



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI**

Trabalho de Conclusão de Curso

**LAISE GOBIRA DAMASCENO  
PAULO HENRIQUE FERREIRA**

***APLICAÇÃO DE MÉTODOS ESTATÍSTICOS NA ANÁLISE DE  
ESTABILIDADE EM TALUDES DE ATERRO SANITÁRIO***

**OURO BRANCO - MG**

**DEZEMBRO - 2018**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI**

Trabalho de Conclusão de Curso

**LAISE GOBIRA DAMASCENO**

**PAULO HENRIQUE FERREIRA**

***APLICAÇÃO DE MÉTODOS ESTATÍSTICOS NA ANÁLISE DE  
ESTABILIDADE EM TALUDES DE ATERRO SANITÁRIO***

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de São João Del-Rei, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

**Orientador:** Prof. Dr. Leandro Neves Duarte

**OURO BRANCO - MG**

**DEZEMBRO - 2018**

Ficha catalográfica elaborada pela Divisão de Biblioteca (DIBIB)  
e Núcleo de Tecnologia da Informação (NTINF) da UFSJ,  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

D155a	<p>Damasceno, Laise Gobira. Aplicação de métodos estatísticos na análise de estabilidade em taludes de aterro sanitário / Laise Gobira Damasceno; Paulo Henrique Ferreira; orientador Leandro Neves Duarte. -- Ouro Branco, 2018. 77 f.</p> <p>Trabalho de Conclusão (Graduação - Engenharia Civil) - Universidade Federal de São João del-Rei, 2018.</p> <p>1. Estabilidade de taludes 2. Aterro sanitário 3. Métodos probabilísticos 4. Probabilidade de ruptura I. Ferreira, Paulo Henrique II. Duarte, Leandro Neves, orient. III. Título.</p>
-------	--

# FOLHA DE APROVAÇÃO

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI  
CAMPUS ALTO PARAÓPEBA

DECLARAÇÃO DE APROVAÇÃO

**Título:** *APLICAÇÃO DE MÉTODOS ESTATÍSTICOS NA ANÁLISE DE ESTABILIDADE EM  
TALUDES DE ATERRO SANITÁRIO*

Autores: Laise Gobira Damasceno e Paulo Henrique Ferreira

Aprovado em: \_\_ / \_\_ / 2018

Aprovado como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

---

Prof. Dr. Leandro Neves Duarte - UFSJ  
(Orientador)

---

Prof. Douglas Henrique Santos Sousa - UFSJ  
(Co- orientador)

---

Prof. Me. Tales Moreira de Oliveira - UFSJ  
(Avaliador- UFSJ)

Ouro Branco-MG  
Dezembro de 2018

## **AGRADECIMENTOS**

Agradecemos primeiramente a Deus, por nos dar força e saúde para concluir mais essa etapa em nossas vidas.

Ao nosso orientador Prof. Dr. Leandro Neves Duarte, pela confiança em nosso trabalho e pelo prazer em contribuir com nosso crescimento e por todo o conhecimento repassado.

Ao nosso co-orientador Prof. Douglas Sousa, pela disponibilidade e grande contribuição em nosso desenvolvimento profissional e na elaboração deste trabalho.

Aos nossos pais, por sempre acreditar em nosso potencial e por nos dar força em todos os momentos ao longo do curso.

Aos nossos familiares por sempre estarem dispostos a contribuir com nosso crescimento pessoal e proporcionar momentos de descanso.

A todos os amigos, que contribuíram de maneira importante nos momentos de dificuldade e estiveram presentes também nos momentos de descontração.

Gratidão aos nossos momentos desafiadores ao longo desta graduação, que nos tornaram pessoas mais maduras. E aos momentos felizes, que nos proporcionaram a leveza da vida.

**Laise Gobira Damasceno e Paulo Henrique Ferreira**

## RESUMO

DAMASCENO, L. G. e FERREIRA, P. H. **Aplicação de métodos estatísticos na análise de estabilidade em taludes de aterro sanitário**. 2018. Trabalho Bacharelado (Graduação em Engenharia Civil) – Coordenação de Engenharia Civil. Universidade Federal de São João Del-Rei.

O grande crescimento populacional, atrelado a uma sociedade de consumo, tem configurado uma grande geração de resíduos, no qual traz tona a problemática relacionada a gestão de resíduos por parte dos municípios e da sociedade em geral. Sendo assim, uma solução comum tem sido a otimização dos aterros já existentes. Na construção de um aterro sanitário, em especial, é essencial conhecer adequadamente as propriedades dos resíduos que ali serão depositados, bem como as características do solo presente na área. De posse dos dados necessários, são feitas as verificações recomendadas por norma, para que se conheça o possível comportamento do talude de resíduos sólidos urbanos ao longo do tempo. O objetivo deste trabalho é realizar a análise determinística e probabilística relacionada a estabilidade de um aterro de resíduos sólidos urbanos, localizado no município de Conselheiro Lafaiete, Minas Gerais. Afim de verificar a estabilidade do maciço, foram utilizados resultados de ensaios de amostras do solo local, e parâmetros de resistência de resíduos sólidos urbanos, com base em revisão literária. Desta forma, obteve-se um valor médio relacionado às características do material, associados a um desvio padrão. A partir dos cálculos e análises é possível obter um fator de segurança bem como a sua probabilidade de ruptura, que são parâmetros que indicam as condições de estabilidade em que se encontra o talude. Os resultados obtidos foram satisfatórios diante do panorama apresentado. Por este trabalho constatou-se que, para realizar uma análise de estabilidade de talude consistente é recomendado a realização de ensaios dos resíduos do aterro estudado, afim de obter as propriedades geotécnicas com menor coeficiente de variabilidade. Desta forma, obtém-se melhores resultados com menor probabilidade de ruptura do maciço, possibilitando maior inclinação do talude e conseqüentemente uma maior capacidade de volume de resíduo para o aterro.

**Palavra-chave:** Estabilidade de talude, aterro sanitário, métodos estatísticos, probabilidade de ruptura.

## **ABSTRACT**

DAMASCENO, L. G. e FERREIRA, P. H. **Application of statistical methods in the stability analysis in waste landfill**. 2018. Bachelor's Degree (Civil Engineering Degree) - Coordination of Civil Engineering. Federal University of São João del Rei.

The large population growth, coupled with a consumer society, has configured a large generation of waste, which brings to light the problems related to waste management by municipalities and society in general. Therefore, a common solution has been the optimization of existing landfills. In the construction of a waste landfill, in particular, it is essential to know adequately the properties of the waste that will be deposited there, as well as the characteristics of the soil present in the area. With the necessary data, the recommended checks are made as a rule, so that the possible behavior of the slope of urban solid waste can be known over time. The objective of this work is to perform the deterministic and probabilistic analysis related to the stability of an urban solid waste landfill, located in the city of Conselheiro Lafaiete, Minas Gerais. In order to verify the stability of the mass, results of local soil samples, and resistance parameters of urban solid waste were used, based on literary revision. In this way, a mean value related to the characteristics of the material, associated with a standard deviation, was obtained. From the calculations and analyzes it is possible to obtain a safety factor as well as its probability of rupture, which are parameters that indicate the stability conditions in which the slope is located. The results obtained were satisfactory in view of the presented scenario. For this work it was verified that, in order to perform a consistent slope stability analysis, it is recommended to carry out tests of the waste from the landfill in order to obtain the geotechnical properties with the lowest coefficient of variability. In this way, better results are obtained with less probability of rupture of the mass, allowing a greater inclination of the slope and consequently a greater capacity of volume of residue for the waste landfill.

**Keywords:** slope stability, waste landfill, statistical methods, probability of rupture.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplo de Aterro Sanitário.....	7
Figura 2 – Etapas na execução de sondagem a percussão: (a) avanço da sondagem por desagregação e lavagem; (b) ensaio de penetração dinâmica (SPT).....	17
Figura 3 – Zona fraca, zona cisalhada e superfície de cisalhamento.....	19
Figura 4 – Exemplo de divisão em fatias de uma superfície circular.....	22
Figura 5 – Equilíbrio de forças na fatia.....	22
Figura 6 – Probabilidade de ruptura admissíveis.....	26
Figura 7 – Risco social aceitável proposto pelo departamento de planejamento de Hong Kong para deslizamentos.....	26
Figura 8 – Probabilidade de ruptura.....	27
Figura 12 – Local de estudo.....	35
Figura 13 – Curvas de nível do local de estudo.....	36
Figura 11 – Croqui com indicação da seção de análise.....	38
Figura 12 – Seção de análise (configuração final).....	38
Figura 13 – Perfil geológico da seção de análise.....	39
Figura 18 - Probabilidade de Ruptura.....	51
Figura 19 - Probabilidade de Ruptura.....	52
Figura 20 – Índice de confiabilidade.....	52

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Revisão literária dos parâmetros de resistência do RSU .....	15
Quadro 2 – Valores de parâmetro do Fator de Segurança .....	20
Quadro 3 – Nível de segurança desejado contra perdas humanas .....	21
Quadro 4 – Nível de segurança desejado contra danos materiais e ambientais.....	21
Quadro 5 – Fator de segurança para deslizamentos .....	21
Quadro 6 – Listagem de equações (método equilíbrio-limite).....	23
Quadro 7 – Listagem de incógnitas (método equilíbrio-limite).....	23
Quadro 8 – Condições de equilíbrio de momentos e forças de interação nos métodos de análise .....	24
Quadro 9 – Valores típicos do coeficiente de variação de algumas propriedades geotécnicas .....	32

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros de resistência do solo .....	39
Tabela 2 - Parâmetros de resistência do RSU .....	40
Tabela 3 – Coesão e Ângulo de Atrito – Método Rosenblueth .....	42
Tabela 4 – Coesão e Ângulo de Atrito – Método Rosenblueth .....	42
Tabela 5 – Coesão e Ângulo de Atrito – Método Monte Carlo.....	43
Tabela 6 - Valores de FS obtidos por análise de estabilidade pelo Método de Rosenblueth	45
Tabela 7 - Valores de FS obtidos por análise de estabilidade através do Método FOSM .....	45
Tabela 8 - Valores de FS obtidos por análise de estabilidade através do Método Monte Carlo .....	45
Tabela 9 - Superfície de ruptura crítica obtida pelo Método Rosenblueth .....	46
Tabela 10 - Superfície de ruptura crítica obtida pelo Método FOSM.....	47
Tabela 11 - Superfície de ruptura crítica obtida pelo Método Monte Carlo.....	49
Tabela 12 - Resultados obtidos pelo Método Rosenblueth .....	50
Tabela 13 - Resultados obtidos pelo Método Monte Carlo.....	50
Tabela 14 – Resumo das análises de estabilidade.....	51
Tabela 15 – Legenda para leitura dos gráficos .....	53

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivos</b>	<b>3</b>
1.1.1	Objetivo geral	3
1.1.2	Objetivos específicos	3
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b>	<b>4</b>
<b>2.1</b>	<b>Considerações gerais</b>	<b>4</b>
2.1.1	Desastres	4
<b>2.2</b>	<b>Aterros sanitários</b>	<b>5</b>
2.2.1	Aspectos gerais do aterro sanitário	5
2.2.2	Geometria de aterros sanitários	6
2.2.3	Movimento de massas em aterro sanitário	7
2.2.4	Resíduos sólidos urbanos	8
2.2.5	Parâmetros de caracterização do resíduo	9
2.2.6	Propriedade mecânica do resíduo	9
2.2.7	Peso Específico do RSU	11
2.2.8	Composição gravimétrica do RSU	11
2.2.9	Poropressão do maciço de RSU	12
2.2.10	Coesão e ângulo de atrito do RSU	12
<b>2.3</b>	<b>Investigações geotécnicas</b>	<b>16</b>
2.3.1	Ensaio de sondagem a percussão (SPT)	16
2.3.2	Ensaio de caracterização	18

<b>2.4</b>	<b>Levantamento topográfico .....</b>	<b>18</b>
<b>2.5</b>	<b>Análise de estabilidade.....</b>	<b>18</b>
2.5.1	Bishop simplificado.....	24
2.5.2	Morgenstern-price .....	24
2.5.3	Comparação entre os métodos .....	24
<b>2.6</b>	<b>Análise probabilística .....</b>	<b>25</b>
2.6.1	Probabilidade de ruptura .....	25
2.6.2	Método FOSM.....	27
2.6.3	Método Rosenblueth .....	30
2.6.4	Método Monte Carlo.....	31
<b>2.7</b>	<b>Coeficiente de Variação .....</b>	<b>32</b>
<b>2.8</b>	<b>Estado da arte em estabilidade de aterros sanitários .....</b>	<b>33</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>35</b>
<b>3.1</b>	<b>Descrição do local.....</b>	<b>35</b>
3.1.1	Características da região .....	35
3.1.2	Levantamento Topográfico .....	36
3.1.3	Caracterização do solo .....	36
3.1.4	Área e seção de análise.....	37
3.1.5	Parâmetros de resistência do solo .....	39
3.1.6	Parâmetros de resistência do RSU .....	39
3.1.7	Peso específico.....	40
3.1.8	Poropressão .....	40

<b>3.2</b>	<b>Análise de estabilidade.....</b>	<b>41</b>
3.2.1	Estrutura do estudo.....	41
3.2.2	1ª Parte - Método de Rosenblueth.....	42
3.2.3	2ª Parte - Método de FOSM .....	42
3.2.1	3ª Parte - Método de Monte Carlo .....	42
3.2.2	Software GEO SLOPE.....	43
<b>4</b>	<b>ANÁLISES E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....</b>	<b>45</b>
<b>4.1</b>	<b>Análise de estabilidade.....</b>	<b>45</b>
<b>4.2</b>	<b>Probabilidade de ruptura.....</b>	<b>49</b>
4.2.1	Rosenblueth .....	49
4.2.2	Monte Carlo.....	50
4.2.3	FOSM .....	50
4.2.4	Comparação entre os métodos Rosenblueth e Monte Carlo .....	50
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>54</b>
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>56</b>
	<b>ANEXO A – RELATÓRIO DE SONDAÇÃO SPT 03.....</b>	<b>63</b>
	<b>ANEXO B – RELATÓRIO DE SONDAÇÃO SPT 04.....</b>	<b>64</b>
	<b>ANEXO C – RELATÓRIO DE SONDAÇÃO SPT 05.....</b>	<b>65</b>
	<b>ANEXO D – TABELA DE PARÂMETROS MÉDIOS DO SOLO.....</b>	<b>66</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Diante do significativo crescimento da humanidade vivido no último século, surgiu uma demanda e necessidade de expansão e ocupação de territórios para obras de uso do homem. Junto ao crescimento populacional, a cultura de consumo tem configurado por consequência num aumento significativo da geração de resíduos tornando-se um desafio de gestão por parte dos municípios e da sociedade em geral.

As soluções encontradas para a problemática de gestão de resíduos no Brasil são fundamentadas pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instaurada pela Lei 12.305/2010. Esta determina o que é gerenciamento de resíduos sólidos e compreende desde a redução de geração de resíduos, coleta seletiva<sup>1</sup>, controle social<sup>2</sup>, destinação em compostagem, reciclagem, recuperação, aproveitamento energético, entre outros, até a disposição final de rejeitos<sup>3</sup> em aterros sanitários.

As obras de engenharia no que se refere a aterros sanitários por sua vez, demandam elevados recursos e técnicas. Essas obras na maioria dos casos, de acordo com as características do relevo, podem estar relacionadas a movimentos de terra como escavações e aterros. Sendo assim, o conhecimento do subsolo no qual pretende-se trabalhar é condição primordial para projetos de engenharia, principalmente no que se refere a obras de cortes, aterros e estruturas de contenção. Sendo assim, as investigações geotécnicas dão alicerces para elaboração de projetos seguros e de competência econômica. Dentre essas, a mais utilizada na maioria dos países e também no Brasil, é a sondagem à percussão, SPT (HACHIC, *et al.*, 1998).

No caso das atividades que envolvem cortes e aterros é conveniente se atentar para a análise da estabilidade do talude, tendo em vista garantir a segurança do maciço, uma vez que as falhas ocorrentes quanto a instabilidade de taludes, podem provocar

---

<sup>1</sup> Coleta de resíduos sólidos previamente segregados conforme sua constituição ou composição;

<sup>2</sup> Conjunto de mecanismos e procedimentos que garantam à sociedade informações e participação nos processos de formulação, implementação e avaliação das políticas públicas relacionadas aos resíduos sólidos;

<sup>3</sup> Resíduos sólidos que, depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não apresentem outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada;

desastres, colocando em risco o meio ambiente, vidas e prejuízos econômicos aos envolvidos.

Com a redução de espaços disponíveis nos grandes centros urbanos e a dificuldade de encontrar áreas adequadas para disposição de resíduos, a otimização na capacidade dos aterros sanitários tem sido solução comum para a problemática de falta de espaço. Para tanto, a expansão de aterros já existentes através de alteamento e o aproveitamento das áreas já encerradas, envolvem variáveis muito importantes que acometem a estabilidade de talude do maciço de RSU e a condição de operacionalidade do aterro (drenagem e impermeabilização). Ambos estão relacionados ao desempenho geomecânico do RSU, ou seja, a capacidade de resistência e deformabilidade do material (ABREU, 2015).

Outrossim, por se tratarem de obras de engenharia, os aterros sanitários, precisam ter bem definidos os seus materiais de construção, que neste caso são os resíduos sólidos. Sendo assim, diversos estudiosos têm conduzido pesquisas em busca da caracterização dos parâmetros de estabilidade e resistência do RSU, o que tem resultado em diversas publicações, ainda que não completamente universalista (OLIVEIRA, 2002).

De maneira geral as análises de estabilidade da mecânica dos solos estão fundamentadas no método de equilíbrio-limite (LEM) (GERSCOVICH, 2016). Esses por sua vez expressam os resultados por meio de um coeficiente, chamado de fator de segurança (FS), o qual relaciona a resistência ao cisalhamento com as tensões cisalhantes mobilizadas.

Vale ressaltar, que a avaliação determinística não leva em consideração a variabilidade dos parâmetros de resistência do material, que para o RSU existe grandes variabilidades inerentes à característica do material. Sendo assim, aliado ao método determinístico, a abordagem probabilística propõe resultados que relacionam a probabilidade de ruptura da estrutura e o índice de confiabilidade, associados ao fator de segurança calculado pelos métodos LEM.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo geral**

O objetivo geral deste trabalho consiste realizar a análise de estabilidade de talude de aterro de RSU, localizado no município Conselheiro Lafaiete, Minas Gerais, pelos métodos determinísticos e probabilísticos.

### **1.1.2 Objetivos específicos**

O presente trabalho tem os seguintes itens como objetivos específicos:

- Análise dos fatores de segurança quanto ao deslizamento do talude;
- Efetuar uma análise estatística dos métodos determinísticos.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Considerações gerais

Os movimentos de terra (naturais e artificiais) envolvem um conjunto de fatores que estão relacionados a geologia, topografia, características naturais do substrato, saturação do solo, clima, ações antrópicas e diversos agentes externos, que combinados ou não, condicionam o que chamamos de estabilidade e instabilidade do talude (FREITAS, 2010)

Segundo Gerscovich (2016), qualquer maciço de solo ou rocha com superfície inclinada pode ser denominado de talude. Sendo ele conhecido como encosta, local com inclinação natural, ou aterros e cortes, para taludes construídos.

A problemática de estabilidade de taludes, presente no contexto da engenharia, é uma adversidade recorrente tanto em encostas naturais quanto em taludes de aterro. (GERSCOVICH, 2016). Desta forma a análise criteriosa do assunto não é só questão de projeto, mas também uma demanda de segurança pública, uma vez que a ausência de critérios na análise pode provocar desastres naturais como os deslizamentos de terra, colapsos de talude, entre outros.

#### 2.1.1 Desastres

De acordo com a Codificação Brasileira de Desastres (COBRADE) publicada na Instrução Normativa Nº1, de 24 de agosto de 2012, desastre pode ser entendido como, resultado de eventos adversos, naturais ou provocados por ações antrópicas sobre um ecossistema vulnerável, causando graves danos materiais, ambientais e até humanos, que combinados ou não, geram exaustivas perdas sociais e econômicas. De acordo com a classificação do COBRADE, publicada na mesma Instrução Normativa, o movimento de massa é um tipo de desastre natural geológico.

A respeito de desastres ocorridos em aterro sanitários, apesar de pouca frequência, quando ocorrem ruptura, geralmente tomam grandes proporções de consequência. (DIJON; JONES,2005)

Visto a importância do tema em questão, alguns conceitos são essenciais para entender o estudo da geotecnia relacionada às condições de estabilidade de taludes de aterros sanitários.

## **2.2 Aterros sanitários**

No Brasil, assim como em diversos países, é crescente a preocupação no que se refere a destinação correta dos resíduos sólidos urbanos (RSU). Em uma população mundial atual de cerca de 7,6 bilhões de pessoas (ONU,2017), a questão com os RSU se torna uma condição de atenção e alerta.

Apesar dos incentivos dados por parte do governo, através de educação ambiental e da Política Nacional de Resíduos Sólidos, que prevê dentre uma delas o reaproveitamento dos resíduos, é inevitável a necessidade de unidades de disposição final, principalmente em grandes centros populacionais. Sendo assim, no Brasil, a conformação mais adequada para disposição final de RSU, são as unidades de tratamento de resíduos, os chamados Aterro Sanitários.

### **2.2.1 Aspectos gerais do aterro sanitário**

A NBR 8419 define os aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos, como o local de disposição de RSU no qual possui aplicação de técnicas de engenharia para confinamento do resíduo obtendo melhor condição de compactação, garantindo a mitigação dos impactos ambientais, sem causar danos à saúde pública e à sua segurança (ABNT, 1992).

Entre os autores Fiorillo (2011), Albuquerque (2011) e Costa e Ribeiro (2013), a opinião é de que o aterro sanitário é o método correto e que devidamente prepara para receber e confinar os resíduos sólidos urbanos.

A PNRS instaurada pela Lei 12.305/2010, dá alicerce aos responsáveis pela gestão de resíduos, para adequação de todo o ciclo (geração, coleta, destinação, disposição final) de diversos municípios do Brasil. Dentre as obrigações estabelecidas pela lei, está o encerramento de lixões e construção de unidades de tratamento de resíduos sólidos urbanos. Sendo assim, o Aterro Sanitário de Conselheiro Lafaiete-MG, do

presente estudo, surgiu dessa necessidade de conformidade dos municípios da região do Alto do Paraopeba.

Por se tratar de uma obra de engenharia, as construções contam com parâmetros de norma técnica no qual devem atender as condições mínimas de operação. No Brasil uma das normas que orientam tais condições é a NBR 15849. Sendo assim, para começar a disposição de rejeitos no aterro sanitário, é preciso inicialmente que sejam realizados estudos geotécnicos para definição de projeto sobre a configuração do aterro. Posteriormente, são realizadas as obras de terraplenagem com nivelamento da terra e selamento da base com argila compactada. Na sequência é realizada a impermeabilização da base do aterro com mantas de geossintéticos que garantem a estanqueidade do sistema, protegendo o lençol freático de possíveis contaminações com o chorume (ABNT, 2010).

Além disso, faz parte da estrutura de um aterro sanitário a construção de drenos horizontais e verticais para a permitir a fluidez de líquidos e gases gerados pela decomposição do resíduo para fora do maciço. E ainda efetuar o tratamento desses dois passivos gerados (FEAM,2006).

Ainda segundo este órgão, em termos gerais, a operação do aterro sanitário controla as variáveis que influenciam na rotina de disposição e na manutenção do meio ambiente. Sendo assim, devem ser realizados todos os monitoramentos geotécnicos, biológicos e físico-químicos da área de influência do aterro construído.

Além disso, para garantir que a construção do aterro esteja cumprindo parâmetros de aproveitamento de volume, faz-se necessário o bom conhecimento de propriedades físicas e mecânicas dos resíduos a serem dispostos no local de confinamento (CARDIM, 2008).

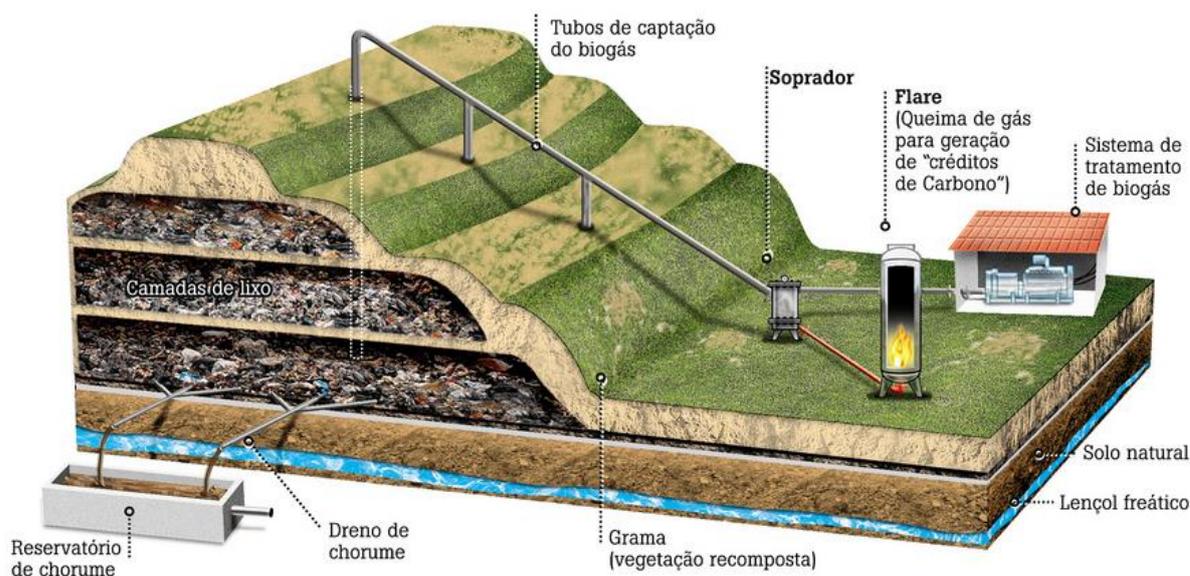
### 2.2.2 Geometria de aterros sanitários

De maneira geral, a geometria dos aterros sanitários está diretamente ligada a capacidade volumétrica do aterro, bem como as condições de estabilidade do maciço. (RECESA,2008). Na constante busca por otimização dos espaços, o projeto geométrico do aterro deve ser projetado de forma a maximizar o volume para disposição de resíduos.

Demais fatores influenciam na geometria do aterro, um deles é a compactação da rampa, no qual afetam diretamente a condição de inclinação dos taludes (SHIMAZAKI,2017).

Na Figura 1 está representado a estrutura geométrico de um aterro sanitário:

Figura 1 - Exemplo de Aterro Sanitário



Fonte: Ricardo Terêncio Ferreira (2009)

### 2.2.3 Movimento de massas em aterro sanitário

O movimento de massa de um aterro sanitário pode ser ocasionado, em termos gerais, pela instabilidade do maciço de resíduos, ou pela instabilidade do talude de solo natural.

Segundo KNOCHENMUS *et al.* (1998<sup>4</sup> *apud* CARDIM, 2008), no que se trata da estabilidade de maciço de resíduo os dois parâmetros que são cruciais para o estudo em questão são a compressibilidade e resistência ao cisalhamento. Estes por sua vez,

<sup>4</sup> Knochenmus, G., Wojnarowicz, M., Van Impe (1998). **Stability of municipal solid waste**. In Proc. of the Third International Congress on Environmental Geotechnics, Lisboa, Portugal, Sêco e Pinto (ed), Balkema, Rotterdam, ISBN 905809006x, Vol. 3, 977-1000.

estão diretamente relacionados às características dos materiais que compõem o RSU e as propriedades físicas dos mesmos

E mais, segundo Fucale (2005), ainda há muitas divergências no estudo de resíduos sólidos devido a diferenças no comportamento dos materiais. Além disso, por não haver ensaios assertivos quanto ao estudo de resistência do RSU, os princípios da Mecânica dos Solos são aplicados a esses materiais.

#### 2.2.4 Resíduos sólidos urbanos

Os resíduos sólidos urbanos, ainda popularmente conhecidos como lixo doméstico, englobam além do que o próprio termo sólido transmite, pois abrangem os estados semissólidos e até líquidos.

Para melhor compreensão, no art. 3º da Lei Nº 12.305<sup>5</sup> de 2 de agosto de 2010, resíduo sólido é preceituado como:

XVI – resíduos sólidos: material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnicas ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível; (BRASIL, 2010, p. 3)

Esta mesma lei classifica os resíduos sólidos urbanos como os resíduos originados de atividade doméstica em residências urbanas, ou provenientes de varrição e limpeza de ruas e vias públicas.

Segundo dados do Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil, publicado pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE) representante da ISWA – *International Solid Waste Association* no Brasil, no ano de 2017 houve a geração de 78,4 milhões de toneladas de RSU, sendo 91,2% destes efetivamente coletados. Apenas 59,1% dos resíduos coletados tiveram destinação em aterros sanitários, ou seja, os outros 40,9% foram despejados locais inadequados (lixões e aterros controlados). O que reforça o grande avanço que o Brasil ainda tem que alcançar em termos de expansão, no que se refere a adequação

---

<sup>5</sup> Publicada no Diário Oficial da União, Seção 1, de 3 de agosto de 2010.

de disposição final dos resíduos. Este por consequência leva os municípios a construir novos aterros sanitários, ou expandirem os já existentes.

### 2.2.5 Parâmetros de caracterização do resíduo

São vários fatores que estão relacionados com as propriedades geotécnicas (compressibilidade e resistência ao cisalhamento) do RSU. Dentre elas estão relacionados o peso específico do material, a composição do RSU, umidade e gravimetria (CARDIM,2008).

Estas propriedades estão diretamente relacionadas com a capacidade resistiva do material. A composição física, está relacionada às fases do material sendo elas: sólida, líquida e gasosa. A distribuição da presença de cada tipo de fase influencia na interação entre as partículas e conseqüentemente na coesão (parâmetro de resistência) (CARVALHO,1999).

Já a umidade, além de estar relacionada com a composição física do material, está relacionada também à condição de operação, às condições climáticas do local e demais fatores. Diferentes autores estudam a influência da umidade na estabilidade do maciço de resíduo, Cardim (2008), cita em seus estudos, dentre eles o Tchonobanoglous *et al.* (1993), Carvalho (1999) Landva e Clark (1990), Knochenmus (1998), Fucale e Jucá (2002) e demais. O que é conclusivo a todos eles é que a umidade no interior do maciço implica entre outros parâmetros, o desempenho do mecânico do RSU, principalmente no que se refere a resistência ao cisalhamento.

O peso específico, por sua vez, tem papel importante no comportamento geotécnico do maciço, uma vez que a composição, posição de aterramento, degradação e demais fatores estão diretamente relacionados à resistência do material (CARDIM, 2008).

### 2.2.6 Propriedade mecânica do resíduo

A compreensão das propriedades mecânicas de um material está relacionada de forma geral a dois parâmetros, sendo eles a compressibilidade e resistência ao cisalhamento. (SILVA,2014)

A compressibilidade do resíduo tem papel interessante na previsão de movimento de massas. Para isso recomenda-se a leitura do Santos e Presa (1995) para melhor compreensão desta propriedade.

Por outro lado, a resistência ao cisalhamento será tratada no estudo. Nos dias atuais, grande parte das pesquisas destinadas à determinação dos parâmetros de resistência e interpretação de ensaios dos RSU, adotam os conceitos importados da Mecânica dos Solos clássica, considerando o critério de ruptura de *Mohr-Coulomb* (CARDIM,2008; SILVA,2014). Essa aplicação adaptada resulta em uma grande variação dos parâmetros de análise, visto a diferença entre os dois tipos de materiais, solo e resíduos sólidos urbanos.

Dessa forma, os parâmetros que definem a envoltória de ruptura são o ângulo de atrito ( $\varphi$ ), que corresponde à inclinação da envoltória, e coesão ( $c'$ ), que pode ser definido como uma coesão entre as partículas, mas é frequentemente uma função de um ou mais fatores: curvatura da envoltória de ruptura, variação entre as amostras, erros de medidas, ou uma indicação de resistência à tração. Portanto é comum na sua definição o termo “coesão aparente” ou “intercepto de coesão” (NASCIMENTO, 2007).

Dispõe-se atualmente de uma quantidade razoável de determinações de coesão e ângulo de atrito para RSU, cujos valores apresentam grande dispersão. O que pode ser explicado pela grande heterogeneidade na composição dos resíduos e a ausência de padronização na obtenção de amostras para ensaios. A composição dos resíduos varia significativamente de acordo com a região, podendo até variar em uma mesma região ao longo do tempo de operação do aterro sanitário.

Segundo König e Jessberger (1997<sup>6</sup> *apud* NASCIMENTO, 2007), apesar de haver diferenças na composição, idade e estado de alteração, os RSU apresentam um comportamento peculiar que o diferencia de outros materiais geotécnicos, pelo fato de sua curva tensão-deformação não apresentar pico de ruptura, mesmo para grandes deformações.

Em termos gerais, a resistência ao cisalhamento dos resíduos sólidos urbanos é determinada através da realização de ensaios *in situ* (SPT, CPT), ensaios de

---

<sup>6</sup> KÖNIG, D.; JESSBERGER, H.L. (1997). **Waste Mechanics**. In: ISSMFE Technical Committee TC5 on Environmental Geotechnics pg. 35-76.

laboratório (cisalhamento direto e triaxial) e por retro-análise de dados de campo. DIXON et al. (2005<sup>7</sup> *apud* NASCIMENTO, 2007). Porém, de acordo com Fucale (2005), a interpretação dos resultados dos ensaios em RSU está sujeita ainda a muitas incertezas devido à falta de um modelo conceitual de referência do comportamento desse material.

### 2.2.7 Peso Específico do RSU

Dentre os diversos fatores que influenciam o comportamento geotécnico de um maciço, está o peso específico do material que o compõe (CARDIM, 2008).

O peso específico ( $\gamma$ ) dos RSU, semelhante ao dos solos, é definido como a relação de peso por unidade de volume da amostra, geralmente expresso em kN/m<sup>3</sup> (SILVEIRA, 2004).

Segundo Nascimento (2007) devido a composição heterogênea dos maciços de um aterro sanitário de RSU, a determinação do peso específico se torna difícil, por sofrer influência da umidade, das camadas de cobertura grau de compactação entre demais fatores.

De acordo com Gotteland *et al.* (1995), as principais técnicas de determinação do peso específico *in situ* são os ensaios em poços escavados ou trincheiras, no qual o peso específico é obtido pela relação de volume e o peso do RSU em um determinado volume escavado. Além desses, existem aqueles determinados empregando radiação gama.

Para Gomes *et al.* (1997) os valores médios de peso específico para os RSU compactados, variam de 7,0 a 9,0 kN/m<sup>3</sup>. Após alguns processos de decomposição (físicos e biológicos) e consolidação do resíduo com o tempo, o peso específico atinge a faixa de 10,0 a 13,0 kN/m<sup>3</sup>.

### 2.2.8 Composição gravimétrica do RSU

A composição multifásica do RSU traz por consequência características bastante heterogênea ao material. Sendo assim, a determinação da composição gravimétrica

---

<sup>7</sup> DIXON, N.; JONES, R. D. V. (2005). **Engineering properties of municipal solid waste**. Geotextiles and Geomembranes, v.23, n.3, p.205-233.

torna-se essencial para conhecer as propriedades e o percentual de cada componente em relação ao peso total da amostra de estudo (OLIVEIRA,2002).

Além disso, segundo Machado *et al.* (2005), a composição dos RSU é influenciada pela condição econômica do local, pela cultura, posição geográfica da cidade, condições climáticas entre demais fatores.

### 2.2.9 Poropressão do maciço de RSU

A poropressão ( $u$ ) é entendida como pressão que existe nos líquidos que compõe a seção multifásica de uma massa saturada. (BORGATTO,2006). Segundo Oliveira (2002), a poropressão influencia na estabilidade do talude, através do coeficiente de poropressão ( $r_u$ ). Sendo que este pode ser definido pela seguinte equação (SCHULER,2010):

$$r_u = \frac{u}{\sigma_v}$$

Sendo:

- $u$ : Poropressão medida (kPa);
- $\sigma_v = \gamma \cdot z$
- $\gamma$  = Peso específico do resíduo (kN/m<sup>3</sup>);
- $z$ : Altura do resíduo sobre o ponto considerado(m).

Segundo Massad (2010), esses parâmetros são obtidos por ensaios laboratoriais ou por observação de obras semelhantes, ou seja, de maneira geral consideração empírica. Além disso, segundo Martins (2006), o teor de umidade também tem relevância na condição da poropressão no interior das pilhas de resíduos, pois quanto maior o acúmulo de líquidos e gases no interior do maciço, maiores tendem a ser os valores de poropressão e conseqüentemente o menor a resistência do RSU.

### 2.2.10 Coesão e ângulo de atrito do RSU

A determinação dos parâmetros de resistência dos RSU, para a realidade brasileira, é relativamente escassa, pois quando são realizadas, seguem padrões determinados

pela mecânica dos solos ou ainda são estimados através de retronálises de ruptura. (SCHULER, 2010).

Em seus trabalhos, Cardim (2008) descreve os ensaios de cisalhamento direto realizados em laboratório por Landva e Clark (1990), utilizando-se de amostras provenientes de aterros sanitários do Canadá. Para amostras com natureza granular e fibrosa, foram encontrados valores de coesão em um intervalo de 0 a 23 kPa, e valores de ângulo de atrito variando entre 24° a 41°. Foram citados também Gabr e Valero (1995), que encontraram valores de ângulo de atrito variando entre 20,5° e 39°, coesão de 0 a 27,5 kPa, através de ensaios com amostras retiradas do aterro Pioneer Crossing na Pensilvânia, em que atribuíram a dispersão de dados encontrados à diferença de idade e composição física dos RSU.

Fucale (2005) através de suas pesquisas, realizou análises em resíduos provenientes de aterros sanitários de Ihlenberg e Buchen, na Alemanha, alcançando resultados de 42,5° a 46° para ângulo de atrito, e 29,7 kPa até 30 kPa para coesão. Além disso, cita os estudos realizados por Turczynski (1988) que obteve valores de ângulo de atrito entre 26° e 40°, e para coesão encontrou valores entre 10 e 50 kPa.

Em seus estudos sobre o comportamento geotécnico dos RSU, Lamare Neto (2004) realizou ensaios em amostras resultantes de pré-tratamento mecânico biológico e obteve valores de ângulo de atrito entre 25° e 42°, e coesão num intervalo de 3 kPa a 11 kPa.

Santos *et al.* (1998), realizou ensaios de compressão triaxial em um talude do Aterro Controlado de Muribeca, em Recife no Estado de Pernambuco, chegando à valores de coesão a 13 kPa e uma faixa de 20° a 25° para ângulo de atrito.

Com amostras retiradas do Aterro Bandeirantes em São Paulo, Carvalho (1999) realizou ensaios em corpos de prova com diferentes dimensões. Para as amostras de 15x30 cm foram encontrados valores de 27° para o ângulo de atrito e uma variação entre 42 kPa e 55 kPa para a coesão. Para os corpos de prova moldados com 20x40cm, obteve-se um ângulo de atrito da ordem de 21° e valores de coesão entre 45 a 60 kPa.

Também citado por Cardim (2008), utilizando RSU de um aterro no sudeste do estado de Wisconsin, nos Estados Unidos, Edinçliler *et al.* (1996) realizaram ensaios nas amostras, obtendo valores médios de  $\phi'$  e  $c'$  na ordem de  $41^\circ$  e 24 kPa respectivamente. Além de Caicedo *et al.* (2002), com ensaios em resíduos do Aterro Sanitário Doña Juan em Bogotá, na Colômbia, apresentando resultados de  $24^\circ$  para ângulo de atrito e 26 kPa para coesão.

Nascimento (2007) realizou ensaios em resíduos de diferentes idades, coletados no Aterro Metropolitano Centro, em Salvador, e obteve valores de coesão entre 0 e 25,8 kPa, e ângulo de atrito num intervalo de  $24,9^\circ$  a  $66^\circ$ .

Através de ensaios de cisalhamento direto em amostras retiradas do Centro de Tratamento de Resíduos Sólidos da BR-040, em Belo Horizonte, Martins (2006) encontrou valores de coesão entre 8 e 45 kPa e ângulo de atrito em um intervalo de  $3^\circ$  a  $23^\circ$ .

Motta (2011) realizou ensaios de cisalhamento direto em resíduos provenientes do CTR Igarassu, em Pernambuco, e obteve um valor de 34 kPa para coesão e um ângulo de atrito de  $28^\circ$ .

Citados por Abreu (2015) em seus trabalhos, Kolsch (2009) realizou ensaios de cisalhamento direto em amostras oriundas de vários aterros na Alemanha e obteve valores de coesão abaixo de 10 kPa e ângulo de atrito em um intervalo de  $25^\circ$  a  $30^\circ$ , e também Bareither *et al.* (2012), realizaram o mesmo tipo de ensaio em resíduos do Aterro em Wisconsin e da Carolina do Norte, nos Estados Unidos, encontrando um valor de 20 kPa para coesão e um ângulo de atrito de  $37^\circ$ .

Além disso, foi fornecido pela empresa responsável pela operação do Aterro Sanitário do presente estudo, os valores de 13,5 kPa e  $22^\circ$  para coesão e ângulo de atrito, respectivamente.

O Quadro 1 apresenta os resultados obtidos pelos autores citados acima, em seus respectivos experimentos.

Quadro 1 – Revisão literária dos parâmetros de resistência do RSU

Autor	Método de Ensaio	Parâmetros	
		c' (kPa)	$\phi$ (°)
Fucale (2005)	Ensaio de Cisalhamento direto	29,7 - 30	42,5 - 46
Turczynski (1988)	Ensaio de Cisalhamento direto	10 - 50	26 - 40
De Lamare Neto (2004)	Ensaio de Cisalhamento direto	3 - 11	25 - 42
Santos <i>et al.</i> (1998)	Ensaio de Compressão Triaxial	13	20 – 25
Landva e Clark (1990)	Ensaio de Cisalhamento direto	0 - 23	24 - 41
Gabr e Valero (1995)	Ensaio de Cisalhamento direto e Compressão Triaxial	0 - 27,5	20,5 - 39
Carvalho (1999)	Ensaio Consolidado Drenado (CD) e não - drenado (CU)	42 - 60	21 - 27
Edinliler <i>et al.</i> (1996)	Ensaio de Cisalhamento Direto	24	41
Caicedo <i>et al.</i> (2002)	Ensaio de Cisalhamento direto e Compressão Triaxial	26	24
Nascimento (2007)	Ensaio Consolidado Drenado (CD) e não - drenado (CU)	0 - 25,8	24,9 - 66
Martins (2006)	Ensaio de Cisalhamento direto	8 - 45	3 - 23
Motta (2011)	Ensaio de Cisalhamento direto	34	28
Kolsch (2009)	Ensaio de Cisalhamento direto	< 10	25 - 30
Bareither <i>et al.</i> (2012)	Ensaio de Cisalhamento direto	20	37
Empresa que opera o Aterro Sanitário Regional de Conselheiro Lafaiete	Dados empíricos	13,5	22

Fonte: Autor

Além dos parâmetros mecânicos de resíduos sólidos urbanos, na análise de estabilidade do talude de aterro sanitário, deve-se considerar a condição de suporte do solo no qual irá receber a sobrecarga do maciço de RSU, para isso algumas investigações geotécnicas devem ser realizadas a fim de conhecer o solo no qual irá se construir o aterro sanitário.

## 2.3 Investigações geotécnicas

A elaboração de projetos geotécnicos em geral, exige adequado conhecimento do solo. Sendo assim, é necessário executar a identificação e classificação das diversas camadas componentes do substrato a ser analisado, assim como a avaliação das suas propriedades de engenharia, como, por exemplo, resistência ao cisalhamento entre outros (HACHIC *et al.*, 1998).

As investigações geotécnicas podem ser realizadas por diversos métodos e variam de acordo com as necessidades e limitações do local da obra. A execução das investigações, além de minimizar os riscos e custos, é uma conduta que exprime respeito à natureza, uma vez que conhecer verdadeiramente o solo permite ao responsável técnico projetar de modo e garantir a segurança do terreno. (MARINHO, 2005).

Além de permitir a identificação de características geométricas e estruturais que podem condicionar determinadas soluções, segundo Marinho (2005), a investigação geotécnica pode fornecer parâmetros para projeto e análises. Esses dados podem ser classificados nos grupos: resistência, deformabilidade e fluxo.

Segundo Norma Brasileira (NBR)11682, podem ser utilizados quaisquer tipos de investigação que forneçam elementos confiáveis para a montagem do modelo de análise. Além disso, deve ser determinada a superfície de escorregamento, para fins de retro-análise, no caso de taludes em que já ocorreram ou estão ocorrendo escorregamentos (ABNT, 2009).

De acordo com Rocha Brasil Engenharia (2018), para a escolha do método de investigação geotécnica a ser utilizado em uma obra, deve-se levar em consideração fatores como: finalidade da obra, características do terreno, experiência e prática locais, custo e viabilidade do método.

### 2.3.1 Ensaio de sondagem a percussão (SPT)

Standard Penetration Test (SPT) é, reconhecidamente, a mais popular e econômica ferramenta de investigação geotécnica em praticamente todo o mundo. Ele serve como indicativo da densidade de solos granulares e é aplicado também na

identificação da consistência de solos coesivos, até mesmo de rochas brandas (SCHNAID; ODEBRECHT, 2012).

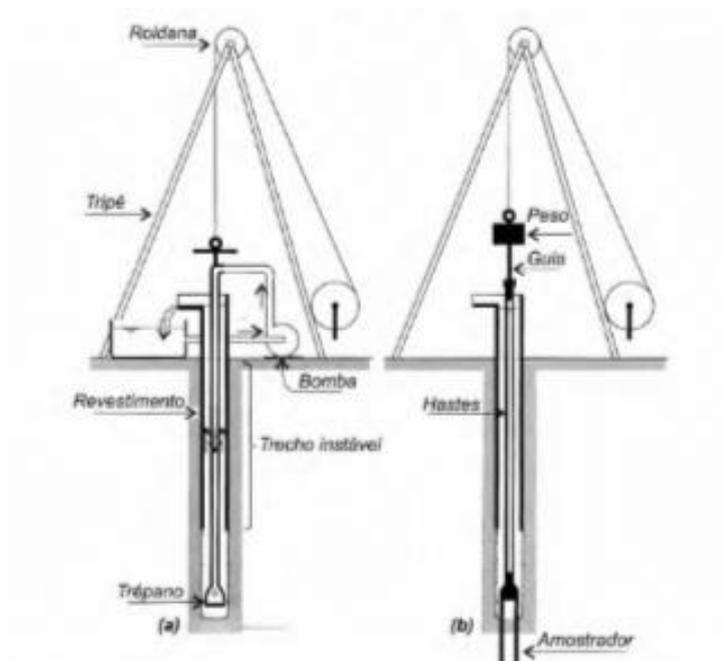
A NBR 6484 (ABNT, 2001) define que o SPT consiste na perfuração e cravação dinâmica do amostrador-padrão, a cada metro, resultando na determinação do tipo de solo e de um índice de resistência, bem como o apontamento do nível do lençol freático.

Ao se realizar um processo de sondagem, são obtidos os parâmetros de resistência ( $N_{SPT}$ ) à cravação do amostrador por metro, a posição do nível d'água e o tipo de solo atravessado, por meio da retirada de uma amostra deformada, a cada metro perfurado.

A cada metro de perfuração devem ser colhidas amostras dos solos através do amostrador.

A Figura 2 apresenta o equipamento de sondagem. Na Figura 1 (a), tem-se o equipamento para o processo de perfuração, interrompido a cada metro, onde é realizado o ensaio de penetração dinâmica (SPT), apresentado na Figura 1 (b).

Figura 2 – Etapas na execução de sondagem a percussão: (a) avanço da sondagem por desagregação e lavagem; (b) ensaio de penetração dinâmica (SPT)



Fonte: Velloso e Lopes (2010)

### **2.3.2 Ensaios de caracterização**

Como citado anteriormente, a caracterização de um solo pode ser realizada através de ensaios *in situ* ou ensaios de laboratório. De acordo com a NBR 11.682, as investigações em campo devem ser direcionadas para a obtenção do perfil geotécnico que orientará o modelo de cálculo de estabilidade. Enquanto as análises realizadas em laboratório visam a caracterização física e mecânica dos diversos solos que compõem a estratigrafia da encosta e terrenos envolvidos (ABNT, 2009).

## **2.4 Levantamento topográfico**

Segundo a NBR 13133, levantamento topográfico se caracteriza como um conjunto de processos que materializa pontos de apoio no terreno, determinando suas coordenadas topográficas, através de medições de ângulos horizontais e verticais, distâncias horizontais, verticais e inclinadas, com auxílio de instrumentos de precisão adequada (ABNT, 1994).

No que se refere a análise de estabilidade de taludes, em especial em aterros sanitários, de acordo com a NBR 11.682, o levantamento topográfico deve ser orientado por engenheiro civil geotécnico ou geólogo de engenharia, que indicará as seções e pontos obrigatórios de interesse geotécnico, bem como a abrangência da área a ser levantada. Deve ser realizado levantamento topográfico planialtimétrico, com curvas de nível, e indicando claramente o contorno da área do material escorregado (se for o caso), a locação das investigações geotécnicas, além de quaisquer estruturas (ABNT, 2009).

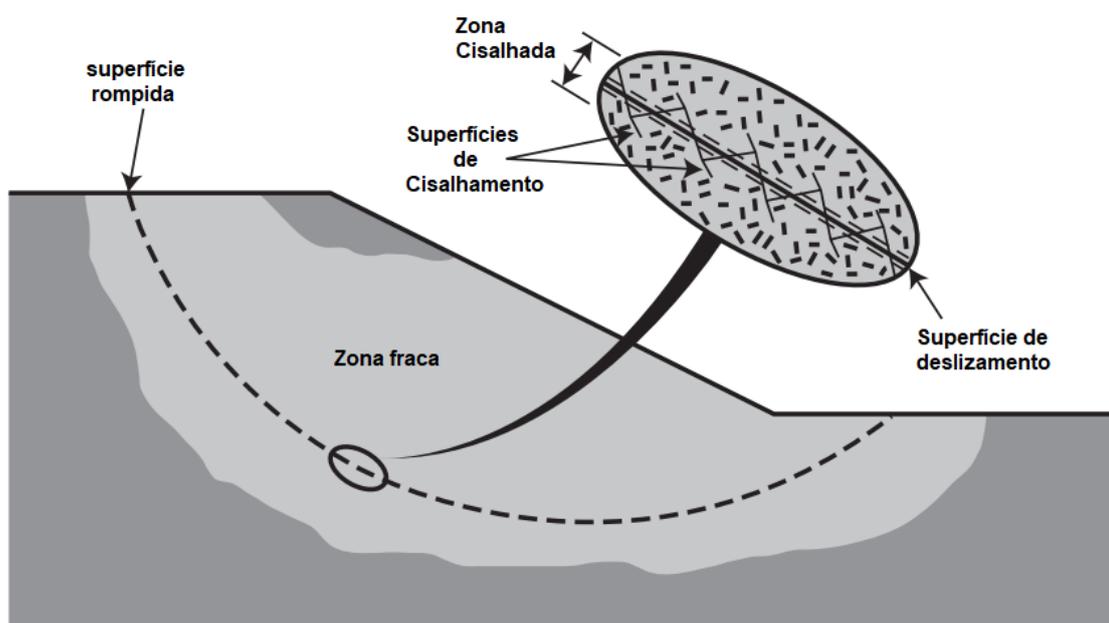
## **2.5 Análise de estabilidade**

O ponto de atenção acerca da estabilidade de taludes está relacionado a ruptura da massa de solo de resíduos sólidos urbanos, no caso dos aterros sanitários. Sendo assim, a ruptura de um maciço é caracterizada pela formação de um plano de cisalhamento que perde as suas características originais, formando uma zona cisalhada e posteriormente uma superfície de cisalhamento, conforme ilustrado na Figura 3 (GERSCOVICH, 2016).

Por se tratar de massas de solo ou de rsu(muitas vezes heterogêneo), a análise de estabilidade pode se tornar complexa, devido a compreensão das tensões que constituem o comportamento de cada camada do substrato. (FREITAS, 2010). Sendo assim, os métodos que promovem uma análise não mais complexa que o nível de conhecimento do próprio talude são, os atualmente em uso, conhecidos como métodos de equilíbrio limite (GUIDICINI ;NIEBLE, 1984; MASSAD,2010), que possibilitam uma análise com relativa simplicidade e com alta credibilidade pela experiência acumulada do seu uso ao longo dos anos.

Como já citado anteriormente, devido a ausência e técnicas eficazes para análise de estabilidade de talude aplicados à resíduos sólidos urbano, utiliza-se dos métodos da mecânica dos solos para análises de estabilidade de maciços de resíduos.

Figura 3 – Zona fraca, zona cisalhada e superfície de cisalhamento



Fonte: Adaptado de Leroueil (2001)

A análise equilíbrio-limite fundamenta-se no princípio de que a ruptura ocorre no momento em que há o equilíbrio numa superfície da massa de solo, entre a resistência ao cisalhamento com as tensões cisalhantes mobilizadas (forças solicitantes). Para tanto, define-se um fator de segurança (FS) para conhecer e estabelecer o nível de segurança do projeto. (GERSCOVICH, 2016; GUIDICINI; NIEBLE, 1984; MASSAD, 2010).

Dentre os métodos existentes de equilíbrio-limite serão analisados no presente estudo os seguintes métodos: Bishop Simplificado e Morgenstern-Price, sendo este último o mais rigoroso dos dois logo, tomado como referência (MASSAD, 2010).

Além disso, a escolha dos métodos está relacionada ao software que será utilizado, o SLOPE/W, o qual permite obter resultados a respeito dos métodos citados anteriormente.

De maneira geral, uma análise de estabilidade de talude deve prever em quais condições de solicitações das tensões cisalhantes mobilizadas ( $\tau_{mob}$ ) comparadas a resistência ao cisalhamento ( $\tau_f$ ) o maciço apresentará condições segurança. Sendo assim, o FS define-se de acordo com a equação:

$$FS = \frac{\tau_f}{\tau_{mob}}$$

E para tanto, de acordo com o tratamento determinístico de Gerscovich (2016) os valores de parâmetro para a segurança do maciço são relacionados de acordo com o Quadro 2:

Quadro 2 – Valores de parâmetro do Fator de Segurança

FS > 1	Obra estável
FS = 1	Ocorre ruptura
FS < 1	Não tem significado físico

Fonte: Gerscovich (2016)

Além dos fatores de cálculo citados anteriormente, a norma técnica brasileira NBR 11682 (ABNT,2009) de Estabilidade de Encostas determina padrões de avaliações de segurança para projeto de taludes.

A classificação está relacionada com o grau de segurança exigido para o local, sendo eles classificados em alto, médio e baixo considerando danos materiais e ambientais, e perda de vidas humanas. De acordo com NBR 11682 (ABNT,2009) obtém-se a classificação para todos os tipos de áreas de acordo os Quadros 3, 4, 5.

Quadro 3 – Nível de segurança desejado contra perdas humanas

<b>Nível de segurança</b>	<b>Critérios</b>
Alto	Áreas com intensa movimentação e permanência de pessoas, como edificações públicas, residenciais ou industriais, estádios, praças e demais locais, urbanos ou não, com possibilidade de elevada concentração de pessoas. Ferrovias e rodovias de tráfego intenso.
Médio	Áreas e edificações com movimentação e permanência restrita de pessoas. Ferrovias e rodovias de tráfego moderado.
Baixo	Áreas e edificações com movimentação e permanência eventual de pessoas. Ferrovias e rodovias de tráfego reduzido.

Fonte: ABNT,2009

Quadro 4 – Nível de segurança desejado contra danos materiais e ambientais

<b>Nível de segurança</b>	<b>Critérios</b>
Alto	Danos materiais: Locais próximos a propriedades de alto valor histórico, social ou patrimonial, obras de grande porte e áreas que afetem serviços essenciais. Danos ambientais: Locais sujeitos a acidentes ambientais graves, tais como nas proximidades de oleodutos, barragens de rejeito e fábricas de produtos tóxicos.
Médio	Danos materiais: Locais próximos a propriedades de valor moderado. Danos ambientais: Locais sujeitos a acidentes ambientais moderados.
Baixo	Danos materiais: Locais próximos a propriedades de valor reduzido. Danos ambientais: Locais sujeitos a acidentes ambientais reduzidos.

Fonte: ABNT,2009

Quadro 5 – Fator de segurança para deslizamentos

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

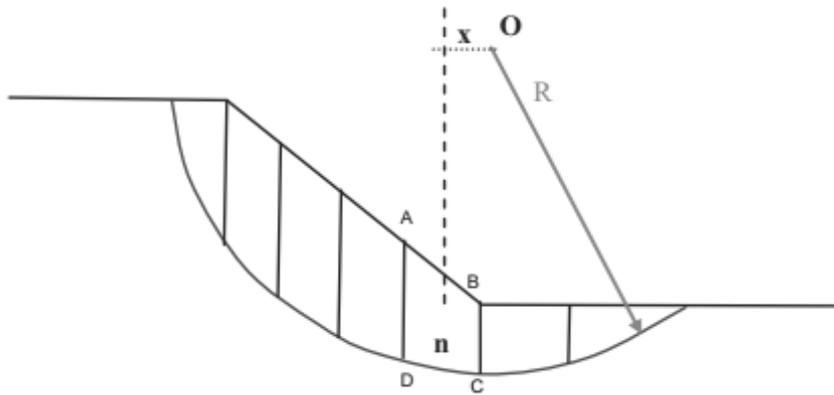
Fonte: ABNT,2009

Inicialmente, o método de equilíbrio-limite considera as premissas de que o maciço sofre uma ruptura repentina, ou seja, não se deforma antes de se romper, logo, as

relações de equilíbrio estático são válidas até o instante anterior à ruptura. Por fim, considera-se que o FS é constante ao longo da linha de ruptura do maciço em estudo.

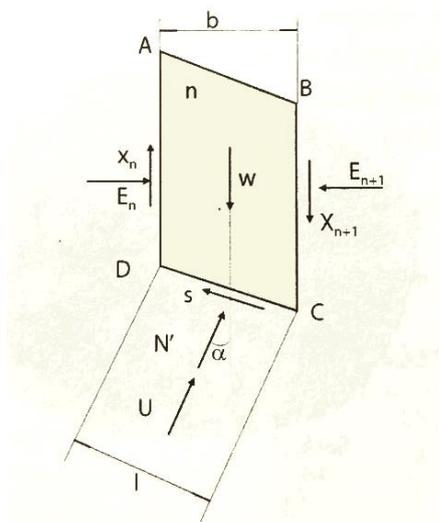
A experiência obtida no histórico de escorregamentos permitiu entender que encostas naturais que apresentam certa homogeneidade em sua composição, manifestam o rompimento do talude em formato circular. Sendo assim, primeiramente, o método de Bishop adota um arco de circunferência como a linha de ruptura da massa de solo ativa, além disso, a massa de solo circular é subdividida em fatias conforme demonstrado nas Figura 4 e 5.

Figura 4 – Exemplo de divisão em fatias de uma superfície circular



Fonte: Gerscovich (2016)

Figura 5 – Equilíbrio de forças na fatia



Fonte: Gerscovich (2016)

A medida de resolução desse problema é determinada através das equações de equilíbrio de forças, momentos e da envoltória de resistência, no qual as tensões cisalhantes mobilizadas ( $\tau_{mob}$ ) é uma das incógnitas da questão (GERSCOVICH,2016).

Visto isso, conforme aplicado os princípios de equilíbrio nas condições apresentadas nas Figuras 4 e 5, obtém-se um balanço de equações e incógnitas para condição de  $n$  fatias (Quadro 6 e Quadro 7).

Quadro 6 – Listagem de equações (método equilíbrio-limite)

<b>Equações</b>	<b>Tipos de equações</b>
<b>2n</b>	Equilíbrio de forças
<b>n</b>	Equilíbrio de momentos
<b>n</b>	Envoltória da resistência (Mohr-Coulomb)
<b>4n</b>	<b>Total de equações</b>

Fonte: Gerscovich (2016)

Quadro 7 – Listagem de incógnitas (método equilíbrio-limite)

<b>Incógnitas</b>	<b>Tipos de incógnitas</b>
<b>1</b>	Fator de Segurança
<b>n</b>	Fator tangencial na base da fatia (s)
<b>n</b>	Localização de N' na base da fatia
<b>n-1</b>	Força tangencial entre fatias (T)
<b>n-1</b>	Força normal entre fatias (E)
<b>n-1</b>	Ponto de aplicação da força entre fatias (E e T)
<b>6n-2</b>	<b>Total de incógnitas</b>

Fonte: Gerscovich (2016)

Como pode-se observar, da maneira como foi estruturada a análise do problema, ele se torna indeterminado por apresentar número de incógnitas ( $6n-2$ ) superior ao número de equações ( $4n$ ). Desta forma, vários autores adotaram métodos e hipóteses de simplificação para tornar o tema solucionável. Uma das hipóteses comuns aos métodos de Bishop e Morgenstern-Price, consiste em considerar a atuação do esforço normal no centro da base da fatia, o que permite a redução das incógnitas para ( $5n-2$ ). Nota-se que o problema ainda está indeterminado, logo foram originadas diferentes hipóteses de análise para cada método que será descrito nos tópicos a seguir.

### 2.5.1 Bishop simplificado

No caso do método de Bishop Simplificado, a hipótese é de que a resultante das forças laterais atuantes na fatia é horizontal e se anulam, sendo assim as equações de equilíbrio das forças são obtidas na direção vertical.

A vantagem da metodologia de Bishop Simplificado é a sua aplicabilidade em taludes que compreendem diferentes características de solo, como por exemplo, coesão efetiva diferente, bem como diferentes ângulos de atrito entre outros parâmetros (ROGÉRIO, 1976).

### 2.5.2 Morgenstern-price

O método Morgenstern-Price, diferente do método apresentado anteriormente, cumpre todas as condições de equilíbrio, e a superfície de ruptura pode tomar qualquer forma. Sendo assim, auxiliados por softwares computacionais permitem uma análise rigorosa da estabilidade de talude.

A solução desse método é obtida por interação das equações e da integralização dos diferenciais (REMÉDIO, 2014).

### 2.5.3 Comparação entre os métodos

De maneira geral o Quadro 8 relaciona quais as equações de equilíbrio são atendidas em cada método citado anteriormente e a consideração das demais forças atuantes.

Quadro 8 – Condições de equilíbrio de momentos e forças de interação nos métodos de análise

Métodos	Superfície de ruptura	Equilíbrio de Momentos	Equilíbrio de forças horizontais	Força de interação normal (E)	Forças de interação tangenciais (X)	Inclinação da Resultante X/E
Bishop Simplificado	Circular	Sim	Não	Sim	Não	Horizontal
Morgenstern e Price	Qualquer	Sim	Sim	Sim	Sim	Variável

Fonte: Adaptado de Ferreira (2012)

## 2.6 Análise probabilística

Nos métodos tradicionais de cálculo, caracterizados pela abordagem determinística, a incerteza nos parâmetros geomecânicos dos resíduos, por exemplo, é considerada por meio da adoção de um fator de segurança, que será representativo da estabilidade do talude. Este é obtido por meio de valores médios de coesão, ângulo de atrito e peso específico por exemplo, que são dados de entrada das análises. Na abordagem probabilística, se considera a variabilidade dos parâmetros de entrada, que são denominados variáveis aleatórias. Este tipo de análise permite a determinação de índices utilizados para verificar a adequação de um projeto, como a probabilidade de ruptura (PIMENTEL *et al.*, 2017).

### 2.6.1 Probabilidade de ruptura

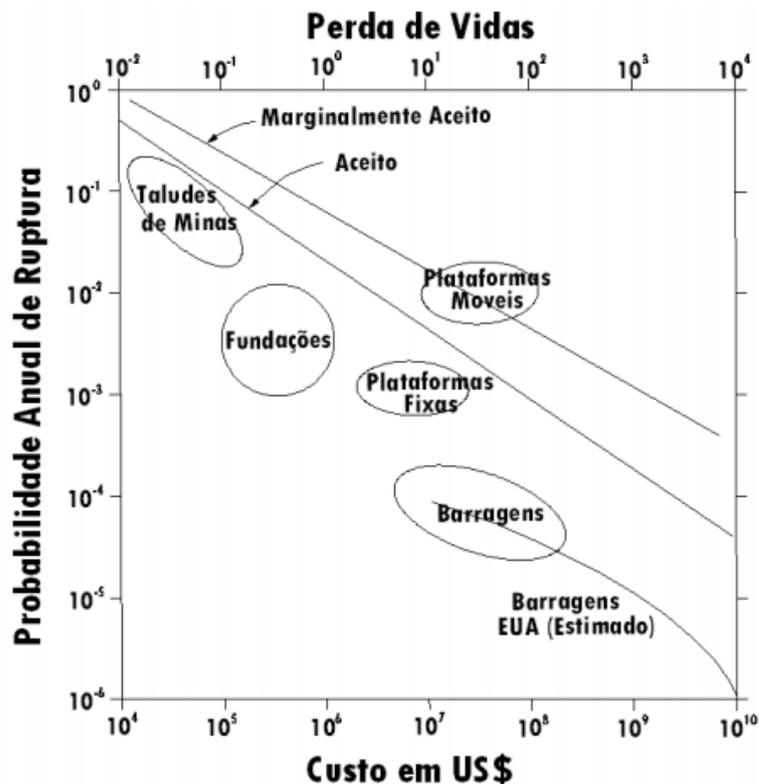
Este fator corresponde à probabilidade de assertividade do FS, e o índice de confiabilidade do mesmo. Ou seja, ele representa a distância em número de desvios padrão entre o valor médio e o valor do fator de segurança crítico (PIMENTEL *et al.*, 2017).

De maneira geral, as análises comumente utilizadas para estabilidade de talude estão relacionadas ao método equilíbrio limite (SILVA, 2011). Esses métodos geralmente utilizam parâmetros médios para análise, não levando em consideração as incertezas inerentes às propriedades avaliadas.

A avaliação do resultado da probabilidade de ruptura está inicialmente relacionada ao limite aceitável desse parâmetro, logo, a priori, deve-se estabelecer o nível de risco que pode ser admitido.

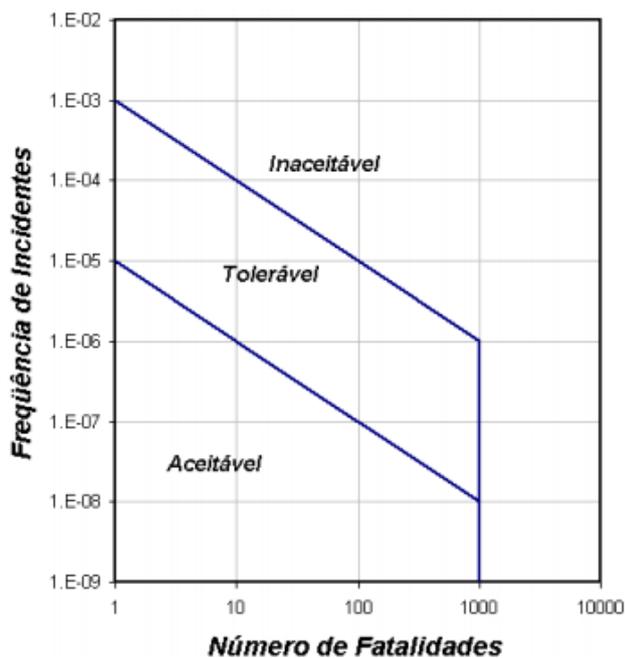
Sendo assim, diversos autores desenvolveram gráficos que fazem a correlação entre probabilidade de ruptura ou índice de confiabilidade com as consequências potenciais da obra (econômicos, ambiental, humana, infraestrutura, entre outros), segue nas Figuras 6, 7 e 8.

Figura 6 – Probabilidade de ruptura admissíveis



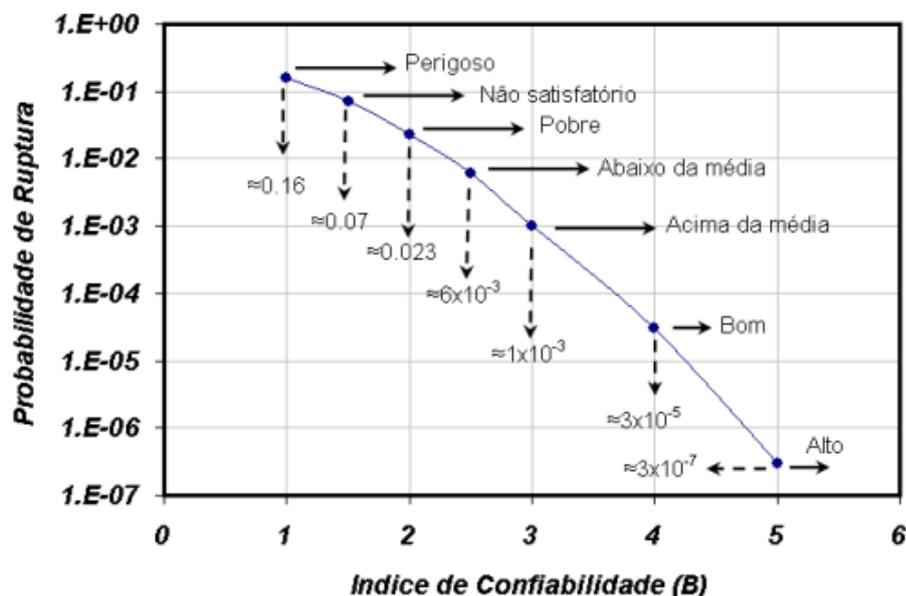
Fonte: Baecher (1982)

Figura 7 – Risco social aceitável proposto pelo departamento de planejamento de Hong Kong para deslizamentos



Fonte: Baecher e Christian (2003)

Figura 8 – Probabilidade de ruptura



Fonte: US Army Corps of Engineers (1995)

No presente projeto serão utilizados para o cálculo de probabilidade de ruptura, os métodos de Monte Carlo, Rosenblueth e FOSM, que serão descritos posteriormente neste trabalho.

### 2.6.2 Método FOSM

O método *First Order Second Moment* (FOSM) é considerado simples, e apresenta resultados satisfatórios na determinação da variância do fator de segurança e da probabilidade de ruptura. Além disso, pode-se determinar a influência de cada variável aleatória na variância do fator de segurança. Em contrapartida, o método não obtém uma função de distribuição estatística do FS, dessa forma, o cálculo da probabilidade de ruptura deve ser realizado mediante a adoção de uma função de distribuição (PIMENTEL *et al.*, 2017).

De acordo com Rezende (2013) e Fabrício (2006), são utilizados valores médios das variáveis aleatórias para expressar uma função de performance ou desempenho, como representado na equação a seguir:

$$E[F] = F(\bar{X}_1, \bar{X}_2, \bar{X}_3, \dots, \bar{X}_n)$$

No qual:

$\bar{X}_i$  = valores médios de cada variável aleatória.

É aplicada uma taxa de variação em cada variável aleatória separadamente, mantendo o valor das demais constante e iguais aos seus valores médios, e assim se determina qual foi a variação em F.

Para se definir a taxa de variação a ser aplicada, deve-se considerar que a superfície crítica deve ser mantida constante ou com pouca variação, em torno da superfície obtida para os valores médios das variáveis aleatórias. Então deve-se atentar para a escolha de um valor de incremento intermediário, que não gere muitos erros e não altere a superfície crítica.

Em seus trabalhos, Pimentel *et al.* (2017) apresentam um sumário do procedimento de aplicação do método FOSM na determinação do índice de confiabilidade e probabilidade de ruptura:

Inicialmente calcula-se o fator de segurança determinístico, através da determinação dos valores médios dos parâmetros geotécnicos (coesão, ângulo de atrito, peso específico, entre outros). Então determina-se o desvio padrão das variáveis aleatórias  $X_i$ .

Em seguida é definida a variação ( $\delta X_i$ ) em cada variável aleatória, multiplicando a taxa de variação aplicada pelo valor da variável. A partir disso, faz-se o cálculo da variação de FS ( $\delta FS_i$ ), que ocorre quando cada variável aleatória é variada de  $\delta X_i$ , através de:

$$\delta FS_i = FS(\bar{X} + \delta X_i) - FS(\bar{X})$$

Calcula-se então a derivada parcial de FS a partir da equação abaixo:

$$\frac{\delta FS_i}{\delta X_i}$$

Prossegue-se com o cálculo da variância de FS a partir do somatório das variâncias parciais de cada variável aleatória, através da equação a seguir:

$$V[FS] = \sum_{i=1}^n \left( \frac{\delta FS_i}{\delta X_i} \right)^2 \times V[X_i]$$

Em que:

- $V[FS]$  = variância de FS, igual ao quadrado do seu desvio padrão;
- $\delta FS_i$  = variação de FS que ocorre quando cada variável aleatória é variada de um valor igual a  $\delta X_i$ .
- $\delta X_i$  = variação de cada variável envolvida.
- $V[X_i]$  = variância de cada um dos  $X_i$ .

Então é calculado o desvio padrão de FS:

$$\sigma[FS] = \sqrt{V[FS]}$$

A contribuição relativa de cada variável aleatória  $X_i$  na variância de FS é calculada pela seguinte equação:

$$\text{Contribuição} = \frac{\left( \frac{\delta FS_i}{\delta X_i} \right)^2 \times V[X_i]}{V[FS]} \times 100$$

Como o método não obtém uma distribuição estatística do fator de segurança, adota-se uma função de distribuição estatística, e em seguida faz-se o cálculo da probabilidade de ruptura.

Por último, é realizado o cálculo do índice de confiabilidade ( $\beta$ ) conforme a equação abaixo, considerando que a ruptura ocorre quando o resultado de FS é abaixo do seu valor crítico que corresponde a 1,0:

$$\beta = \frac{\mu_{FS} - 1}{\sigma_{FS}}$$

No qual:

- $\mu_{FS}$  = valor esperado ou médio do fator de segurança;
- $\sigma_{FS}$  = desvio padrão do fator de segurança.

### 2.6.3 Método Rosenblueth

A aplicação do método Rosenblueth consiste na utilização de cálculos matemáticos simples, embora possa exigir a realização de muitas análises de estabilidade para os casos em que for considerado um número significativo de parâmetros (PIMENTEL *et al.*, 2017).

Também conhecido como Método das Estimativas Pontuais, segundo Maia (2003), este usa uma função geradora para obter os primeiros momentos probabilísticos de uma dada distribuição (média e variância). O processo é subdividido em um número de análises determinísticas igual a  $2^n$ , em que  $n$  é o número de variáveis aleatórias consideradas, e 2 é o número de pontos de estimativa por variável, isto é, o valor da média ora acrescido do desvio padrão, ora decrescido do desvio padrão, como apresentado nas equações a seguir:

$$X_{i+} = \bar{X}_i + \sigma_i$$

$$X_{i-} = \bar{X}_i - \sigma_i$$

Em que:

- $\bar{X}_i$  = valor médio da distribuição da variável  $X_i$ ;
- $\sigma_i$  = desvio padrão da distribuição da variável  $X_i$ .

Segundo Park *et al.* (2012<sup>8</sup> *apud* PIMENTEL *et al.*, 2017), o método também possibilita a consideração da correlação entre variações aleatórias. Assumindo que as variáveis sejam simetricamente distribuídas, as estimativas pontuais são tomadas a um desvio padrão acima e um abaixo do valor esperado. Para o caso em que se têm duas variáveis, quatro pontos ( $X_{i++}$ ,  $X_{i+-}$ ,  $X_{i-+}$  e  $X_{i--}$ ), o valor esperado para o fato de segurança poderá ser definido conforme as equações a abaixo:

$$E[FS] = x_{i++}FS_{++} + x_{i+-}FS_{+-} + x_{i-+}FS_{-+} + x_{i--}FS_{--}$$

$$E[FS^2] = x_{i++}FS_{++}^2 + x_{i+-}FS_{+-}^2 + x_{i-+}FS_{-+}^2 + x_{i--}FS_{--}^2$$

<sup>8</sup> PARK, H. J.; UM, J-G.; WOO, I; KIM, J. W. (2012). **The Evaluation of the Probability of Rock Wedge Failure Using the Point Estimate Method.** Environmental Earth Science, 65: 353-361.

$$x_{++} = x_{--} = \frac{1 + \rho}{4}$$

$$x_{+-} = x_{-+} = \frac{1 - \rho}{4}$$

No qual  $\rho$  é o coeficiente de correlação.

Assim, a estabilidade é analisada por meio de pontos de estimativa, variando os parâmetros chave que contribuem de forma significativa para a variação de FS e mantendo-se os demais constantes.

A partir de todas as possíveis combinações dos pontos estimados de cada variável aleatória, e conseqüentemente da obtenção de cada valor de fator de segurança, é possível calcular os momentos da distribuição probabilística de FS (média e desvio padrão) e a probabilidade de ruptura, assumindo uma distribuição de probabilidade.

#### 2.6.4 Método Monte Carlo

O método de Monte Carlo é um dos principais métodos probabilísticos aplicados, principalmente quando se trata de problemas complexos. Durante a análise, cada variável aleatória é representada por uma função de densidade de probabilidade, e as simulações são repetidas milhares de vezes com o objetivo de atingir a convergência da solução. Em cada iteração, o valor de cada variável aleatória é selecionado por um gerador de números aleatórios usando a função de densidade de probabilidade especificada enquanto os demais parâmetros são mantidos constantes (PIMENTEL *et al.*, 2017).

Um fator de segurança é calculado a cada iteração, e após todas as análises, é obtida uma função de densidade de probabilidade para o fator de segurança. Além disso, é determinado o número de vezes em que o FS foi inferior a 1,0. Para a determinação da probabilidade de ruptura pode-se utilizar o número de iterações em que o FS possui valores inferiores a 1,0, através da equação a seguir, no qual  $P_r$  é a probabilidade de ruptura:

$$P_r = \frac{\text{Número de vezes em que FS} < 1,0}{\text{Número total de iterações}}$$

De acordo com Farias e Assis (1998), o método de Monte Carlo é considerado robusto, e apresenta o potencial de ser “exato”, caso seja realizado um número de iterações suficiente para a estabilização da função de densidade de probabilidade da variável dependente, que nesse caso é o fator de segurança.

## 2.7 Coeficiente de Variação

O coeficiente de variação é uma medida relativa da variação, sendo expresso em porcentagem (ASSIS *et al.*, 2011). Ele mede a dispersão dos dados tratados em relação à média aritmética, conforme apresentado na equação a seguir:

$$CV = \left( \frac{s}{\bar{X}} \right) 100\%$$

Em que:

- CV = coeficiente de variação;
- s = desvio padrão amostral;
- $\bar{X}$  = média aritmética.

Devido à grande dispersão de dados analisados relativos a coesão e ângulo a aplicação de coeficiente de variação é necessário para análise dos parâmetros (OLIVEIRA,2002).

Para melhor entendimento do conceito acima, o Assis et al. ,2011 fez uma relação empírica do coeficiente de variação, relativo as propriedades geotécnicas do solo, somente a título de conhecimento acerca da utilização do coeficiente. O Quadro 9 apresenta valores típicos do coeficiente de variação de algumas propriedades geotécnicas do solo:

Quadro 9 – Valores típicos do coeficiente de variação de algumas propriedades geotécnicas

Parâmetro	Coeficiente de variação
Peso específico	03 (02 a 08)
Coesão	40 (20 a 80)
Ângulo efetivo de resistência	10 (04 a 20)
Coesão não-drenada	30 (20 a 50)

Fonte: Assis *et al.* ,2011

## 2.8 Estado da arte em estabilidade de aterros sanitários

O conhecimento atual nos estudos de estabilidade de taludes está baseado essencialmente na aplicação de métodos de análise determinísticos e probabilísticos. No que se refere a determinação dos parâmetros de resistência de resíduos sólidos urbano, é possível observar que estudiosos da área entendem esse processo como desafiador, devido a condição bastante heterogênea dos resíduos. Além disso, os ensaios aplicados aos resíduos sólidos urbanos são, geralmente, adaptações das metodologias determinadas pela mecânica do solo.

Na literatura são identificados alguns estudos relacionados a estabilidade de talude de aterro sanitário, como por exemplo, Silva (2014), Remédio (2014), e Shimazaki (2017).

Em seu estudo, Silva (2014), faz uma análise comparando os parâmetros geomecânicos dos solos, com os do RSU. Sendo estes parâmetros: compactação, compressibilidade, permeabilidade e resistência ao cisalhamento. Segundo este autor, é hábito geral dos estudos relacionados a resistência ao corte, relacionarem a esta resistência principalmente o parâmetro do ângulo de atrito, considerando a coesão com pequena participação de influência. Além disso, Silva (2014) identifica que os valores obtidos por diversos autores são de grande variabilidade, e explica o fato nas condições divergentes de ensaios e composição do resíduo.

Este autor fez também a análise de sensibilidade do fator de segurança à variação dos parâmetros do seu estudo. Sendo eles: ângulo de atrito, coesão, peso específico e nível piezométrico. Foi possível identificar que estes dois últimos não são representativos na análise de estabilidade do talude, não sendo relevantes na determinação do FS. Além disso, afirmou que o ângulo de atrito é a componente que tem maior influência no FS, seguido da coesão. Vale ressaltar que todos os dados do estudo do autor para estes dois fatores, foram baseados em revisão bibliográfica.

Remédio (2014) estudou o Aterro de Caetetuba no município de Atibaia – SP e em sua análise feita para obtenção do FS, considerou inicialmente três possibilidades: a consideração de todos as componentes (coesão, ângulo de atrito e peso específico), resíduos puramente coesivos ( $\varphi=0$ ), resíduos puramente não coesivos ( $c'=0$ ).

Este mesmo autor determinou o grau de segurança do talude do aterro, de acordo com a categoria do fator determinado pela NBR 11682 (ABNT,2009), sendo classificados entre alto, médio e baixo, e aplicou dentre os métodos de análise de estabilidade os métodos de Janbu simplificado, Spencer, Morgenstern-Price e Bishop Simplificado, com ênfase neste último. Este autor, definiu os parâmetros geotécnicos através de análises realizadas a partir dos ensaios de SPT, e com base em propostas literárias.

Remédio (2014) obteve o maior valor de FS para análise que considerou todas as componentes geomecânicas na sua avaliação. Na sequência verificou que para os demais cenários (resíduos puramente coesivos e não coesivos), houve diminuição do fator de segurança.

Já Shimazaki (2017) fez o estudo da análise de estabilidade de um aterro sanitário de RSU hipotético, projetado para atender a população da cidade de São Carlos – SP. A autora em seu estudo utilizou para escolha dos parâmetros de resistência do RSU, valores também coletados na bibliografia de variados estudos. E a estabilidade do talude foi obtida pelos métodos de Bishop Simplificado, Spencer, Janbu e Morgenstern-Price. Além disso, também foi realizado uma análise da variação do FS de acordo com as componentes da resistência, para taludes com as seguintes inclinações 1V:1,5H e 1,5 V: 2H. Primeiro resultado obtido pela autora, foi a identificação de que a variação da inclinação do talude não provocou mudanças significativas no FS. Além disso, calculando o FS com base em todos os parâmetros geomecânicos (coesão, ângulo de atrito e peso específico), em nenhum dos cenários obteve-se o fator de segurança superior a 1,5 conforme recomendado pela NB 11682 (ABNT,2009).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste item serão apresentadas características do local de estudo, ensaios e levantamento de dados, localização da secção de análise, parâmetros de resistência do RSU e software de utilizado para estudo.

#### 3.1 Descrição do local

##### 3.1.1 Características da região

A área de estudo do Aterro Sanitário está instalada no município de Conselheiro Lafaiete em Minas Gerais, como apresenta a Figura 9.

Atualmente, o Aterro sanitário de Conselheiro Lafaiete atende sete municípios para disposição final de resíduos sólidos urbanos, sendo eles Conselheiro Lafaiete, Ouro Branco, Barbacena, Ressaquinha, Itaverava, Alto Rio Doce e Rio Espera, ainda com capacidade de receber mais municípios. O aterro possui todas estruturas legais para operação e em conformidade com os órgãos ambientais competentes de fiscalização do empreendimento.

Figura 9 – Local de estudo



Fonte: Google Earth

### 3.1.2 Levantamento Topográfico

O levantamento topográfico é importante para detalhar as curvas de nível do local do estudo. Na Figura 10, estão representadas as curvas de nível da área em questão.

Figura 10 – Curvas de nível do local de estudo



Fonte: Empresa que opera o Aterro Sanitário Regional

### 3.1.3 Caracterização do solo

A caracterização do solo foi realizada através de análises em campo e em laboratório, com sondagem SPT, ensaios de granulometria e determinação dos índices de consistência (LL e LP).

O ensaio SPT foi realizado de acordo com as recomendações da NBR 6484 (ABNT, 2001). Foram executados onze furos de sondagem, observando a presença de nível d'água e recolhendo amostras de solo para ensaios de laboratório, com o uso do amostrador padronizado "Raymod" ou SPT. Os relatórios de sondagem para cada furo, com a descrição das camadas de solo encontradas, os valores de resistência à penetração e indicação de presença de nível d'água, se encontram em anexo no fim deste trabalho.

O ensaio de granulometria foi executado segundo as recomendações da NBR 7181 (ABNT, 2016). Utilizou-se material proveniente dos furos de sondagem dos ensaios SPT 04 e SPT 07. Foram retiradas no total, quatro amostras de solo, sendo que em cada furo retirou-se uma amostra à profundidade de 1 a 2 metros, e outra de 4 a 5 metros. Aferiu-se o teor de umidade de cada amostra, executou-se o peneiramento do solo granular e do solo fino, e também o ensaio de sedimentação.

Os índices de consistência (LL e LP) foram verificados através de ensaios, como recomendado pelas normas técnicas NBR 6459 (ABNT,2016) e NBR 7180 (ABNT,2016). O solo utilizado foi retirado nas profundidades de 1 a 2 metros e 4 a 5 metros, nos furos de sondagem dos ensaios SPT 04 e SPT 07, totalizando quatro amostras, assim como no ensaio de granulometria. A partir do resultado do Limite de Liquidez e do Limite de Plasticidade, foi calculado o Índice de Plasticidade do solo.

#### 3.1.4 Área e seção de análise

Para a elaboração do projeto técnico do aterro sanitário, foram realizadas 11 sondagens em toda a área de projeto e a escolha dos pontos se deu pela equipe técnica contratada da empresa que opera as atividades do local, e os laudos de sondagem e de ensaios foram disponibilizados para realização desse estudo.

Escolheu-se dentre a área de construção do aterro sanitário, a seção de um perfil do talude no qual passa pelo ponto que apresentou o maior número de sondagens, e características que visualmente apresenta maior probabilidade a instabilidade.

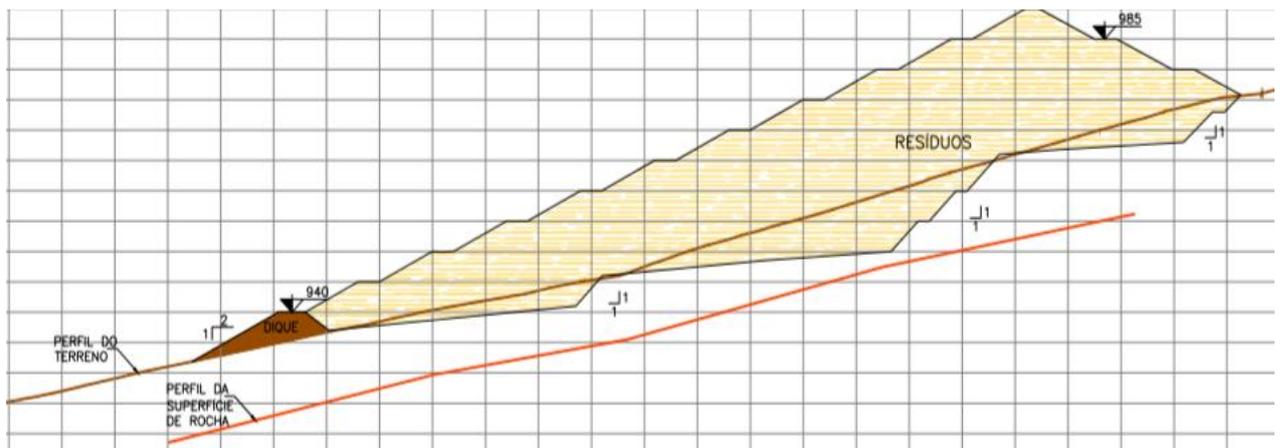
Abaixo as Figuras 11, 12, 13 apresentam a área e seção escolhida para análise, o corte do maciço em estágio final da seção de análise, bem como perfil geológico da área.

Figura 11 – Croqui com indicação da seção de análise



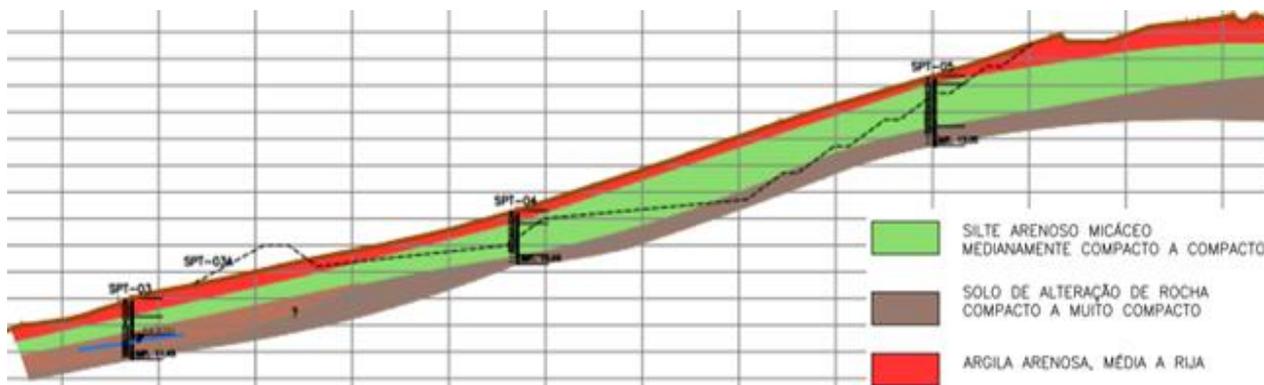
Fonte: Empresa que opera o aterro sanitário

Figura 12 – Seção de análise (configuração final)



Fonte: Empresa que opera o aterro sanitário

Figura 13 – Perfil geológico da seção de análise



Fonte: Empresa que opera o aterro sanitário

### 3.1.5 Parâmetros de resistência do solo

Com base nos laudos de sondagem do SPT03, SPT04 e SPT05 (*vide* em anexo) foram obtidos os parâmetros de resistência do solo.

Para isso, foi utilizada a tabela de parâmetros médios do solo de Joppert (2007), para correlação de coesão, ângulo de atrito e peso específico a partir do cálculo do N60. Os parâmetros obtidos pela correlação e inseridos no software, de acordo com o tipo de solo encontrado na seção, são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Parâmetros de resistência do solo

Tipo de solo	Ângulo de atrito ( $\varphi$ )	Coesão (kN/m <sup>2</sup> )	Peso Específico (kN/m <sup>3</sup> )
Argila arenosa média a rija, cor marrom	18	34,34	17,65
Silte arenoso micáceo, medianamente compactado, cor variegada	25	14,72	17,65

Além dos solos considerados acima, foi identificada na sondagem uma base rochosa impenetrável, a qual também foi considerada no *software* SLOPE/W.

### 3.1.6 Parâmetros de resistência do RSU

Para caracterização dos parâmetros de coesão e ângulo de atrito do RSU, foram utilizados diversos estudos da bibliografia e aplicados os métodos de análise probabilística FOSM e Rosenblueth, a fim de obter valores a serem utilizados no Slope/W.

Devido à dificuldade em determinar efetivamente as propriedades geomecânicas do resíduo do aterro sanitário em estudo, fez-se uma investigação bibliográfica para determinar o ângulo de atrito e coesão, sendo estes parâmetros, os essenciais para análise de estabilidade de talude. Sendo assim, a partir dos dados de literatura foi obtido a média dos parâmetros e considerado um coeficiente de variação relacionado a eles.

Devido às características dos RSU, a dificuldade de se realizar ensaios neste material, e considerando os métodos empíricos realizados pelos autores consultados na composição do estudo, o coeficiente de variação para os parâmetros de entrada consequentemente será alto, na consideração desses valores. Sendo assim, foi calculado o valor do coeficiente de variação, relativo ao desvio padrão para coesão e ângulo de atrito. Os resultados encontrados foram 60% e 20%, respectivamente.

Considerando os dados do Quadro 1 e os coeficientes de variação, obteve-se os seguintes valores adotados na análise do problema:

Tabela 2 - Parâmetros de resistência do RSU

	<b>Média (<math>\bar{x}</math>)</b>	<b>Coeficiente de variação (%)</b>	<b>Desvio Padrão (<math>\sigma</math>)</b>
<b>Coesão (kN/m<sup>2</sup>)</b>	21,47	60,00	12,88
<b>Ângulo de atrito (°)</b>	30,50	20,00	6,10

### 3.1.7 Peso específico

O peso específico na análise de estabilidade, foi utilizado com o valor fornecido pela empresa, coletado do próprio resíduo, de 10 kN/m<sup>3</sup>. Foi mantido o mesmo valor em todas as interações, visto que este parâmetro exerce pouca a quase nenhuma influência no FS (SILVA,2014).

### 3.1.8 Poropressão

Schuler (2010) em seus estudos, determinou uma faixa de poropressão na retro-análise do aterro sanitário localizado no estado do Rio de Janeiro, obtendo os valores de ru que variavam de 0,18 a 0,55. Além disso, sugeriu que valores acima de 0,40 são muito conservadores para análise de estabilidade de aterros sanitários.

Por outro lado, para Santos e Presa (1995) os RSU têm comportamento naturalmente drenante, ou seja, não retém líquidos no seu interior, de forma a não desenvolverem excessos de poropressão a ser considerada. No entanto Benvenuto e Cunha (1991) discordam dessa hipótese visto que análises de ruptura do aterro de Bandeirantes no estado de São Paulo, consideraram fatores de  $r_u$  da ordem até de 0,60 nas retro-análises após o rompimento da estrutura, além disso, foi constatado que a maior influência pode estar relacionada ao acúmulo de chorume e gases no interior do maciço.

Nesse sentido, foi adotado um valor de 0,3 para o  $r_u$ , que é um valor médio dentre os pesquisados na literatura, além de ser uma recomendação do projetista da empresa que opera o aterro sanitário. Além disso, é um valor que representa a poropressão que pode ser gerada em decorrência da operação do maciço de resíduos, considerando o fato de que este apresenta boas condições de drenagem.

## **3.2 Análise de estabilidade**

### **3.2.1 Estrutura do estudo**

O estudo foi realizado em três partes, sendo que a diferença entre elas é definida pelo método probabilístico utilizado para o cálculo do fator de segurança. Em ambas partes foram aplicados os Métodos de Bishop Simplificado e Método de Morgenster-Price.

Segundo NBR 11682(ABNT,2009), conforme demonstrado no Quadro 2, 3 e 4, o Aterro Sanitário Regional é classificado como Fator de Segurança mínimo de 1,5. Pois, requer o nível de segurança alto para danos ambientais e nível de segurança médio para perdas de vidas humanas, visto que o acesso a área de aterro sanitário é restrito e a operação funciona diariamente com três pessoas de ocupação.

Para a realização do estudo foram ponderadas algumas condições, sendo elas: desconsideração do nível de água; desconsideração do solo de cobertura (representa uma camada ínfima, se comparada ao maciço de resíduo, logo não representa alterações na análise); Consideração da poropressão ( $r_u = 0,30$ ), conforme recomendado por projetistas e profissionais da área.

### 3.2.2 1ª Parte - Método de Rosenblueth

O primeiro utilizado foi o método probabilístico Rosenblueth, no qual é feita a variação e combinação recomendada pelo método, dos parâmetros a serem inseridos no SLOPE/W. A Tabela 3 apresenta a modelagem dos dados utilizados:

Tabela 3 – Coesão e Ângulo de Atrito – Método Rosenblueth

Interação		Coesão (kN/m <sup>2</sup> )		Ângulo de Atrito (°)
1	+	34,35	+	36,60
2	+	34,35	-	24,40
3	-	8,59	+	36,60
4	-	8,59	-	24,40

### 3.2.3 2ª Parte - Método de FOSM

Neste método, é recomendado que seja utilizada uma variação de  $\pm 10\%$  em cada um dos parâmetros montando as interações a serem analisadas (PIMENTEL *et al.*, 2017).

A Tabela 4 apresenta a modelagem dos dados utilizados:

Tabela 4 – Coesão e Ângulo de Atrito – Método Rosenblueth

Interação		Coesão (kN/m <sup>2</sup> )		Ângulo de Atrito (°)
5	=	21,47	=	30,50
6	+ 10 %	23,62	=	30,50
7	=	21,47	+ 10 %	33,55
8	- 10%	19,32	=	30,50
9	=	21,47	- 10%	27,45

### 3.2.1 3ª Parte - Método de Monte Carlo

A aplicação do método foi executada pelo *software* SLOPE/W, o qual faz a análise determinística associada à probabilística. Os valores inseridos no *software* são os valores médios de coesão e ângulo de atrito e seus respectivos desvio padrão. Para execução do método Monte Carlo foram computadorizadas 10.000 interações, e a variabilidade dos valores com distribuição normal, quando relacionadas ao fator de segurança. Segue Tabela 5 com a variação dos parâmetros utilizados no *software*.

Tabela 5 – Coesão e Ângulo de Atrito – Método Monte Carlo

	Mínimo	Médio	Máximo
<b>Coesão (kN/m<sup>2</sup>)</b>	8,59	21,47	34,35
<b>Ângulo de Atrito (°)</b>	24,40	30,50	36,60

### 3.2.2 Software GEO SLOPE

O SLOPE/W é atualmente um dos softwares mais utilizados em análises de estabilidade de taludes, baseando-se em análises de Equilíbrio Limite e suas formulações, baseadas no método das lamelas, principalmente.

Para execução do presente trabalho, foi utilizado a versão *free 30 days trial* GEOSTUDIO 2018 -SLOPE/W 2018 disponível no *website* do *software*.

Através do programa, pode-se analisar ao mesmo tempo, problemas simples e complexos, para uma variedade de formas de desnível da superfície, métodos de análise, condições de poropressão, propriedades do solo e condições de carga.

As análises de estabilidade podem ser realizadas com a utilização de parâmetros de entrada determinísticos ou probabilísticos. Além disso, permite se fazer verificações pelos métodos de Bishop, Morgenstern-Price, dentre outros.

Na utilização do programa, define-se um modelo de estabilidade, e se escolhe também um método de análise. É possível modelar o talude, com os tipos de solos heterogêneos, fornecendo dados como a geometria da superfície de deslizamento, as propriedades do solo, com os valores de peso específico, coesão e ângulo de atrito, além das coordenadas da linha piezométrica.

Após a execução da análise, o SLOPE/W oferece várias ferramentas para a visualização dos resultados. Pode-se exibir as informações críticas sobre a superfície de deslizamento, com a massa total deslizada, um diagrama de corpo livre e as forças que atuam em cada área específica. Além disso, pode-se observar todas as superfícies calculadas, bem como o seu fator de segurança.

Para análise da seção do presente estudo, foram escolhidas uma seção de análise nos quais compilam cerca 10.000 superfícies de ruptura otimizada, além disso, foi definido 0,10 m como profundidade mínima de superfície potencial de ruptura.

## 4 ANÁLISES E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 4.1 Análise de estabilidade

Os resultados obtidos das análises de estabilidade realizadas sob as condições pré-determinadas no estudo são apresentados na Tabela 6, Tabela 7 e Tabela 8.

Tabela 6 - Valores de FS obtidos por análise de estabilidade pelo Método de Rosenblueth

Interação	Coesão (kN/m <sup>2</sup> )	Ângulo de atrito (°)	Fator de Segurança	
			Morgenstern-Price	Bishop Simplificado
1	34,352	36,60	2,110	2,244
2	34,352	24,40	2,029	2,071
3	8,588	36,60	2,081	2,130
4	8,588	24,40	1,596	1,605

Tabela 7 - Valores de FS obtidos por análise de estabilidade através do Método FOSM

Interação	Coesão (kN/m <sup>2</sup> )	Ângulo de atrito (°)	Fator de Segurança	
			Morgenstern-Price	Bishop Simplificado
5	21,47	30,50	1,741	1,745
6	23,62	30,50	2,074	2,121
7	21,47	33,55	2,123	2,172
8	19,32	30,50	2,033	2,081
9	21,47	27,45	1,976	2,025

Tabela 8 - Valores de FS obtidos por análise de estabilidade através do Método Monte Carlo

Interação	Coesão (kN/m <sup>2</sup> )	Ângulo de atrito (°)	Fator de Segurança	
			Morgenstern-Price	Bishop Simplificado
10	21,47	30,50	1,824	1,823

O FS obtido pelos métodos citados anteriormente, apresentou resultado satisfatório conforme NBR 11682 (ABNT,2009). É possível observar que os valores de fator de segurança são relativamente convergentes, exceto pela interação 4, que devido ao valor reduzido (se comparado aos demais) de coesão e ângulo de atrito, influenciou na redução do fator de segurança.

Nas Tabelas 9, 10 e 11 a seguir, estão expostas as imagens obtidas do SLOPE/W, após a análise de estabilidade, considerando a superfície de ruptura otimizada. A Tabela 9 apresenta as análises realizadas com base no Método Rosenblueth, na Tabela 10 estão os resultados obtidos pelo Método FOSM e na Tabela 11 resultados pelo método Monte Carlo.

Tabela 9 - Superfície de ruptura crítica obtida pelo Método Rosenblueth

(continua)

Rosenblueth		
Interações	Bishop	Morgensten-Price
1	<p>2.244</p>	<p>2.110</p>
2	<p>2.130</p>	<p>2.029</p>
3	<p>2.071</p>	<p>2.081</p>

Tabela 9 - Superfície de ruptura crítica obtida pelo Método Rosenblueth

(conclusão)

Rosenblueth		
Interações	Bishop	Morgensten-Price
4		

Tabela 10 - Superfície de ruptura crítica obtida pelo Método FOSM

(continua)

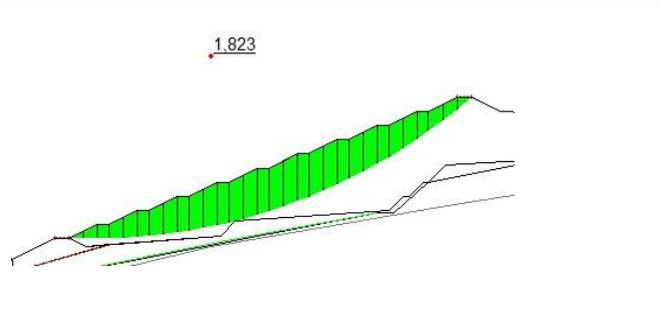
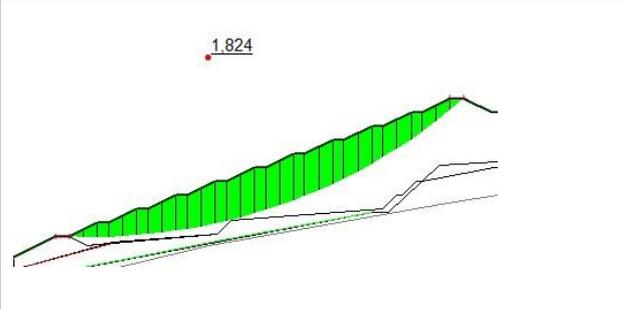
FOSM		
Interações	Bishop	Morgensten-Price
5		
6		

Tabela 10 - Superfície de ruptura crítica obtida pelo Método FOSM

(conclusão)

FOSM		
Interações	Interações	Interações
7	<p>2.172</p>	<p>2.123</p>
8	<p>2.081</p>	<p>2.033</p>
9	<p>2.025</p>	<p>1.976</p>

Tabela 11 - Superfície de ruptura crítica obtida pelo Método Monte Carlo

<b>Monte Carlo</b>	
<b>Bishop</b>	<b>Morgenstern-Price</b>
 <p>1.823</p>	 <p>1.824</p>

## 4.2 Probabilidade de ruptura

A análise probabilística na estabilidade de taludes é uma técnica que traz diversas vantagens à análise geotécnica. O melhor entendimento a respeito da utilização desse método está relacionado a probabilidade de ruptura, no qual confere maior realidade de segurança do talude.

Segundo Lacasse e Nadim (1996), o fator de segurança por si só não fornece adequadamente estabilidade à estrutura. Pois se relacionarmos a ele a probabilidade de ruptura na ordem de  $10^{-3}$ , por exemplo, o talude pode apresentar  $FS = 1,79$  e ainda assim ser menos confiável do que uma análise de  $FS = 1,4$  com probabilidade de ruptura da ordem de  $10^{-4}$ .

Para o presente trabalho foram utilizados os métodos probabilísticos de Rosenblueth, Monte Carlo e FOSM.

### 4.2.1 Rosenblueth

Para cálculo deste método foi utilizado o *software* Microsoft Excel. Segue abaixo a Tabela 12, com a probabilidade de ruptura em cada um dos métodos determinísticos.

Tabela 12 - Resultados obtidos pelo Método Rosenblueth

	<b>Morgenstern-Price</b>	<b>Bishop</b>
Média	1,9540	2,0125
Desvio Padrão	0,2410	0,2810
Probabilidade de Ruptura	3,77E-05	1,57E-04
Índice de Confiabilidade	3,96	3,60

#### 4.2.2 Monte Carlo

O software SLOPE/W foi utilizado na realização das análises probabilísticas para esse método, e os resultados encontrados estão apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 - Resultados obtidos pelo Método Monte Carlo

	<b>Morgenstern-Price</b>	<b>Bishop</b>
Média	1,8240	1,8230
Desvio Padrão	1,2271	1,2251
Probabilidade de Ruptura	4,12E-04	4,07E-04
Índice de Confiabilidade	3,34	3,35

#### 4.2.3 FOSM

Nos cálculos realizados através do Método FOSM, observou-se uma discrepância significativa no valor da probabilidade de ruptura em relação aos obtidos através dos demais métodos utilizados. Acredita-se que esse fato pode ser atribuído ao alto coeficiente de variação empregado nos parâmetros de resistência, o que sugere que o método não se aplica bem a essas condições.

#### 4.2.4 Comparação entre os métodos Rosenblueth e Monte Carlo

A utilização dos dois métodos na avaliação geotécnica do estudo, teve o objetivo de averiguar a qualidade da análise. Conforme esperado, os dados apresentaram valores bem convergentes, conforme pode-se observar na Tabela 14Tabela 14.

Tabela 14 – Resumo das análises de estabilidade

	Monrgentern-Price			Bishop Simplificado		
	FS	Probabilidade de Ruptura	Índice de Confiabilidade	FS	Probabilidade de Ruptura	Índice de Confiabilidade
Rosenblueth	1,954	3,77E-05	3,96	2,013	1,57E-04	3,60
Monte Carlo	1,824	4,12E-04	3,34	1,823	4,07E-04	3,35

As Figuras 21,22 e 23 abaixo apresentam os gráficos propostos por Baecher (1982), Baecher e Christian (2003), e US Army Corps of Engineers (1995) representando a classificação da probabilidade de ruptura de acordo com o risco aceitável proposto por cada autor. A Tabela 15 descreve a legenda para leitura dos gráficos.

Figura 14 - Probabilidade de Ruptura

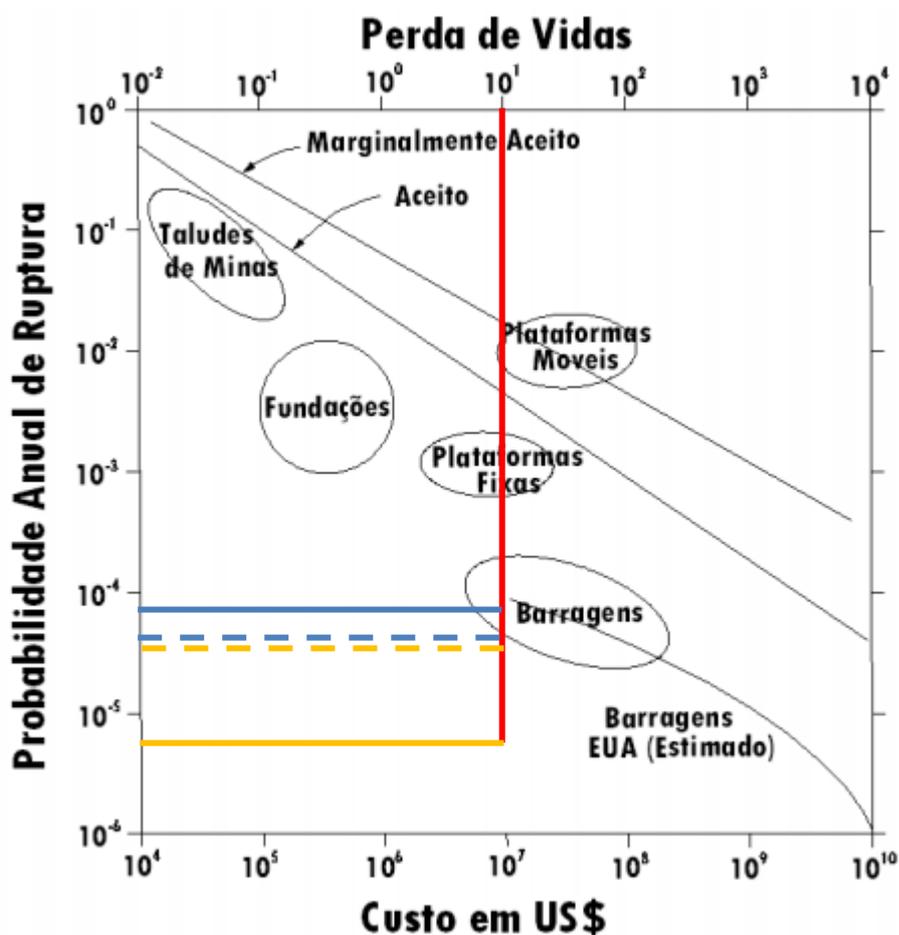


Figura 15 - Probabilidade de Ruptura

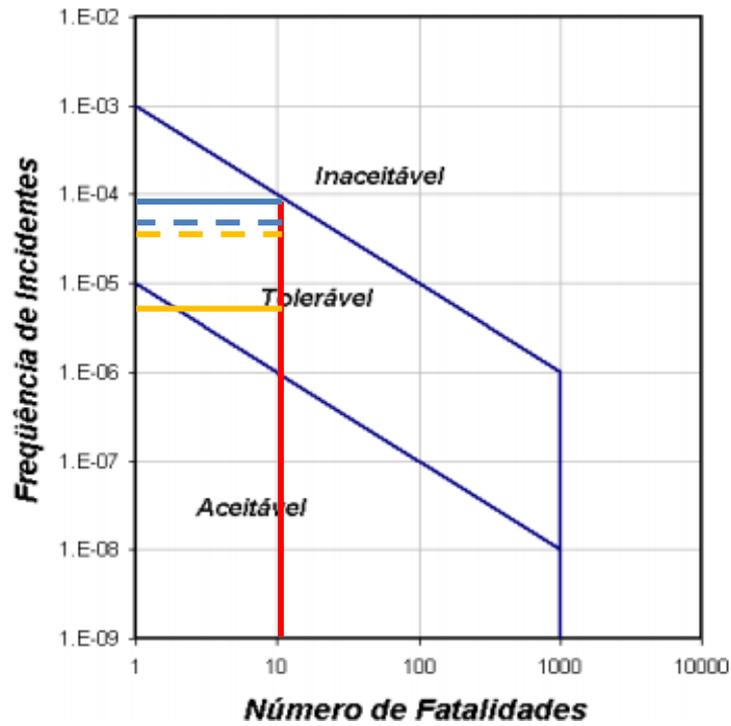


Figura 16 – Índice de confiabilidade

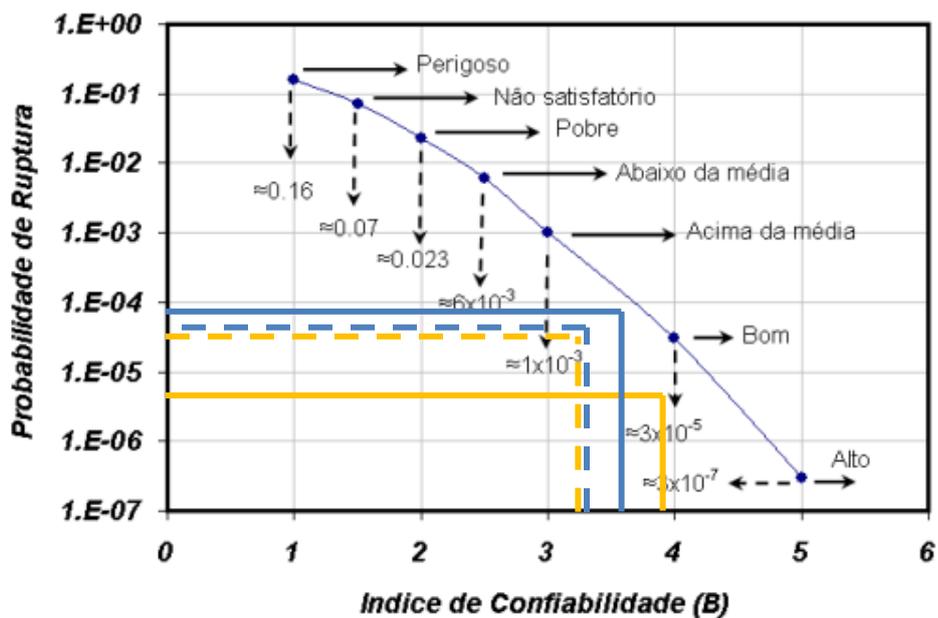


Tabela 15 – Legenda para leitura dos gráficos

<b>Cor /Traço</b>	<b>Método Determinístico</b>	<b>Método Probabilístico</b>
	Bishop Simplificado	Rosenblueth
	Bishop Simplificado	Monte Carlo
	Morgenstern-Price	Rosenblueth
	Morgenstern-Price	Monte Carlo

## 5 CONCLUSÃO

O presente trabalho consistiu em realizar a análise de estabilidade de uma seção contendo um maciço de resíduos sólidos urbanos e solo natural, do Aterro Sanitário Regional localizado no município de Conselheiro Lafaiete em Minas Gerais.

A análise de estabilidade foi baseada em métodos determinísticos relacionados a estabilidade de taludes, sendo eles: o Método de Bishop Simplificado e Método de Morgenstern-Price, mais rigoroso, usado como base comparativa. As avaliações e aplicações dos métodos foram realizadas através do *software* SLOPE/W.

Além das análises determinísticas, foi executada a análise probabilística relacionada aos parâmetros de resistência dos RSU e ao fator de segurança obtido por todas interações executadas para cada método no presente trabalho.

Com base em todas as avaliações anteriormente realizadas, é possível concluir que o atual projeto de construção da Bacia Sul do Aterro Sanitário Regional apresentou um fator de segurança médio satisfatório de acordo com normas técnicas. Esse fator, relacionado à probabilidade de ruptura da ordem de  $10^{-4}$ , infere estabilidade à estrutura com boa margem de segurança.

Para análise realizada neste estudo, foi calculado o coeficiente de variação de 60% para coesão e 20% para ângulo de atrito, valores obtidos através de cálculos com os parâmetros obtidos no estudo. O coeficiente de variabilidade expressa a ausência de incerteza nos dados coletados e na qualidade dos ensaios realizados. Sendo assim, esses valores influenciam diretamente o cálculo do fator de segurança.

Considerando a proposta de melhoria em aumentar a capacidade do aterro em estudo, sugere-se a realização de uma maior quantidade de ensaios nos materiais, de forma a obter resultados mais precisos em relação aos seus parâmetros de resistência, e assim ter uma análise com maior confiabilidade.

O sucesso em uma análise depende fundamentalmente da construção de um modelo geotécnico representativo das condições de campo, em relação aos materiais constituintes e aos parâmetros geotécnicos utilizados. Ao se definir os dados a serem

utilizados, como o desvio padrão por exemplo, deve-se avaliar o seu significado físico e considerar a variabilidade do parâmetro analisado.

Assim, torna-se imprescindível o conhecimento das propriedades geotécnicas dos materiais envolvidos e das condições de poropressão, as quais devem ser estudadas e obtidas através de investigações geotécnicas abrangentes, além de ensaios de campo e laboratório.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, A.E.S. **Investigação geofísica e resistência ao cisalhamento de resíduos sólidos urbanos de diferentes idades**. 2015. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

ALBUQUERQUE, J. B. T. **Resíduos sólidos**. Leme: Independente, 2011.

ASSIS, A. P.; BARBOSA, T. J. E.; ALMEIDA, M. G. G. A.; MAIA, J. A. C. **Métodos Estatísticos e Probabilísticos Aplicados a Geotecnia**. Universidade de Brasília. Brasília, DF, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **ABNT – NBR 6459**: Solo – Determinação do Limite de Liquidez. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **ABNT – NBR 6484**: Solo – Sondagens de simples reconhecimento com SPT – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **ABNT – NBR 7180**: Solo – Determinação do Limite de Plasticidade. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **ABNT – NBR 7181**: Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **ABNT – NBR 8419**: Apresentação de Projetos de Aterros Sanitários de Resíduos Sólidos Urbanos. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **ABNT – NBR 11682**: Estabilidade de encostas. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **ABNT – NBR 13133**: Execução de levantamento topográfico. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **ABNT – NBR 15849**: Resíduos Sólidos Urbanos – Aterros Sanitários de pequeno porte – Diretrizes para localização, projeto, implantação, operação e encerramento. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). **Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil**. 15ªed. (2017).

BENVENUTO, C.; CUNHA, M.A. (1991). **Escorregamento em Massa de Lixo no Aterro Sanitário Bandeirantes em São Paulo**. II Simpósio sobre Barragens de Rejeito e Disposição de Resíduos - v.2, Rio de Janeiro, RJ.

BAECHER, G. B. **Simplified geotechnical data analysis**. **Proceedings of NATO advanced study institute on reliability theory and its application in structure and soil mechanics**. Bornholm (1982).

BAECHER, G.B.; CHRISTIAN, J.T. **Reliability and Statistics Geotechnical Engineering**, John Wiley & Sons (2003).

BORGATTO, A. V. A. **Estudo do efeito fibra e da morfologia na estabilidade de aterros de resíduos sólidos urbanos**. 2006. 174 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro.

BRASIL. Lei n. 12.305, de 2 de agosto de 2010. **Política nacional de resíduos sólidos** [recurso eletrônico]. – 2. ed. – Brasília: Câmara dos Deputados, Edições Câmara, 2012. 73 p. – (Série legislação; n. 81)

CARDIM, R. D. (2008). **Estudo da Resistência de Resíduos Sólidos Urbanos por meio de Ensaios de Cisalhamento Direto de Grandes Dimensões**. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-168/08, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 91p.

CARVALHO, M.F. (1999). **Comportamento Mecânico de Resíduos Sólidos Urbanos**. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, São Paulo.

COSTA, B. S.; RIBEIRO, J. C. J. **Gestão e gerenciamento de resíduos sólidos: direitos e deveres**. Rio de Janeiro: Lumen Juris, 2013.

DIJON, N.; JONES, D. R. V. **Engineering properties of municipal solid waste**. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 23,2005.

FABRÍCIO, J. V. F., 2006, **Análises Probabilísticas de Estabilidade de Taludes e Contencões**, Dissertação de Mestrado, PUC, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

FARIAS, M.M. e ASSIS, A., 1998. **Uma Comparação entre Métodos Probabilísticos Aplicados à Estabilidade de Taludes**. Anais do XI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – XI COMBRASEG. ABMS, Brasília, DF, Brasil.

FEAM - Fundação Estadual do Meio Ambiente. Orientações **básicas para a operação de aterro sanitário**. Belo Horizonte, Minas Gerais. FEAM, 2006.

FERREIRA, J. L. F. **Análise de estabilidade de taludes pelos métodos de Jambu e Spencer**. Dissertação de Mestrado – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2012.

FIORILLO, C. A. P. **Curso de Direito Ambiental brasileiro**. São Paulo: Saraiva, 2011.

FREITAS, M. A. C. **Análise de estabilidade de taludes pelos métodos Morgenstern-Price e Correia**. 2011. 178 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil- especialização em geotecnia) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, Portugal 2010.

FUCALE, S.P. **Influência dos componentes de reforço na resistência de resíduos sólidos urbanos**. Tese de Doutorado, Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Pernambuco, 2005.

GERSCOVICH, D. M. **Estabilidade de Talude**. São Paulo. Oficina de Textos (2016).

GOMES, L. P.; CONCEIÇÃO, D. C.; FLECK, A. **Avaliação dos recalques em sistemas piloto de aterramento de resíduos sólidos urbanos**. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Foz do Iguaçu, PR. Anais ... Rio de Janeiro: ABES, 1997;

GOTTELAND, P.; LEMARÉCHAL, D.; RICHARD, P. **Analysys and monitoring of the stability of a domestic waste landfill**. Proceedings Sardinia 95, Fifth International Landfill Symposium, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy, October 1995.

GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M. **Estabilidade de taludes naturais e de escavação**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1984.

HACHIC, W.; FALCONI, F. F.; SAES, J. L.; FROTA, R. G. Q.; CARVALHO, C. S.; NIYAMA, S. **Fundações: teoria e prática**. 2° ed. São Paulo. Pini, 1998.

JOPPERT JR, Ivan. **Fundações e Contensões de Edifícios** – São Paulo: Editora PINI, 2007.

LACASSE F.; NADIM. **Uncertainties in characterising soil properties**. In C.D. Shackelford et al, editor, Geotechnical Special Publication No 58, Proceedings of Uncertainty '96 held in Madison, Wisconsin, 1996.

LAMARE NETO, A. D. **Resistência ao cisalhamento de resíduos sólidos urbanos e de materiais granulares com fibras**. (2004) Tese – Doutorado. Ciências em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro.

LEROUEIL, S., 2001, “**Natural slopes and cuts: movement and failure mechanisms**”. *Géotechnique*, v. 51, n.3, pp.197-243.

MACHADO, S. L.; CARVALHO, M. F.; NASCIMENTO, J. C. F.; DOURADO, K. A. **Estudo do comportamento mecânico dos resíduos sólidos urbanos sob a influência da biodegradabilidade**. XXIII Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Campo Grande, Mato Grosso do Sul, 2005

MAIA, J. A. C., 2003. **Métodos Probabilísticos Aplicados à Estabilidade de Taludes e Cavidades em Rocha**. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-99/03, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, Brasil.

MARINHO, F. A. M. **Investigação Geotécnica Para Quê?**. In IV Conferência Brasileira de Estabilidade de Encostas, Salvador, v. 2, 2005.

MARTINS, H. L., 2006, **Avaliação da resistência de resíduos sólidos urbanos por meio de ensaios de cisalhamento direto em equipamento de grandes dimensões**, Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil.

MASSAD, F. **Obras de Terra: curso básico de Geotecnia**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL. **Instrução Normativa nº 1**, de 24 de agosto de 2012.

MOTTA, E. Q., 2011, **Avaliação da resistência ao cisalhamento de resíduos sólidos urbanos com codisposição de lodo de tratamento de esgoto através de ensaios de cisalhamento direto de grandes dimensões**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, Brasil.

NASCIMENTO, J. C. F. **Comportamento mecânico de resíduos sólidos urbanos**. 2007. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

OLIVEIRA, D. A. F. **Estabilidade de taludes de maciços de resíduos sólidos urbanos**. Dissertação de Mestrado, G.DM-095A/02, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 155p, 2002.

PIMENTEL *et al.* 2017, **Avaliação dos Métodos Probabilísticos Aplicados à Estabilidade de Taludes de Barragens**, XXXI – Seminário Nacional de Grandes Barragens, Comitê Brasileiro de Barragens, Belo Horizonte, MG, Brasil.

RECESA: Rede de Capacitação e Extensão Tecnológica em Saneamento Ambiental. **Resíduos sólidos: projeto, operação e monitoramento de aterros sanitários**. Guia do profissional em treinamento: nível 2/ Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental (org.). Belo Horizonte. 2008

REMÉDIO, F.H. **Análise de estabilidade de taludes de aterro de resíduos urbanos utilizando parâmetros geotécnicos de propostas bibliográficas e correlações com  $N_{sPT}$** . Dissertação de Mestrado em Geociências. Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Rio Claro, São Paulo (2014).

REZENDE, D. A. 2013, **Análise Probabilística de Estabilidade de Taludes em Barragens de Rejeitos**, Projeto de Graduação, Escola Politécnica, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Rocha Brasil Engenharia. **Métodos de Investigações Geotécnicas**. Rocha Brasil, 2018. Disponível em: <<http://rochabrasil.net/engenharia-geotecnica/metodos-de-investigacoes-geotecnicas/>>. Acesso em: 5 set. 2018.

ROGÉRIO, P. R. **Cálculo de estabilidade de taludes pelo método de Bishop Simplificado**. São Paulo, Edgar Blücher, 1976.

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

SANTOS, S. M.; PONTES, FILHO, I.; JUCÁ, J. F. T.; SANTOS, E. A. (1998). **Simulação Numérica de Provas de Carga Realizadas em um Aterro de Resíduos Sólidos**. In: XI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Vol.I, Brasília. 1998

SCHNAID, F.; ODEBRECHT, E. **Ensaio de campo e suas aplicações à engenharia de fundações**. 2º ed. São Paulo. Oficina de Textos, 2012.

SCHULER, A. R. **Análise do comportamento de um aterro municipal de resíduos sólidos urbanos instrumentado**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ/COPPE), Rio de Janeiro, 2010.

SHIMAZAKI, L. R. **Análise de estabilidade de aterros de resíduos sólidos antigos**. 2017. 112 p. Trabalho de conclusão de curso – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

SILVA, B. V. **Estabilidade de taludes de aterros não controlados de resíduo**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geológica) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, Portugal, 2014.

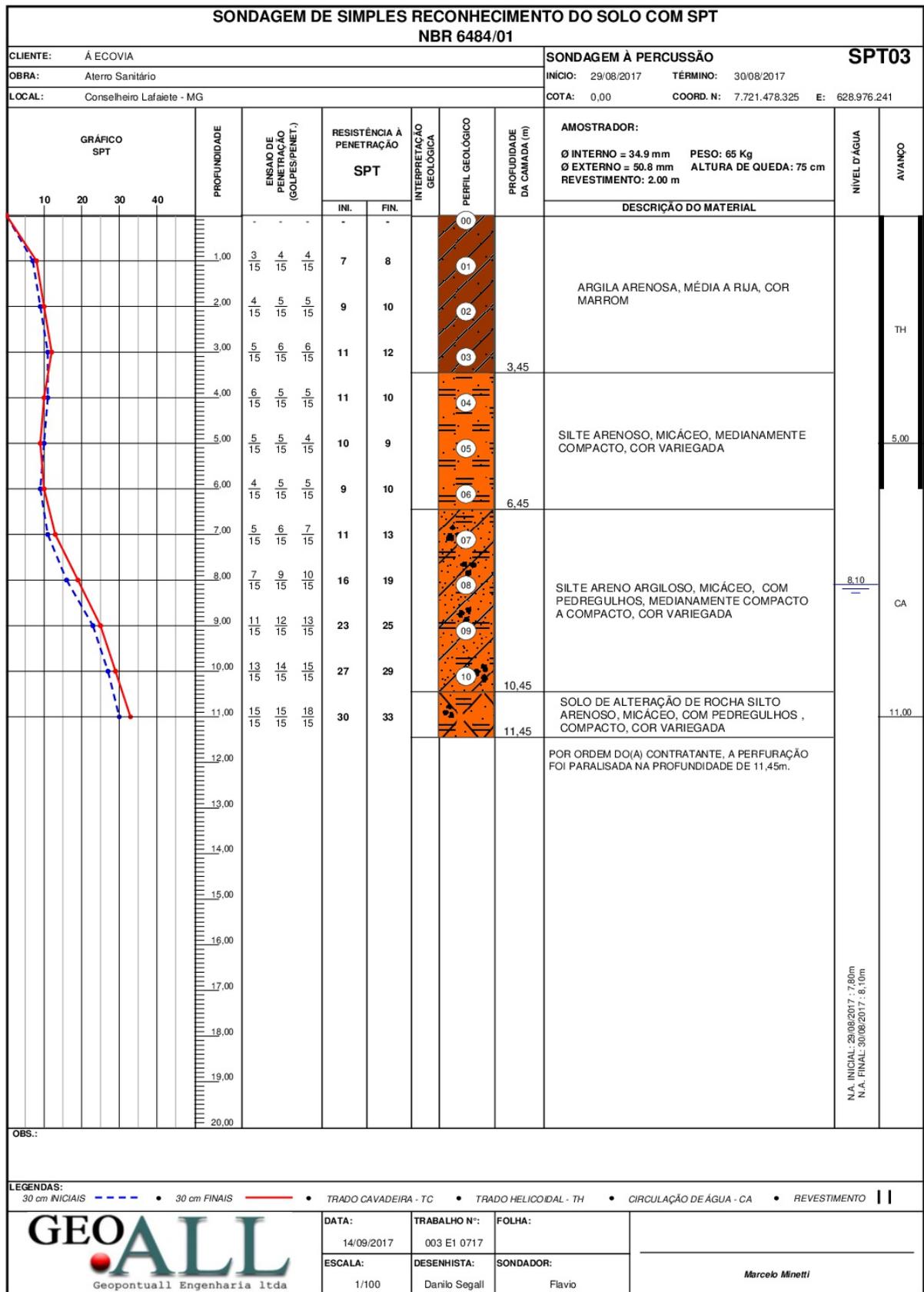
SILVA, J. P. M. **Os métodos de equilíbrio limite e dos elementos finitos na análise de estabilidade de taludes**. 2011. 173 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil-especialização em geotecnia) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2011.

SILVEIRA, A. M. M. **Estudo do peso específico de resíduos sólidos urbanos.** 2004. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro.

UNITED NATIONS (ONU), Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2017). **World Population Prospects: The 2017 Revision, Key Findings and Advance Tables.** Working Paper No. ESA/P/WP/248.

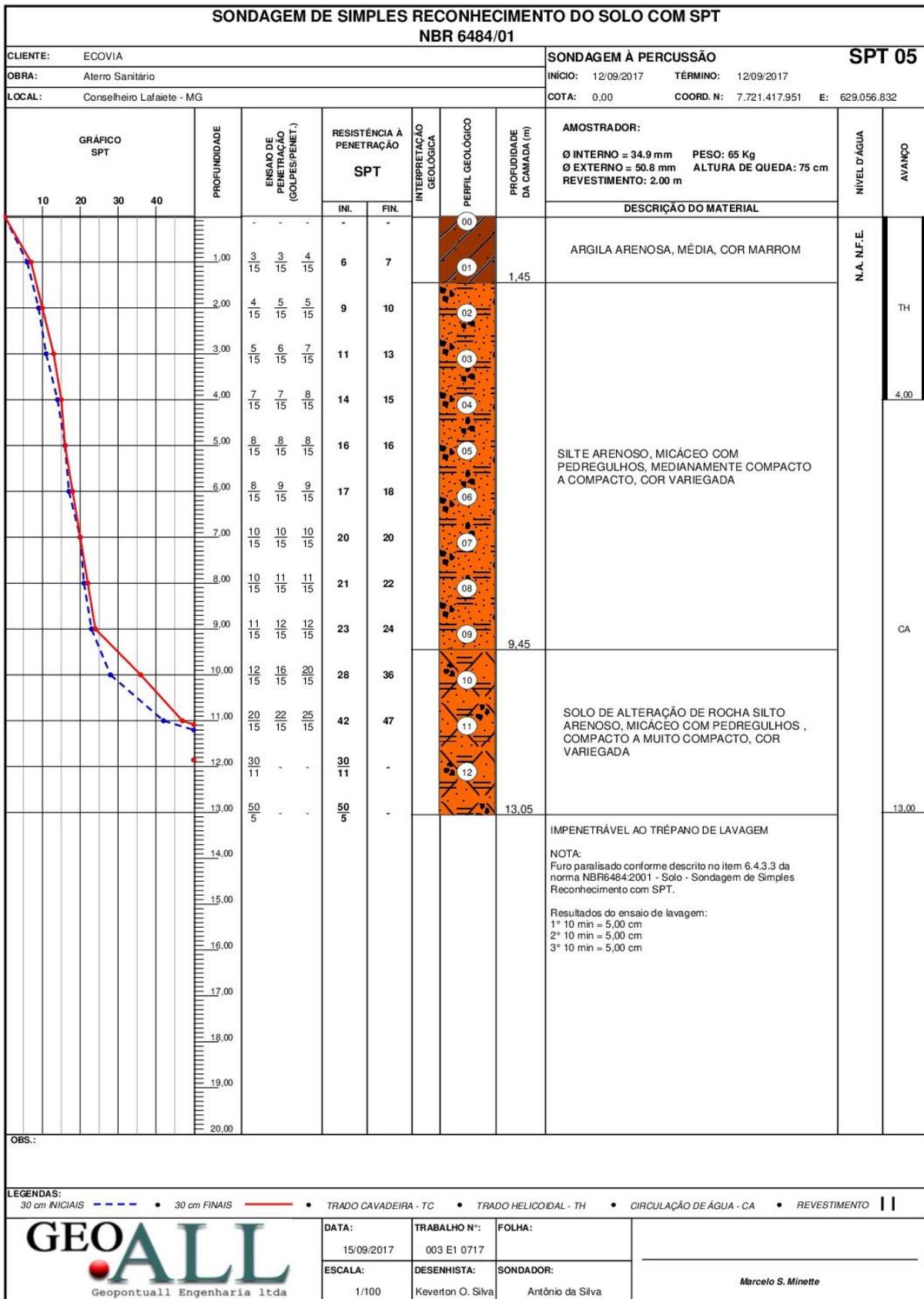
US ARMY CORPS OF ENGINEERS. **General Assessment of Small-Scale Measures.** St. Paul, Rock Island. (1995).

## ANEXO A – RELATÓRIO DE SONDAGEM SPT 03.





## ANEXO C – RELATÓRIO DE SONDAGEM SPT 05.



## ANEXO D – TABELA DE PARÂMETROS MÉDIOS DO SOLO.

<b>Tabela nº 13 - Parâmetros médios do solo</b>						
Tipo de solo	Faixa de STP	Módulo de elasticidade (t/m <sup>2</sup> )	Peso específico (g)		Ângulo atrito efetivo (f)	Coesão efetiva (tf/m <sup>2</sup> )
			Natural (t/m <sup>3</sup> )	Saturado (t/m <sup>3</sup> )		
Areia pouco siltosa / pouco argilosa	0 - 4	2000 - 5000	1,7	1,8	25°	–
	5 - 8	4000 - 8000	1,8	1,9	30°	–
	9 - 18	5000 - 10000	1,9	2,0	32°	–
	19 - 41	8000 - 15000	2,0	2,1	35°	–
	≥ 41	16000 - 20000	2,0	2,1	38°	–
Areia média e fina muito argilosa	0 - 4	2000	1,7	1,8	25°	0
	5 - 8	4000	1,8	1,9	28°	0,5
	9 - 18	5000	1,9	2,0	30°	0,75
	19 - 41	10000	2,0	2,1	32°	1,0
Argila porosa vermelha e amarela	0 - 2	200 - 500	1,5	1,7	20°	0,75
	3 - 5	500 - 1000	1,6	1,7	23°	1,5
	6 - 10	1000 - 2000	1,7	1,8	25°	3,0
	≥ 10	2000 - 3000	1,8	1,9	25°	3,0 a 7,0
Argila siltosa pouco arenosa (terciário)	0 - 2	100	1,7	1,8	20°	0,75
	3 - 5	100 - 250	1,8	1,9	23°	1,5
	6 - 10	250 - 500	1,9	1,9	24°	2,0
	11 - 19	500 - 1000	1,9	1,9	24°	3,0
	20 - 30	3000 - 10000	2,0	2,0	25°	4,0
	≥ 30	10000 - 15000	2,0	2,0	25°	5,0
Argila arenosa pouco siltosa	0 - 2	500	1,5	1,7	15°	1,0
	3 - 5	500 - 1500	1,7	1,8	15°	2,0
	6 - 10	1500 - 2000	1,8	1,9	18°	3,5
	11 - 19	2000 - 3500	1,9	1,9	20°	5,0
	≥ 20	3500 - 5000	2,0	2,0	25°	6,5
Turfa / argila orgânica (quaternário)	0 - 1	40 - 100	1,1	1,1	15°	0,5
	2 - 5	100 - 150	1,2	1,2	15°	1,0
Silte arenoso pouco argiloso (residual)	5 - 8	8000	1,8	1,9	25°	1,5
	9 - 18	1000	1,9	2,0	26°	2,0
	19 - 41	15000	2,0	2,0	27°	3,0
	≥ 41	20000	2,1	2,1	28°	5,0