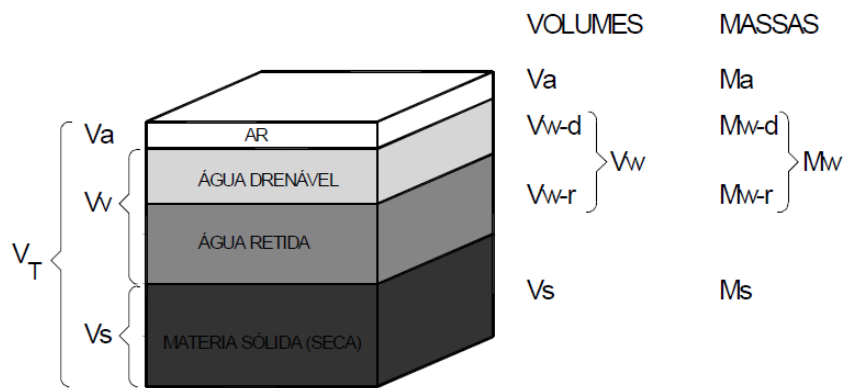


Figura 2.5 - As quadri-fases dos RSU (Beaven *et al.*, 2009).

Compondo o volume total ver-se: ar, lixiviado (composto por água drenável), água retida (matéria orgânica que contém umidade) e a matéria sólida seca que contém resíduos inorgânicos (BEAVEN *et al.*, 2009). Na Figura 2.6 apresentam-se os processos de biodegradação da matéria orgânica que têm efeito significativo na perda de volume de uma parcela de RSU. Este processo também influencia nas propriedades de resistência e compressibilidade do lixo (JUCÁ, 2003).

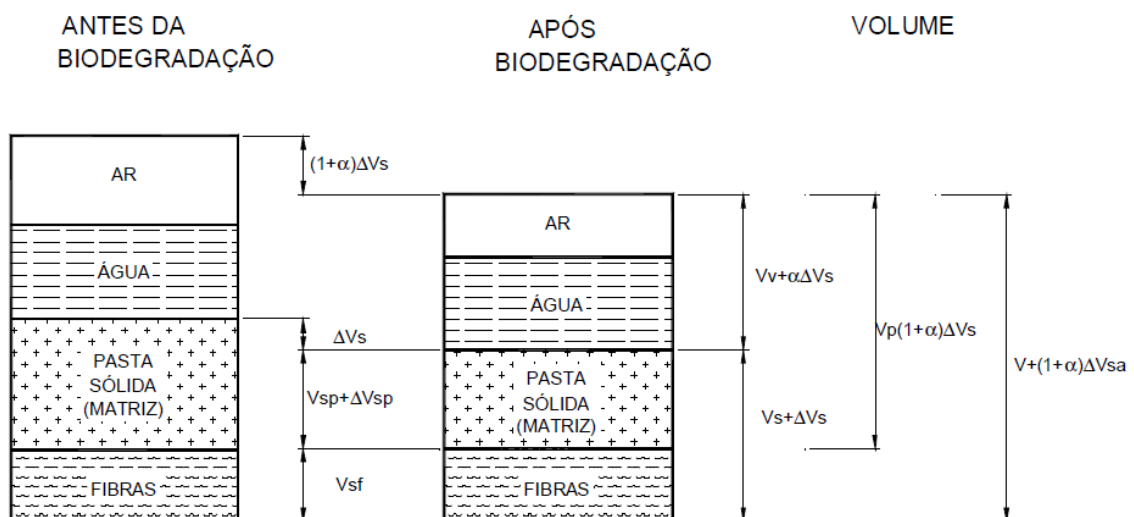


Figura 2.6 - Efeito da perda de massa dos RSU (Schuler, 2010 adaptado de Machado *et al.*, 2009).

### 2.2.1 Gravimetria dos Resíduos Sólidos Urbanos

Por muitas vezes, a composição gravimétrica do RSU é um reflexo do nível de renda da população. Em regiões mais ricas, é esperado um menor percentual de material orgânico tendo em vista o grande consumo de alimentos semiprontos e processados. Schuler (2010) também cita que variações sazonais afetam as características do RSU, como por exemplo em épocas de chuvas fortes, onde o teor de umidade no lixo tende a crescer. Há diversos fatores que influenciam no tipo e produção dos RSU.

Ao contrário do grande volume ocupado pelos recicláveis, os resíduos orgânicos têm como principal característica a rápida degradação. De acordo com os dados do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA) de 2012, o Brasil possui 51,4% de orgânicos na composição gravimetria dos resíduos sólidos coletados, seguido de 31,9% de material reciclável. De acordo com o Plano Distrital de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos do Distrito Federal (PDGIRS), 48,34% dos resíduos sólidos domiciliares gerados no Distrito Federal são resíduos orgânicos (Figura 2.7). O alto teor de resíduos orgânicos em aterros sanitários influencia diretamente na produção de gases, além do chorume. De acordo com Jucá (2003), a biodegradação da matéria orgânica influencia também nas propriedades de resistência e compressibilidade do lixo.

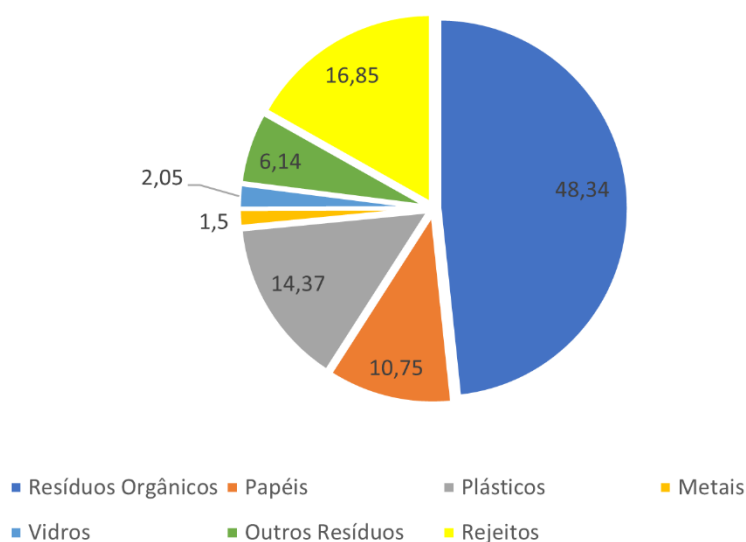


Figura 2.7 - Gráfico da composição gravimétrica dos resíduos sólidos domiciliares produzidos no Distrito Federal – resultados médios da coleta convencional no DF (PDGIRS, 2018).

Além do mais, no Brasil e no mundo, é possível notar uma relação da renda e evolução da geração *per capita* de resíduos sólidos – principalmente quando se trata da fração orgânica, onde o desenvolvimento econômico implica em maior consumo de alimentos processados e semiprontos, descartáveis, embalagens, etc., o que diminui o percentual de material de origem orgânica no resíduo gerado da parcela mais rica da população (COMLURB, 2005).

### 2.2.2 Caracterização Granulométrica

A análise da distribuição do tamanho da partícula é definida através de peneiras com diâmetros diferenciados, que são padronizadas com as mesmas análises granulométricas utilizadas na Mecânica dos Solos. Jucá (2003) cita que os resíduos sólidos podem ser modelados como um material composto de duas componentes (Figura 2.8):

- Uma matriz básica compreendida pelas partículas de granulometria fina a média que apresentam comportamento de atrito – constituída por materiais inertes estáveis e pela maioria dos materiais facilmente biodegradáveis; e
- Uma matriz de reforço contendo os componentes fibrosos do lixo – constituída por materiais bastante deformáveis.

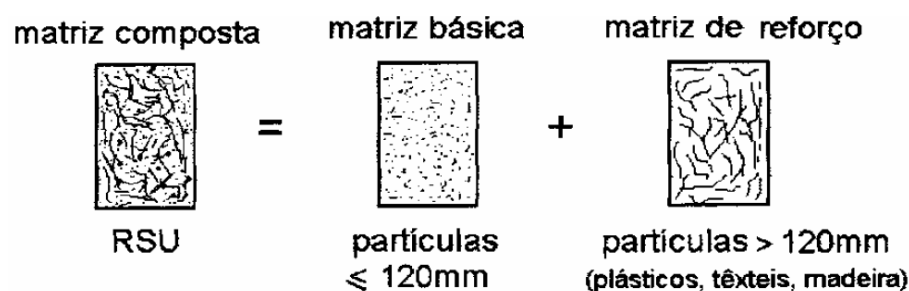


Figura 2.8 - Modelo esquemático da composição de RSU (Jessberger *et al.*, 1995).

A sistemática de determinação da dimensão e distribuição das partículas do resíduo sólido urbano é limitada, fase a grande heterogeneidade e variedade desses resíduos (SANTOS & PRESA, 1995). De acordo com Carvalho (1999), a fração mais fina do RSU aumenta com a idade do RSU, como resultado da biodegradação do material orgânico. A Figura 2.9 apresenta curvas granulométricas de resíduos sólidos urbanos com idade variando entre 8 meses e 15 anos.

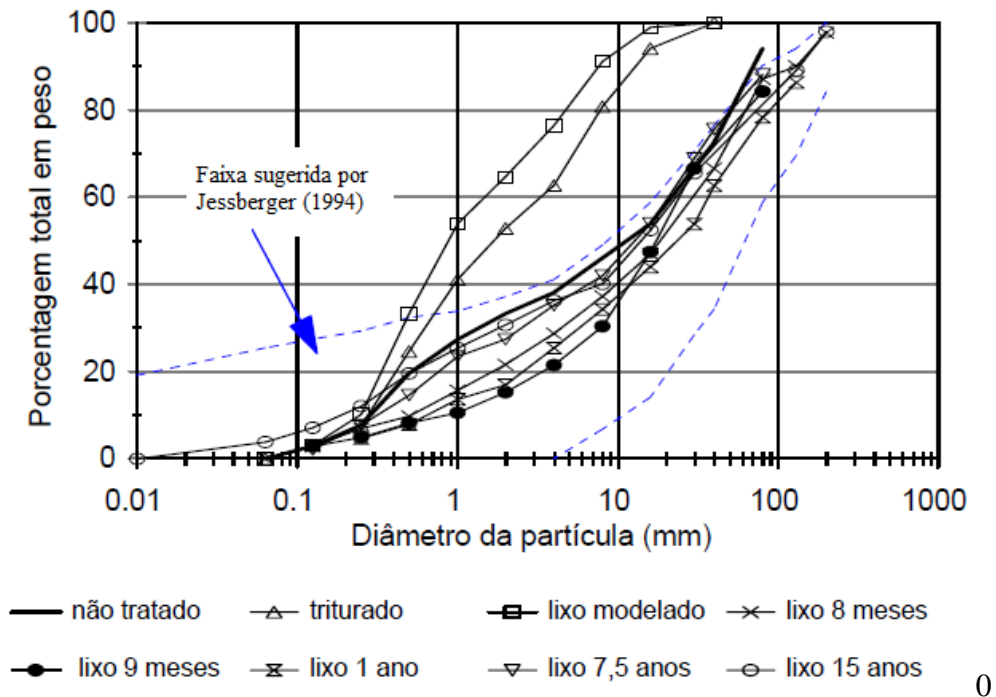


Figura 2.9 - Curva de distribuição do tamanho das partículas do RSU (Carvalho, 1999 adaptado de Jessberger, 1994).

### 2.2.3 Massa Específica

A massa específica dos resíduos sólidos urbanos é influenciada por diversos fatores, destacando-se a composição gravimétrica, distribuição granulométrica, grau de compactação, grau de saturação, idade do resíduo e a profundidade em que se encontra aterrado (BOSCOV, 2008).

O estudo do comportamento mecânico de qualquer material aterrado torna-se incoerente caso não seja conhecido sua massa específica. Para variação do peso específico, Kavazanjian *et al.* (1995) cita que o aumento desta variável está relacionado com o aumento da profundidade devido à bioconsolidação do RSU com o tempo e à compressão devido à sobrecarga. Como observado na Figura 2.10, a partir de profundidades superiores a 40 – 45 metros, tem-se um pequeno aumento do peso específico com a profundidade.



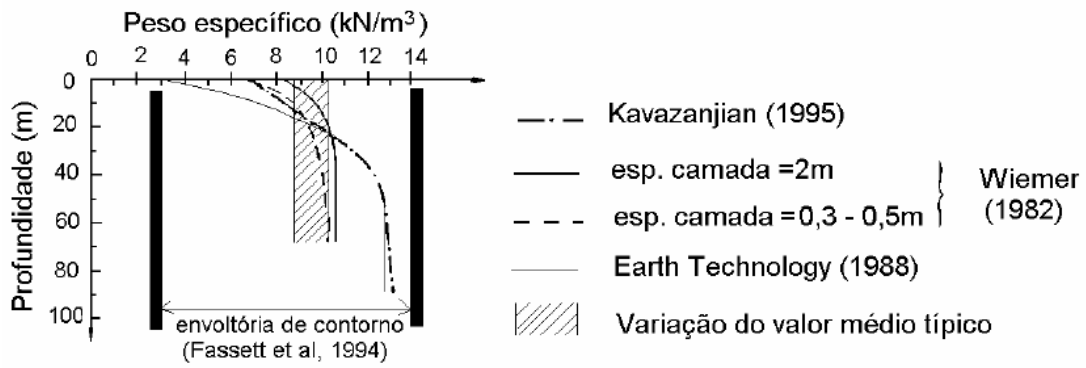


Figura 2.10 - Peso específico para o resíduo sólido urbano (Carvalho, 1999 adaptado de Kavazanjian *et al.*, 1995).

Não só a profundidade, como a percentagem de matéria orgânica na massa de lixo também influencia em um maior peso específico, como mostrado por De Lamare Neto (2004), que ao analisar a composição gravimétrica de resíduo sólido proveniente de várias regiões da cidade do Rio de Janeiro, constatou que para regiões mais pobres os resíduos apresentavam maior peso específico que o gerado nas porções mais nobres da cidade. Na entrada de Aterros Sanitários, é realizado a medida da massa específica de RSU presente nos caminhões e carretas.

Segundo Konic e Jessbenger (1997), os pesos específicos obtidos para os resíduos sólidos urbanos aterrados apresentam uma ampla faixa de variação, indo desde valores baixos como  $3\text{kN/m}^3$ , para aterros não compactados a pobremente compactados, até valores como  $17\text{kN/m}^3$ , para aterros com alto grau de compactação. Na Tabela 2.1 são apresentados alguns valores de pesos específicos de RSU. Há uma grande variação dos resultados devido às diferenças de procedimento na compactação, diferenças na composição dos resíduos e diferentes épocas dos estudos e regiões.

Tabela 2.1 - Peso específico de alguns aterros de RSU não pré-tratados (Calle, 2007).

<b>Autor</b>	<b>Peso Específico (kN/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Observações</b>
Merz & Stone (1962)	2,2 a 2,7	Não compactado
Sowers (1968)	4,7 a 9,4	Compactado
Schomaker (1972)	2,8 a 8,8	Não compactado à bem compactado
Bromwell (1978)	3,1 a 9,3	Não compactado à bem compactado
Ham <i>et al.</i> (1986)	6,6	Compactado
Sargunan <i>et al.</i> (1986)	5,5 a 6,9	Pouco Compactado
Landva & Clark (1986)	6,8 a 16,2	Compactado
Watts & Charles (1990)	5,9	Londres, resíduo <i>in situ</i> compacto
Oweis & Khera (1990)	6,3 a 9,4	Compactado
Sharma <i>et al.</i> (1990)	7,2	Sem relatos sobre compacidade
Galante <i>et al.</i> (1991)	9,9 a 10,9	Compactado
Richardson & Reynolds (1991)	15	Sem relatos sobre compacidade
Fassett <i>et al.</i> (1994)	3,0 a 9,0	Não compactado
	5,0 a 8,0	Medianamente compacto
	9,0 a 10,5	Compactado
Vam Impe (apud Manassero <i>et al.</i> 1996)	5,0 a 10,0	Bélgica
Jessberger (1997)	3,0 a 17,0	-
Hendron <i>et al.</i> (1999)	9,1	Bogotá – Aterro de Doña Juana
Zomberg <i>et al.</i> (1999)	10,0 a 15,0	Sem relatos sobre compacidade
Kavazanjian (2001)	10,0 a 20,0	USA – Azusa (aumenta com a profundidade)
Gotteland <i>et al.</i> (2001)	10	França – Montech, Tarn
Jasem (2002)	5,8	Kuwait, <i>in situ</i>
Carvalho (2002)	11,7	Brasil – Santo André/SP. Ensaio de campo – percâmetro
Silveira (2004)	14,8 a 12,2	Brasil – Paracambi/RJ. Ensaio de campo – cava e percâmetro
	18,2	Brasil – Gramacho/RJ. Ensaio de campo – cava
	9,15	Brasil – Nova Iguaçu/RJ. Ensaio de campo - cava

#### 2.2.4 Umidade

O teor de umidade do RSU depende da composição inicial do material, das condições climáticas locais, do processo de operação dos aterros, da taxa de decomposição biológica,

da capacidade e funcionamento dos sistemas de coleta de líquidos percolados e do sistema de *liner* de recobrimento (Carvalho, 1999). A Figura 2.11 apresenta os resultados de Jucá *et al.* (1997) e compara os dados encontrados por Gabr e Valero (1995). Os resultados de umidade obtidos e apresentados por Jucá *et al.* (1997) por meio de ensaios de SPT no aterro da Muribeca (PE) mostra teores de umidades em profundidade variando entre 20 a 50%.

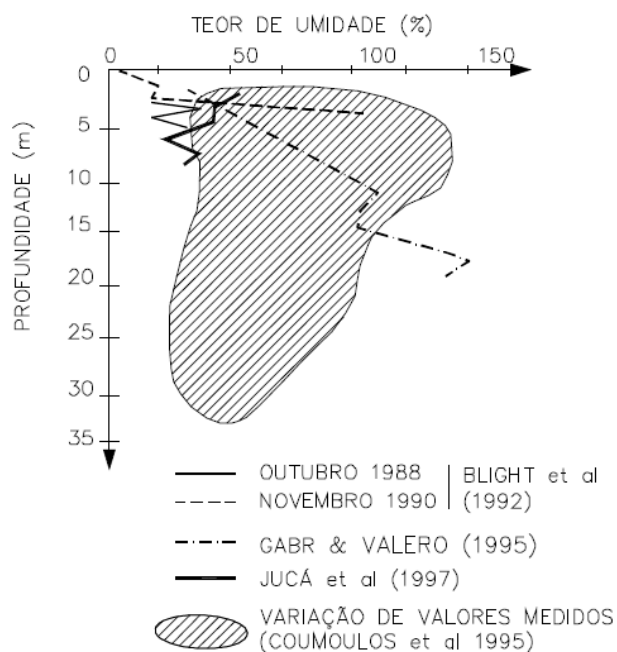


Figura 2.11 - Variação do teor de umidade dos RSU com a profundidade (Jucá *et al.*, 1997).

Gabr e Valero (1995) verificaram que para teores de umidade entre 55% e 70%, os valores de coesão aparente podem sofrer reduções consideráveis passando de cerca de 100 kPa para 40 kPa (Figura 2.12). Estes resultados revelam um aspecto importante a considerar sobre a influência do teor de umidade no comportamento mecânico do maciço, visto que o valor da coesão aparente do RSU varia em função do teor de umidade.

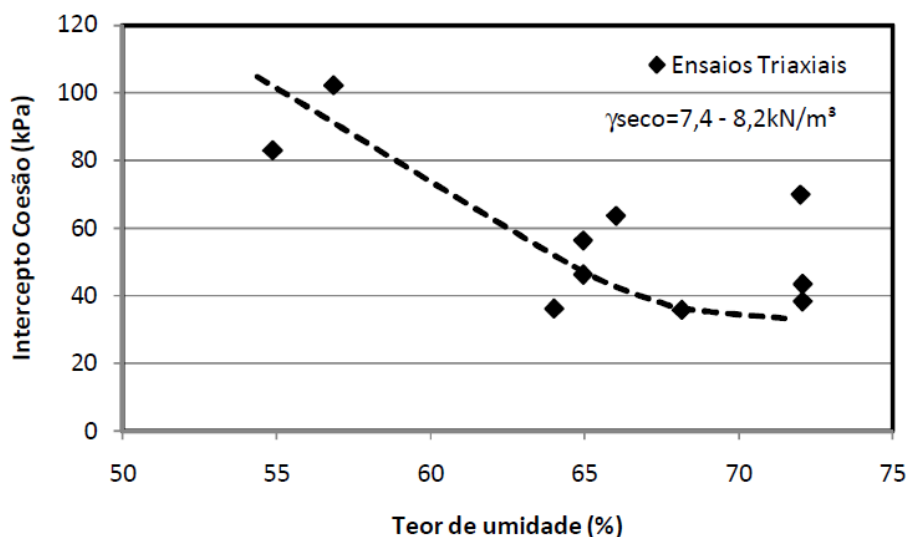


Figura 2.12 - Variação da coesão aparente com a umidade (Gabr e Valero, 1995).

### 2.2.5 Temperatura

A temperatura é um parâmetro que implica balanços energéticos nos processos biodegradativos. Em geral, respeitando determinados limites, menor temperatura irá implicar e uma menor atividade e menor taxa de conversão do material orgânico presente nos RSU através da ação bioquímica de microrganismos (ALCANTARA, 2007). Em suma, é importante conhecer a temperatura no interior de aterros sanitários de forma a entender tais processos de degradação.

As medidas de temperatura têm influência em questões sazonais, tanto como o clima como também o período do ano em que foi feita a medição. Um estudo realizado no aterro Ano Liossia, na Grécia, mostrou valores entre 40 e 60°C a pequenas profundidades e entre 5 a 15°C a grandes profundidades (COUMOULOS *et al.*, 1995). No aterro da Muribeca, em Recife, Mariano e Jucá (1998) também apresentaram graus de temperatura elevados na faixa de profundidade inicial, entre 40 a 57°C. A Figura 2.13 faz uma comparação dos resultados encontrados pelos autores em diferentes localizações. De acordo com Camoulous *et al.* (1995), essa variação de temperatura que ocorre devido à profundidade se dá principalmente pela concentração de oxigênio próximo a superfície, que acelera o processo de degradação liberando maior quantidade de energia na forma de calor.

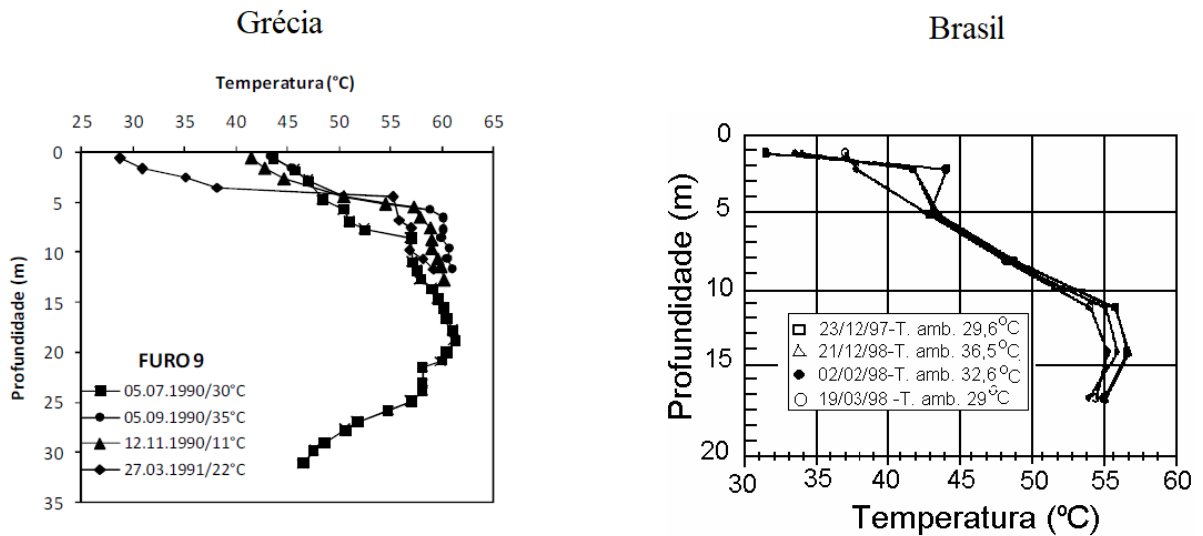


Figura 2.13 - Variação da temperatura do RSU com a profundidade, comparação Grécia e Brasil (Coumoulos *et al.*, 1995 adaptado por Mariano e Jucá, 1998).

### 2.2.6 Permeabilidade

O coeficiente de permeabilidade do resíduo é um importante parâmetro projetual na operação de aterros sanitários. É importante que se tenha a permeabilidade de RSU para a concepção dos sistemas de drenagem de um aterro sanitário. A permeabilidade é normalmente avaliada por meio de ensaios de laboratório e ensaios *in situ*, executados em trincheiras e poços escavados de grande diâmetro ou em furos de sondagem (Carvalho, 1999). A dispersão de valores obtidos em ensaios de infiltração está relacionada, em grande parte, com a heterogeneidade dos resíduos sólidos urbanos e à efeito de bloqueio do fluxo dos componentes plásticos, que tem efeito considerável sobre a permeabilidade (Schuler, 2010).

Calle (2007) fez uma comparação entre aterros sanitários e suas permeabilidades, apresentando coeficientes que variam, normalmente, entre  $10^{-3}$  m/s a  $10^{-5}$  m/s, o qual é compatível com os valores obtidos para areais finas e siltes. Já em Carvalho (1999), a faixa média de coeficiente de permeabilidade citada é entre  $10^{-4}$  m/s a  $10^{-6}$  m/s, valor que ainda é compatível para materiais mais finos. Ambos os autores chegam em valores muito próximos (Tabela 2.2), o que pode indicar um padrão para valores de coeficiente de permeabilidade nos resíduos sólidos de um aterro sanitário.

Tabela 2.2 - Coeficientes de permeabilidade de aterros sanitários (Calle, 2007).

<b>Autor</b>	<b>Análise</b>	<b>Coeficiente de Permeabilidade (cm/s)</b>	<b>Observações</b>
Fungaroli <i>et al.</i> (1979)	Lisímetro	$1 \times 10^{-3}$ a $2 \times 10^{-3}$	Resíduos Triturado
Koriaties <i>et al.</i> (1983)	Laboratório	$5,1 \times 10^{-3}$ a $3,2 \times 10^{-3}$	-
Oweis & Khera (1986)	Ensaio de campo	$1 \times 10^{-3}$	-
Oweis (1990)	Ensaio de campo	$1,5 \times 10^{-4}$	Carga Variável
Massanero (1990)	Ensaio em poço	$1,5 \times 10^{-3}$ a $2,6 \times 10^{-2}$	Ensaio de Bombeamento (15-20m)
Brandl (1990)	Ensaio de campo	$2 \times 10^{-3}$ a $7 \times 10^{-4}$	Com. com rolo. ens. de carga variável
Landva & Clark (1990)	Ensaio em poço	$1 \times 10^{-3}$ a $4 \times 10^{-2}$	-
Cepollina <i>et al.</i> (1994)	Ensaio em poço	$1 \times 10^{-5}$	Aterro Bandeirantes/SP
Brandl (1994)	Laboratório	$2 \times 10^{-4}$ a $3 \times 10^{-3}$	Compacto
Ehrlich <i>et al.</i> (1994)	Ensaio de campo	$1 \times 10^{-3}$	Gramacho/RJ – Fluxo horizontal
Beaven & Powrie (1995)	Laboratório	$1 \times 10^{-5}$ a $1 \times 10^{-4}$	Pressão conf. de 0 a 600kPa
Gabr & Valero (1995)	Laboratório	$1 \times 10^{-5}$ a $2 \times 10^{-3}$	-
Blengino <i>et al.</i> (1996)	Ensaio de campo	$3 \times 10^{-5}$ a $3 \times 10^{-4}$	Ens. car. var. em furos (30-40m)
Santos (1998)	Ensaio de campo	$1 \times 10^{-5}$	Muribéca/PE furos de sondagem
Mahler & Aguilar (2001)	Perm. Guelph	$4,73 \times 10^{-2}$	Jacarepaguá/RJ
Carvalho (2002)	Ensaio de campo	$9,48 \times 10^{-4}$	Santos André/SP

### 2.2.7 Resistência ao Cisalhamento

As principais propriedades mecânicas a serem consideradas para o estudo da estabilidade de taludes de resíduos são a compressibilidade e a resistência ao cisalhamento. Por sua vez, estas propriedades sofrem influências das variações ocorridas dentro de um maciço em função da decomposição, da idade do resíduo, condições de estocagem, drenagem, entre outras (KNOCHENMUS *et al.*, 1998).

Em um aterro sanitário, materiais como plásticos, papéis, pedaços de madeira, entre diversos outros, passam a desempenhar um papel de reforço. Por isso, o aumento das deformações pode ser explicado pela degradação destes materiais ao longo do tempo, impactado também na resistência dos resíduos sólidos urbanos.

A resistência ao cisalhamento do RSU é usualmente determinada por meio de ensaios in situ, ensaios de laboratório (triaxiais, cisalhamento direto) e retroanálises de dados de campo. A Figura 2.14 apresenta uma relação entre coesão aparente e ângulo de atrito de

resíduos sólidos urbanos. Tais resultados foram obtidos em ensaios de laboratório e retroanálises, sendo propostas envoltórias por Singh e Murphy (1990) e Oweis e Khera (1990). Observa-se que quanto maior o ângulo de atrito, menor tende ser a coesão aparente.

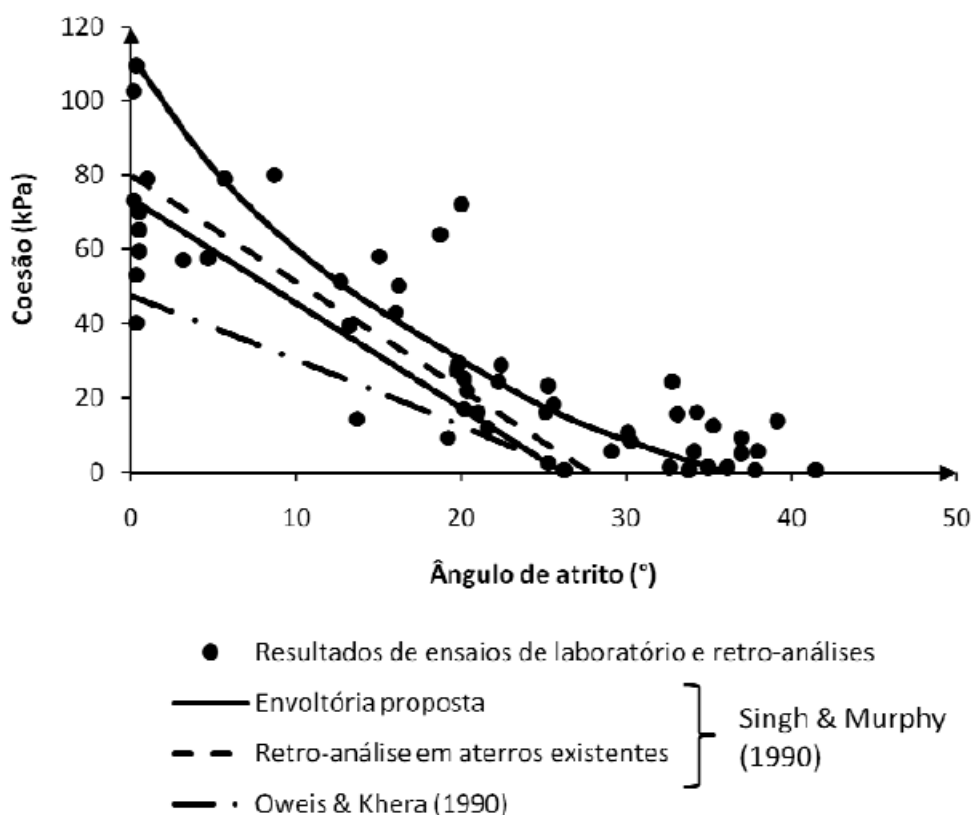


Figura 2.14 - Relação entre coesão aparente e ângulo de atrito do RSU (Singh e Murphy, 1990 adaptado por Wojnarowicz *et al.*, 1998).

Kölsch (1993) propôs um modelo que relaciona tensão de cisalhamento e deformação (Figura 2.15). O autor cita que os materiais fibrosos (plásticos, panos/trapos etc.), presentes na composição do lixo seriam capazes de criar forças de tração que dependeriam do vínculo das fibras com a massa do lixo, isto é, seriam função da tensão normal atuante. Com isso, podemos dizer que a resistência ao cisalhamento seria composta por duas parcelas distintas:

- Parcela 1: refere-se às forças de atrito no plano de cisalhamento; e
- Parcela 2: refere-se às forças de tração das fibras ou coesão aparente devido às fibras.

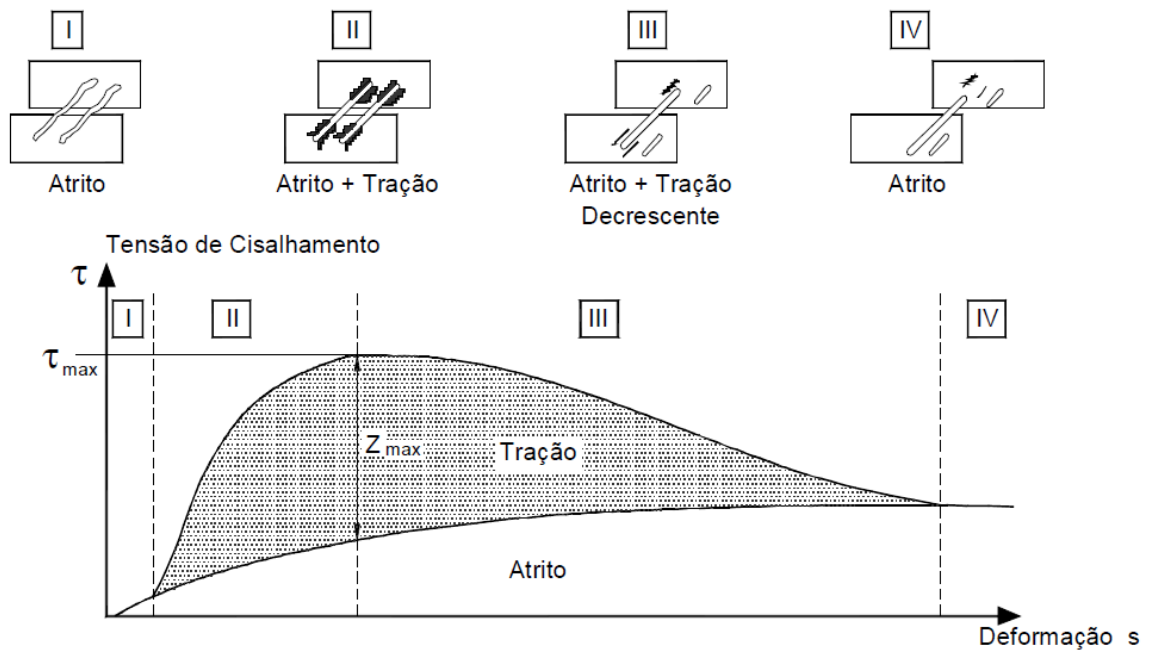


Figura 2.15 - Curva tensão x deformação do RSU (Kölsch, 1993).

De acordo com Schuler (2010), ao analisar da esquerda para direita, podemos ver que na Fase 1, onde há uma pequena deformação, existe apenas a mobilização das forças de atrito – a tração das fibras é nula. À medida que as deformações vão aumentando, há o início da Fase 2, onde as fibras começam a ser tracionadas até atingir um valor máximo ( $\tau_{max}$ ) que corresponde à resistência a tração ou vínculo das fibras com a massa do lixo. Ao atingir seu valor máximo, ocorre o início da Fase 3, onde ainda há um aumento da deformação, entretanto, a parcela começa a sofrer uma tração decrescente até atingir sua etapa, a Fase 4, onde novamente vemos a resistência ao cisalhamento em função apenas do atrito. Por fim, a Tabela 2.3 apresenta um resumo das análises de tração.

Tabela 2.3 - Análise da tração de acordo com a fase.

Fase	Análise
1	Tração nula
2	Tração crescente
3	Tração decrescente
4	Tração nula



Vale lembrar que a contribuição de cada uma dessas parcelas na resistência ao cisalhamento do RSU varia de acordo com a tensão normal atuante, além naturalmente da deformação. Sabe-se que, das variações dos parâmetros de resistência ao longo do tempo, a que é mais marcante é a coesão aparente. Conforme o passar do tempo, as fibras tornam-se menos resistentes, o que é coerente devido à degradação de sacolas plásticas e demais fibras contidas nos RSU (Mahler *et al.*, 1998).

A Tabela 2.4 apresenta os valores de parâmetros de resistência ao cisalhamento, coesão e o ângulo de atrito, e pesos específicos coletados por Norberto *et al.* (2020) da literatura entre os anos de 1978 a 2018. Os dados apresentados incluem dados obtidos com diferentes técnicas experimentais, como ensaios, retroanálises e, em alguns casos, valores estimados.

Tabela 2.4 - Parâmetros geotécnicos de aterros de Resíduos Sólidos Urbanos - RSU de diversas literaturas. Fonte: Modificado por Norberto *et al.* (2020), de Strauss (1998), Silveira (2004), Borgatto (2010) e Remédio (2014).

$\gamma$ ( $\text{kN/m}^{-3}$ )	c (kPa)	$\Phi$ (°)	Tipo de resíduo e/ou ensaio	Referência Bibliográfica
-	40,5	13,2	Prova de Carga <i>in-situ</i>	Converse, Davis & Dixon Associates (1975 em Gabr & Valero, 1995)
13	7	38	Resíduo Municipal	Gay <i>et al.</i> (1978)
10	0	35	Resíduos municipais estimados por observação de campo	Cassina (1979)
9	10	16	Retro análise de deformações por cargas induzidas	Spillmann (1980)
11,5	7	42	Cisalhamento direto. Resíduos com 9 meses de decomposição	Gay <i>et al.</i> (1981)
9,5	28	26,5	Cisalhamento direto. Resíduos municipais novos	Gay <i>et al.</i> (1981)
-	37		Retro análise conservadora, baseada em Converse <i>et al.</i> (1975)	Cooper & Clark (1982 em Gabr & Valero, 1995)
-	24	21,5	Valores recomendados de cálculo	Landva <i>et al.</i> (1984)
-	23	24	Cisalhamento direto. Resíduos novos	Landva <i>et al.</i> (1984)
-	16	38	Cisalhamento direto	Landva <i>et al.</i> (1984)
-	0	38	Cisalhamento direto drenado. 61,5 mm diâmetro X 25,4 mm espessura	LA Country Sanitation District (1984)

$\gamma$ ( $\text{kN/m}^{-3}$ )	c (kPa)	$\Phi$ (°)	Tipo de resíduo e/ou ensaio	Referência Bibliográfica
-	35	13,8	Retro análise conservadora, baseada em Converse <i>et al.</i> (1975)	EMCON (1986 em Gabr & Valero, 1995)
-	34		Retro análise conservadora, baseada em Converse <i>et al.</i> (1975)	Cooper Enginerrrs (1986 em Gabr & Valero, 1995)
-	17	19,9	Retro análise conservadora, baseada em Converse <i>et al.</i> (1975)	EMCON (1987 em Gabr & Valero, 1995)
7	-	-	Resíduos novos não decompostos e pouco compactados	Kaumoto & Cepolina, (1987)
11,5	-	-	Resíduos após a compactação	
-	27	19,6	Retro análise conservadora, baseada em Converse <i>et al.</i> (1975)	Harding-Lawson & Assoc (1987 em Gabr & Valero, 1995)
-	21	20	Retro análise conservadora, baseada em Converse <i>et al.</i> (1975)	Dames & More (1988 em Gabr & Valero, 1995)
-	23,5	20,2	Retro análise conservadora, baseada em Converse <i>et al.</i> (1975)	EMCON (1989 em Gabr & Valero, 1995)
-	15	33	Cisalhamento direto drenado. 419 mm x 287 mm	Landva & Clark (1990 em Gabr & Valero, 1995)
-	19	39	Cisalhamento direto drenado. 419 mm x 287 mm	Landva & Clark (1990 em Gabr & Valero, 1995)
-	12	35,2	Cisalhamento direto drenado. 419 mm x 287 mm	Landva & Clark (1990 em Gabr & Valero, 1995)
13	13,5	22	Resíduos sólidos antigos	Benvenuto & Cunha (1991)
15	10	30,5	Cisalhamento direto <i>in-situ</i>	Richardson & Reynolds (1991) em Kavazanjim <i>et al.</i> (1995)
10	-	-	Condição drenada	Benvenuto & Cunha (1991)
13	-	-	Condição saturada	
10	15	30	Ruptura do Aterro de Bandeirantes – SP	Bandeirantes (1991)
5	16	21	Cisalhamento direto. Dois fardos de 400 X 500 X 600 mm	Del Greco & Oggeri (1994)
7	24	22	Cisalhamento direto. Dois fardos de 400 X 500 X 600 mm	Del Greco & Oggeri (1994)
-	10	30	Cisalhamento direto drenado. 1,5m X 1,5m – em campo	Withiam <i>et al.</i> (1995)

$\gamma$ ( $\text{kN/m}^{-3}$ )	c (kPa)	$\Phi$ (°)	Tipo de resíduo e/ou ensaio	Referência Bibliográfica
11,05	24	32,7	Cisalhamento direto drenado. 63,5 mm diâmetro X 23 mm espessura	Gabr & Valero (1995)
7,3	16	35	Triaxial CU (c/medidas de w/u)	Gabr & Valero (1995)
8	-	-	Resíduos Saturados	Gabr & Valero (1995)
7	-	-	Resíduos Novos	Santos & Presa (1995)
10	-	-	Resíduos após a ocorrência de recalques	
10	0,5	27	Resíduo municipal	Blengimo <i>et al.</i> (1996)
-	16	28	Retro análise de ruptura no aterro de Bandeirantes (1991) Resíduos novos	Kaimoto & Cepollina (1996)
-	16	22	Retro análise de ruptura no aterro de Bandeirantes (1991) Resíduos antigos – boa drenagem	Kaimoto & Cepollina (1996)
-	13,5	22	Retro análise de ruptura no aterro de Bandeirantes (1991) Resíduos antigos – má drenagem	Kaimoto & Cepollina (1996)
7,5	0	35	RSU novos	Strauss (1998)
7,5	0	31	RSU antigos	
10,5	-	-	Sítio São João com 10 meses de alteamento	Mahler & Iturri (1998)
-	40	35	Aterro municipal	Eid <i>et al.</i> (2000)
-	25	35	-	
-	25	31,5	Aterro municipal	Pelky <i>et al.</i> (2001)
-	23	46	Resíduos degradados	Kavazanjian (2001)
15	-	-	EUA	Kavaza & Nijian (2001)
7	2	35	Aterro de Canabrava – BA	Oliveira (2002)
-	39,2	29	Resíduo natural, com tensão de 20%	Vilar & Carvalho (2002)
9	-	-	Aterro Sanitário	Catapreta <i>et al.</i> (2005)
11,5	-	-	Portugal	Gomes <i>et al.</i> (2005)
10,87	-	-	Ensaio Percâmetro, Santo André – SP	Carvalho (2006)
12,1	-	-	Aterro com Resíduos Degradados	Bauer (2006)
11	-	-	Mohawk landfill, NY	Harris <i>et al.</i> (2006)
7	10	28	Aterro Sanitário	Ribeiro (2007)
-	30	30	Cisalhamento a tensão > 200 kPa	Stark <i>et al.</i> (2009)
-	47,5	28	Resíduos novos	Reddy <i>et al.</i> (2009)
-	38	16	Resíduos novos	

$\gamma$ ( $\text{kN/m}^{-3}$ )	c (kPa)	$\Phi$ (°)	Tipo de resíduo e/ou ensaio	Referência Bibliográfica
-	40	28	Cisalhamento direto – RSU decomposto	Reddy <i>et al.</i> (2011)
-	21	8	Cisalhamento direto – RSU recente	
5	10	28	Prova de carga de talude	
11	13,5	22	Aterro Sanitário de São Paulo	Suzuki (2012)
-	20	25	Aterro Sanitário – China	Mohurd (2012)
15	15	35	-	Xu <i>et al.</i> (2012)
	48	34	Correlação de sondagens SPT de aterros	Remédio (2014)
		35		
11,3	18,24	32,27	Aterro Sanitário – China	Babu <i>et al.</i> (2015)
15	15	35	Resíduos municipais biodegradados	Giri & Reddy (2014)
9,2	16	40,1	Cisalhamento de grande escala – composto básico de resíduo	
7,65	34,7	34,7	Cisalhamento de grande escala – composto básico de resíduo + 20% de fibras	Fucale <i>et al.</i> (2015)
9,7		48,1	Cisalhamento de grande escala – composto básico de resíduo + 10% de fibras	
10,2	14,1	33	-	Hong-Jun (2015)
11	1,3	36,8	Aterro de João Pessoa – cisalhamento direto com 0% de fibras	
11	10	33,5	Aterro de João Pessoa – cisalhamento direto com 15% de fibras	GRS (2016)
11	25	29,1	Aterro de João Pessoa – cisalhamento direto com 30% de fibras	
13	30	15		
13	25	20	Aterro Sanitário – China	Fan <i>et al.</i> (2016)
13	20	25		
10	5	30	Aterro Sanitário – Índia	Ering & GL (2016)
12	14	34	-	Jahanfar <i>et al.</i> (2018)

## 2.2.8 Compressibilidade

Diferentemente dos maciços de solos compactados, os aterros sanitários são constituídos por diferentes tipos de resíduos que, quando depositados, interagem formando um maciço heterogêneo e poroso. Cada um desses diferentes tipos de materiais, que estão entre os resíduos de um aterro sanitário, tem uma degradação distinta com o passar do tempo, além de uma compressibilidade diferente devido à sobrecarga.

O resíduo que é depositado em um aterro sanitário se transforma devido à ação integrada de processos físico-químicos e biológicos. Sabe-se que a degradação biológica ocorre sob duas condições: a aeróbia (presença de oxigênio) e a anaeróbia (sem a presença de oxigênio). A transformação aeróbia é a mais rápida e a anaeróbia é a mais lenta, sendo a primeira ocorrendo nas camadas mais próximas do solo e a outra nas camadas mais profundas.

Tapahuasco (2005) ao avaliar os recalques de células experimentais construídas no antigo Aterro do Jockey de Brasília (antigo lixão) com diferentes materiais para camada de cobertura (argila compactada e entulho de construção), constatou que, como esperado, as células cobertas com entulho apresentaram maiores deslocamentos verticais que os observados nas células cobertas com a argila compactada. Grisolia e Napoleoni (1996) propuseram uma curva teórica subdividida em fases, capaz de explicar os mecanismos controladores do recalque em depósitos de RSU, como apresentado na Figura 2.16.

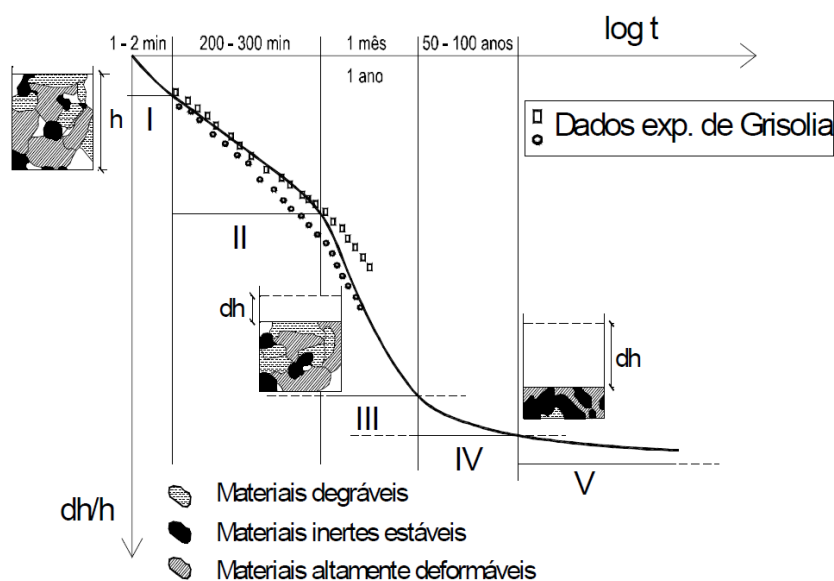


Figura 2.16 - Curva Teórica de compressibilidade do RSU (Grisolia & Napoleoni, 1996 adaptado por Schuler, 2010).

As fases representadas podem assim ser descritas:

- Fase I – Deformação inicial, redução da macroporosidade;
- Fase II – Recalque residual dos materiais altamente deformáveis;
- Fase III – Deformação lenta e decomposição da matéria orgânica;
- Fase IV – Deformação concluída; e
- Fase V – Deformação residual.

Schuler (2010) cita que em função da degradação biológica da matéria orgânica presente no lixo, a fase líquida acaba contribuindo para a redução de volume do maciço, uma vez que, inicialmente há a conversão de material sólido em líquido, e este por sua vez desloca-se, aumentando a porosidade do meio. Em segundo lugar, ao percolar, este líquido acaba indo para vazios maiores, fazendo com que haja uma redução do volume de água contido nos vazios que ocupavam anteriormente, assim provocando o adensamento do solo e conseqüentemente, no pior dos casos, o recalque da camada.

### **2.3 CONDIÇÃO DE EQUILÍBRIO DE ATERROS SANITÁRIOS**

O comportamento mecânico do aterro sanitário está associado às características dos resíduos sólidos urbanos (RSU) e do terreno de fundação, ao projeto concebido e à influência das condições ambientais. Na Geotecnia Ambiental, ao tratar da gravimetria dos resíduos sólidos, tem-se um leque de diversidade de materiais envolvidos e, associado a isso, diferentes propriedades e comportamentos. Dentro desse contexto é possível inserir os problemas de estabilidade dos taludes, da capacidade de carga e os recalques nos aterros, que são controlados pelas propriedades de resistência e compressibilidade do lixo (Jucá, 2003).

Os problemas de estabilidade são frequentemente conseqüências do excesso de líquidos no aterro de resíduos após grandes precipitações. Em combinação com outras condições de limite, a água é fator de colapso. A infiltração causa a saturação da massa de lixo, diminuindo sua resistência ao cisalhamento e aumentando o peso específico e as pressões hidrostáticas, cuja poro pressão reduz a condição de estabilidade do aterro. Drenos podem ter sua capacidade hidráulica reduzida ao longo do tempo, sofrerem colmatação, terem sua declividade modificada em função de um recalque localizado, criando um ponto de

concentração de chorume e até mesmo sofrerem colapsos. O comprometimento da drenagem subterrânea da massa de RSU é difícil de ser avaliado e afeta muito a estabilidade do aterro, devido a consequente elevação do nível do chorume. Entretanto, com a monitoração piezométrica pode-se identificar problemas com drenos, pois haverá variações piezométricas diferentes das comumente observadas. A variação do nível de chorume também influencia na produção de gases líquidos na massa de RSU. Com isso, a análise de estabilidade de um aterro sanitário envolve questões sobre os parâmetros de resistência, que são influenciados por algumas variáveis, destacando-se o efeito fibra (Tabela 2.5), degradação (Figura 2.17) e as pressões de chorume e gases oriundos dos processos anaeróbicos dos resíduos, cuja infiltração de chuva no aterro apresenta um papel importante. Nesse processo ainda há contribuição dos deslocamentos verticais, resultantes da compressibilidade da massa de RSU.

Tabela 2.5 - Parâmetros geotécnicos de aterros de RSU considerando o efeito de fibra.

$\gamma$ (kN/m <sup>-3</sup> )	c (kPa)	$\Phi$ (°)	Descrição do Ensaio e do Material	Autor
9,2	16	40,1	Cisalhamento de grande escala – composto básico de resíduos	
7,65	34,7	34,7	Cisalhamento de grande escala – composto básico de resíduo + 20% de fibras	Fucale <i>et al.</i> (2015)
9,7		48,1	Cisalhamento de grande escala – composto básico de resíduo + 10% de fibras	
11	1,3	36,8	Aterro de João Pessoa – cisalhamento direto com 0% de fibras	
11	10	35,5	Aterro de João Pessoa – cisalhamento direto com 15% de fibras	GRS (2016)
11	25	29,1	Aterro de João Pessoa – cisalhamento direto com 30% de fibras	

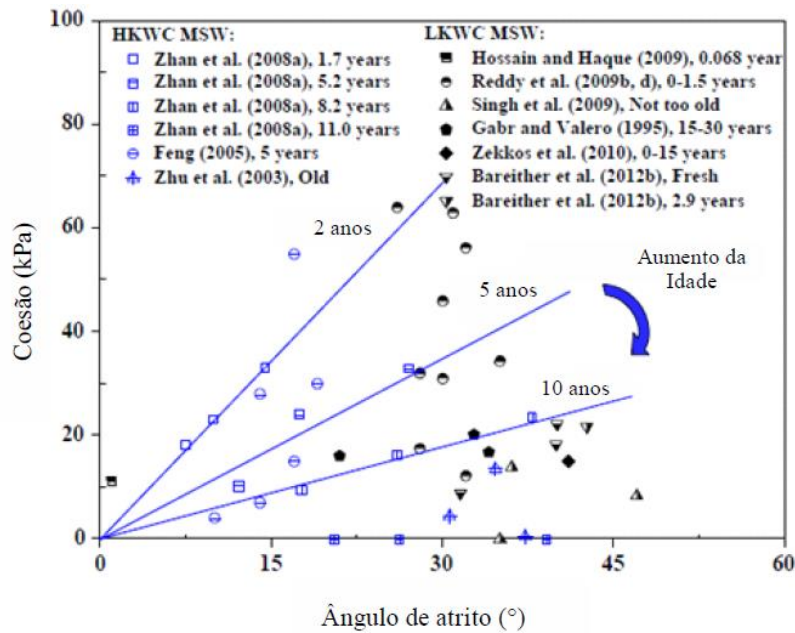


Figura 2.17 - Efeito da degradação nos parâmetros de resistência dos RSU (Gao *et al.*, 2015 adaptado por Daciolo, 2020).

Na Figura 2.17, é apresentado o efeito da degradação dos parâmetros de resistência dos resíduos sólidos urbanos ao longo do tempo. Isso ocorre pois o lixo vai ficando mais inerte, resultando no aumento do ângulo de atrito e, conseqüentemente, na redução da coesão.

## 2.4 ANÁLISE E ESTABILIDADE DE TALUDES

Os métodos de estabilidade de taludes em solo também são aplicados para avaliação da estabilidade de Aterros de Resíduos. Nem sempre é possível prever a forma da superfície sobre a qual ocorrerá a ruptura de uma massa de resíduos. Dixon & Jones (2004) relacionam os possíveis tipos e formas de rupturas que podem ocorrer em aterros de RSU (Figura 2.18). Os métodos podem ser utilizados para analisar as condições de estabilidade de taludes existentes e projetados, ou para retroanalisar casos de ruptura.

A estabilidade de taludes é definida usualmente em termos determinísticos, através de um fator de segurança (FS) que representa a razão entre a resistência disponível e a resistência necessária para manter o equilíbrio. Com base na resistência ao cisalhamento e as tensões cisalhantes desenvolvidas ao longo da superfície de ruptura, é possível obter o Fator de Segurança (FS) como observado na Equação 2.1.



$$FS = \frac{\tau_f}{\tau_{mob}} \quad (2.1)$$

Onde:

- FS = Fator de segurança, onde alcançando-se valores igual a 1,0 tem-se o limite da ruptura, acima de 1,0 considera-se o talude estável, e abaixo de 1,0 não possui significado físico (Schuler, 2010);
- $\tau_f$  = Resistência ao cisalhamento; e
- $\tau_{mob}$  = Tensões cisalhantes desenvolvidas ao longo da superfície de ruptura.

Considerando que o terreno de fundação apresenta boa capacidade de suporte e lençol freático afastado de sua superfície, apresenta-se as informações mínimas que devem ser levantadas para elaboração das análises de um aterro sanitário.

- a) Topografia existente e/ou projetada para o traçado das seções transversais de análise;
- b) Parâmetros do RSU: peso específico, ângulo de atrito e intercepto coesivo;
- c) Variações dos níveis piezométricos; e
- d) Carregamentos externos, para simular o tráfego de tratores e caminhões durante a fase de operação do aterro sanitário.

Segundo GeoRio (2014), nas retroanálises de taludes rompidos sabe-se, a priori, que o fator de segurança, no momento da ruptura, era igual à unidade. Geralmente, busca-se, nesses casos, um conjunto de pares de parâmetros de resistência que corresponda à condição de ruptura. É necessário conhecer ou estimar previamente a topografia no momento da ruptura, a geometria da superfície de ruptura, a estratigrafia, os carregamentos externos e as condições de fluxo no momento da ruptura. Por meio da observação de casos de ruptura ao longo dos anos de 1984 a 1997 (Tabela 2.6) pode-se concluir que há tendência da superfície de ruptura assumir o formato circular ou planar. Entretanto, ressalta-se que as superfícies de ruptura podem ter formato composto, por exemplo, com parte circular e parte planar. Nesses casos, somente se pode prever o formato da superfície crítica testando várias possibilidades com auxílio de programas de computador (GeoRio, 2014).

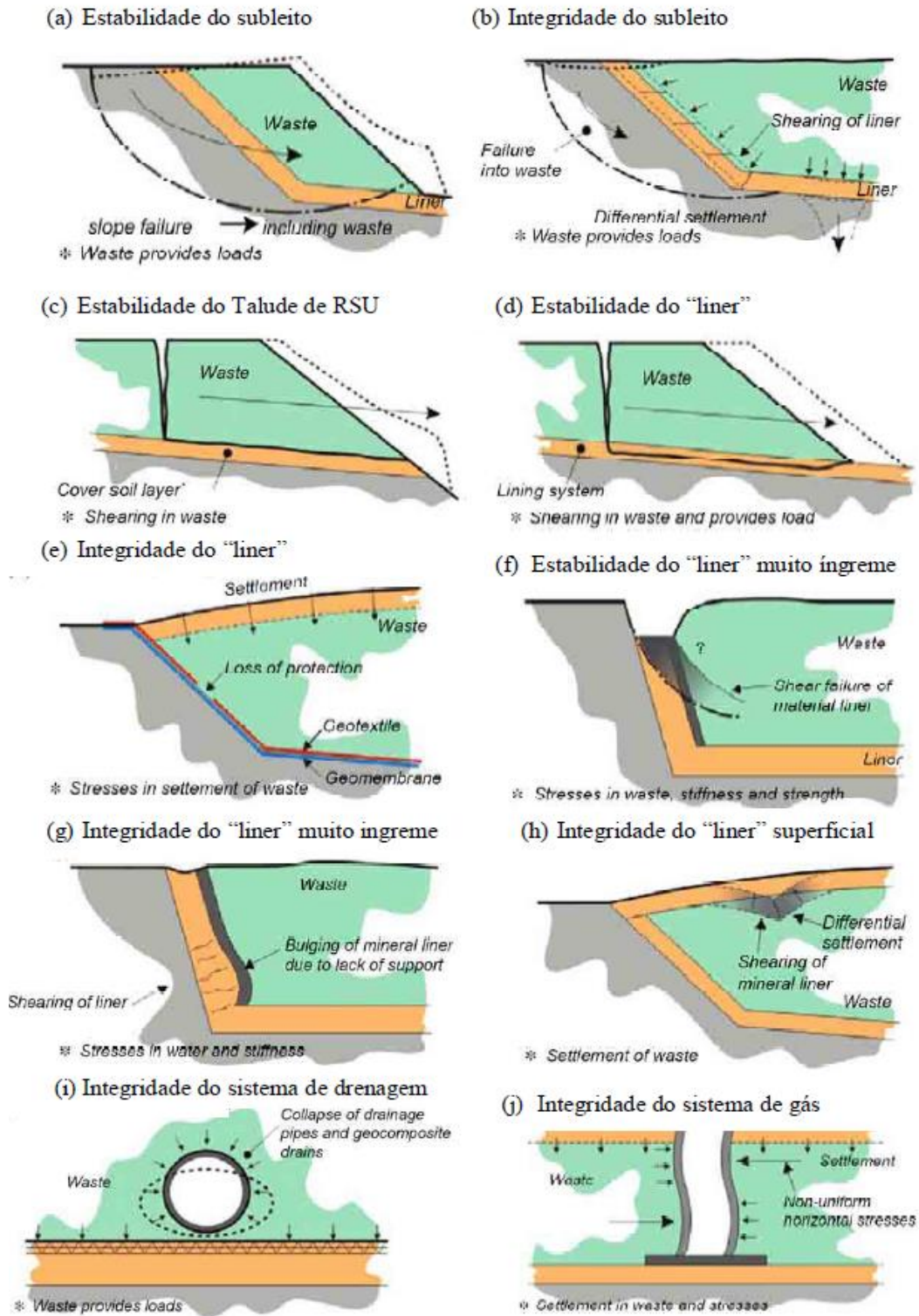


Figura 2.18 - Tipos de rupturas possíveis em aterros de RSU (Dixon & Jones, 2004 adaptado por Schuler, 2010).

Tabela 2.6 – Tipologias de ruptura em massas de RSU (Koerner & Soong, 1999).

Ano	Local	Tipo de Ruptura	Volume Envolvido (m <sup>3</sup> )
1984	América do Norte	Rotacional Simples	110.000
1988	América do Norte	Translacional	490.000
1989	América do Norte	Rotacional Múltiplas	500.000
1993	Europa	Translacional	470.000
1994	Europa	Translacional	60.000
1996	América do Norte	Translacional	1.100.000
1997	América do Norte	Rotacional Simples	100.000
1997	América do Norte	Translacional	100.000
1997	África	Translacional	300.000
1997	América do Sul	Translacional	1.200.000

#### 2.4.1 Método de Análise (GeoRio, 2014)

A prática corrente consiste em considerar o solo como um material rígido-perfeitamente-plástico (Figura 2.19) e submeter o problema a uma análise por equilíbrio limite, ou seja, desconsideram-se as deformações. Admite-se que o solo se comporta como um corpo rígido que pode escorregar sobre uma superfície de geometria conhecida. As análises são determinísticas, isto é, despreza-se a variabilidade natural dos parâmetros e adotam-se valores médios que se presume ser perfeitamente representativos dos solos envolvidos. A resposta da análise é um número adimensional denominado Fator de Segurança (FS), que é o quociente entre a resistência disponível e as solicitações atuantes.

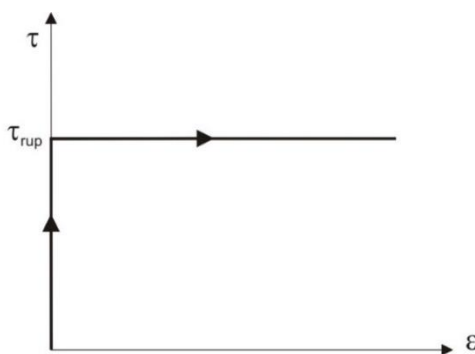


Figura 2.19 - Tensão vs. deformação de um material rígido-perfeitamente-plástico.

Nos casos de superfície aproximadamente circular ou complexa, recomenda-se análise pelo método das fatias, através de programas de computador. Diversos autores desenvolveram

formulações que empregam o método das fatias para resolver problemas de estabilidade (Bishop, 1955; Morgenstern e Price, 1965; Spencer, 1967; Duncan, 1996; Clayton *et al.*, 1993). O método das fatias baseia-se na hipótese de que uma massa de solo instável pode ser imaginariamente dividida em diversas fatias verticais e que as tensões normais que atuam na base de uma determinada fatia dependem principalmente do peso próprio da fatia. A Figura 2.20 representa uma massa de solo instável dividida em “n” fatias e as forças que atuam na “i-ésima” fatia.

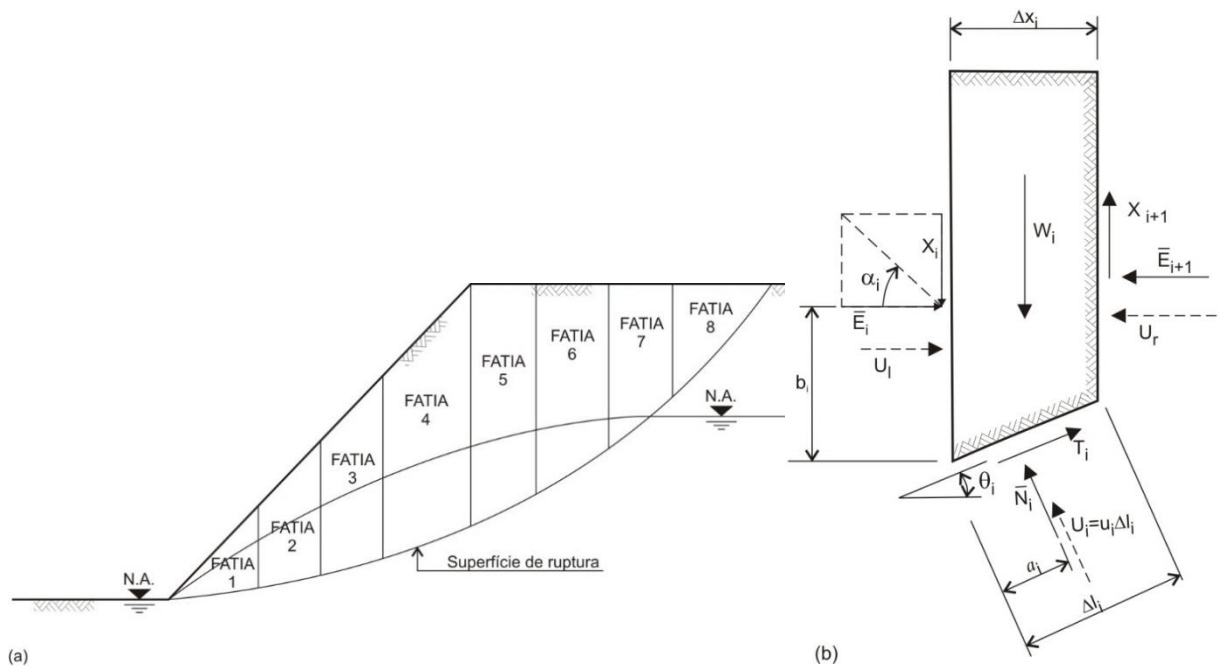


Figura 2.20 - Método das fatias: a) massa instável dividida em fatias e b) forças que atuam na i-ésima fatia.

As forças que atuam na i-ésima fatia são:

- $W_i$ : peso da fatia;
- $X_i, E_i$ : resultantes das tensões cisalhantes e normais na lateral esquerda da fatia;
- $X_{i+1}, E_{i+1}$ : resultantes das tensões cisalhantes e normais na lateral direita da fatia;
- $N'_i$ : resultantes das tensões normais efetivas que atuam na base da fatia;
- $T_i$ : resultantes das tensões cisalhantes que atuam na base da fatia;
- $U_d, U_e$ : resultantes das pressões de poro que atuam nas laterais da fatia;
- $U_i$ : resultantes das pressões de poro que atuam na base da fatia;
- $a_i$ : distância entre  $N'_i$  e o vértice inferior esquerdo da fatia;
- $b_i$ : distância entre o ponto de atuação de  $E_i$  e o vértice inferior esquerdo da fatia;

$\alpha_i$ : ângulo da resultante das forças  $E_i$  e  $X_{.i}$ ; e

$\theta_i$ : ângulo de inclinação da base da fatia.

O fator de segurança pode ser definido em termos de momentos:

$$FS = \frac{M_{res}}{M_{inst}} = \frac{\text{momento da resistência ao cisalhamento ao longo da superfície}}{\text{momento do peso da massa instável}} \quad (2.2)$$

As forças  $X_i$ ,  $E_i$ ,  $U_d$  e  $U_e$  são forças internas da massa instável e não precisam ser levadas em conta no somatório de momentos. As forças  $N'_i$  e  $U_i$  apontam para o centro do arco de circunferência e tem momento nulo. Para um solo homogêneo dividido em “n” fatias, obtemos os seguintes somatórios de momentos:

$$M_{inst} = r \cdot \sum_{i=1}^n W_i \cdot \sin \theta_i \quad (2.3)$$

$$M_{res} = r \cdot \sum_{i=1}^n (c' + \sigma'_i \cdot \tan \phi') \cdot \Delta \ell_i = r \left( c' L + \tan \phi' \sum_{i=1}^n N'_i \right) \quad (2.4)$$

Sendo:

$L$ : comprimento de todo o arco de circunferência de ruptura;

$r$ : raio do arco de circunferência que representam a superfície de ruptura; e

$\sigma'_i$ : tensão normal na base da fatia.

Dessa forma, a equação do fator de segurança pode ser reescrita:

$$FS = \frac{c' L + \tan \phi' \sum N'_i}{\sum W_i \cdot \sin \theta_i} \quad (2.5)$$

É necessário determinar o valor de  $N'_i$  para cada fatia, mas o sistema é estaticamente indeterminado, e não é possível obter o valor exato de  $N'_i$ , pois há mais incógnitas que equações. Entretanto, diversos autores apresentaram hipóteses simplificadoras acerca da

magnitude, inclinação e posição da resultante das tensões que atuam nas laterais das fatias (força lateral). Essas hipóteses eliminam a indeterminação e permitem obter soluções aproximadas com variados graus de acurácia. Os métodos resultantes podem ser divididos em dois grupos: simplificados e rigorosos. Os métodos simplificados são aqueles que não atendem todas as três condições de equilíbrio estático (equilíbrio de forças em duas direções perpendiculares e equilíbrio de momentos). Os métodos rigorosos atendem às três condições de equilíbrio. A Tabela 2.7 apresenta as características das principais formulações baseadas no método das fatias.

Tabela 2.7 - Algumas formulações baseadas no método das fatias.

Formulações	Características Principais
Fellenius (1936)	Método simplificado. Superfície circular. Assume que a resultante das forças entre fatias é paralela à base de cada fatia, razão pela qual pode apresentar erros significativos na determinação do fator de segurança, geralmente subestimando-o. Recomenda-se utilizar métodos mais acurados.
Simplificada de Bishop (Bishop, 1955)	Apesar de ser um método simplificado tem boa acurácia. Superfície circular. Assume que a resultante das forças que atuam nas laterais das fatias é horizontal e obtém o fator de segurança através de equilíbrio de forças verticais e momentos.
Janbu (1954)	Método simplificado. Desenvolvido para superfícies de formato qualquer. Assume que as forças laterais são horizontais e obtém o FS através de equilíbrio de forças. Posteriormente, um ábaco de correção foi introduzido para melhorar a acurácia do FS.
Morgenstern e Price (1965)	Método rigoroso. Desenvolvido para superfícies de formato qualquer. Assume que a inclinação das forças laterais obedece a uma função $f(x)$ prescrita. As inclinações são determinadas durante o processo de cálculo para satisfazer às condições de equilíbrio de forças e momentos.
Spencer (1967)	Método rigoroso. Desenvolvido para superfícies de formato qualquer. Assume que a inclinação das forças laterais é a mesma para todas as fatias. A inclinação é determinada durante o processo de cálculo de modo a satisfazer às condições de equilíbrio de forças e momentos.

Conforme estabelecido na norma NBR 11682 – Estabilidade de Encostas (2009) é necessário que os taludes analisados promovam um Fator de Segurança definido conforme os riscos envolvidos e o grau de segurança esperado, baseado nas possibilidades de perdas

de vidas humanas (Tabela 2.8) e de perdas materiais e ambientais (Tabela 2.9). Os fatores de segurança (FS) recomendados pela norma têm a finalidade de cobrir as incertezas naturais das diversas etapas de projeto e construção.

Dentro da visão do presente autor, considera-se que o nível de segurança desejado contra a perda de vidas humanas para o ASB deve ter um grau de segurança médio, já que o local é isolado e há apenas a movimentação de quem trabalha no local junto aos motoristas que levam o resíduo para ser aterrado. Em relação ao nível de segurança desejado contra danos materiais e ambientais, tem-se que o grau de segurança também deve ser médio, considerando que não há propriedades de alto valor histórico perto, entretanto, há um curso hídrico que passa logo ao lado do ASB (Rio Melchior). Utilizando a Tabela 2.8, independente do grau de segurança ser médio ou alto para o nível de segurança desejado contra a perda de vidas humanas, tem-se que a adoção de grau de segurança alto para o nível de segurança desejado contra danos materiais e ambientais, conduz a um FS de 1,5. Sendo este o FS que o presente autor adotaria para as análises de estabilidade.

Tabela 2.8 – Nível de segurança desejado contra a perda de vidas humanas.

Grau de Segurança	Critérios
Alto	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Áreas urbanas com intensa movimentação e permanência de pessoas, como edifícios públicos, residenciais, comerciais e industriais, escolas, hospitais, estádios, praças e demais locais, urbanos ou não, com possibilidade de elevada concentração de pessoas.</li> <li>- Ferrovias. Rodovias de tráfego intenso.</li> </ul>
Médio	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Áreas e edificações com movimentação e permanência restrita de pessoas.</li> <li>- Rodovias de tráfego moderado.</li> </ul>
Baixo	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Áreas e edificações com movimentação e permanência eventual de pessoas.</li> <li>- Rodovias de tráfego reduzido.</li> </ul>

Tabela 2.9 – Nível de segurança desejado contra danos materiais e ambientais.

Grau de Segurança	Critérios
Alto	- <u>Propriedades</u> : Locais próximos a propriedades de alto valor histórico, social ou patrimonial, obras de grande porte e áreas que afetem serviços essenciais. - <u>Dano ambiental</u> : Locais sujeitos a acidentes ambientais graves, tais como nas proximidades de oleodutos, barragens de rejeito, fábricas de produtos tóxicos.
Médio	- <u>Propriedades</u> : Locais próximos a propriedades de valor moderado. - <u>Dano Ambiental</u> : Locais sujeitos a acidentes ambientais moderados.
Baixo	- <u>Propriedades</u> : Locais próximos a propriedades de valor reduzido. - <u>Dano ambiental</u> : Locais sujeitos a acidentes ambientais reduzidos.

Tabela 2.10 – Fatores de segurança mínimos para deslizamento recomendados pela norma brasileira NBR 11682 – Estabilidade de Encostas (2009).

Nível de segurança contra danos a vidas humanas →	Nível de segurança contra danos materiais e ambientais		
	Alto	Médio	Baixo
Alto	1,5	1,5	1,4
Médio	1,5	1,4	1,3
Baixo	1,4	1,3	1,2

## 2.5 INSTRUMENTAÇÃO E MONITORAÇÃO

Segundo GeoRio (2014), instrumentar uma obra ou um talude é instalar, em locais cuidadosamente escolhidos, aparelhos que medem diversas grandezas importantes para a estabilidade, tais como deformações, poro pressões etc. Monitorar é acompanhar a leitura dos instrumentos durante certo tempo e compará-la com valores previamente definidos. O monitoramento de uma obra permite verificar o desempenho da mesma e as hipóteses de projeto, aumentando o nível de confiabilidade e permitindo a execução de obras cada vez mais econômicas.

Conforme Christopher *et al.* (1990), podem-se executar programas de monitoramento de obras de contenção ou taludes com os seguintes objetivos:



- Confirmar níveis de tensão ou de poro pressão assumidos em projeto e monitorar o nível de segurança durante e após a construção;
- Permitir modificações e inovações nos métodos construtivos visando melhorias na segurança ou na economia;
- Controlar os recursos gastos;
- Aumentar o conhecimento dos mecanismos de comportamento para propiciar uma referência teórica para futuros projetos, com a possibilidade de reduzir custos e refinar métodos de projeto; e
- Permitir o conhecimento das manutenções requeridas pela estrutura ao longo do tempo, por meio de monitoramento de longo prazo.

Este capítulo apresenta conhecimentos básicos sobre instrumentação e monitoramento e as características principais dos instrumentos mais utilizados na prática de monitoramento de aterros sanitários.

### 2.5.1 Pluviometria

Os pluviômetros mais comuns são os denominados Ville de Paris (Figura 10.1). Esse pluviômetro é mais utilizado devido à simplicidade de sua instalação, operação e custo. No pluviômetro é lida a altura total de água precipitada, ou seja, a lâmina acumulada durante a precipitação, sendo que seus registros são sempre fornecidos em milímetros por dia ou em milímetros por chuva. É necessário efetuar uma leitura diária, à mesma hora, para ler a chuva das últimas 24 horas. Esse aparelho não mede a distribuição horária da chuva, nem sua intensidade.

Para se ter um registro mais detalhado da chuva ao longo de um período, utiliza-se o pluviógrafo. O pluviógrafo é mais encontrado nas estações meteorológicas propriamente ditas e registra a intensidade de precipitação, ou seja, a variação da altura de chuva com o tempo. Esse aparelho registra, simultaneamente, a quantidade e a duração da precipitação. Os instrumentos modernos, como o indicado na Figura 2.21, dispõem de sistema de aquisição de dados e podem ou não ser dotados de um sistema de telemetria automática e painel solar para alimentação das baterias.

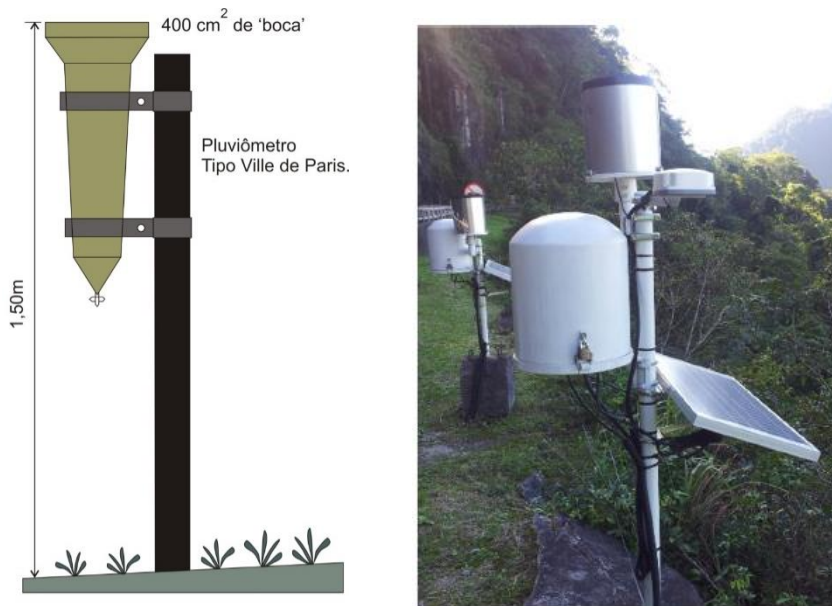


Figura 2.21 - Pluviômetro tipo Ville de Paris (GeoRio, 2014) e pluviógrafo empregado para mitigação de riscos de deslizamentos de talude rodoviários (Ehrlich *et al.*, 2018).

### 2.5.2 Piezometria

O piezômetro mede a poro pressão ou a carga de pressão atuante em determinada profundidade. Existem diversos tipos de piezômetros, classificados de acordo com o princípio de funcionamento: Casagrande, elétrico, pneumático etc. Entretanto, o piezômetro utilizado em aterros sanitários se difere daqueles usados em maciços naturais ou taludes. Os piezômetros tipo sifão permite medir as pressões de gás e de líquidos percolados, separadamente, por um processo de sifão.

Como exemplo são apresentados os piezômetros sifão instalados por Schuler (2010) no aterro sanitário localizado no estado do Rio de Janeiro. Estes são constituídos de dois tubos concêntricos, o interno para o registro da pressão no chorume e o externo para a avaliação da pressão no gás. Este tipo de piezômetro (Figura 2.22 e Figura 2.23) mostra-se adequado para o caso de aterros sanitários, pois evita a formação de bolhas de gás, que são observadas quando da utilização dos piezômetros de tubo aberto convencionais (Casagrande), o que cria falsos níveis de líquidos.

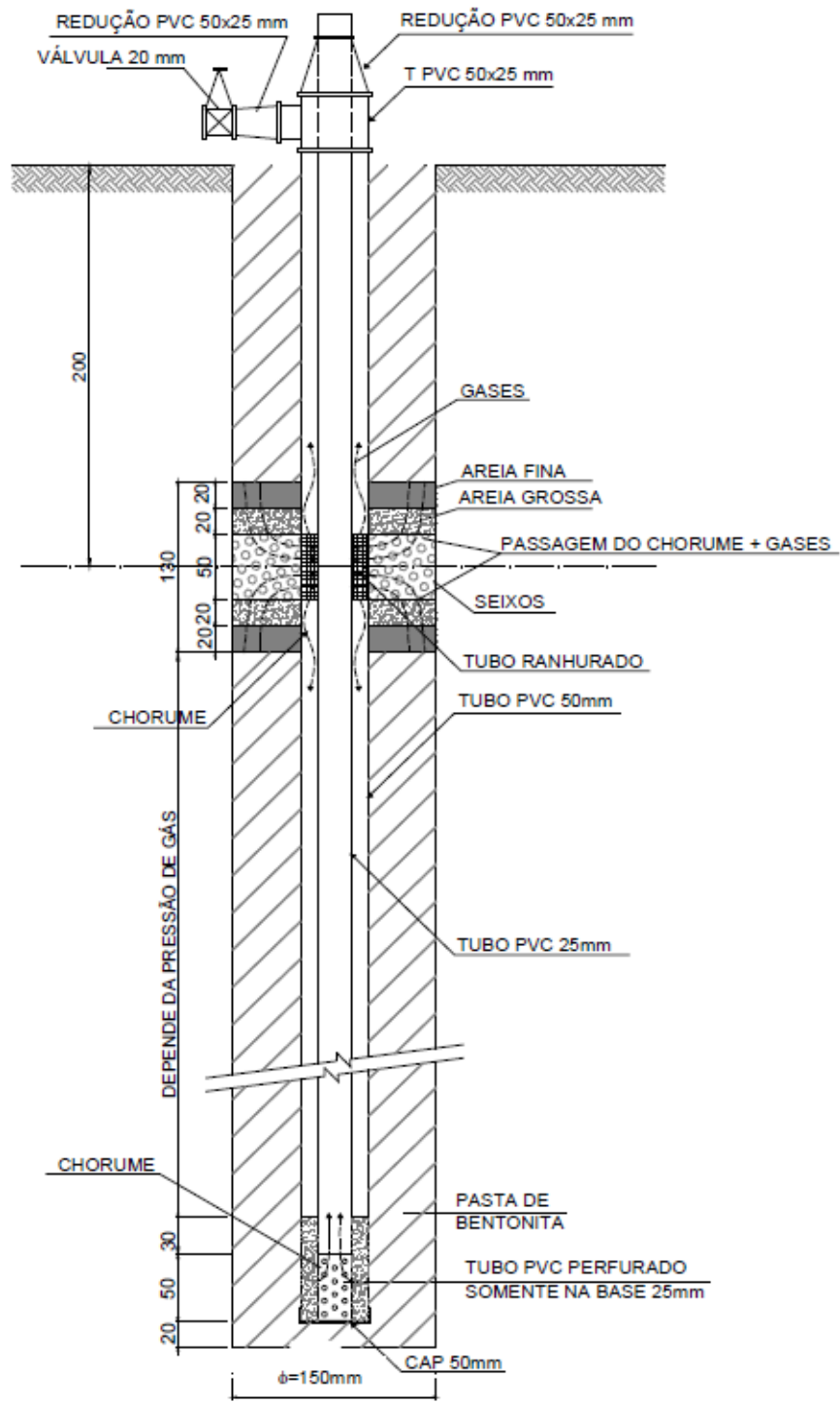


Figura 2.22 - Piezômetro sifão - dimensões em cm (Schuler, 2010).

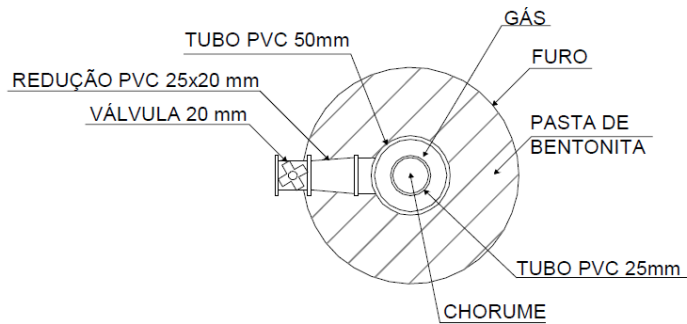


Figura 2.23 – Vista superior do piezômetro sifão (Schuler, 2010).

O procedimento de leitura pode ser realizado conforme recomendado pela GeoRio (2014), para maciço naturais e ou taludes. A leitura é realizada com um instrumento indicador de nível d'água que consta de um torpedo contendo uma chave elétrica, um fio graduado e um carretel. Quando o torpedo atinge a água do tubo de acesso, fecha-se um circuito elétrico que aciona uma buzina ou lâmpada instalada no carretel. A poro pressão é igual à altura de coluna d'água no tubo vezes o peso específico da água.

A Figura 2.24 apresenta parte do piezômetro do tipo sifão (Schuler, 2010) acima da superfície do aterro, na qual pode-se observar o tubo de diâmetro menor onde é introduzido o torpedo para leitura do nível piezométrico e a redução que vai para o tubo de diâmetro superior, onde está instalado o manômetro para leitura da pressão de gás.



Figura 2.24 – Piezômetro do tipo sifão utilizado em aterros sanitários (Schuler, 2010): (a) vista superior; (b) leitura do nível piezométrico com torpedo; e (c) leitura da pressão de gás no manômetro.

### 2.5.3 Inclínometria

O inclinômetro é um instrumento que serve para medir deslocamentos horizontais dentro do terreno. Permite localizar a profundidade de uma superfície de ruptura e saber como estão progredindo os movimentos de uma encosta ao longo do tempo. A Figura 2.25 apresenta as partes em que compõem o equipamento: torpedo sensor de inclinação, cabo elétrico, unidade de leitura e tubos de acesso ranhurados em duas direções ortogonais.

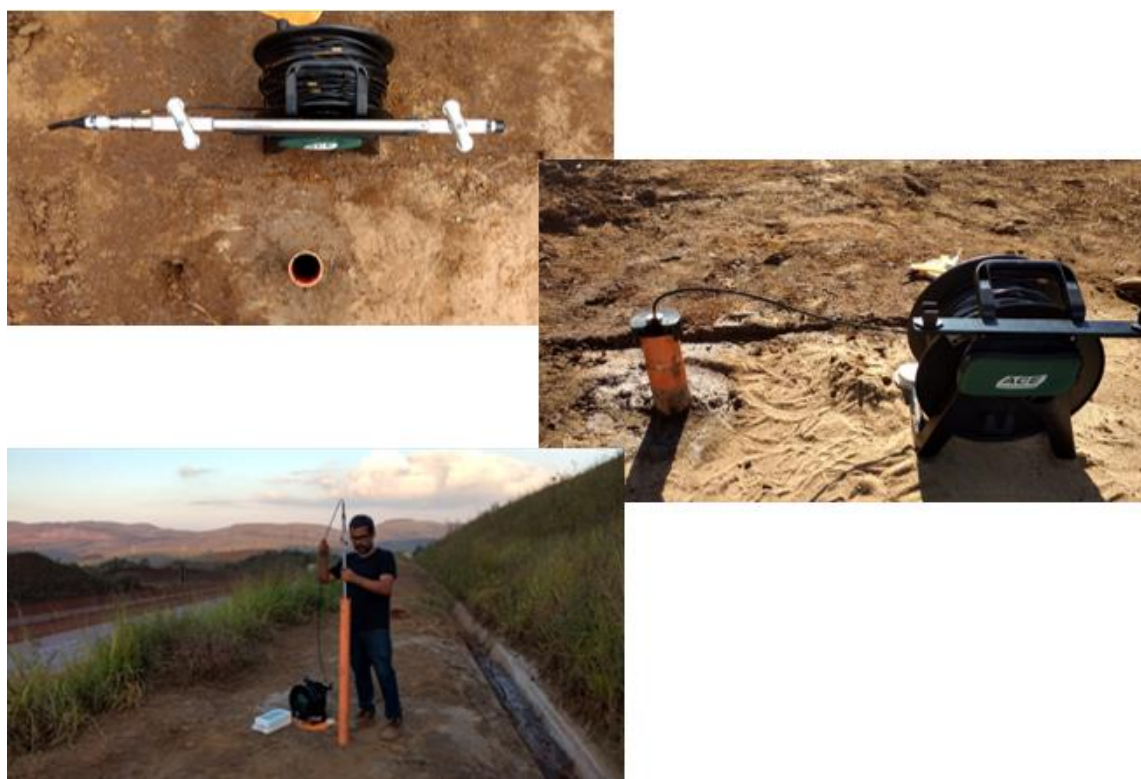


Figura 2.25 - Partes de um inclinômetro: torpedo, rolo de cabo elétrico, unidade de leitura (*tablet*, via *bluetooth*), tubos de acesso e início da leitura (condução do torpedo até o fim da vertical inclinométrica, cota definida no tubo ranhurado (Silva, 2019).

O tubo de acesso é instalado no terreno através de furo com pelo menos 100mm de diâmetro. A extremidade inferior do tubo deve ser localizada em rocha ou em uma camada de solo isenta de movimentos. Esse tubo pode ser de alumínio ou plástico, com diâmetro da ordem de 80mm e possui dois pares de ranhuras ortogonais que servem para guiar as rodas do torpedo de leitura. O tubo é orientado por ocasião da instalação de tal forma que um par de ranhuras (eixo A) fique paralelo à direção dos movimentos esperados. Nos modelos modernos os eixos A e B são lidos simultaneamente. Para que se possa avaliar

possíveis erros de leitura, após a primeira leitura inverte-se o posicionamento do sensor (giro de 180°) e repete-se a operação de baixo para cima. A resultante dos movimentos é calculada a partir da composição dos movimentos nos eixos A e B.

Na Figura 2.26 exemplifica-se uma configuração típica de leituras e deslocamentos horizontais obtidos por inclinômetros em casos de escorregamento de rastejo em colúvios (Silva *et al.*, 2018) e em movimentação de aterros sanitários (Schuler, 2010). Nos gráficos (Figura 2.27), em certa profundidade observa-se uma variação brusca nas leituras e inflexão na curva de deslocamentos laterais, assinalando a presença a essa profundidade de uma superfície de ruptura.

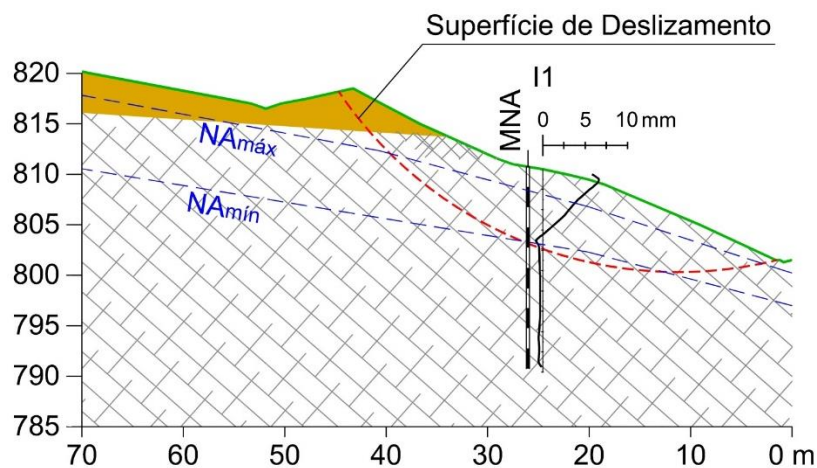


Figura 2.26 - Perfil de deslocamentos horizontais em profundidade indicando uma superfície de ruptura de um talude sujeito a movimentação lenta de rastejo (Silva *et al.*, 2018).



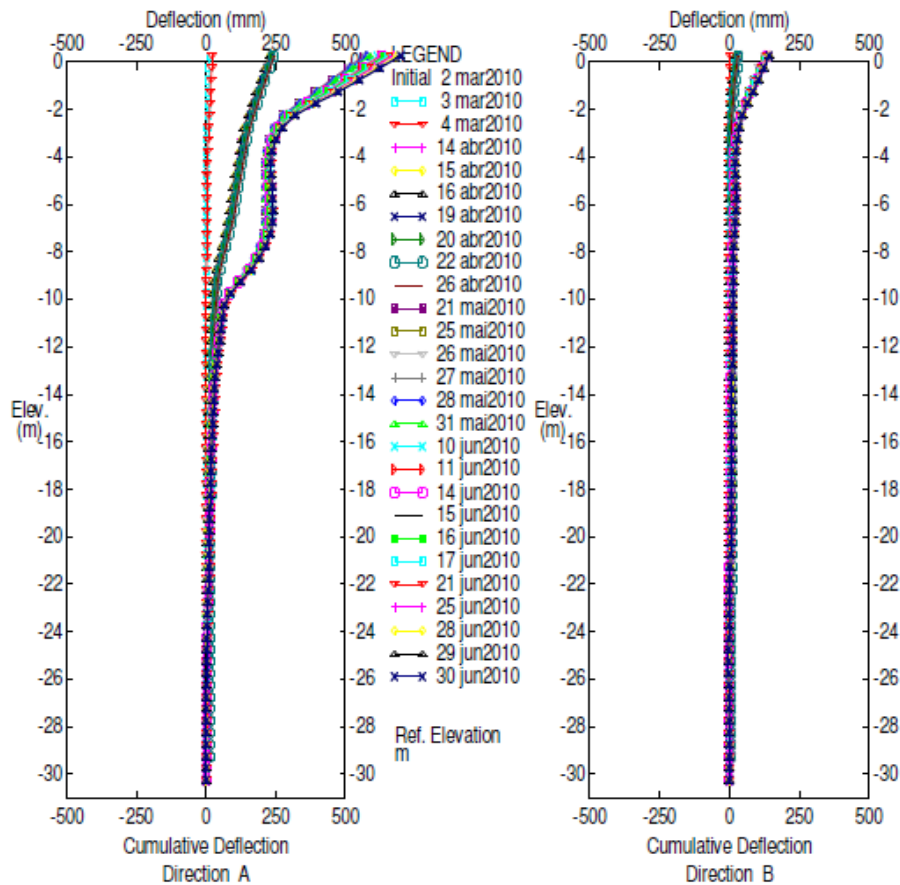


Figura 2.27 - Inclímetro registrada por Schuler (2010) no aterro de resíduos sólidos localizado no estado do Rio de Janeiro.

#### 2.5.4 Marcos Topográficos

De maneira geral, os deslocamentos de pontos superficiais acessíveis podem ser monitorados por métodos topográficos. Para tanto, são necessários pontos de referência no talude, também chamados de marcos, e pontos de referência fixos, fora da zona de movimentação. Os pontos de referência fixos, também chamados *benchmarks*, podem ser instalados em construções próximas, que estejam sabidamente livres de qualquer movimento como recalques, inclinações, movimentos térmicos etc. Caso não existam construções assim, ou em caso de dúvida, pode-se instalar *benchmarks* profundos. Segundo Dunicliff (1998), um *benchmark* profundo (Figura 2.28) consiste de uma haste ancorada no subsolo a certa profundidade e protegida dos movimentos do solo adjacente por um tubo, com o qual a haste não tem contato. Deve-se tomar especial cuidado para ancorar o *benchmark* em rocha ou solo em profundidade onde não ocorram movimentações devido à cravação de estacas, recalques naturais ou provocados por construções vizinhas etc. Os

marcos superficiais (Figura 2.29) podem ser, por exemplo, parafusos de cabeça boleada inseridos na estrutura ou em pequenos blocos de concreto enterrados no talude. Também podem ser utilizados prismas refletores, para leituras com estações totais.

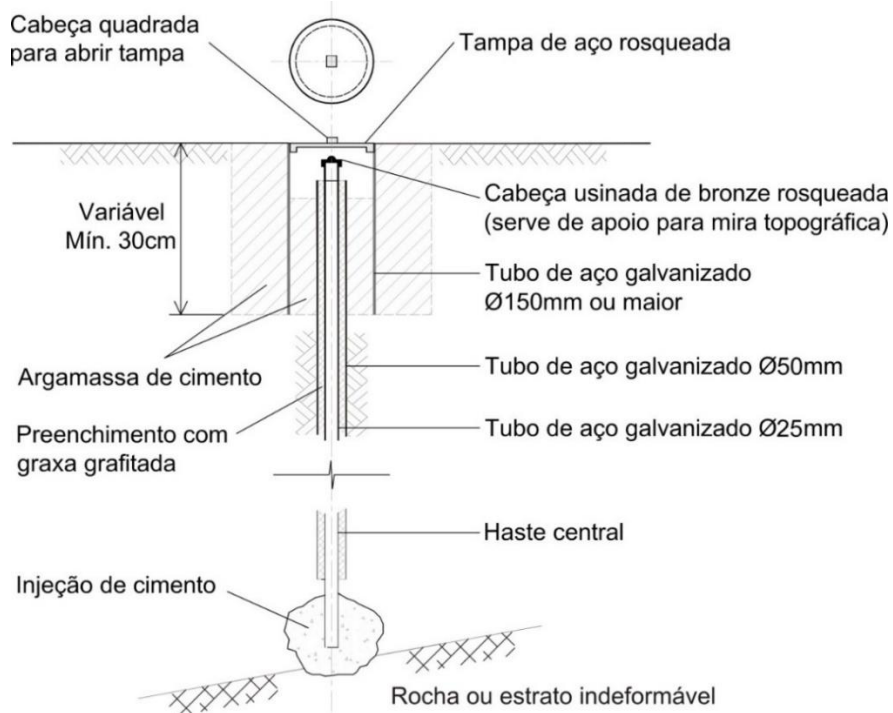


Figura 2.28 - Esquema de *benchmark* profundo (Schuler, 2010).

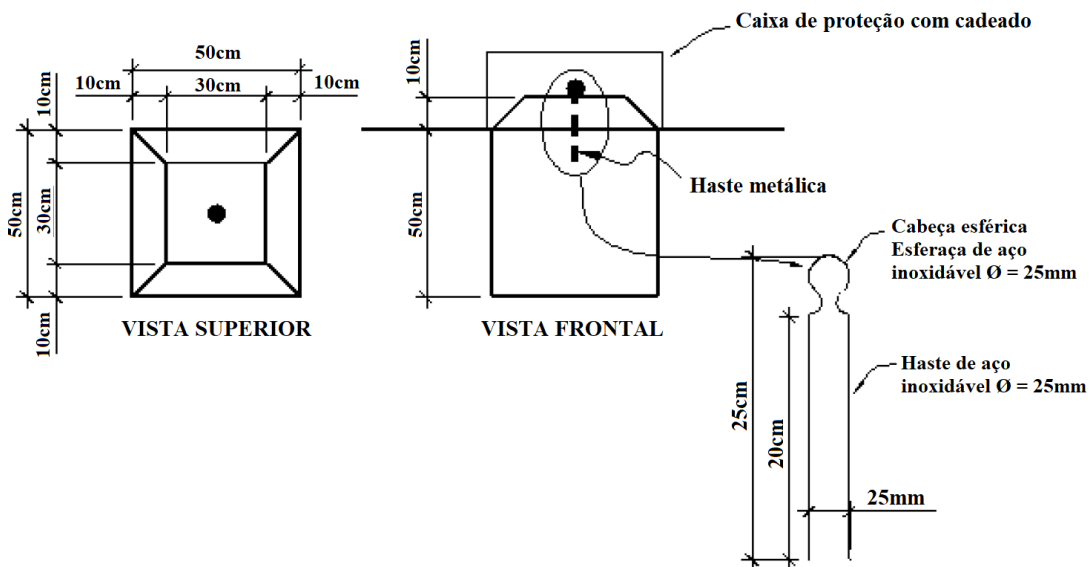


Figura 2.29 - Detalhes de um Marco Superficial (Adaptado de Schuler, 2010).



### 2.5.5 Medição de Vazão de Chorume

A medição de vazão de chorume pode ser feita pela calha *Parshall* (Figura 2.30). A calha *Parshall* é um dispositivo tradicional para medição de vazão em canais abertos de líquidos fluindo por gravidade. Basicamente, consiste numa seção convergente, numa seção estrangulada “garganta” e uma seção divergente, dispostas em planta. O fundo da unidade é em nível na seção convergente, em declive na “garganta” e em aclive na seção divergente. A vazão é determinada pela altura do nível d’água, podendo este ser medido por um sensor ultrassônico. O sensor de nível ultrassônico mede a altura da lâmina da água formada na calha *Parshall* e o controlador converte em vazão a altura medida, registrando também em seu display a totalização de vazão. No ASB a monitoração de vazão do chorume é realizada com calha *Parshall* (Figura 2.31)

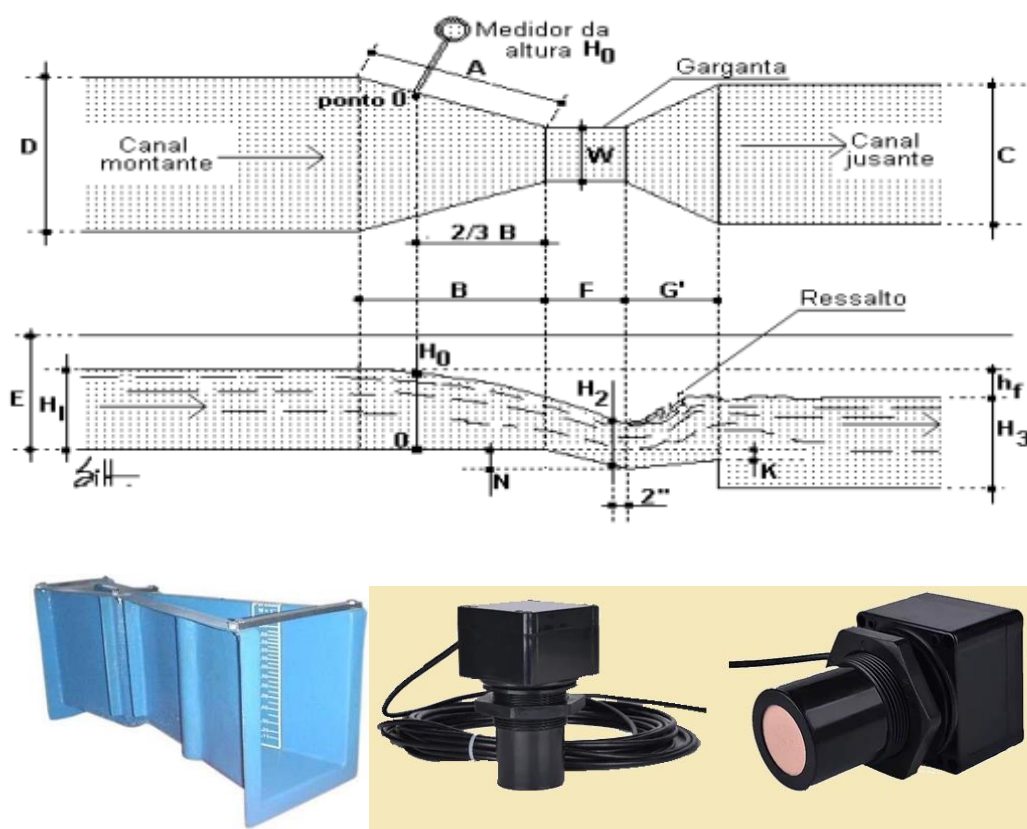


Figura 2.30 - Detalhes da Calha *Parshall* (Azevedo Neto, 1998) e fotos de uma calha e sensor ultrassônico para medição da lâmina d’água, por consequência da vazão (Fotos: Digiflow e Hidrometer, respectivamente)



Figura 2.31 - Calha *Parshall* utilizada no ASB (Jucá e Fernandes, 2020)

### 3. METODOLOGIA

O Aterro Sanitário de Brasília (ASB) conta com 760 mil metros quadrados de área, sendo que 320 mil são destinados para receber rejeitos. Durante o ano de sua inauguração (2017), o ASB recebeu cerca de 260 mil toneladas de rejeitos. Com o fechamento do antigo lixão da Estrutural em 2018, o local passou a receber todo o rejeito do DF, além dos Grandes Geradores, fechando o ano com 800 mil toneladas, aproximadamente (SLU, 2019).

A monitoração geotécnica do aterro sanitário vem sendo realizada pelo alinhamento de instrumentos que resultam em 5 seções transversais. Destas, 3 seções são objeto de análise. A instrumentação utilizada nesse estudo é composta por piezômetros e medidores de deslocamentos superficiais (marcos topográficos). Além da instrumentação geotécnica tem-se as leituras das precipitações, bem como das vazões nos drenos de percolados. O acompanhamento da evolução da expansão e alteamento do ASB vem sendo realizado por meio de levantamento planialtimétrico. Com base na coleta e organização das informações da monitoração, associada aos avanços da geometria do aterro foram realizadas análises das relações entre as variáveis medidas, estimativa dos parâmetros de resistência, por meio de estudos de estabilidade, e elaboração de carta de risco para previsão de fator de segurança em função dos níveis piezométricos.

Na Figura 3.1 e Figura 3.2 apresenta-se uma visão aérea, com indicação de alguns piezômetros e a topografia do Aterro Sanitário de Brasília referente ao mês de julho de 2020, com a indicação dos alinhamentos das 3 seções transversais a serem estudadas. As

geometrias das três seções transversais estudadas (C-C', D-D' e E-E') são apresentadas na Figura 3.3.



Figura 3.1 – Vista aérea do Aterro Sanitário de Brasília (ASB).



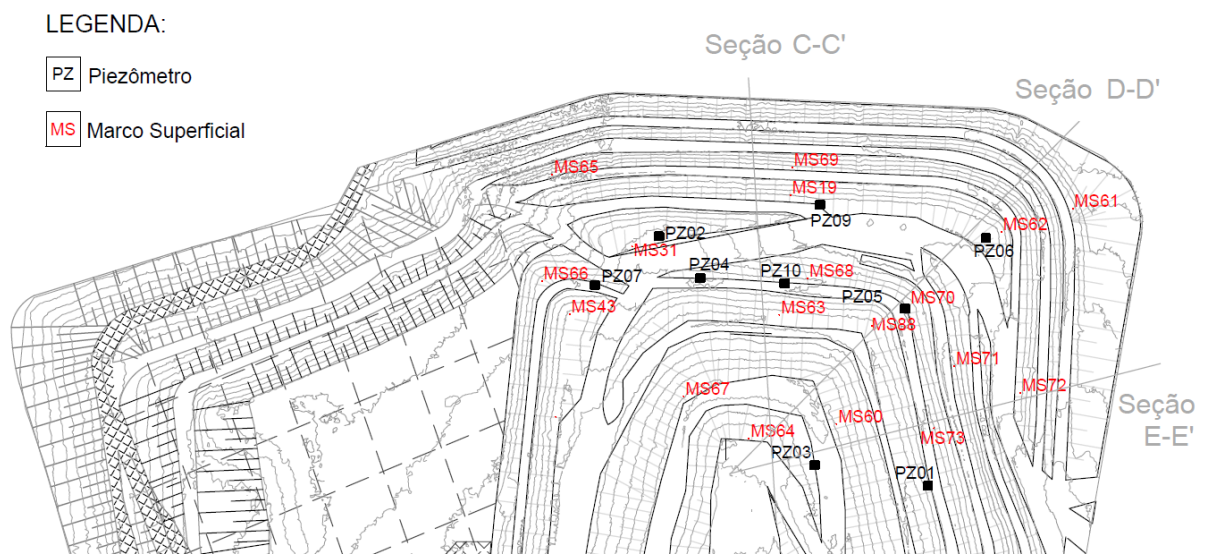
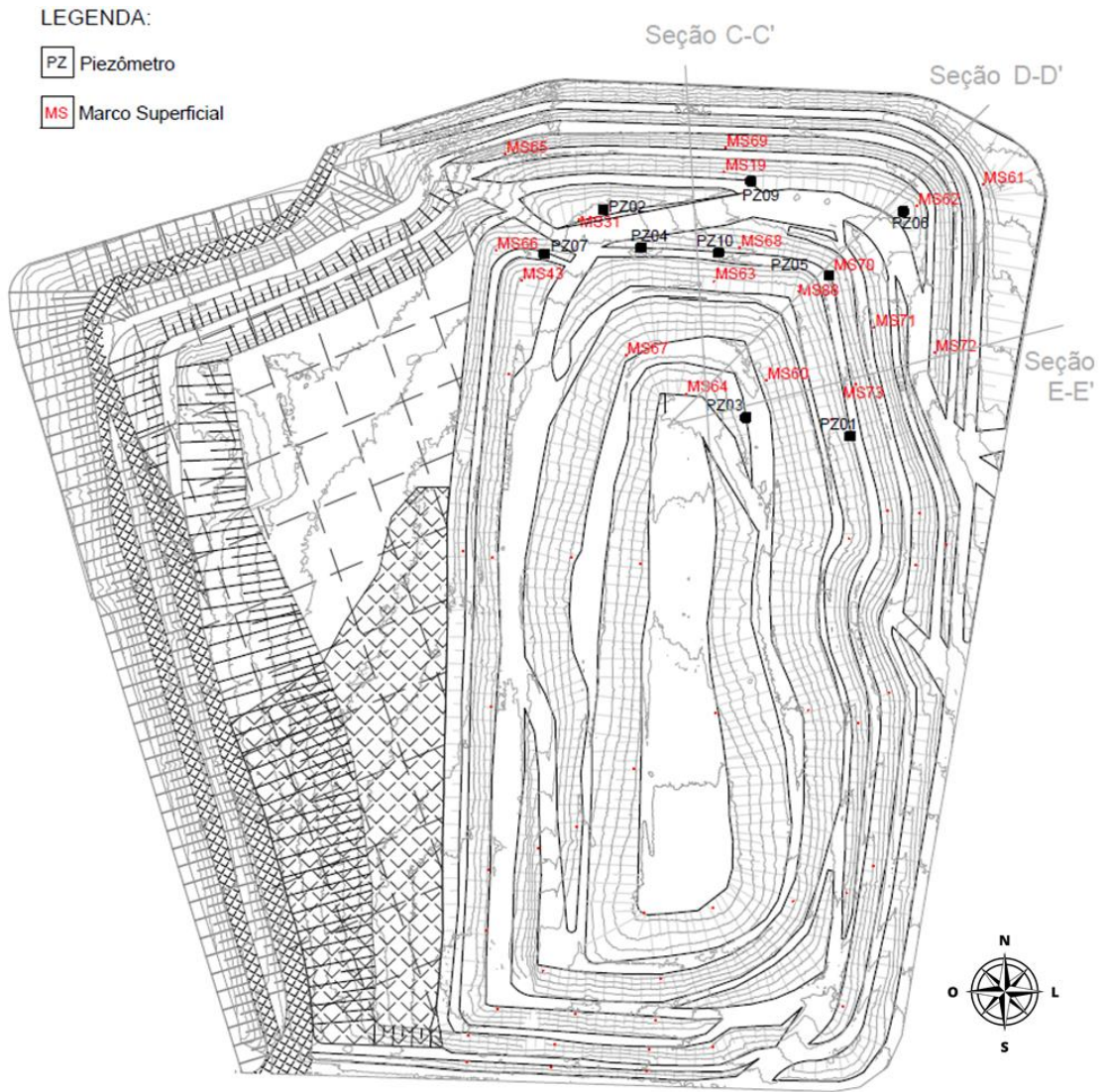
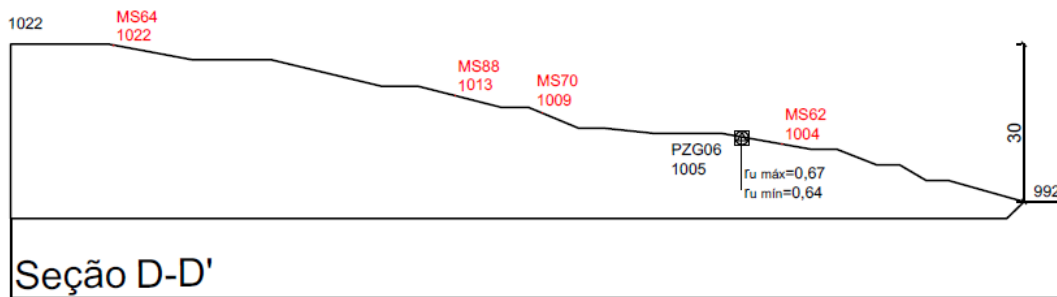
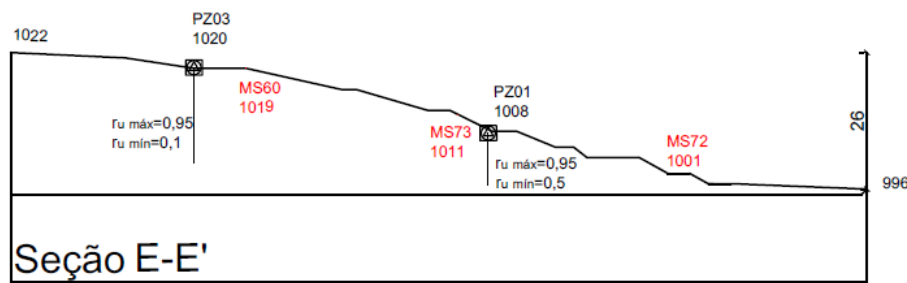
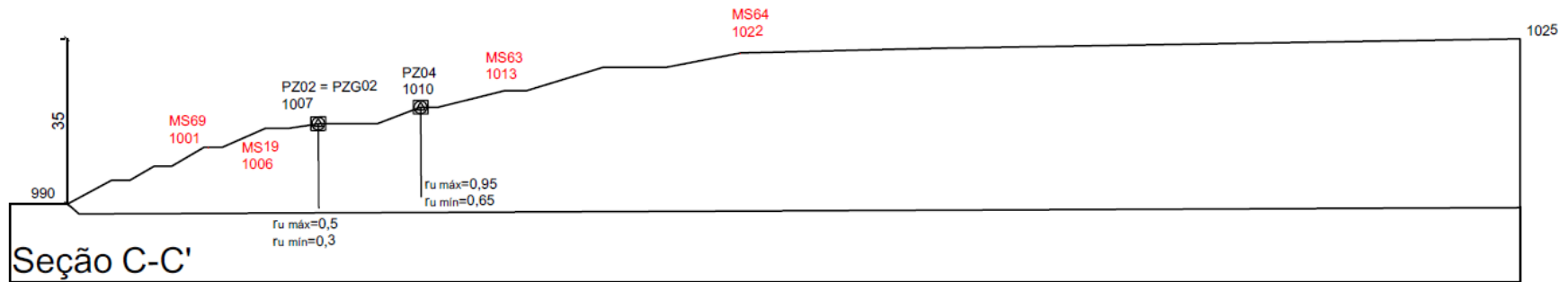


Figura 3.2 - Planialtimetria do ASB e localização dos instrumentos utilizados no estudo.



LEGENDA:

PZ Piezômetro

MS Marco Superficial

Figura 3.3 - Seções de Estudo do ASB.

Os resultados de monitoração dos níveis piezométricos e dos deslocamentos superficiais foram obtidos dos relatórios da ADASA. Estes foram tratados e organizados em uma estrutura de dados em planilha eletrônica que facilitou a elaboração das análises. Relações entre as variáveis monitoradas foram avaliadas, por meio da observação das variações dos parâmetros monitorados ao longo do tempo.

As precipitações foram obtidas do pluviômetro de número #1548034 localizado na ETE Melchior ao lado do Aterro Sanitário de Brasília (Figura 3.4). Os dados foram consultados na plataforma *Hidroweb* da Agência Nacional de Águas (ANA). Os registros de precipitação são referentes a 24 h (precipitação diária)



Figura 3.4 - Localização do Pluviômetro #1548034.

Com base no levantamento de dados dos parâmetros geotécnicos de diversos aterros sanitários, foram definidas possibilidades de parâmetros de resistência (ângulo de atrito e

intercepto coesivo). Esses parâmetros foram obtidos por diversos autores por meio de ensaios de campo e laboratoriais e retroanálises. Destaca-se que alguns ensaios foram realizados em resíduos com diferentes idades (novo e maduro) e diferentes percentuais de fibras, proporcionando ordem de grandeza dos valores possíveis para diferentes condições e estágios de vida do aterro sanitário.

Assim, em complemento ao estudo, foram avaliadas quais seriam as combinações possíveis entre os parâmetros de resistência (ângulo de atrito e intercepto coesivo), por meio de estudos de estabilidade, tendo como referência o peso específico do RSU, parâmetros de poro pressão, obtidos pela monitoração do nível piezométrico. Nesse sentido, com base nos dados da literatura foram definidos de limites superior e inferior de parâmetros de resistência de RSU em duas condições de degradação (novo e maduro). A consistência dos valores dos parâmetros de resistência foi avaliada com base nos limites inferior e superior definidos.

Utilizando os parâmetros de resistência, elaborou-se uma carta de risco, levando em consideração os níveis piezométricos, que levariam os taludes a condições de estabilidade adequadas ( $FS \geq 1,5$ ) e precárias ( $FS$  próximo da unidade). As análises de estabilidade foram realizadas pelo método do equilíbrio limite de Morgenstern & Price (1965). Foi utilizado o *software Slide*, voltado para análises bidimensional de estabilidades de talude, desenvolvido pela *Rocscience*. Ressalta-se a limitação da versão do software utilizado nas análises de estabilidade de maciços compostos por materiais com envoltória de resistência bi-linear. Para considerar envoltória de resistência bi-linear, que é o caso do RSU, poderia ter sido utilizado o software *GeoSlope*, desenvolvido pela *GeoStudio*. Entretanto, nas análises, devido às incertezas relativas às envoltórias de resistência, optou-se em utilizar o *Slide*. Nas análises de estabilidade foi considerado o parâmetro de poro pressão ( $r_u$ ), obtido por meio dos resultados da monitoração dos piezômetros. A Figura 3.5 apresenta um exemplo de leitura piezométrica, onde o  $h_p$  é a altura piezométrica medida pelo indicador de nível d'água ( $h_p = h - L$ ), seguido do cálculo do  $r_u$ .



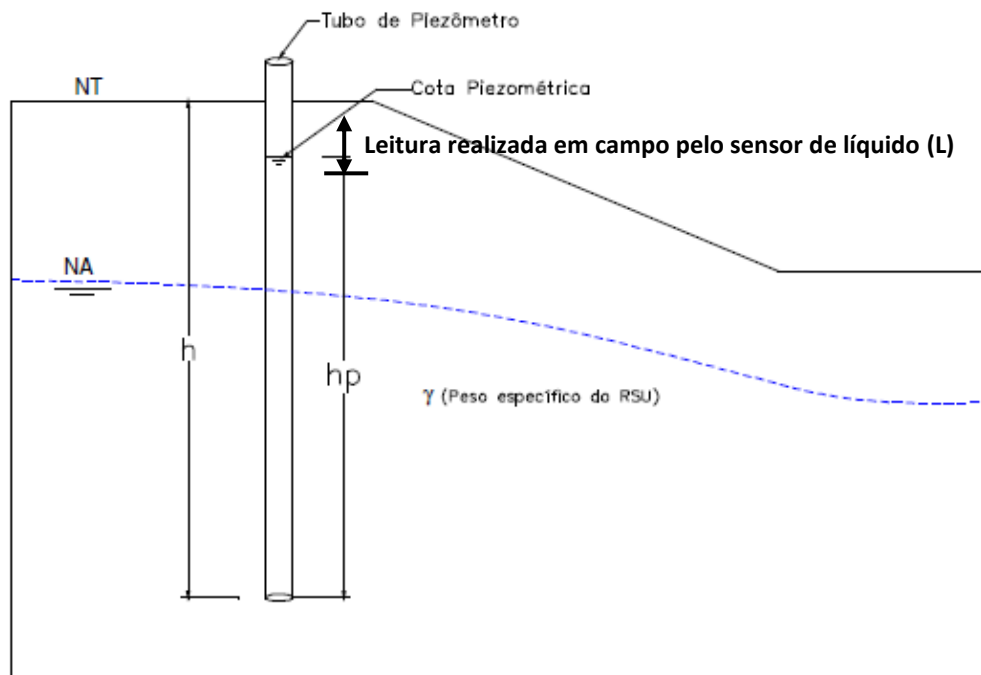


Figura 3.5 - Representação do cálculo do parâmetro de poro pressão  $r_u$  (Schuler, 2010).

O parâmetro de poro pressão ( $r_u$ ), definido pela relação entre poro pressão e tensão vertical, expressa pela equação 3.1.

$$r_u = \frac{u}{\sigma_v} = \frac{u}{\gamma \cdot h} \quad (3.1)$$

Onde:

$u$  = poro pressão medida (kPa) =  $(h-L) \cdot \gamma_w$ ;

$L$  = leitura de campo;

$\gamma$  = peso específico dos RSU ( $\text{kN/m}^3$ ); e

$h$  = altura de lixo acima de onde está se medindo a poro pressão (m).

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 PIEZOMETRIA

Para este estudo, foram adotados os piezômetros, referentes às 3 seções selecionadas para elaboração das análises (Figura 3.3, seções C-C', D-D' e E-E'). Na Tabela 4.1 apresenta-



se a nomenclatura dos piezômetros, com as respectivas profundidades, a data inicial da monitoração e a data final considerada para o presente estudo.

Como ponto de atenção, alguns piezômetros apresentados na Figura 3.2 ficaram de fora da análise deste projeto, já que estes apresentavam questões de extravasamento ao longo do período estudado dentre outros erros de leitura. Por isso, visando a aplicação correta do método proposto, foram considerados apenas os dados consistentes medidos.

Tabela 4.1 – Dados dos Piezômetros.

<b>Seção</b>	<b>Piezômetros</b>	<b>Profundidade (m)</b>	<b>Data inicial da Leitura</b>	<b>Data final da Leitura</b>
E-E'	PZ01	11	05/02/2019	30/08/2019
C-C'	PZ02	16,5	05/02/2019	30/08/2019
E-E'	PZ03	10	05/02/2019	30/08/2019
C-C'	PZ04	18,48	05/02/2019	30/08/2019
C-C'	PZG02	15	06/09/2019	26/06/2020
D-D'	PZG06	10	06/09/2019	26/06/2020

Tanto o PZG02 (seção C-C') e o PZG06 (seção D-D') são piezômetros do tipo sifão, sendo, portanto, constituído de dois tubos concêntricos, o menor é um piezômetro de Casagrande, cuja elevação do nível de chorume, por meio das perfurações no bulbo, não são afetadas por possíveis bolhas de gás, devido a drenagem do gás, que ocorre entre o espaço anelar entre os tubos. Um esquema desse tipo de piezômetro, que é o mais indicado para monitoramento em aterro sanitário, apresentou-se na Figura 2.22 e Figura 2.23. Apesar das leituras serem contínuas, havendo mais dados, as leituras desses dois piezômetros consideradas no estudo são de setembro de 2019 a junho de 2020.

A Figura 4.1 e Figura 4.2 apresentam os parâmetros de poro pressão ( $r_u$ ) obtidos nas monitorações dos piezômetros PZG02 e o PZG06, em conjunto com a precipitação diária (24h). Estes valores de poro pressão ( $r_u$ ) foram calculados com base na equação 3.1, onde as leituras de campo foram retiradas dos relatórios de monitoramento geotécnico do Aterro Sanitário de Brasília, além do peso específico ( $9,6 \text{ kN/m}^3$ ) dos resíduos, que foi obtido por estudo realizado por Jucá (2020) no ASB.

Verifica-se que o nível piezométrico do PZG06 se manteve constante ao longo de todo período de monitoração, ficando com  $r_u$  pouco abaixo de 0,7. Já o PZG02 tem dois

patamares de valor do  $r_u$ , igual a 0,3 até fevereiro de 2020 e se iguala ao PZG06 ( $r_u=0,7$ ) a partir dessa data. A ausência de variação do  $r_u$  observado nos piezômetros das seções C-C' e D-D', frente a precipitação diária, indica que não há relação entre chuva e nível piezométrico. Apesar de não ter sido demonstrado neste projeto, supõe-se que mesmo para uma chuva acumulada não haveria relação com a piezometria. A ausência de correlação entre pluviometria e piezometria também foi verificada nos registros dos demais piezômetros PZ01, PZ02, PZ03 e PZ04, conforme apresentado na Figura 4.2.

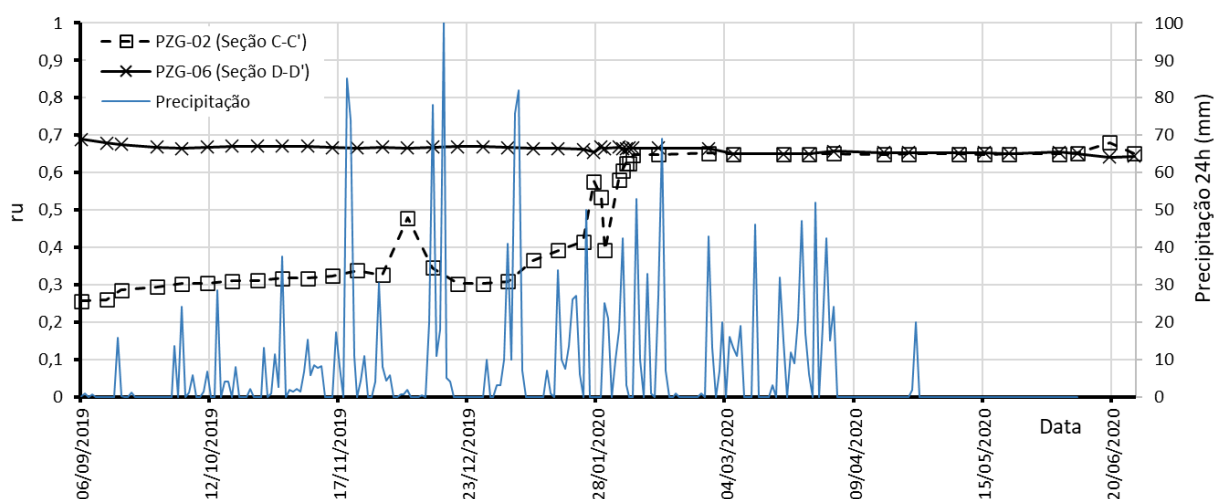


Figura 4.1 - Relação entre PZG02 e PZG06 com precipitação diária.

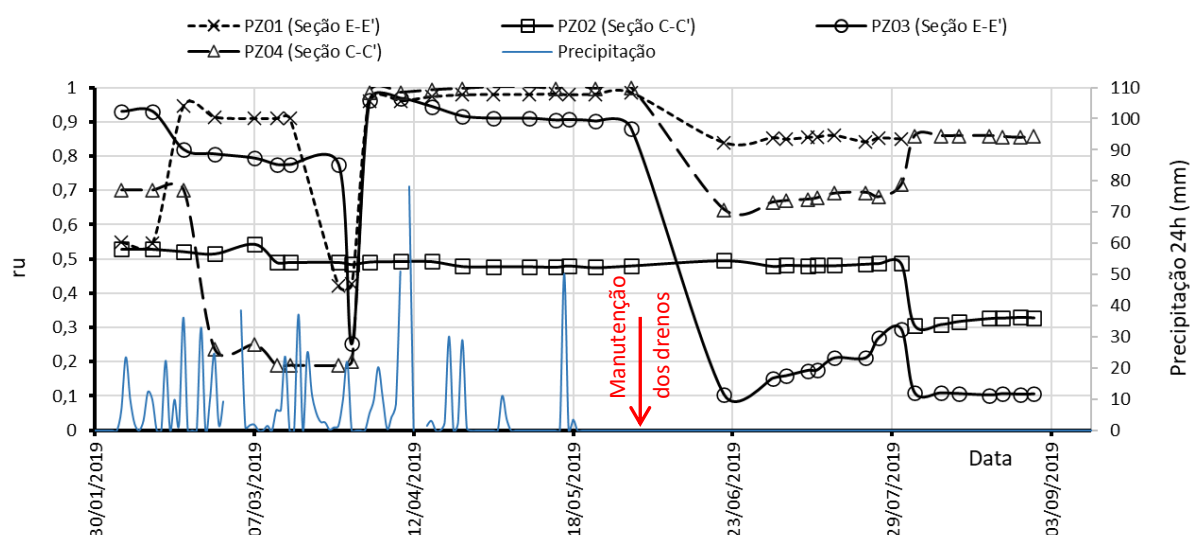


Figura 4.2 - Relação entre PZ01, PZ02, PZ03 e PZ04 com precipitação diária.

A monitoração dos piezômetros PZ01, PZ02, PZ03 e PZ04 revelou a ocorrência de um período com nível piezométrico muito elevado. Entre os meses de abril e junho de 2019 houve elevações dos parâmetros de poro pressão nos piezômetros PZ01 e PZ03 (ambos da seção E-E') e PZ04 (seção C-C'), atingindo o patamar próximo da unidade ( $ru \sim 0,95$ ). Esta condição foi registrada visualmente no talude do aterro, no qual havia surgência de chorume na sua superfície (Figura 4.3). Nas chaminés de gás próximas aos locais de surgência, a cota do chorume se aproximava muito da boca da chaminé (Figura 4.4). Note que neste período não ocorreram chuvas importantes. A redução observada nos níveis piezométricos de PZ01, PZ03 e PZ04 entre maio e junho de 2019 ocorreu após manutenção dos drenos de chorume do aterro sanitário. Tais resultados, destacam a importância da monitoração dos níveis piezométricos para fins de tomadas de decisão, como foi o caso da manutenção dos drenos. Níveis piezométricos nessa ordem de grandeza, dependendo da geometria do talude, podem reduzir o fator de segurança para valores abaixo do mínimo recomendado por norma, comumente de 1,5.



Figura 4.3 - Extravasamento de lixiviado pelo maciço do ASB (08/04/2019).





Figura 4.4 - Chaminé em período crítico do Aterro.

O piezômetro PZ02 foi substituído pelo PZG02 no mês de novembro de 2019. Na Figura 4.5 apresenta-se o período de monitoração de fevereiro de 2019 a junho de 2020, considerando que o PZ02 e o PZG02 são piezômetros complementares, possibilitando ter uma série histórica de dados de 16 meses. Mesmo sendo o PZG02 um piezômetro do tipo sifão, não se observa diferença entre as últimas leituras do PZ02 e as leituras iniciais do PZG02. Isso atesta o bom funcionamento dos piezômetros convencionais. Entretanto, ressalta-se que o ideal para um aterro sanitário é realmente a opção do tipo sifão, para evitar que bolas de gás alterem o nível piezométrico.

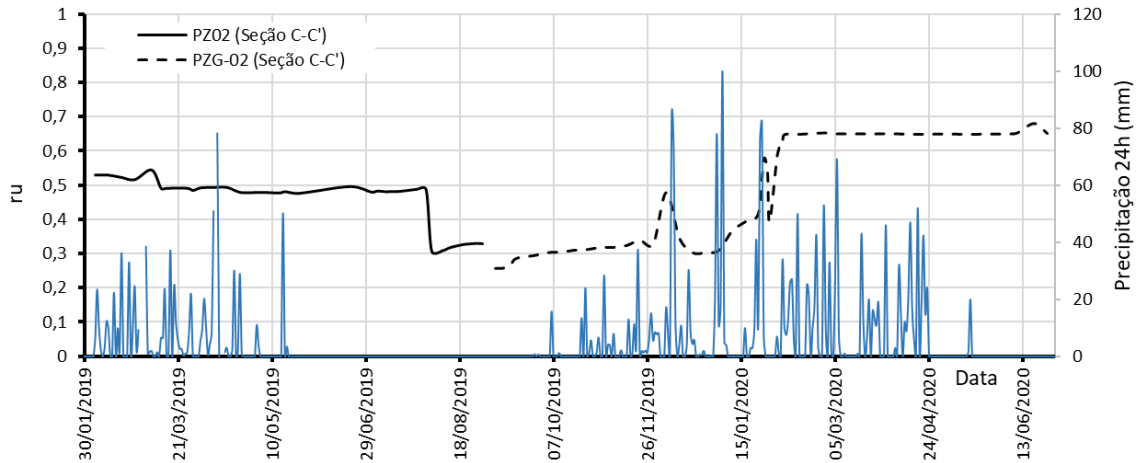


Figura 4.5 - Relação entre PZ02 e PZG02 com precipitação diária.

Os resultados de monitoração de fevereiro de 2020 do PZ02 são apresentados na Figura 4.6. O objetivo da apresentação da variação piezométrica do mês de fevereiro é devido à existência de um estudo realizado nesse mês para comparar vazão de chorume com a pluviometria (Jucá e Fernandes, 2020). Conforme já mencionado, a Figura 4.6 enfatiza a ausência de correlação em piezometria e pluviometria, como também para chuva diária. Por outro lado, conforme estudo de Jucá e Fernandes (2020), nota-se que uma boa correlação entre chuva diária e a variação da vazão de chorume (Figura 4.7). Isso é um indicativo da eficiência hidráulica do sistema de drenagem, que não permite que haja relação entre chuva e nível piezométrico.

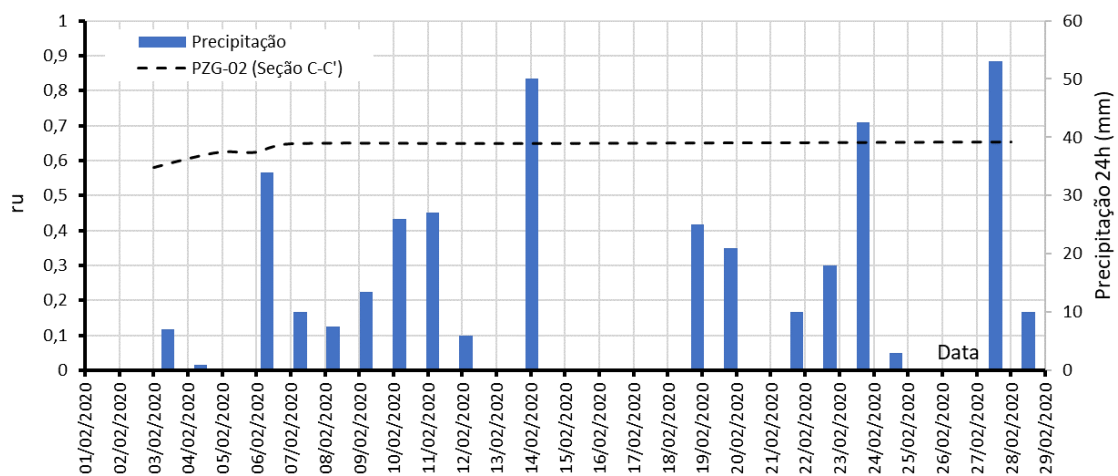


Figura 4.6 - Relação entre PZG02 com precipitação diária para o mês de fevereiro de 2020.

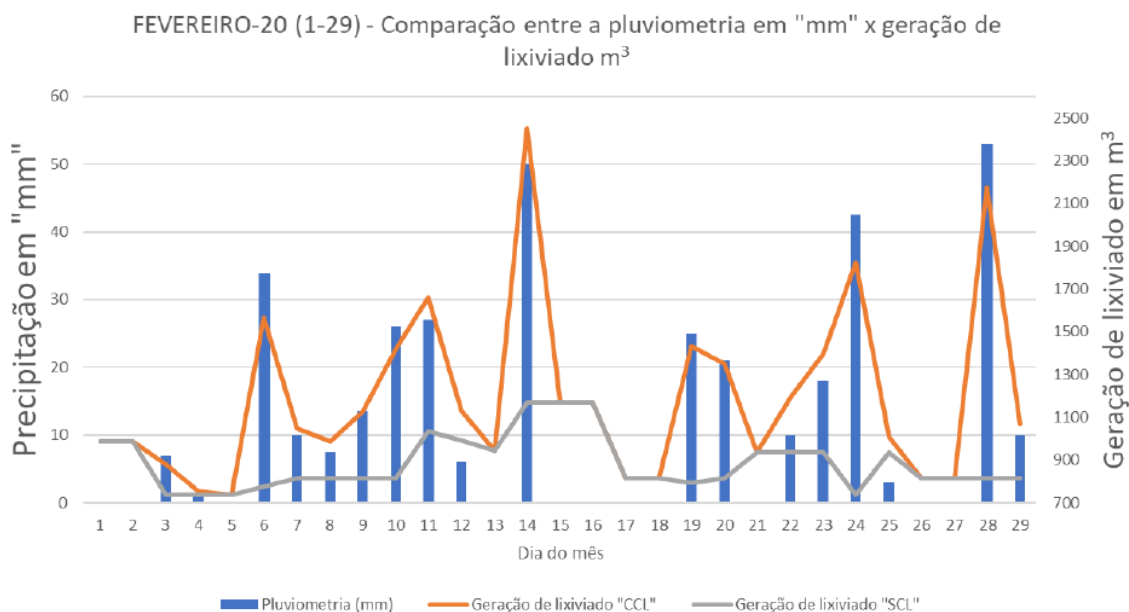


Figura 4.7 - Geração de lixiviado com contribuição das lagoas "CCL" e sem contribuição das lagoas "SCL" referente ao mês de fevereiro de 2020 no ASB (Jucá e Fernandes, 2020).

O fluxo de água nas células é complexo, dependendo em grande parte da espessura da camada de resíduos. A camada de resíduos nos aterros funciona como uma espécie de esponja, tendo uma certa capacidade de retenção de água (Jucá e Fernandes, 2020). Por isso é normal os resíduos reterem uma grande quantidade de água mesmo após longos períodos de seca.

Jucá e Fernandes (2020) citam também que quando as águas pluviais começam a penetrar no maciço, parte da capacidade de retenção de líquidos que estava seca, absorve a água que leva mais tempo para sair pelo sistema de drenagem da célula. Nas estações chuvosas, como os resíduos apresentam alta umidade, à medida em que as águas pluviais penetram nas células, o aumento de vazão é quase imediato, se os drenos estiverem em boas condições.

## 4.2 ANÁLISE DAS VELOCIDADES DE DESLOCAMENTO

Para realizar as análises de deslocamentos, foram usados como base os marcos superficiais representados pela Tabela 4.2 e que estavam presentes nas seções de estudo deste projeto (seções C-C', D-D' e E-E'). Como citado no Item 5, referente à metodologia, os dados

apresentados no relatório geotécnico do ASB estavam em velocidade (milímetro por dia). Com base no intervalo de tempo entre leituras obteve-se os deslocamentos, entre leituras e acumulados.

Nem todos os Marcos Superficiais apresentados na Figura 3.2 foram utilizados nas análises, todavia, os equipamentos de melhor consistência estão presentes no projeto.

Tabela 4.2 - Dados dos marcos superficiais.

<b>Seção</b>	<b>Marcos Superficiais</b>	<b>Data inicial da Leitura</b>	<b>Data final da Leitura</b>
C-C'	MS-19	08/01/2019	30/06/2020
E-E'	MS-60	03/01/2020	30/06/2020
D-D'	MS-62	03/01/2020	30/06/2020
C-C'	MS-63	03/01/2020	30/06/2020
C-C' e D-D'	MS-64	03/01/2020	30/06/2020
C-C'	MS-69	03/03/2020	30/06/2020
D-D'	MS-70	03/03/2020	30/06/2020
E-E'	MS-72	03/03/2020	30/06/2020
E-E'	MS-73	03/03/2020	30/06/2020
D-D'	MS-88	03/03/2020	30/06/2020

Na Figura 4.8 a monitoração de 17 meses das velocidades dos deslocamentos horizontal e vertical do marco superficial MS-19, em conjunto com a precipitação diária. Apesar da variação das velocidades, verifica-se movimentação contínua. Observa-se que na estação seca, com ausência de chuva, entre os meses de abril e novembro, ainda ocorre movimentação, inclusive havendo registro de velocidade inferior à de período chuvoso – já que a degradação do lixo impede o recalque. Visto que não foi observada relação entre chuva e movimentação, foi avaliado se poderia haver alguma relação da velocidade dos deslocamentos com a piezometria (Figura 4.9). Note que a piezometria da seção, onde foi realizado controle topográfico do marco MS-19, apresenta 3 patamares bem nítidos de parâmetros de poro pressão ( $r_u$ ) ao longo dos 17 meses de monitoração. Visto a variação das velocidades dos deslocamentos durante esse período, essa condição indica que também não há relação dos deslocamentos com a piezometria.

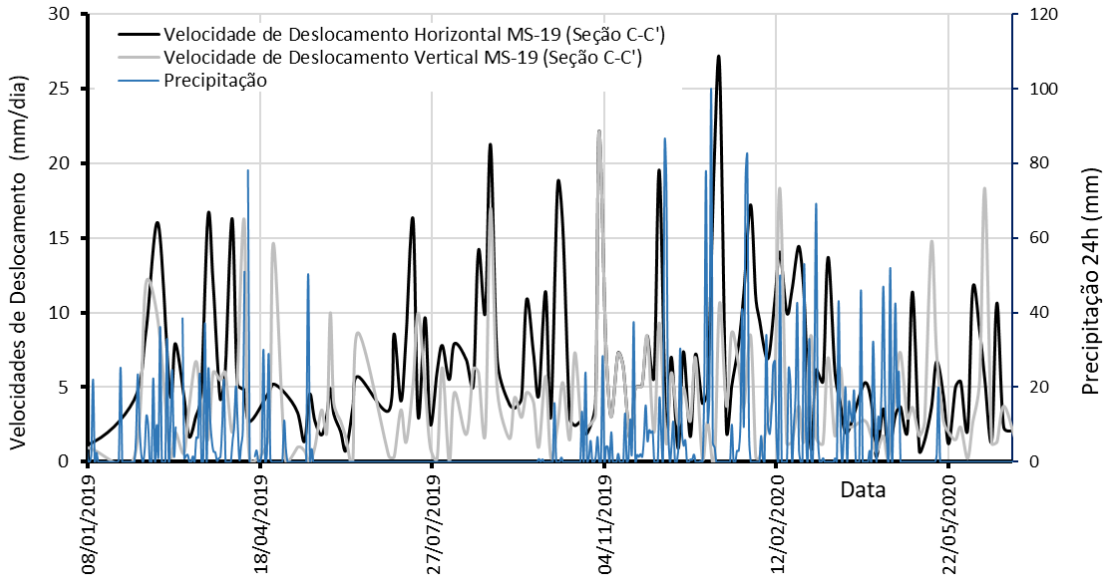


Figura 4.8 - Relação das velocidades de deslocamento do MS-19 com precipitação diária.

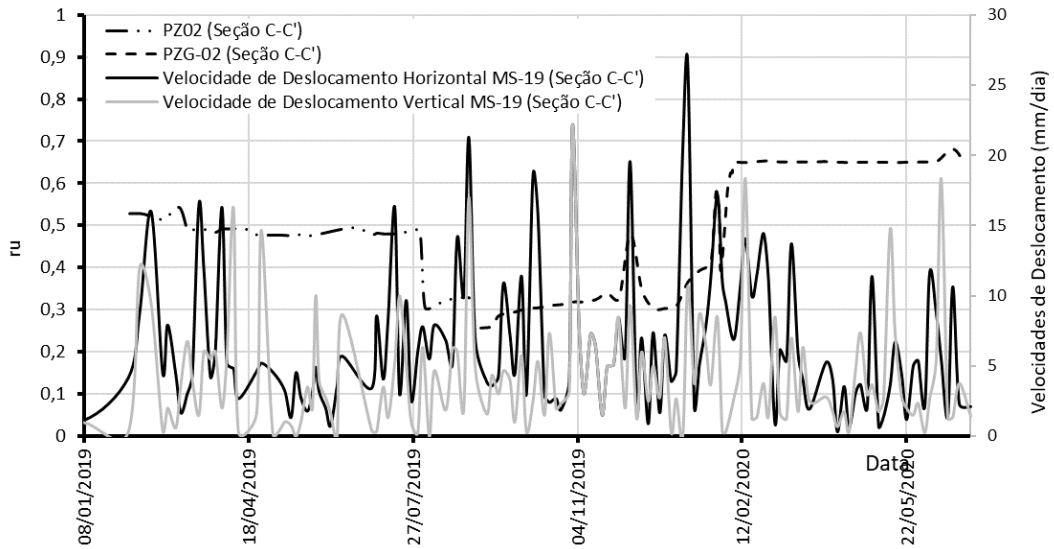


Figura 4.9 - Relação das velocidades de deslocamento do MS-19 com poro pressão.

Fazendo uma análise macro dos valores e considerando a precisão dos métodos e equipamentos utilizados em controles topográficos, pode-se concluir que a magnitude das velocidades de recalque dentro dos padrões de segurança estabelecidos para o Aterro Sanitário de Brasília (ASB).



### 4.3 ANÁLISE DAS RELAÇÕES ENTRE OS DESLOCAMENTOS

Para análise das relações entre os descolamentos, foi utilizado um marco superficial para cada sessão adotada:

- Seção C-C': MS-19;
- Seção D-D': MS-62; e
- Seção E-E': MS-60.

#### 4.3.1 Deslocamentos horizontais e verticais (recalques)

A Figura 4.10 apresenta a relação entre os deslocamentos acumulados do marco superficial MS-19, localizado na seção C-C', com altura de 35 m. Nota-se um deslocamento horizontal de aproximadamente 3,5 metros e um deslocamento vertical de aproximadamente 1 metro, no período de 17 meses. Em linhas gerais, verifica-se que os deslocamentos horizontais são 3 vezes maiores que os verticais ( $\delta h = 3. \delta v$ ). De acordo com Jucá (2020), quando os deslocamentos horizontais são maiores que os deslocamentos verticais, deve-se atentar para a condição de estabilidade do maciço.

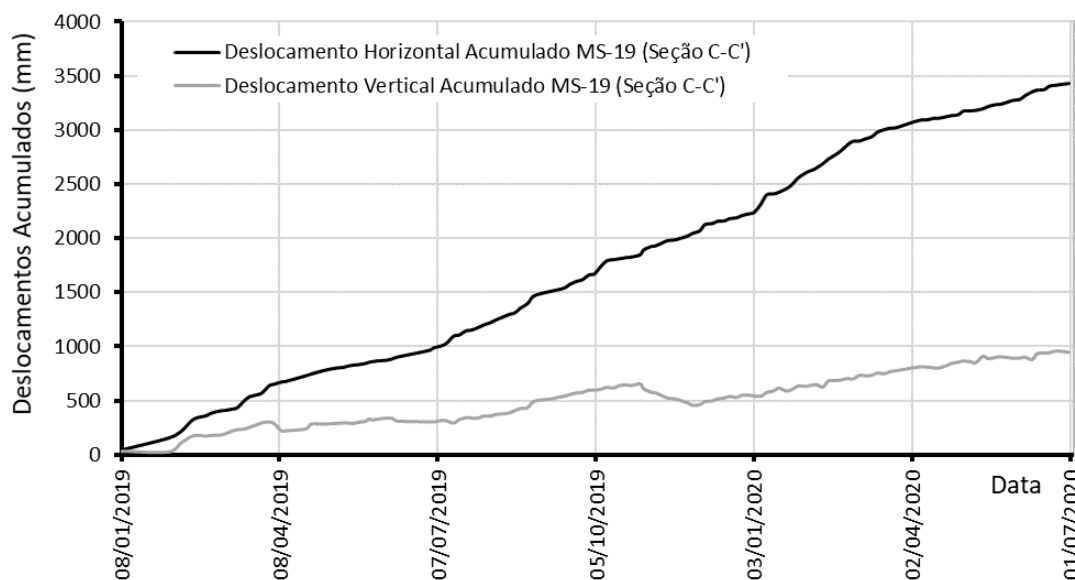


Figura 4.10 - Deslocamentos acumulados MS-19.

Em comum nas três seções transversais os deslocamentos horizontais foram superiores aos verticais. Entretanto, a relação entre deslocamento variou por seção. No marco MS-62 verificou-se uma relação  $\delta h = 10 \cdot \delta v$  (Figura 4.11), sendo a altura do talude de 30 m (seção D-D'). Já no marco da seção E-E' (MS-60) tem-se uma relação  $\delta h = 2 \cdot \delta v$  (Figura 4.12), sendo a altura do talude de 26 m. Nesse marco, nos primeiros meses de monitoração os deslocamentos mantiveram a magnitude (1:1).

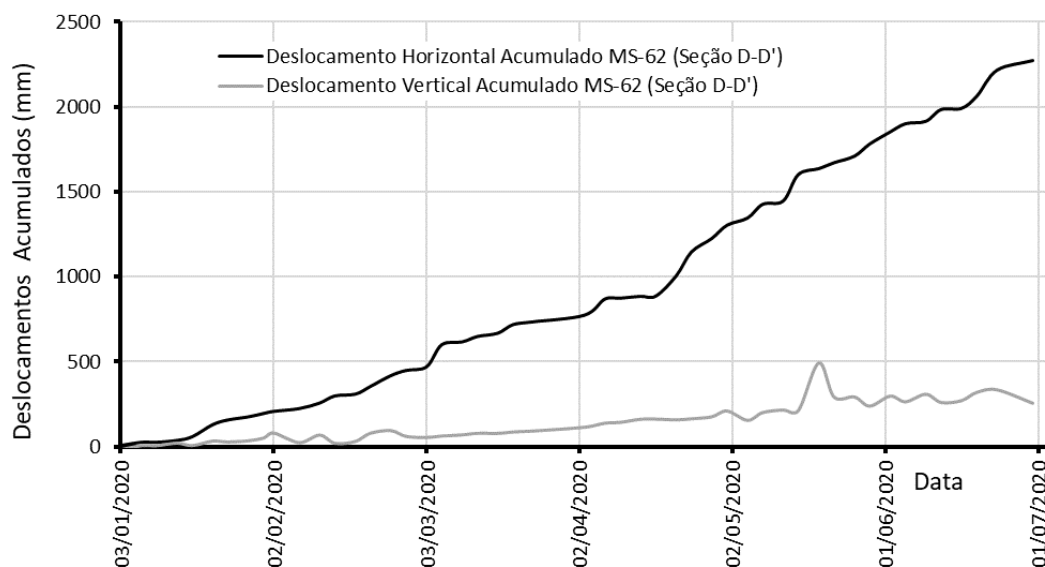


Figura 4.11 - Deslocamentos Acumulado MS-62.

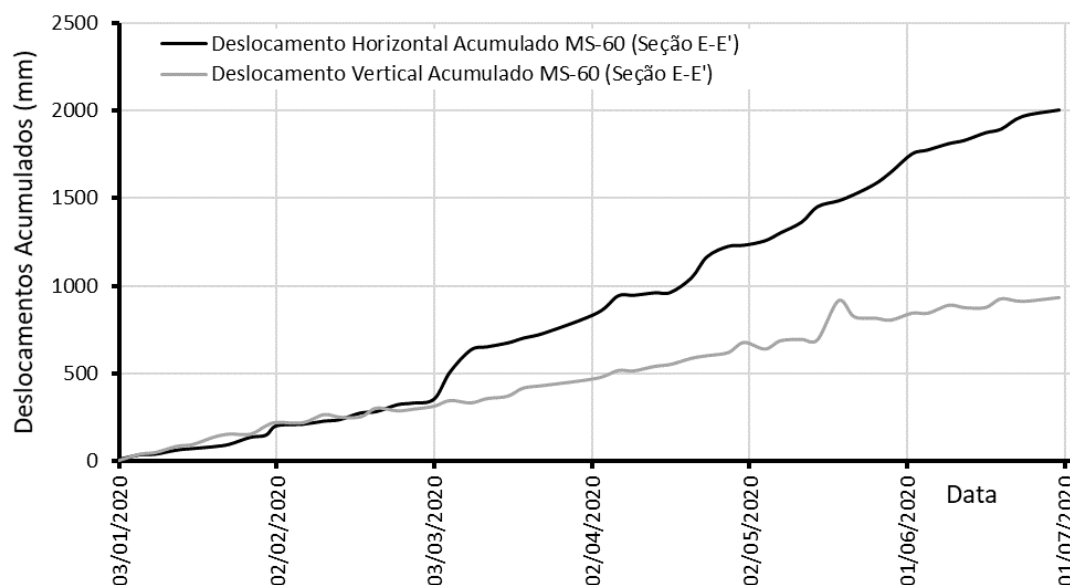


Figura 4.12 - Deslocamentos acumulados MS-60.

Apesar da monitoração destes dois marcos (MS-62 e MS-60) ter sido realizada no mesmo período (março a julho de 2020) a diferença de relação entre os deslocamentos e entre a altura do talude e deslocamentos é razoável, pois estas relações dependem da idade e características dos resíduos, da geometria dos taludes (inclinação dos taludes e largura das banquetas) e outros aspectos. A maior parte dos dados de deslocamentos se enquadram na categoria de valores adequados, assim estando dentro dos critérios de segurança estabelecidos no relatório de monitoramento geotécnico do Aterro Sanitário de Brasília.

#### 4.3.2 Recalque e velocidade de deslocamento vertical

Com os dados de deslocamento vertical e as cotas topográficas dos marcos superficiais localizados nas seções, é possível calcular a porcentagem de recalque dentro de um período determinado (Tabela 4.3).

Tabela 4.3 - Relação de Recalque em porcentagem.

Seção	Cota Inicial da Seção (m)	Marcos Superficiais	Cota do Marco (m)	Espessura da Seção em relação ao Marco	Deslocamento Vertical (m)	Recalque (%)	Período (meses)
C-C'	990	MS-19	1006	16	0,95	5,9	17
E-E'	996	MS-60	1019	23	0,93	4,0	5
D-D'	992	MS-62	1004	12	0,26	2,2	5

Para o MS-19, é notado um recalque de 5,9% em um período de 17 meses. Pode-se observar na Figura 4.13 um registro de recalque acumulado da ordem de 1m. Já no MS-60, correspondente a um período de 5 meses, apresenta um recalque de 4% (Figura 4.14). Ao comparar esse valor com o MS-19, é perceptível que em pouco tempo o marco MS-60 apresentou um recalque considerável, sendo praticamente da mesma ordem de grandeza (1 m). Para o MS-62, no período de 5 meses, é notado um recalque de 2,2%, quase a metade do valor que o MS-60 apresentou dentro do mesmo período. Observa-se na Figura 4.15 um recalque acumulado da ordem de 0,3 m.

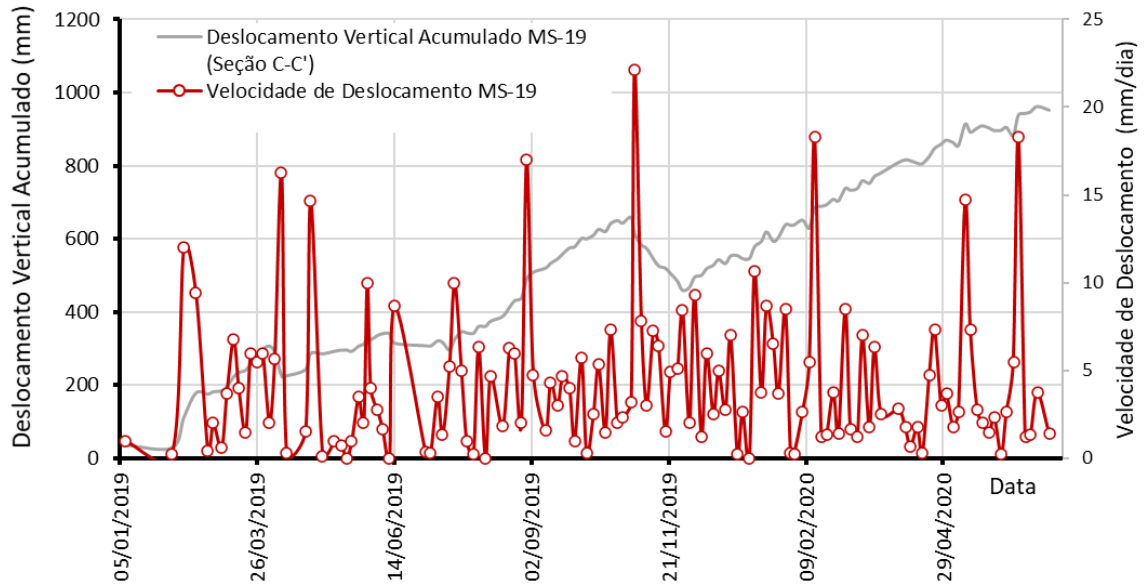


Figura 4.13 - Recalque (deslocamento vertical) registrado no MS-19.

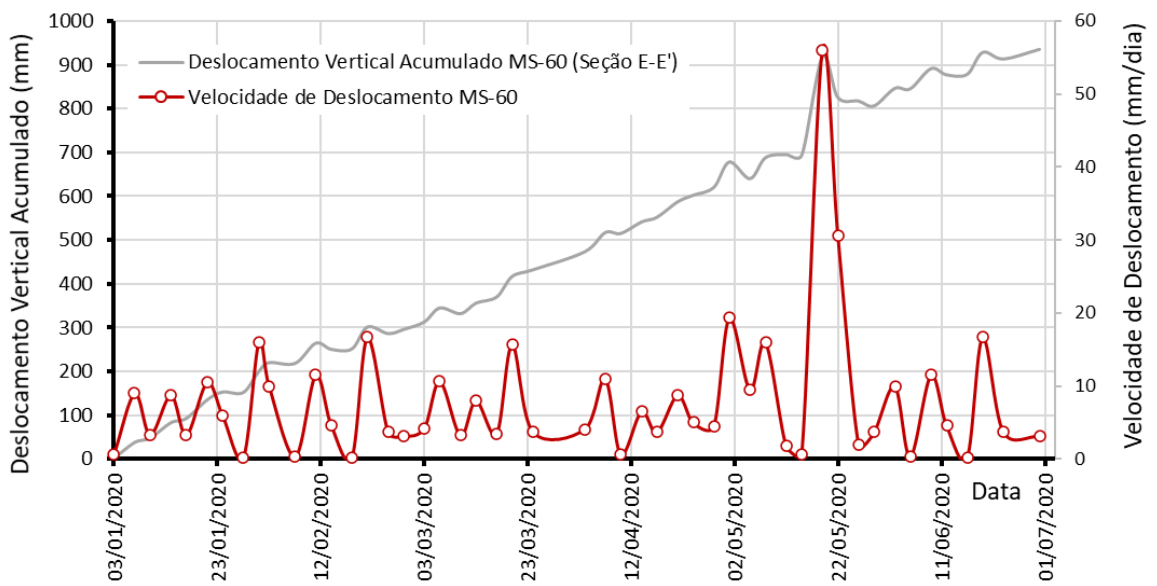


Figura 4.14 - Recalque (deslocamento vertical) registrado no MS-60.

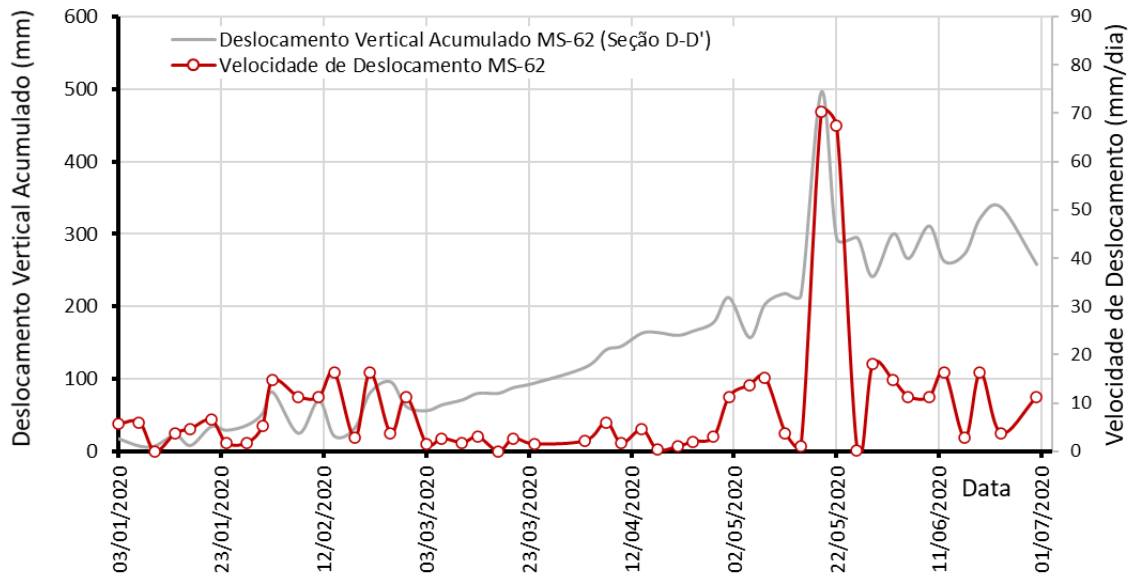


Figura 4.15 - Recalque (deslocamento vertical) registrado no MS-62.

Em comum, nas três seções C-C', D-D' e E-E', os marcos MS-19, MS-62 e MS-60 observa-se que a movimentação tende a continuar. De Jorge *et al.* (2004) monitorou velocidade dos deslocamentos verticais ao longo do tempo (Figura 4.16) no Aterro Sanitário de Vila Albertina, cuja operação foi encerrada em março de 1993. Os resultados mostram uma tendência de ocorrência de recalques, mesmo após o período de encerramento.

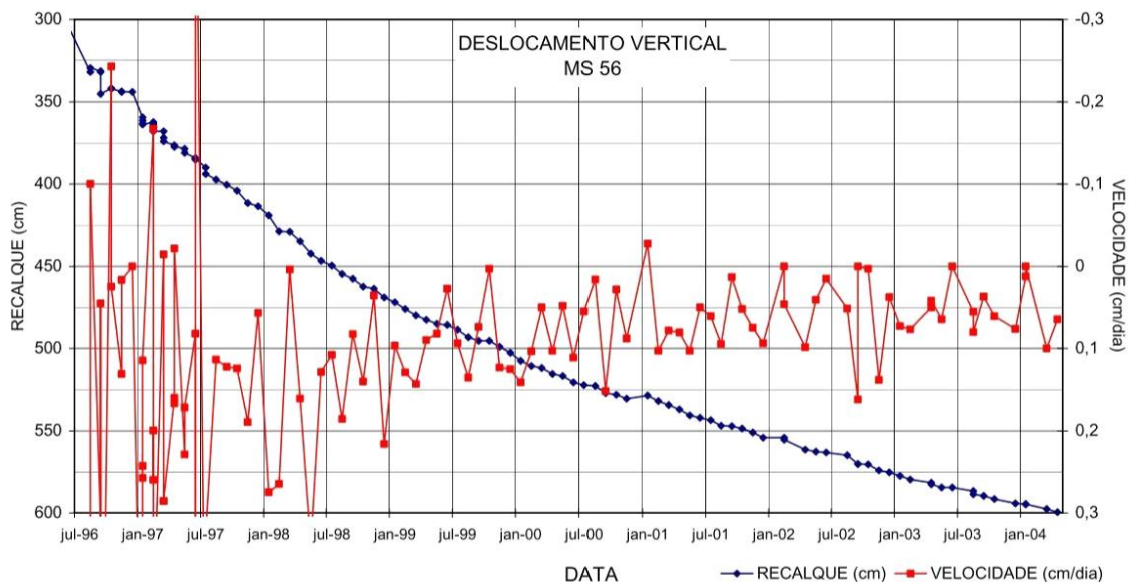


Figura 4.16 - Recalques registrados por um marco superficial instalado em Aterro Vila Albertina/SP – MS 56 (DE JORGE *et al.*, 2004)

### 4.3.3 Deslocamento vertical e precipitação acumulados

A Figura 4.17 e Figura 4.18 apresentam o valor de precipitação acumulada de 5 meses referente aos marcos MS-60 e MS-62. A partir do final de abril de 2020 tem-se o início do período seco. Na metade de maio de 2020 (ponto de inflexão) ocorre redução da velocidade de deslocamento. Em média foi necessário um determinado intervalo de tempo após o término das chuvas para haver redução dos deslocamentos, sendo da ordem de 10 a 15 dias.

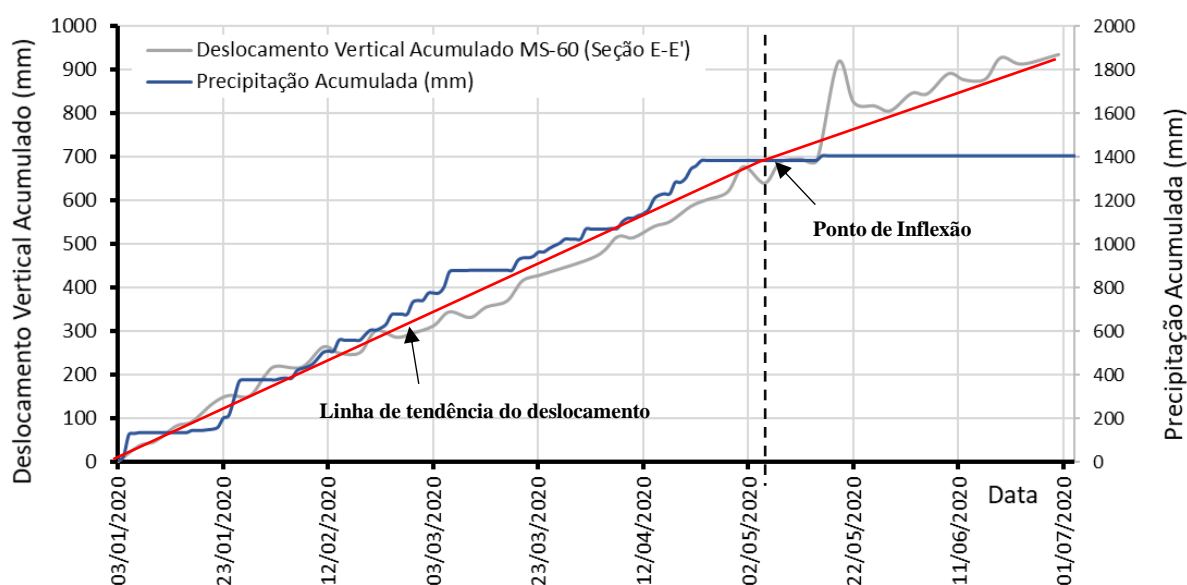


Figura 4.17 - Recalque (deslocamento vertical) x Precipitação Acumulada no MS-60.

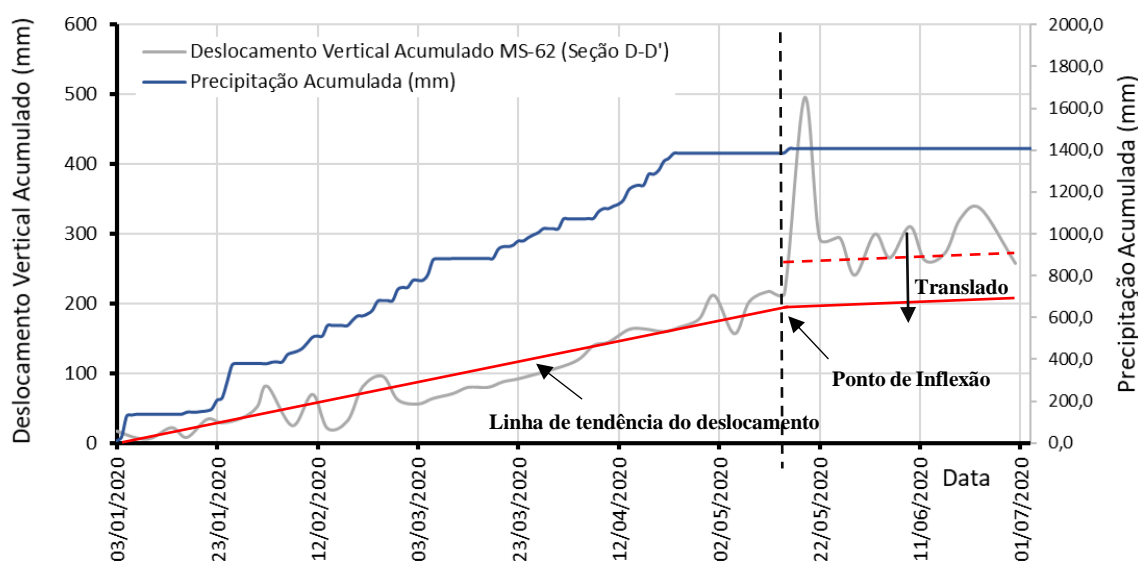


Figura 4.18 - Recalque (deslocamento vertical) x Precipitação Acumulada no MS-62.

#### 4.3.4 Relação entre deslocamentos vertical e horizontal ( $\delta_v/\delta_h$ )

Na Figura 4.19 apresenta-se a relação observada entre os deslocamentos vertical e horizontal das seções C-C', D-D' e E-E'. Para cada seção foram analisados 2 marcos. Do total de 6 marcos analisados apenas um marco (MS-60) fugiu da linha de tendência. Os demais marcos indicaram que a relação ( $\delta_v/\delta_h$ ) varia de 10% a 20%. Um dos marcos da seção E-E' (MS-60) apresentou uma relação da ordem de 45%. Este mesmo marco apresentou um comportamento diferente, em que houve momento em que o deslocamento vertical foi superior ao horizontal.

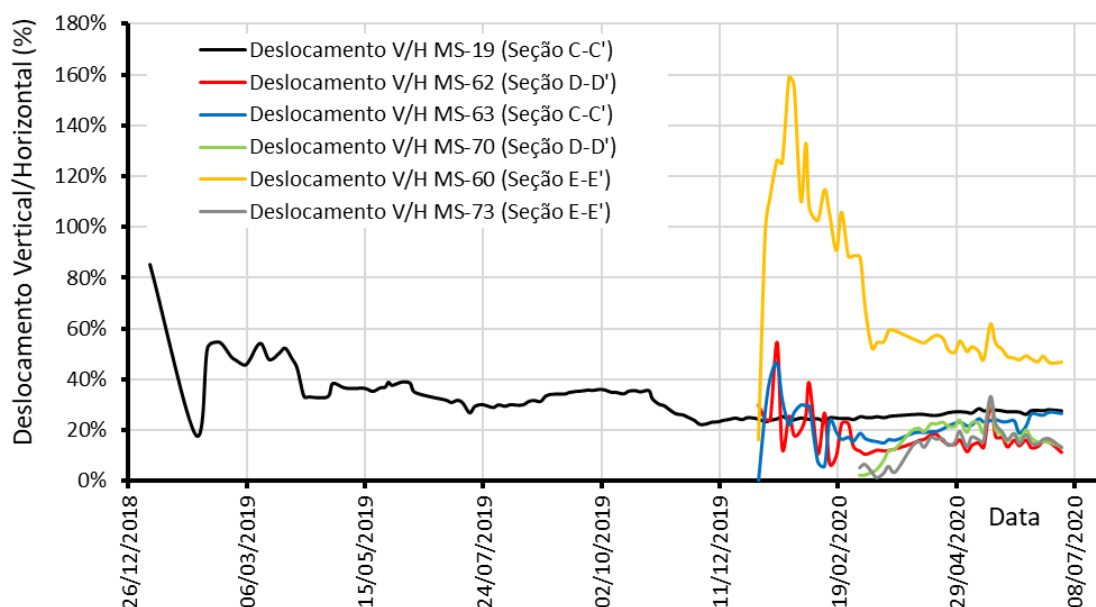


Figura 4.19 - Razão entre deslocamentos verticais e horizontais.

#### 4.4 ESTUDO DE ESTABILIDADE

O estudo de estabilidade foi realizado em duas etapas. A primeira etapa se refere à pesquisa dos possíveis parâmetros de resistência do aterro sanitário, tendo como base os dados de monitoração piezométrica de uma condição considerada atípica e hipóteses sobre o fator de segurança (FS) nessa condição. Na segunda etapa foi elaborada uma carta de risco fundamentada em análises de estabilidade com os parâmetros obtidos, variando os parâmetros de poro pressão ( $r_u$ ), de forma a obter fatores de segurança de 1 até 1,5.

#### 4.4.1 Pesquisa dos Parâmetros de Resistência (coesão e ângulo de atrito)

A pesquisa dos parâmetros de resistência do aterro sanitário foi elaborada a partir das seguintes hipóteses:

- (i) as seções C-C' e E-E' se encontravam com fator de segurança (FS) baixo no período em que a piezometria acusou parâmetros de poro pressão da ordem de 0,9 (Figura 4.20); e
- (ii) considerando que o ângulo de atrito poderia variar de 25° a 35°, pesquisou-se a coesão para um FS igual a 1,1 e parâmetros de poro pressão variando de 0,85 a 0,95.

Buscando reproduzir com mais fidelidade os possíveis valores de ângulo de atrito e coesão para o RSU foram considerados os valores encontrados nas pesquisas realizadas por Sánchez-Alciturri *et al.* (1993) e apresentadas na Figura 4.21, na compilação de parâmetros apresentados na Tabela 2.4, representada na Figura 4.22, e nos ensaios de Turczynski (1988), Figura 4.23.

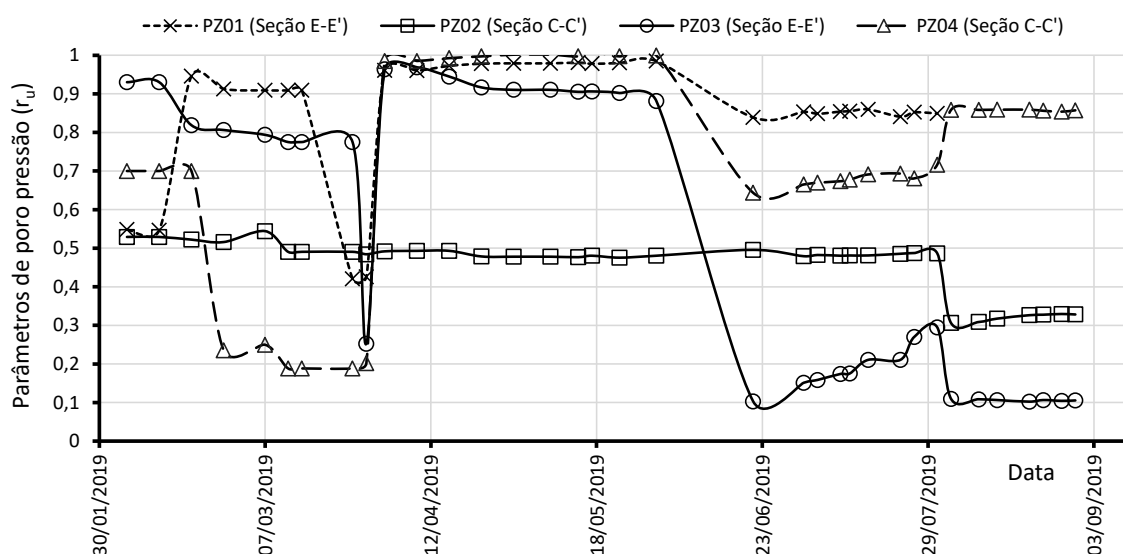


Figura 4.20 – Parâmetros de poro pressão observados nas monitorações dos piezômetros das seções C-C' e D-D'.



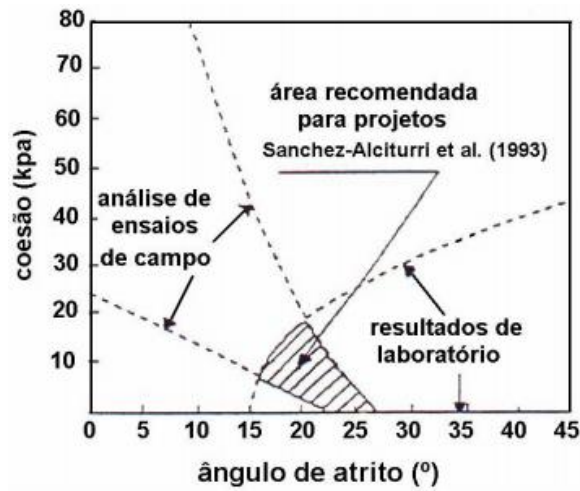


Figura 4.21 - Faixa de valores de parâmetros de resistência para resíduo sólido urbano recomendada para projetos (Sánchez-Alciturri *et al.*, 1993).

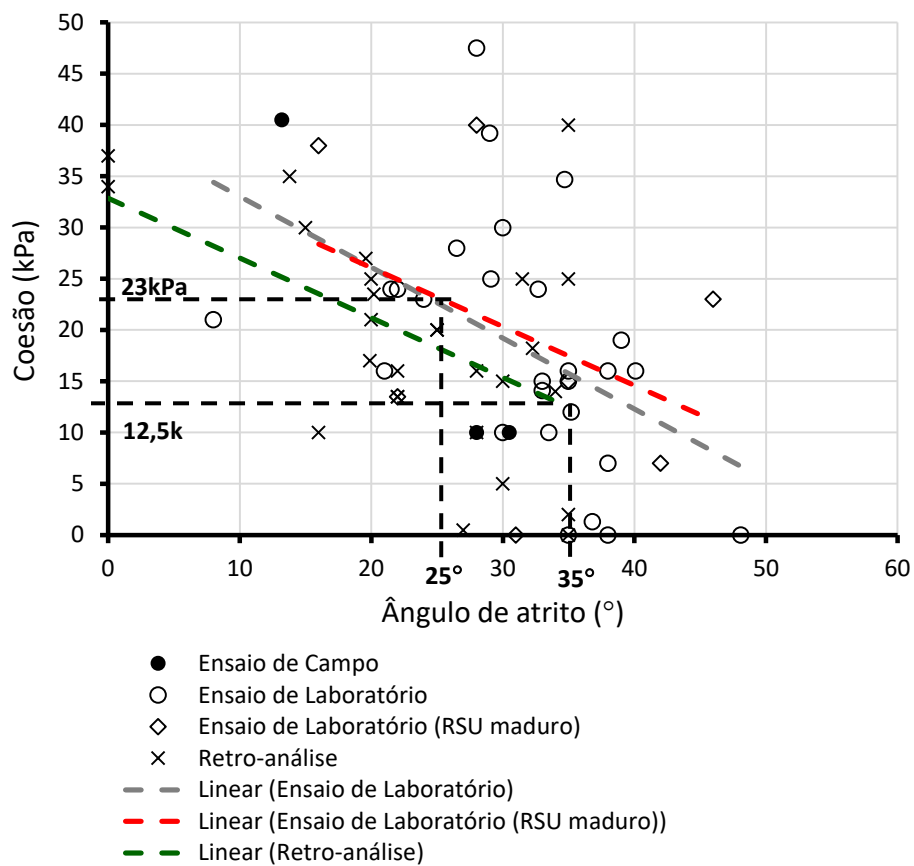


Figura 4.22 – Plotagem dos valores de ângulo de atrito e coesão encontrados na literatura.

Idade (anos)	$\phi'$ (°)	$c'$ (kN/m <sup>2</sup> )
Novo	38° - 40°	40 – 50
3	35°	15
5	32°	12
15	26°	10

Figura 4.23 - Parâmetros de cisalhamento para o Lixo (adaptada de Turckzynski, 1988).

De acordo com Jucá (2020), com base no acompanhamento da execução do Aterro Sanitário de Brasília, durante o período entre janeiro de 2017 e junho de 2020 foram obtidos o volume aterrado (2.303.939,22 m<sup>3</sup>) e a massa lançada (2.205.130,98 t), e desta forma foi determinado o peso específico médio adotado nas análises para o resíduo de 9,6 kN/m<sup>3</sup>.

Na Tabela 4.4 são apresentados considerações e resultados do estudo de estabilidade para fins de estimativa dos parâmetros de resistência. Para cada seção transversal foi adotado que na condição de parâmetro de poro pressão ( $r_u$ ) entre 0,85 e 0,95 o fator de segurança (FS) seria igual a 1,1. Nessa condição foram avaliados os valores de coesão para 3 diferentes ângulos de atrito, 25°, 30° e 35°.

Tabela 4.4 - Dados utilizados nas análises de estabilidade.

Seção	Fator de Segurança	$r_u$	Phi (°)	Coesão (kPa)
C-C'	1,1	0,85	25°	17,5
C-C'	1,1	0,95	25°	23,5
C-C'	1,1	0,85	30°	16
C-C'	1,1	0,95	30°	22
C-C'	1,1	0,85	35°	14
C-C'	1,1	0,95	35°	22,5
E-E'	1,1	0,85	25°	15,5
E-E'	1,1	0,95	25°	20,5
E-E'	1,1	0,85	30°	14,5
E-E'	1,1	0,95	30°	20
E-E'	1,1	0,85	35°	13
E-E'	1,1	0,95	35°	19

Os resultados dos estudos de estabilidade são sintetizados por meio de plotagem gráfica, conforme apresentado na Figura 4.24. No gráfico são apresentadas as possíveis combinações de parâmetros de resistência. No Anexo I é possível encontrar todas as análises de estabilidade que foram realizadas pelo método do equilíbrio limite de *Morgenstern & Price* com auxílio do *software Slide*. Note que a coesão se encontra entre 19 kPa a 23 kPa para a condição mais crítica ( $r_u=0,95$ ) e entre 13 kPa e 17,5 kPa para  $r_u=0,85$ . Tais valores são consistentes com os dados compilados na literatura. Observa-se que o ângulo de atrito é menos importante que a coesão para a estabilidade do talude, pois para uma variação de  $10^\circ$  foi necessário apenas uma diferença da ordem de 4 kPa, para obter um mesmo fator de segurança. Dentro das recomendações de Sánchez-Alciturri *et al.* (1993) os valores do limite inferior encontrado nos estudos de estabilidade ( $\phi=25^\circ$  e  $c=13$  kPa) podem ser considerados razoáveis para o RSU.

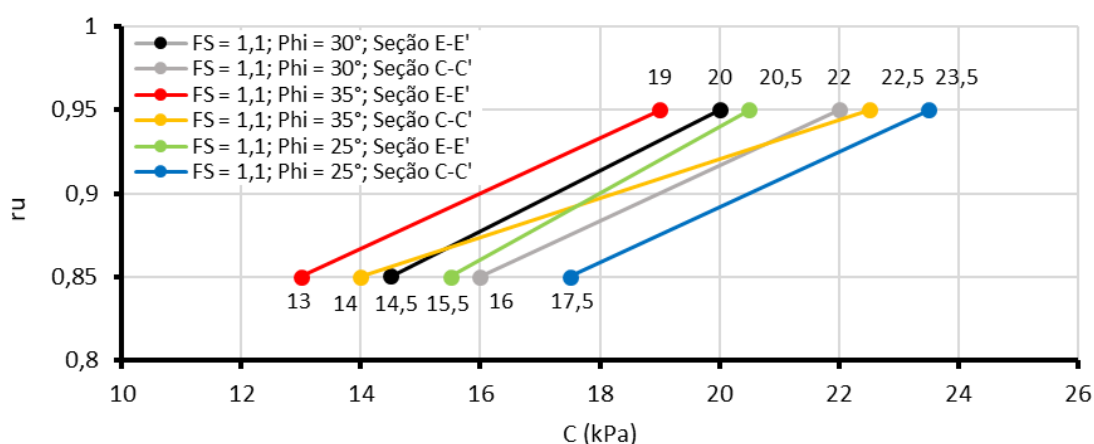


Figura 4.24 – Possíveis valores de coesão e ângulo de atrito obtidos pelas hipóteses adotadas nos estudos de estabilidade.

#### 4.4.2 Carta de Risco

Objetivando a construção de uma Carta de Risco (Figura 4.27), com base em um parâmetro que seja medido pela monitoração do aterro sanitário, foram elaboradas análises de estabilidade na seção transversal mais crítica (C-C'), variando o parâmetro de poro pressão e mantendo a ordem de grandeza dos parâmetros de resistência estimados para o aterro ( $\phi=25^\circ$  e  $c=13$  kPa) e do peso específico encontrado por Jucá (2020),  $\gamma=9,6$  kN/m<sup>3</sup>. Das análises realizadas são apresentadas apenas aqueles referentes aos fatores de segurança

iguais a 1 e 1,5 (Figura 4.25 e Figura 4.26). Estes dois extremos de fatores de segurança (FS) equivalem aos parâmetros de poro pressão ( $r_u$ ) de 0,8 e 0,5. Valores de  $r_u$  inferiores a 0,5 correspondem a FSs superiores a 1,5. Pela carta de risco considera-se uma condição de atenção quando o  $r_u$  se aproxima de 0,6 (FS=1,35), onde acréscimo de pouco menos de 0,1 representaria um risco, pois se aproximaria de um FS de 1,2. Assim, ao alcançar a condição de alerta deve-se agir o quanto antes para reduzir o nível piezométrico.

Em suma, a partir da Carta de Risco, observa-se três níveis de alerta:

- Condição estável:  $r_u < 0,6$ ;
- Nível de alerta:  $0,6 \leq r_u < 0,68$ ; e
- Risco de Movimentação:  $r_u \geq 0,68$ .

Note que os valores de parâmetros de resistência são conservadores, visto que parâmetro de poro pressão ( $r_u$ ) superior a 0,8 já ocorreu na seção C-C' e ela não rompeu. Isso mostra que os parâmetros de resistência atuais são superiores aos adotados. Entretanto, levando-se em consideração os estudos de Turckzynski (1988), que mostram a redução dos parâmetros de resistência ao longo do tempo, os valores adotados nas análises para confecção da carta de risco podem ser representativos para uma condição de lixo maduro, cujos processos de degradação estariam mais avançados, reduzindo, portanto, a resistência ao cisalhamento do RSU. Mas, independentemente dos parâmetros de resistência, fica evidenciado a importância da redução dos níveis piezométricos para melhorar a condição de estabilidade do aterro sanitário.

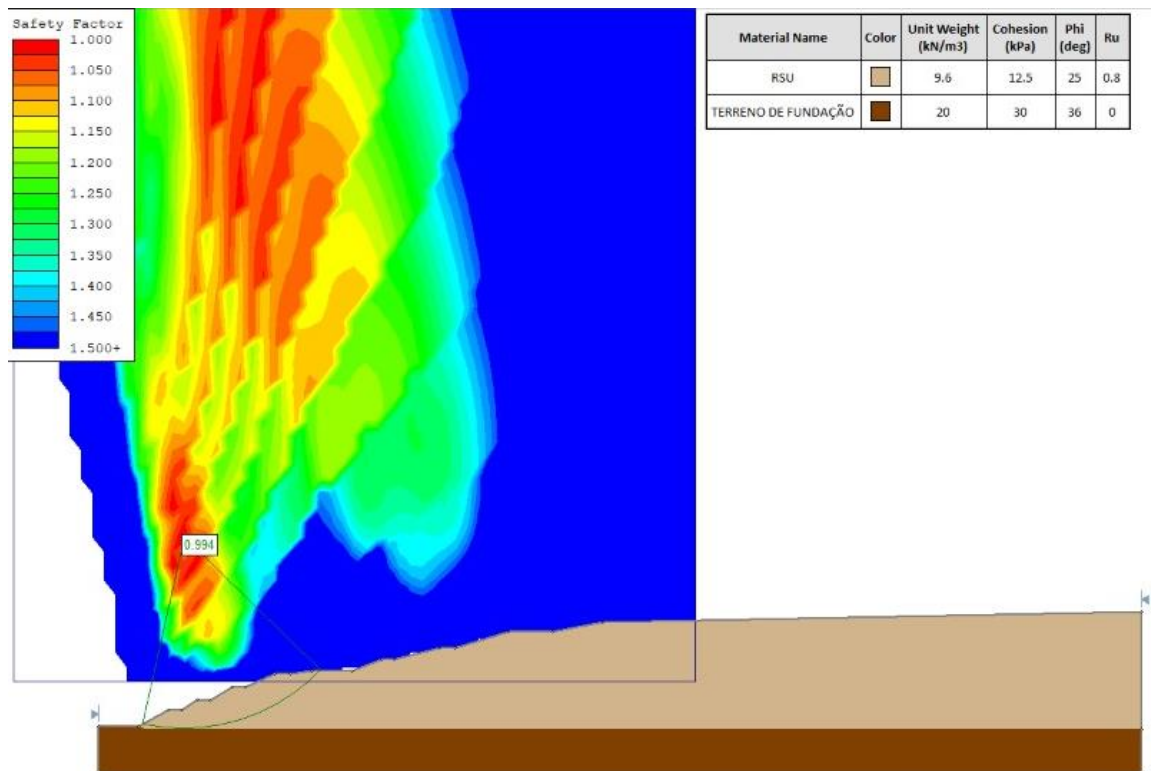


Figura 4.25 - Análise de estabilidade da seção C-C' para  $r_u = 0,8$  (FS=1).

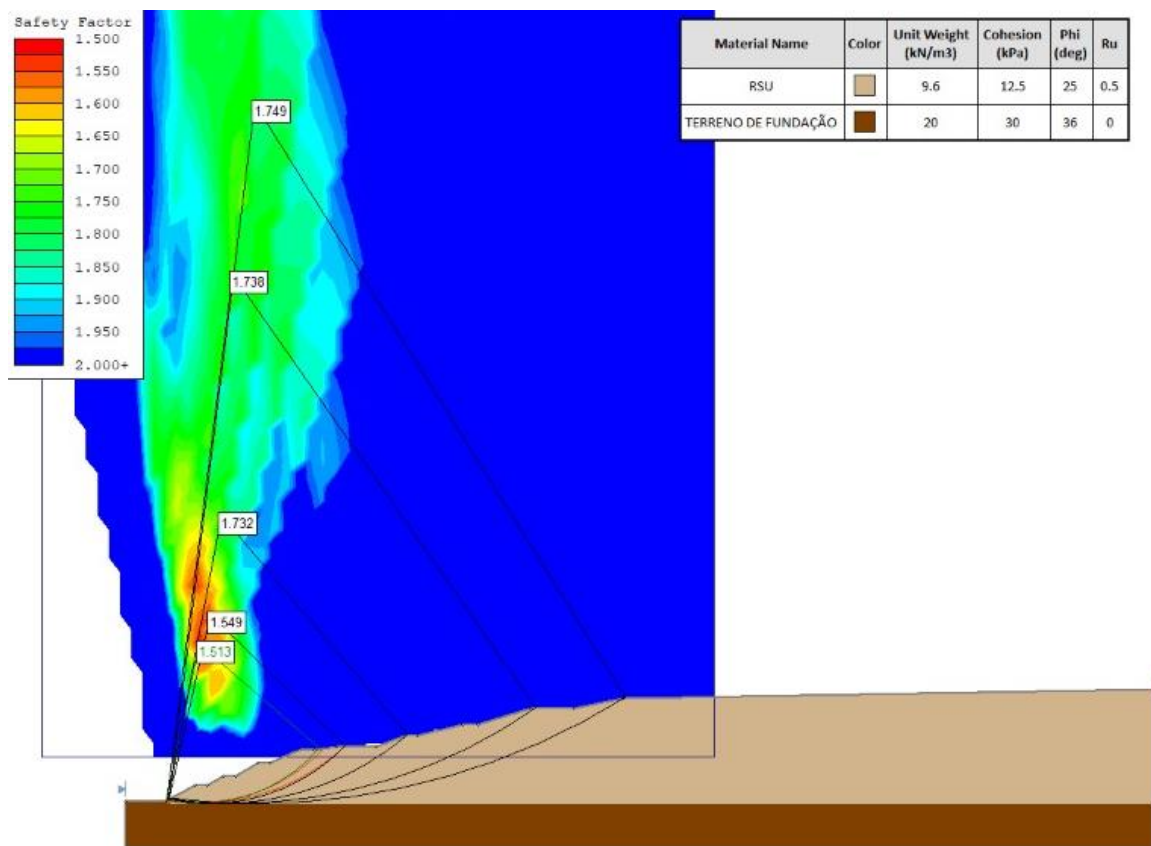


Figura 4.26 - Análise de estabilidade da seção C-C' para  $r_u = 0,5$  (FS~1,5).

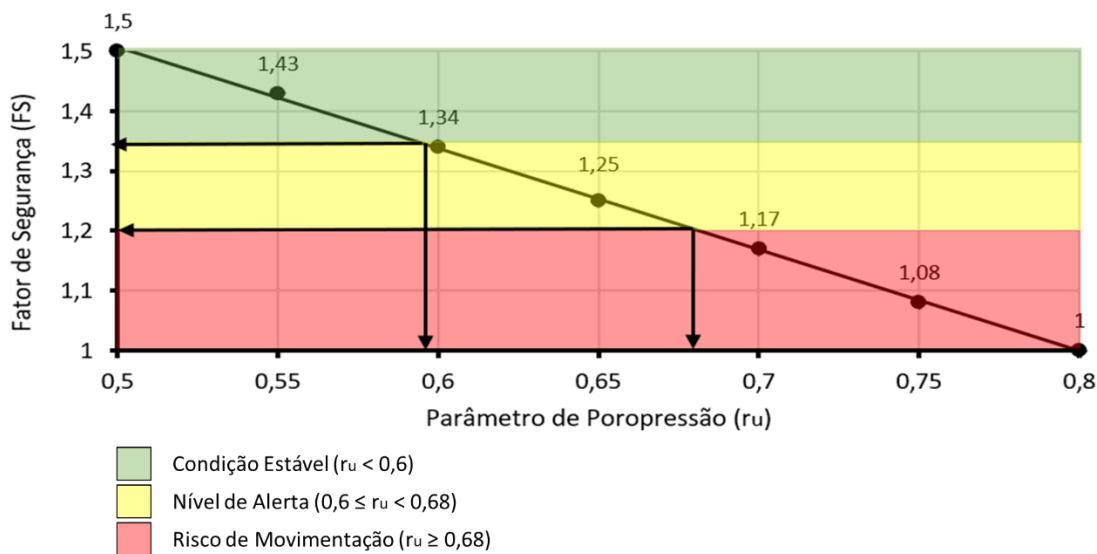


Figura 4.27 - Carta de risco para seção C-C'.

## 5. CONCLUSÃO

No presente Projeto Final foram apresentados e discutidos os resultados de algumas monitorações realizadas no Aterro Sanitário de Brasília (ASB). Com base nos dados da monitoração do ASB, buscou-se correlações entre a precipitação, piezometria e deslocamentos. Verificou-se que não há correlação entre estes parâmetros. Entretanto, como Jucá e Fernandes (2020) verificaram boa correlação entre chuva e vazão dos drenos, pode-se dizer que há um bom funcionamento dos drenos de chorume e isso justifica ausência de relação entre precipitação e níveis piezométricos.

Não existe uma relação direta entre chuva e deslocamentos, mas com a estiagem a velocidade de deslocamento se reduz. Entretanto, existe um determinado tempo de resposta para a redução da velocidade dos deslocamentos, sendo da ordem de 10 a 15 dias. Observou-se que os deslocamentos horizontais são superiores aos verticais e que os resultados indicam que a movimentação ainda vai continuar ocorrendo no aterro. Em linhas gerais, a relação entre os deslocamentos vertical e horizontal variou de 10% a 20%.

Uma forma muito eficaz de se determinar parâmetros de resistência de um maciço qualquer é por meio de retroanálise de uma ruptura ocorrida. Em se tratando de maciço de resíduos sólidos urbanos (RSU) as incertezas são significativas. Assim, foi feita uma pesquisa de

possíveis valores de ângulo de atrito e coesão, com base na hipótese que o maior nível piezométrico monitorado, que levou a parâmetros de poro pressão da ordem de 0,9, corresponderia a um fator de segurança (FS) de 1,1. A pesquisa indicou valores limites de coesão com diferença de 4 kPa para um intervalo de ângulo de atrito de 10° (25° a 35°). Isso mostrou a importância da coesão na condição de estabilidade. Fundamentado nos resultados das análises e nos dados da literatura, considerou-se que os valores do limite inferior encontrado nos estudos de estabilidade ( $\phi=25^\circ$  e  $c=13$  kPa) podem ser considerados razoáveis para o RSU do ASB. No caso, o peso específico utilizado foi aquele determinado de forma direta no ASB por Jucá (2020), sendo igual a  $9,6 \text{ kN/m}^3$

Com base nos parâmetros de resistência estimados para o ASB foi elaborada uma carta de risco, que permitisse obter o fator de segurança (FS) por meio de um dado medido na monitoração do aterro sanitário. As análises realizadas na seção mais crítica foram limitadas para fatores de segurança iguais a 1 e 1,5. Estes dois extremos de fatores de segurança (FS) equivalem aos parâmetros de poro pressão ( $r_u$ ) de 0,8 e 0,5. Considera-se uma condição de atenção quando o  $r_u$  se aproxima de 0,6 (FS=1,35), onde acréscimo de pouco menos de 0,1 se aproximaria do FS unitário. Isso evidencia a importância da redução dos níveis piezométricos para melhorar a condição de estabilidade do aterro sanitário. Os valores de parâmetros de resistência são conservadores, visto que parâmetro de poro pressão ( $r_u$ ) superior a 0,8 já ocorreu na seção analisada e a mesma não rompeu. Considerando que os parâmetros de resistência reduzem ao longo do tempo, os valores adotados para confecção da carta de risco podem ser representativos para lixo maduro.

## **5.1 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS**

Como sugestão para futuras pesquisas, seria interessante complementar os dados de monitoração dessa pesquisa e aprofundar mais os estudos, que podem envolver tanto análises analíticas, quanto numéricas e também o acréscimo da chuva acumulada. Em relação aos parâmetros de resistência poderia ser feito um tratamento estatístico, considerando inclusive e envoltória de resistência bi-linear. Nesse sentido, poderiam ser feitas análises probabilísticas da condição de estabilidade do aterro sanitário.

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ABMS (2010). A Ruptura Do Aterro De Itaquaquecetuba. Disponível em: <<http://www.abms.com.br/home/temas/geoambiental/indice/512-a-ruptura-do-aterro-de-itaquaquecetuba>>.

ABNT NBR 8.419, 1992. *NBR 8.419: Apresentação de projetos de Aterros Sanitários de Resíduos Sólidos Urbanos*. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABNT NBR 10.004, 2004. *NBR 10.004: Classificação de Resíduos Sólidos*. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT NBR 11.682, 2009. *NBR 11.682: Estabilidade de Encostas*. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.

Abrelpe - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (2018). *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2018/2019*. Disponível em: <<http://abrelpe.org.br/download-panorama-2018-2019/>>. Acesso em: 03 abr, 2020.

ALCANTARA, P. R. (2007). *Avaliação da Influência da Composição de Resíduos Sólidos Urbanos no Comportamento de Aterros Simulados*. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). Recife, PE, Brasil.

BEAVEN, R., POWRIE, W. & ZARDAVA, K. (2009). *Chapter x Hydraulic properties of MSW*. In: Chapter for ASCE Special Publication, n 12.

BENVENUTO, C. (2008). *Estabilidade de Aterros Sanitários*. Associação Brasileira de Resíduos Sólidos e Limpeza Pública, São Paulo.

BLIGHT, G. E. & FOURIE, A. B. (2005). *Catastrophe Revisited – Disastrous Flow Failures of Mine and Municipal Solid Waste*. Geotechnical and Geological Engineering.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 02 de Agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, Brasil, 03 ago. 2010.

BOSCOV, M. E. G. (2008). *Geotecnia Ambiental*. São Paulo: Oficina de Textos, 2008, v.1. 248p.

CAMPI, T, M, O. (2011). *Estimativa dos Parâmetros de Resistência ao Cisalhamento e De Módulo de Elasticidade dos Resíduos Sólidos Urbanos utilizando Resultados de*



*Ensaio de Placa em Aterro Sanitário*. Dissertação MSc, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

CARDIM, R. D. (2008). *Estudo da resistência de resíduos sólidos urbanos por meio de ensaios de cisalhamento direto de grandes dimensões*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, DF, Brasil.

CARVALHO, M. F. (1999). *Comportamento Mecânico de Resíduos Sólidos Urbanos*. Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Doutor em Geotecnia.

COMLURB, (2005). *Caracterização Gravimétrica e Microbiológica dos Resíduos Sólidos Domiciliares do Município do Rio de Janeiro*. Rio de Janeiro, COMLURB.

CHRISTOPHER, B. R.; GIROUD, J. P.; JURAN, I.; MITCHELL, J. K.; SCHLOSSER, F.; DUNNICLIFF, J. (1990). *Reinforced soil structures - Design and construction guidelines*. US DOT Federal Highway Administration, Report FHWA/RD/89-043, Washington, D.C.

COUMOULOS, D. G.; KORYALOS, T. P.; METAXAS, I. L. & GIOKA, D. A. (1995). *Geotechnical Investigation at the Main Landfill of Athens*. Proceedings Sardinia 95, Fifth International Landfill Symposium, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy, October 1995, p. 885 – 895.

DACIOLO, L. V. P. (2020). *Parâmetros de resistência de RSU: Abordagem probabilística para análises de estabilidade de taludes de aterros de resíduos*. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para o título de Mestre em Engenharia Civil.

DEL GRECCO, O. & OGGERI, C. (1993). *Geotechnical Parameters of Sanitary Wastes*. IV International Landfill Symposium – Sardinia'93 S. Margherita di Pula, Italy, 1421-1431.

DE JORGE, F. N., BAPTISTI, E., GONÇALVES, A. (2004). *Monitoramento em Aterros Sanitários nas Fases de Encerramento e de Recuperação: desempenhos mecânico e ambiental*. In: RESID 2004 Seminário sobre Resíduos Sólidos.

DE LAMARE NETO, A., (2004). *Resistência ao Cisalhamento de Resíduos Sólidos Urbanos e de Materiais Granulares*. Tese de Doutorado, UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

DISTRITO FEDERAL. *Plano Distrital de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos*. Brasília, 2018. Disponível em: <<http://www.so.df.gov.br/wp-content/uploads/2018/03/PDGIRS.pdf>>. Acesso em 16 jul. 2020.

DIXON, N. & JONES, D. R. V. (2004). *Engineering properties of municipal solid waste*. Accepted 26 November 2004. In: Nottinghamshire, NG12 5BL, UK.

EHRlich, M.; COSTA, D. P.; SILVA, R. C. (2018). *Behavior of a colluvial slope located in Southeastern Brazil*. Springer-Verlag GmbH Germany, part of Springer Nature 2018.

GABR, M.A & VALERO, S. N. (1995). “*Geotechnical Properties of Municipal Solid Waste*”. *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, v.18, n. 018 (Jun), pp. 241-251.

GEORIO (2014). *Secretaria Municipal de Obras*. Fundação Instituto de Geotécnica a do Município do Rio de Janeiro, Manual Técnico de Encostas: Volume I, Rio de Janeiro

GEORIO (2014). *Secretaria Municipal de Obras*. Fundação Instituto de Geotécnica a do Município do Rio de Janeiro, Manual Técnico de Encostas: Volume II, Rio de Janeiro

HENDRON, D. M. (2006). *Large landslide risks in solid waste facilities. Geotechnical fundamentals count*. *Geo-Strata*, pp. 28-30.

HILGER, H. H.; BARLAZ, M. A. *Anaerobic Decomposition of Refuse in Landfills and Methane Oxidation in Landfill Cover Soils*. *Manual of environmental microbiology*. Washington: ASTM Press, 2002. p. 696-718.

IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (2012). *Diagnóstico dos Resíduos Sólidos*. Brasília, 2012. Disponível em: <[http://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/relatoriopesquisa/121009\\_relatorio\\_residuos\\_solidos\\_urbanos.pdf](http://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/relatoriopesquisa/121009_relatorio_residuos_solidos_urbanos.pdf)>. Acesso em 16 jul. 2020.

JESSBERGER, H. L.; SYLLWASSCHY, O. & KOCKEL, R. (1995). “*Investigation of Waste Body Behavior and Waste-Structure Interaction*”. *Proceedings Sardina 95*, Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, São José dos Campos, SP, pp. 384-391.

JUCÁ, J. F. T. (2003). *Disposição Final dos Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil*. 5º Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental – REGEO. Porto Alegre, RS.

JUCÁ, J. F. T. (2020). *Investigação, Projeto e Controle de Aterros Sanitários*. Palestra on-line, 20 agosto 2020 às 18:00 h, CicloGB, Canal e Grupo Geotecnia Brasil. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=hwhZXVjtlxQ&t=4s>>. Acesso em: 20 de nov. 2020.

JUCÁ, J. F. T.; CABRAL, J. J. P. S.; MONTEIRO, V. E. D.; SANTOS, S. M. & PERRIER Jr, G. S. (1997). “*Geotechnics of a Municipal Solid Waste Landfill in Recife, Brazil*”. Recent Developments in Soil And Pavements Mechanics, Almeida (ed), Balkema, Rotterdam, ISBN9054108851, p. 429-436.

JUCÁ, J.F.T.; FERNANDES, F. (2020). *Avaliação de dados de geração e características do chorume e proposta de alternativa de tratamento adequado para o lixiviado produzido no Aterro Sanitário de Brasília*. Produto 1. Consultoria UGP/ADASA/UNESCO.

JUCÁ, J.F.T. (2020). *Diagnóstico das Condições Operacionais e de Monitoramento do Aterro Sanitário de Brasília*. Produto 2. Consultoria UGP/ADASA/UNESCO.

KAVAZANJIAN, E.; MATASOVIC, N.; BONAPARTE, R. & SCHMERTMAM, G. R. (1995). *Evaluation of MSW Properties for Seismic Analyses*. Geonviromental 2000. Geotechnical Special Publication nº 46, ASCE, vol.2, p.1126 – 1142. Ed. Yalcin B. Acar and David E. Daniel, New Orleans.

KAVAZANJIAN, E.; MERRY, M. S. (2005). *The 10 July 2000 Payatas landfill failure*. 10<sup>th</sup> International Waste Management and Landfill Symposium.

KNOCHENMUS, G.; WOJNAROWICZ, M. & VAN IMPE (1998). *Stability of Municipal Solid Wastes*. In: Proc. Of the Third International Congress in Environmental Geotechnics, pp. 977 – 1000, Lisboa, Portugal, Sêco e Pinto (ed.), Balkema, Rotterdam, ISBN 90 5809 006x.

KOERNER, R. M. & SOONG, T. Y. (1999). *Leachate in land hills: the stability issues*. Geotextiles and Geomembranes, n 18, pp. 293-309. Accepted 23 October 1999.

KÖLSCH, F. (1995). *Material values for some mechanical properties of domestic waste*. 5th International Landfill Symposium.

Lemes, Luana. *Aterro Sanitário de Brasília comemora aniversário de dois anos*. Serviço de Limpeza Urbana do Distrito Federal, Brasília, DF, 28 de janeiro de 2019. Acesso em 09 de nov. 2020.

- MACHADO, S. L., CARVALHO, M. F., GOURC, J. P., VILAR, O. M., NASCIMENTO, J. C. F. (2009). *Methane generation in tropical landfills: Simplified methods and field results*. Waste Management 29 (2009) 153-161. Contests lists available at ScienceDirect. Waste Management.
- MAHLER, C. F.; BURIN, E. & OLIVEIRA, F. J. P. (1998). *Reflections on the Stability of a Municipal Sanitary Landfill*.
- MARIANO, M. O. H. & JUCÁ, J. F. T. (1998). *Monitoramento de Recalques no Aterro de Resíduos Sólidos da Muribeca*. XI CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, V.3, novembro de 1988, Brasília, p. 1671 – 1678.
- MERRY, M. S., KAVAZANJIAN, E., & FRITZ, W. U. (2005). *Reconnaissance of the July 10, 2000, Payatas landfill failure*. Journal of Performance of Constructed Facilities, ASCE, pp. 100-107.
- MORGENSTERN, N. R. & PRICE, V. E. (1965). *The analysis of the stability of general slip surfaces Géotechnique*. Vol 15(1), pp. 79-93.
- NORBERTO, A. S., CORRÊA, L. C., MARIANO, M. O. H., JUCÁ, J. F. T. (2020). *Análise Estatística da Variabilidade de Parâmetros de Resistência ao Cisalhamento de Aterros Sanitários*. Journal of Environmental Analysis and Progress V, 05 N. 01x (2020) 108-116.
- PALESTRA MILTON VARGAS DEBATE ATERRO SANITÁRIO E GEOTECNIA (2019). Disponível em: <<http://portalclubedeengenharia.org.br/2019/05/24/palestra-milton-vargas-debate-aterro-sanitario-e-geotecnia/>>. Acesso em 08 de nov. 2020.
- PORTELA, O. M. & RIBEIRO, J. C. J. (2014). *Aterros Sanitários: aspectos gerais e destino final dos resíduos*. Revista Direito Ambiental e Sociedade, v.4, n.1, 2014, p. 115 – 134.
- SÁNCHEZ-ALCITURRI, J. M./ PALMA, J.; SAGASETA, C. & CAÑIZAL, J. (1993). *Mechanical Properties of Wastes in a Sanitary Landfill*. In: Proc. Of International Conference Green' 93 – Waste Disposal by Landfill. Sarsby (ed.), Balkema, Rotterdam, ISBN 90 5410 356 6, pp. 357-363.

SANTOS, G. A. (2008). *Análise tensão deformação e por equilíbrio limite do mecanismo de tombamento flexural*. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia do Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto.

SANTOS, L. A. O. & PRESA, E. P. (1995). *Compressibilidade de Aterros Sanitários Controlados*. III Simpósio Sobre Barragens de Rejeitos e Disposição de Resíduos – REGEO'95, v.II, Ouro Preto/MG, p.577-591.

SILVA, R. C. (2019). *Notas de aula de Análise de Risco em Geotecnia*. Programa de Pós-Graduação em Geotecnia PPGG, Dep. Eng. Civil e Ambiental ENC, Faculdade de Tecnologia FT, Universidade de Brasília UnB.

SILVA, R. C.; COSTA, D. P.; EHRLICH, M. (2018). *Movimentação de Rastejo e Proposta de Estabilização de um Depósito de Solo Residual de Filito*. In: V Simpósio Pan-americano de Deslizamentos (SPD), Salvador / BA. Geotecnia e Desenvolvimento Urbano.

SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (2020). *Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos – 2018*. Disponível em: <<http://www.snis.gov.br/diagnostico-anual-residuos-solidos/diagnostico-do-manejo-de-residuos-solidos-urbanos-2018>>. Acesso em 03 abr. 2020.

SCHULER, A. R. (2010). *Análise do Comportamento de um Aterro Municipal de Resíduos Sólidos Urbanos Instrumentado*. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

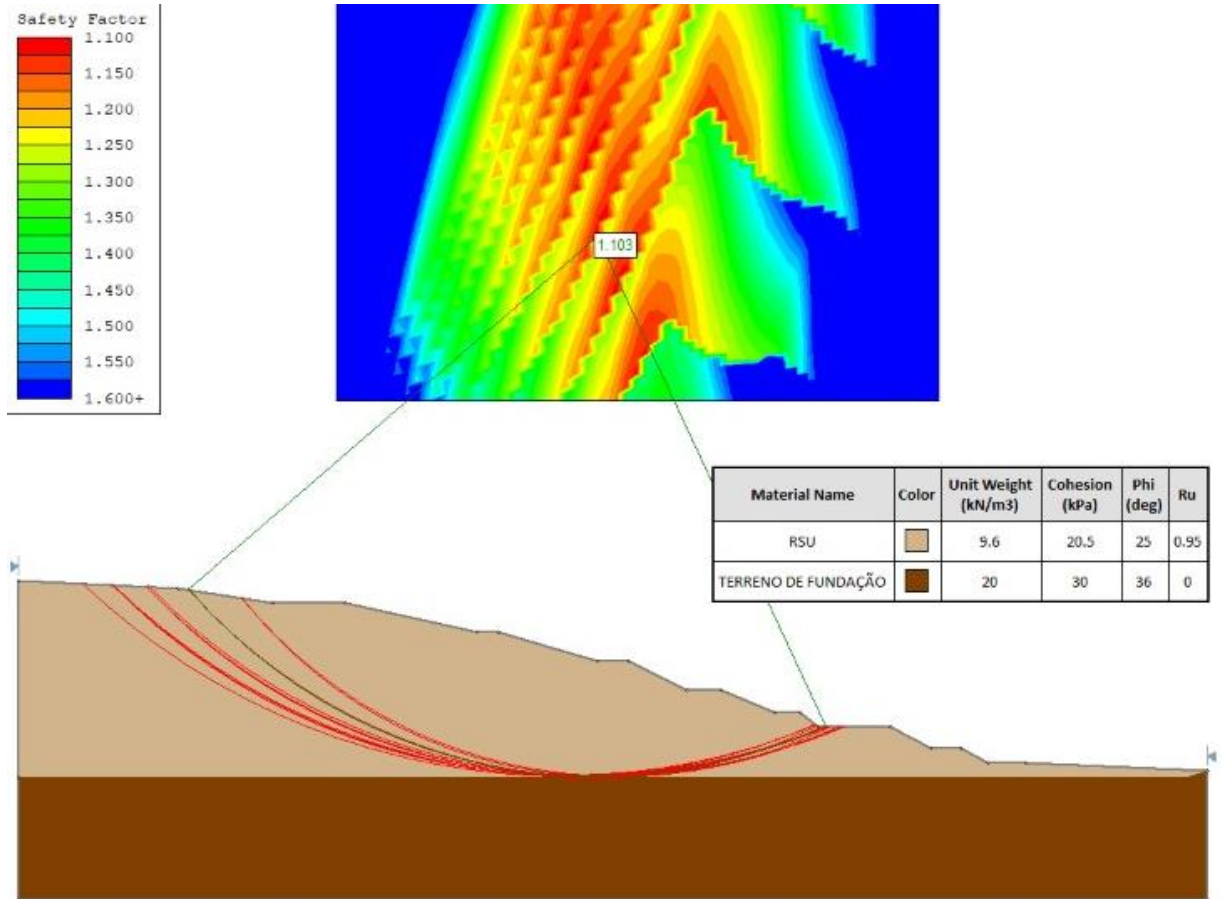
SINGH, S. & MURPHY, B. J. (1990). *Evaluation of the Stability of Sanitary Landfills*. Disponível em: *Geotechnics of Waste Fills – Theory and Practice*, ASTM STP 1070, pp. 240-258

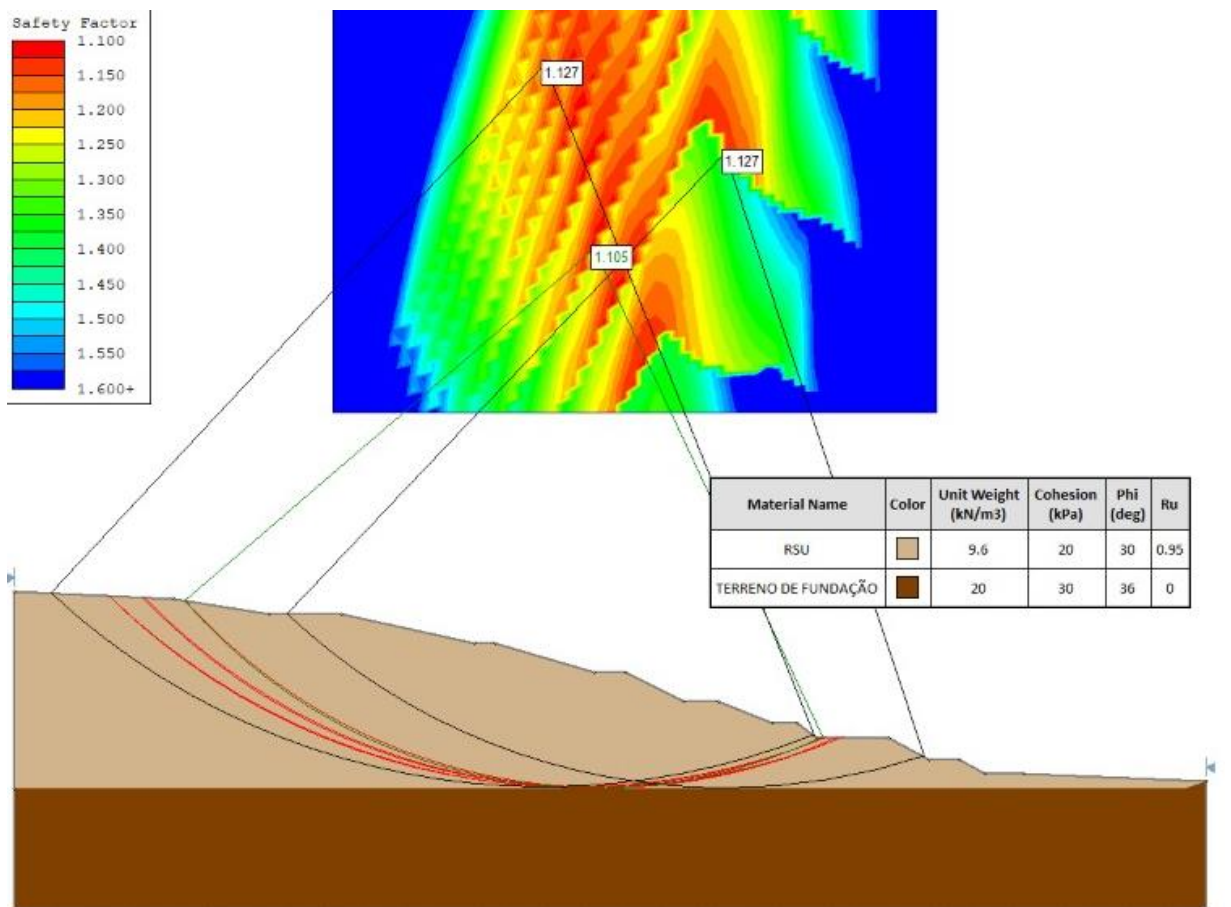
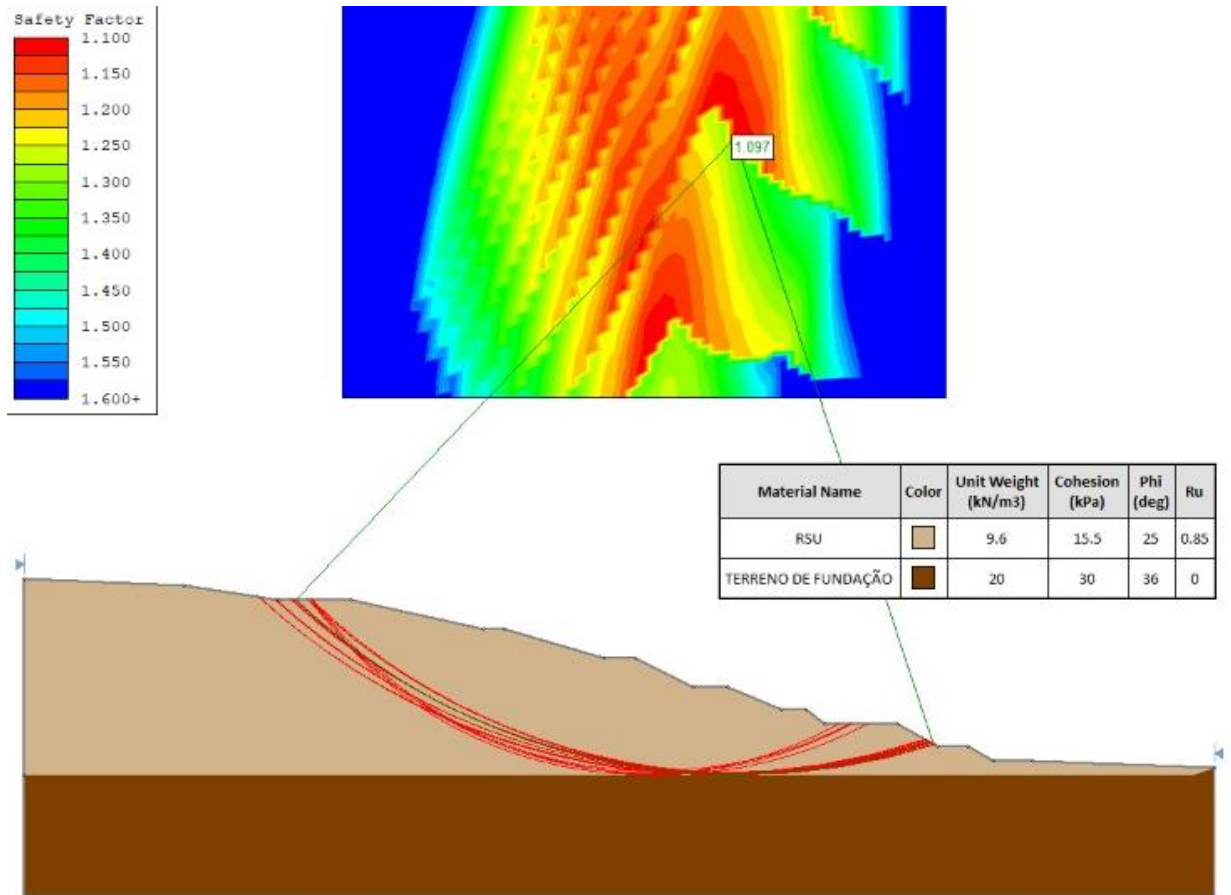
TURCZYNSKI, U. (1988). *Geotechnische Aspekte beim Aufbau von Mehrkomponentendeponien*. Dissertation na der Bergakademie Freiberg (in German).

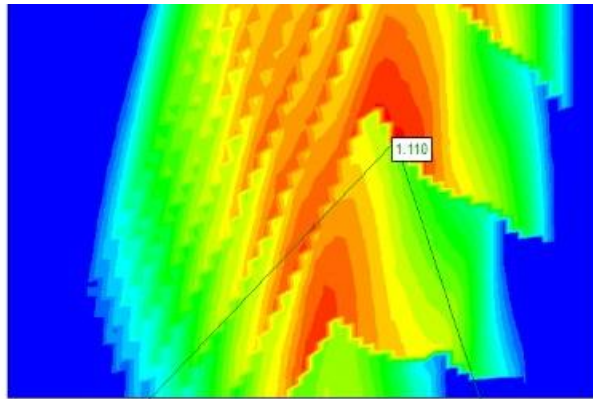
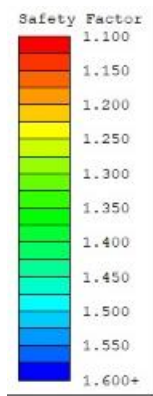
# ANEXO I

Análises de estabilidade das Seções indicadas.

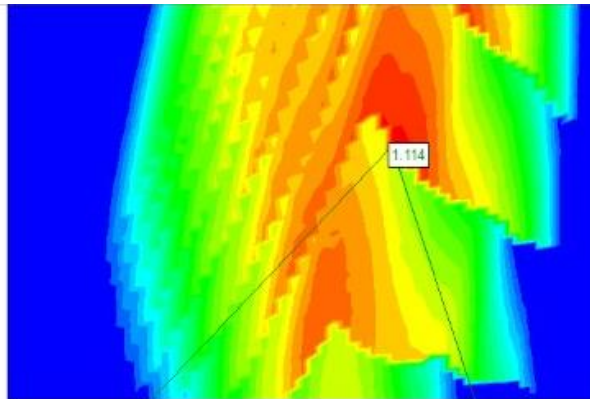
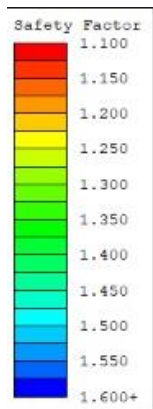
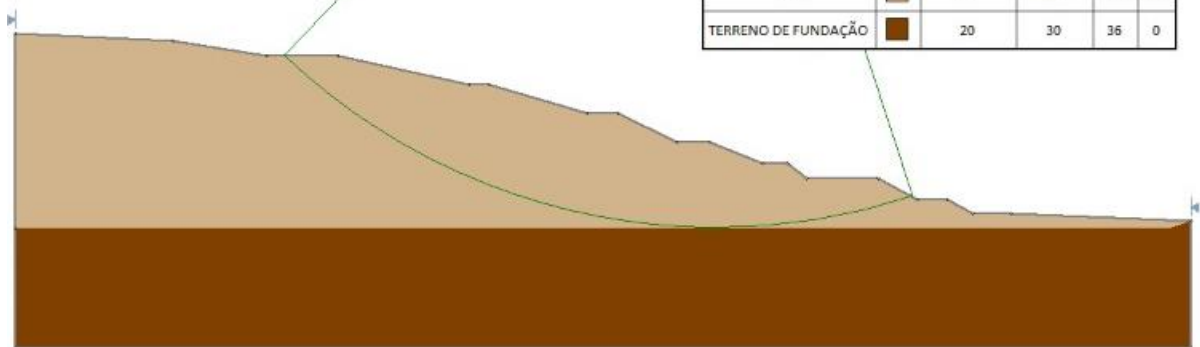
- SEÇÃO E-E'



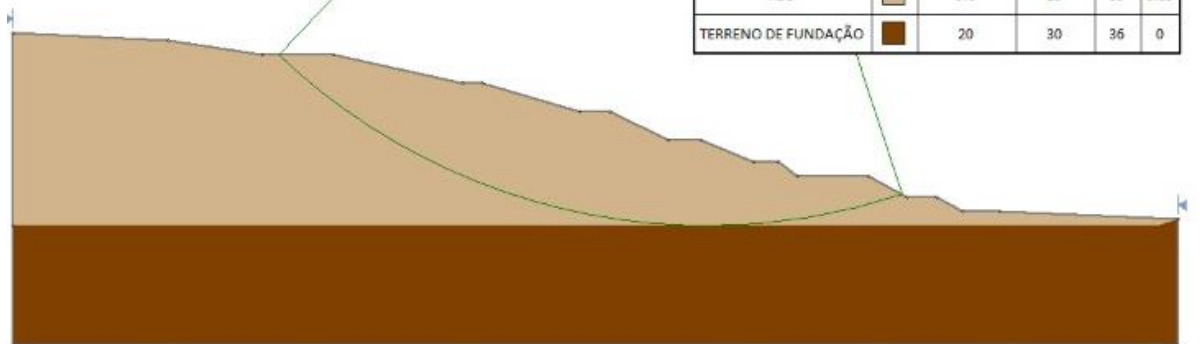




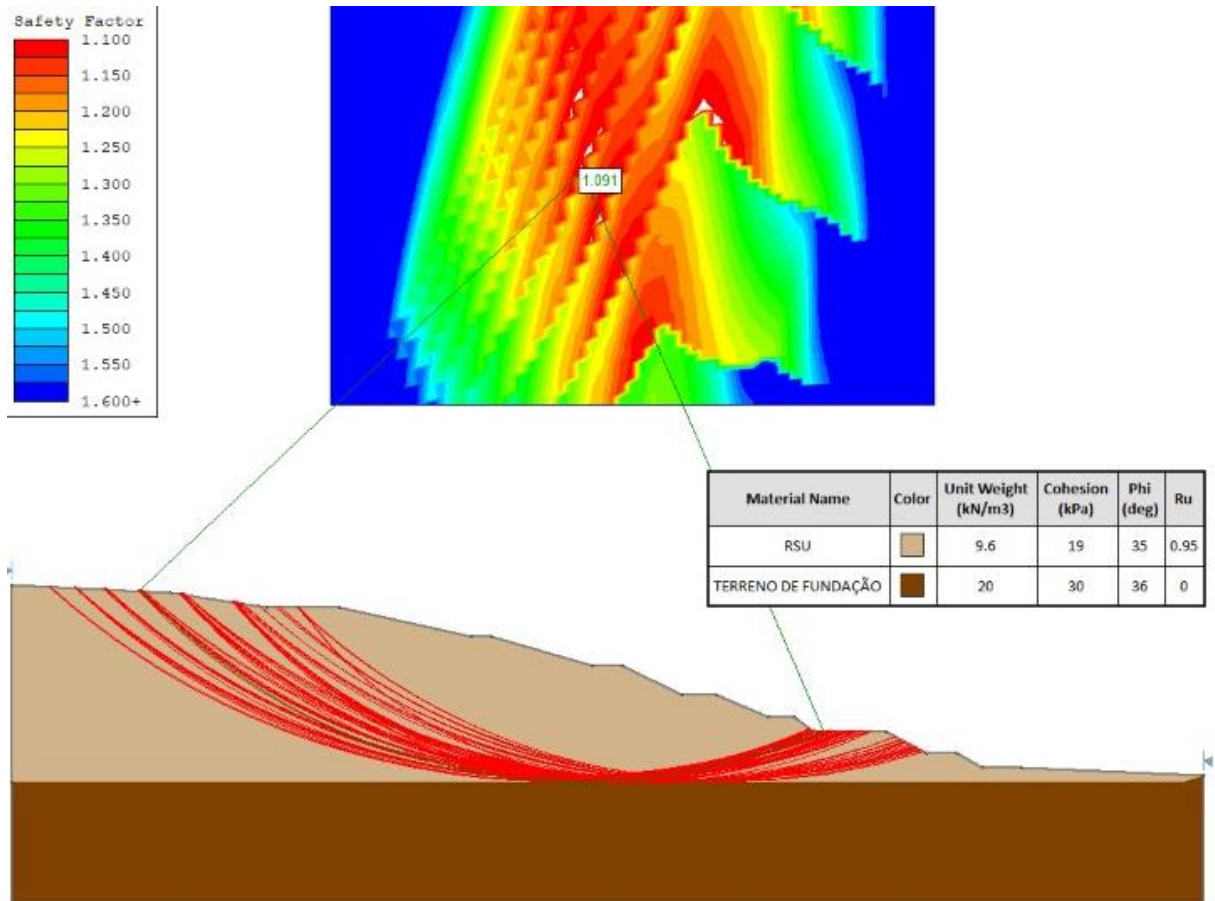
Material Name	Color	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Cohesion (kPa)	Phi (deg)	Ru
RSU		9.6	14.5	30	0.85
TERRENO DE FUNDAÇÃO		20	30	36	0



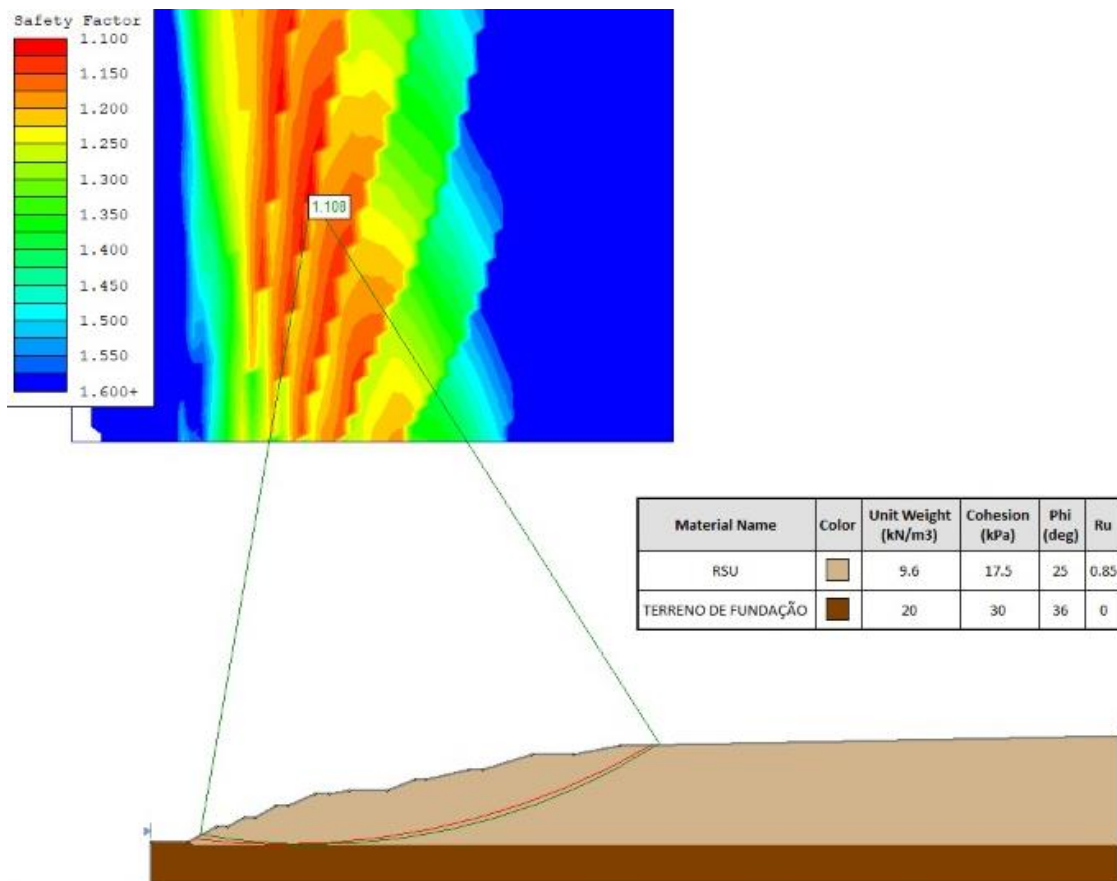
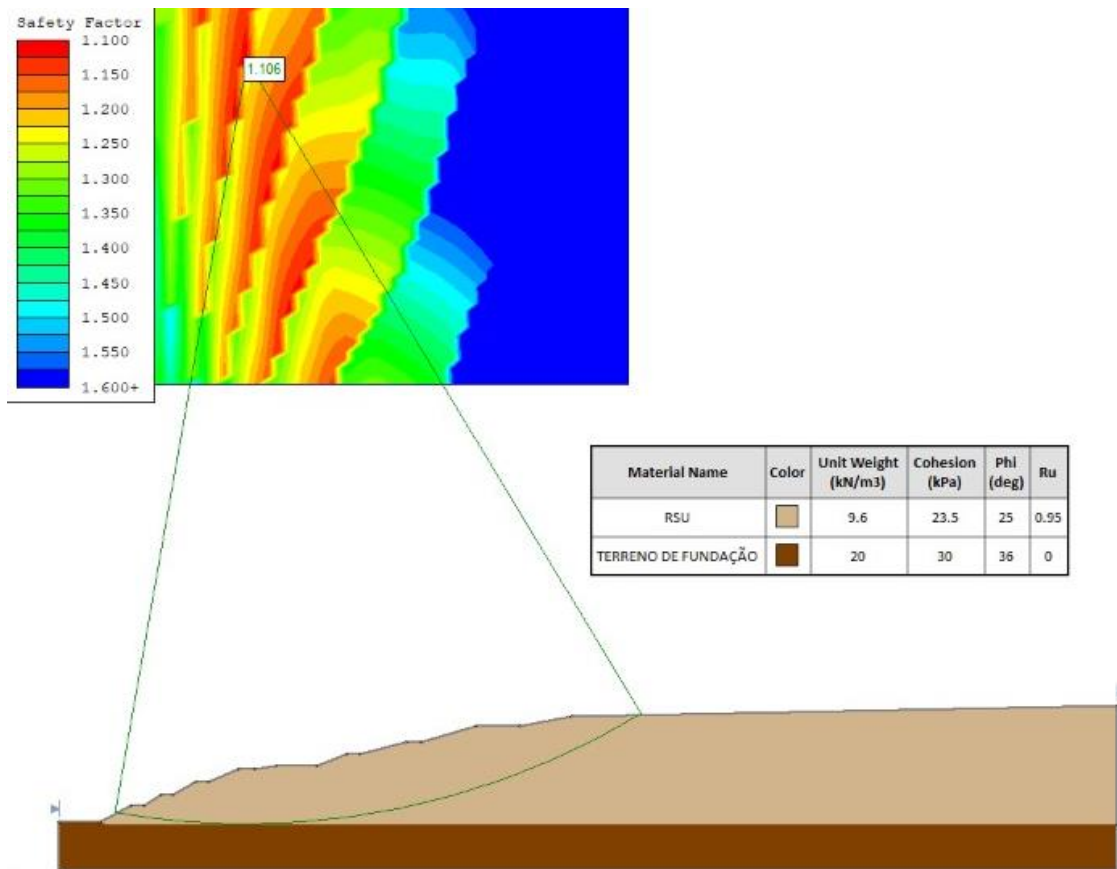
Material Name	Color	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Cohesion (kPa)	Phi (deg)	Ru
RSU		9.6	13	35	0.85
TERRENO DE FUNDAÇÃO		20	30	36	0

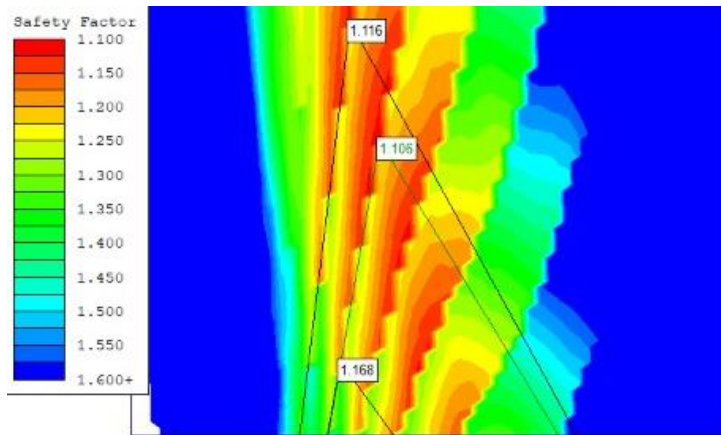





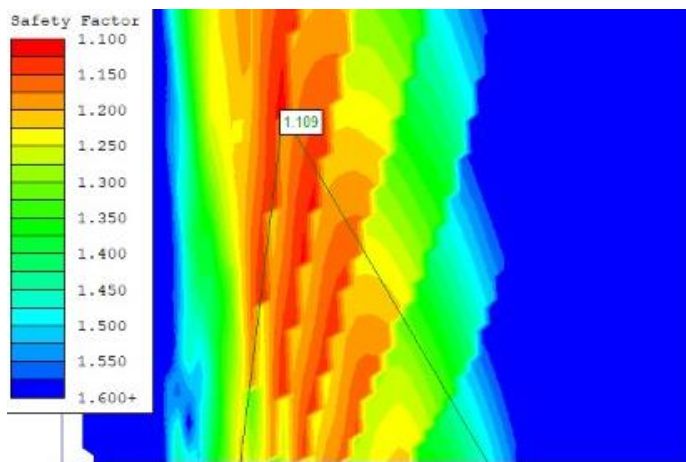
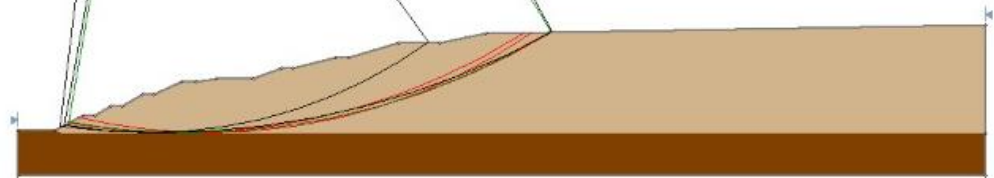


- SEÇÃO C-C'

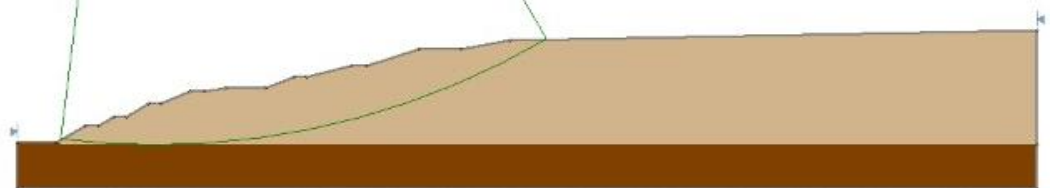


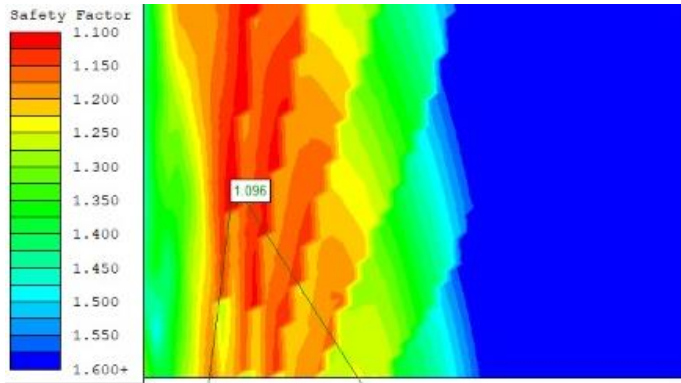



Material Name	Color	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Cohesion (kPa)	Phi (deg)	Ru
RSU		9,6	23	30	0,95
TERRENO DE FUNDAÇÃO		20	30	36	0

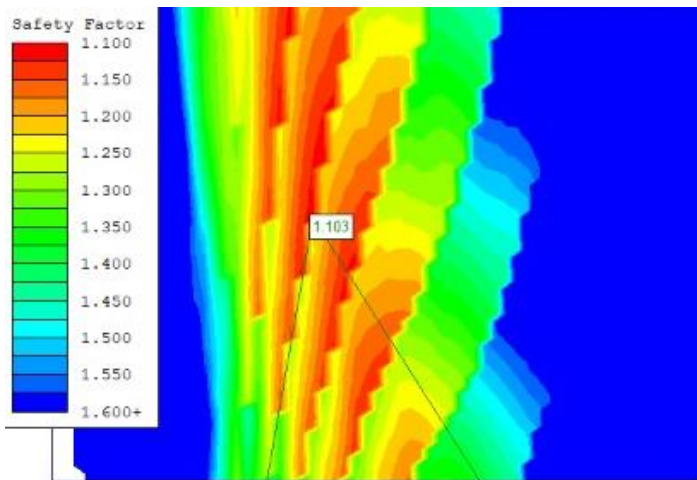
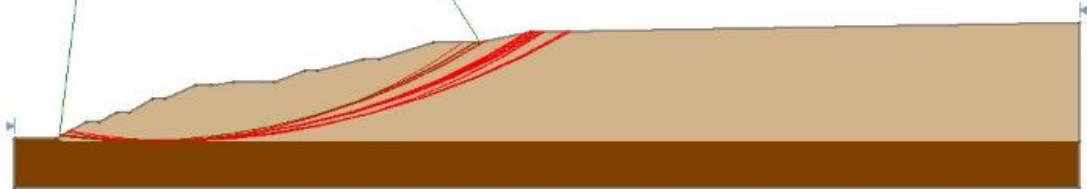


Material Name	Color	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Cohesion (kPa)	Phi (deg)	Ru
RSU		9,6	16	30	0,85
TERRENO DE FUNDAÇÃO		20	30	36	0





Material Name	Color	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Cohesion (kPa)	Phi (deg)	Ru
RSU		9.6	14	35	0.85
TERRENO DE FUNDAÇÃO		20	30	36	0



Material Name	Color	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Cohesion (kPa)	Phi (deg)	Ru
RSU		9.6	22.5	35	0.95
TERRENO DE FUNDAÇÃO		20	30	36	0

