

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

**ANÁLISES ESTATÍSTICA E PROBABILÍSTICA DE  
PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA E DE ESTABILIDADE  
DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS**

**JOÃO HENRIQUE TONIOLO TECHE**

**ORIENTADOR: RAFAEL CERQUEIRA SILVA  
COORIENTADORA: SABRINA MEDEIROS PENASSO**

**MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM ENGENHARIA  
AMBIENTAL**

**BRASÍLIA/DF: MAI/2022**

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

**ANÁLISES ESTATÍSTICA E PROBABILÍSTICA DE  
PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA E DE ESTABILIDADE  
DE UM ATERRO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS**

**JOÃO HENRIQUE TONIOLO TECHE**

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

**APROVADA POR:**

---

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

---

**SABRINA MEDEIROS PENASSO, ENG. CIVIL MESTRANDA (UFJF /  
PESQUISADORA PPGG/ENC/UnB)  
(COORDINADORA)**

---

**CLÁUDIA MÁRCIA COUTINHO GURJÃO, DSc. (ENC/UnB)  
(EXAMINADORA INTERNA)**

---

**MAGNOS BARONI, DSc. (UFMS)  
(EXAMINADOR EXTERNO)**

**DATA: BRASÍLIA/DF, 03 DE MAIO DE 2022**

## FICHA CATALOGRÁFICA

TECHE, JOÃO HENRIQUE TONIOLO

ANÁLISES ESTATÍSTICA E PROBABILÍSTICA DE PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA E DE ESTABILIDADE DE UM ATERRO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

[Distrito Federal] 2022.

xiv, 85 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Ambiental, 2022)

Monografia de Projeto Final – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Aterro Sanitário

2. Parâmetros de Resistência

3. Análise de Estabilidade

4. Método Probabilístico

I. ENC/FT/UnB

II. Título (Bacharel)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

TECHE, J. H. T. (2022). *Análises Estatística e Probabilística de Parâmetros de Resistência e de Estabilidade de um Aterro de Resíduos Sólidos Urbanos*. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 99 p.

## CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: João Henrique Toniolo Teche

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: Análises Estatística e Probabilística de Parâmetros de Resistência e de Estabilidade de um Aterro de Resíduos Sólidos Urbanos

GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Ambiental / 2022

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

---

João Henrique Toniolo Teche

[jhenrique1671@gmail.com](mailto:jhenrique1671@gmail.com)

Brasília/DF - Brasil

## AGRADECIMENTOS

Ao Pai maior das alturas que cobre com seu manto azul seus filhos, Patrão Velho, muito obrigado! Agradeço aos meus pais, Sílvia e Henrique, pelo exemplo de amor e dedicação, pelas aulas de matemática, história e biologia, por sempre me fazerem crescer em estatura, graça e sabedoria e me ensinarem que as pessoas são mais importantes que as coisas.

Ao meu irmão Matheus, por ser sempre meu primeiro amigo em todas as nossas mudanças, aos meus irmãos mais novos, Lucas e Maria Luiza, por me permitirem cuidar, ensinar e aprender com eles.

Às minhas avós, Benê e Nair, por me mostrarem o valor da educação e do trabalho duro. Por rezarem comigo que com Deus me deito, com Deus me levanto, com a Virgem Maria e o Espírito Santo! e por lembrar sempre a importância da união de nossa família. À toda minha família, que mesmo longe sempre se fez presente, em especial meus padrinhos, Ângela e Edimilson, por todo amor e carinho.

Aos meus amigos-irmãos, Lucas, André e Thiago, que estiveram comigo nos melhores e piores momentos, prezando sempre pela amizade e lembrando sempre como a vida é maravilhosa.

À minha namorada, Gabriela, por todo o amor, apoio, incentivo, compreensão e paciência, por sempre buscar extrair o melhor que há em mim, por sempre acreditar nos meus sonhos e buscá-los comigo (JLA).

À banca desse projeto final, em especial aos meus orientadores, Rafael e Sabrina, por todo o conhecimento compartilhado durante esse projeto e outros projetos, pelo compromisso comigo e com a educação, e pela paciência e dedicação em todas as explicações e conversas para o desenvolvimento desse trabalho.

Aos meus professores, de todas as etapas de minha educação, pelos conhecimentos e ensinamentos, por minha construção intelectual e social.

Aos amigos de curso, que tornaram a graduação um momento memorável e de muita alegria.

Ao projeto de extensão do curso de Engenharia Ambiental da UnB, pelas amizades e pelo entendimento da importância de se fazer pesquisa e extensão.

À Flua, pelos conhecimentos na área de projetos de Engenharia Ambiental e de comercial, e principalmente pelos laços de amizade formados, em especial com os amigos de Vendas e Comercial.

Aos meus amigos da Adasa/SRS, onde pude realizar meu estágio e aprender muito sobre a área de resíduos sólidos e aterros sanitários.

À família Bassetto Okamura, por terem me permitido continuar meus estudos na UnB, pelo acolhimento em sua casa, e mais do que isso, por ter me feito parte da família.

Por fim, agradecer à Universidade de Brasília, e todas as oportunidades que a educação pública de qualidade me ofereceu ao longo dos anos em que tive o prazer de estudar aqui.

## RESUMO

Os aterros sanitários são a única maneira de disposição final ambientalmente adequada de resíduos sólidos urbanos (RSU) em solo. São obras bastante complexas, que exigem projeto, implantação e operação com técnicas de engenharia, garantindo proteção ambiental e de segurança e saúde do trabalho. O fato das camadas inferiores de RSU dispostos servirem de base para a continuação da operação do aterro evidencia a necessidade de se conhecer o comportamento geomecânico dos resíduos sólidos. A monitoração geotécnica é fundamental para acompanhar o comportamento e as condições de estabilidade do maciço de RSU. As análises de condição de estabilidade fazem parte das monitorações, e tão importante quanto conhecer os parâmetros geomecânicos e os dados que têm influência na estabilidade do maciço, é necessário adotar métodos eficientes para a realização dessas análises. No presente trabalho discutiu-se a comparação entre métodos determinísticos e probabilísticos para a realização de análises de estabilidade de taludes de aterros sanitários, aplicando-se o Método de Estimativas Pontuais para uma seção específica do Aterro Sanitário de Brasília. Considerando a grande variação das características dos RSU, o presente trabalho realizou o tratamento estatístico de dados referentes aos parâmetros de resistência desses resíduos, obtidos na literatura. Os valores médios de ângulo de atrito ( $\phi$ ) e intercepto coesivo ( $c$ ) obtidos através de regressão linear realizada com os pares de tensão normal e tensão cisalhantes foram razoáveis, comparados com os dados da literatura para RSU. O método probabilístico, ao incorporar as incertezas dos parâmetros em suas análises, permitiu observar fatores de segurança (FS) com valores menores do que os FS observados na análise determinística, além de retornar um índice de confiabilidade ( $\beta$ ) associado a uma probabilidade de ruptura (PR) e a um nível de performance esperado para o aterro sanitário.

Palavras-chave: Aterro Sanitário de Brasília, Método Probabilístico, Análise de Estabilidade, Probabilidade de Ruptura e Fator de Segurança

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>4</b>
<b>2.1. OBJETIVO GERAL .....</b>	<b>4</b>
<b>2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....</b>	<b>4</b>
<b>3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	
<b>5</b>	
<b>3.1. DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS – ATERRO</b>	
<b>SANITÁRIO .....</b>	<b>5</b>
<b>3.2. CARACTERÍSTICAS DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS .....</b>	<b>6</b>
<b>3.2.1. Composição Gravimétrica .....</b>	<b>7</b>
<b>3.2.2. Peso Específico .....</b>	<b>8</b>
<b>3.2.3. Teor de Umidade .....</b>	<b>9</b>
<b>3.2.4. Permeabilidade .....</b>	<b>9</b>
<b>3.2.5. Biodegradação .....</b>	<b>11</b>
<b>3.2.6. Compressibilidade .....</b>	<b>11</b>
<b>3.3. RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS</b>	
<b>URBANOS.....</b>	<b>12</b>
<b>3.3.1. Envoltória de Resistência de Mohr-Coulomb.....</b>	<b>17</b>
<b>3.3.2. Ensaios .....</b>	<b>18</b>
<b>3.3.2.1. Ensaio de Cisalhamento Direto .....</b>	<b>19</b>
<b>3.3.2.2. Ensaio de Compressão Triaxial .....</b>	<b>20</b>
<b>3.3.2.3. Ensaio de Cisalhamento Direto <i>in-situ</i> .....</b>	<b>21</b>
<b>3.4. ESTABILIDADE DE TALUDES .....</b>	<b>22</b>
<b>3.4.1. Estabilidade de Taludes de Resíduos Sólidos Urbanos.....</b>	<b>22</b>
<b>3.4.2. Mecanismos de ruptura em aterros sanitários .....</b>	<b>23</b>
<b>3.4.3. Impacto da Poropressão e Importância da Drenagem na Estabilidade..</b>	<b>26</b>
<b>3.5. CASOS DE RUPTURAS DE TALUDES EM ATERROS SANITÁRIOS .....</b>	<b>26</b>
<b>3.6. ANÁLISE DE ESTABILIDADE.....</b>	<b>31</b>
<b>3.6.1. Análise Determinística .....</b>	<b>32</b>
<b>3.6.1.1. Método do Equilíbrio-Limite .....</b>	<b>32</b>
<b>3.6.2. Análise Probabilística .....</b>	<b>34</b>
<b>3.6.2.1. Probabilidade de Ruptura .....</b>	<b>37</b>
<b>3.6.2.2. Método das Estimativas Pontuais .....</b>	<b>40</b>

<b>4. METODOLOGIA.....</b>	<b>43</b>
<b>4.1. ÁREA DE ESTUDO.....</b>	<b>43</b>
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>54</b>
<b>5.1 PARES DE TENSÕES NORMAL E CISALHANTE.....</b>	<b>54</b>
<b>5.2 TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA</b>	
<b>64</b>	
<b>5.3 ANÁLISE DETERMINÍSTICA.....</b>	<b>65</b>
<b>5.4 ANÁLISE PROBABILÍSTICA.....</b>	<b>66</b>
<b>5.5 POROPRESSÃO.....</b>	<b>73</b>
<b>5.6 VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA.....</b>	<b>74</b>
<b>6. CONCLUSÃO.....</b>	<b>76</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>78</b>
<b>APÊNDICE A – TRATAMENTO ESTATÍSTICO.....</b>	<b>1</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Disposição final de RSU no Brasil, por tipo de destinação (t/ano) (SNIS, 2019).....	2
Figura 3.1 - Diagrama esquemático de um aterro sanitário (Fonte: IPT/CEMPRE, 2000)...	6
Figura 3.2 - Gráfico da composição gravimétrica dos resíduos sólidos domiciliares produzidos no Distrito Federal – resultados médios da coleta convencional no DF (modificado de PDGIRS, 2018) .....	7
Figura 3.3 - Perfil de peso específico para RSU (modificado de Kavazanjian <i>et al.</i> , 1995). 9	
Figura 3.4 - Variação do teor de umidade dos RSU com a profundidade no aterro sanitário dos Bandeirantes, SP (Carvalho, 1999). .....	9
Figura 3.5 - Influência da deformação na resistência ao cisalhamento (Kockel <i>et al.</i> 1997) .....	13
Figura 3.6 - Resultados tensão cisalhante x tensão normal (Strauss 1998 modificado de Kavazanjian <i>et al.</i> , 1995). .....	15
Figura 3.7 - Círculo de Mohr (Ortigão, 2007).....	17
Figura 3.8 - Envoltória de resistência Mohr-Coulomb (Ortigão, 2007).....	18
Figura 3.9 - Esquema do equipamento de cisalhamento direto (Del Greco & Oggeri, 1994, <i>apud</i> Strauss, 1998). .....	20
Figura 3.10 - Máquina para ensaio de cisalhamento direto de 0.3m de diâmetro (Edinçliler <i>et al.</i> 1996).....	20
Figura 3.11 - Amostra de RSU antes e depois do ensaio de compressão triaxial (Machado <i>et al.</i> 2002).....	21
Figura 3.12 - Cisalhamento direto em RSU <i>in-situ</i> (Withiam <i>et al.</i> 1995, <i>apud</i> Edinçliler <i>et al.</i> 1996).....	21
Figura 3.13 - Modelo de interação entre as forças de atrito e de tração das fibras (Strauss, 1998 modificado de Kölsch, 1995).....	23
Figura 3.14 - Configuração de aterros sanitários modernos (Mitchell e Filz, 1997 <i>apud</i> Strauss, 1998). .....	25
Figura 3.15 - Formas potenciais de ruptura em aterros sanitários (Mitchell & Filz, 1997 <i>apud</i> Strauss, 1998). .....	25
Figura 3.16 – Lixiviado extravasando pelo sistema de drenagem de gás (Jucá <i>et al.</i> 2021)26	
Figura 3.17 – Lixiviado extravasando pelo talude (Jucá <i>et al.</i> 2021).....	26
Figura 3.18 - Escorregamento do aterro de Bandeirantes em 1991, (IPT, 1991).....	27



Figura 3.19 – Aterro Sanitário Pajoan após ruptura (Juliana Cardilli/G1, 2011).....	28
Figura 3.20 - Superfícies de ruptura no aterro Rumpke (Jahanfar <i>et al.</i> 2017).....	28
Figura 3.21 - Vista aérea da ruptura do aterro Rumpke, em 1996 (Eid <i>et al.</i> 2000). ....	29
Figura 3.22 – Vista aérea do aterro de Durban antes e depois da ruptura (modificado de Blight, 2008).....	29
Figura 3.23 - Representação do deslizamento no lixão de Sarajevo, em 1977 (Blight, 2008) .....	30
Figura 3.24 - Esquema da geometria e disposição do lixão de Istambul (Jahanfar <i>et al.</i> 2017).....	30
Figura 3.25 - Ruptura do lixão de Istambul, 1977 (Blight, 2008).....	31
Figura 3.26 - Probabilidade de ruptura de estacas (modificado de Lacasse e Nadim, 1998 <i>apud</i> Flores, 2008).....	34
Figura 3.27 – Conceito de análise probabilística de estabilidade de taludes (Flores, 2008). .....	35
Figura 3.28 – Aterro sanitário Sítio São João antes e depois da ruptura (Daciolo, 2020 modificado de Benvenuto <i>et al.</i> 2016).....	36
Figura 3.29 – Avaliação da estabilidade da seção crítica de ruptura do aterro Sítio São João: (a) análise determinística; (b) análise probabilística (Daciolo, 2020).....	36
Figura 3.30 – Índice de confiabilidade obtido: (a) modelo Normal; (b) modelo LogNormal (Daciolo, 2020).....	37
Figura 3.31 - Probabilidade de Ruptura versus Índice de Confiabilidade Sandroni e Sayão (1992 <i>apud</i> Flores 2008).....	39
Figura 3.32 - Estimativas pontuais da função $f(x)$ (Flores, 2008).....	41
Figura 4.1 – Aterro Sanitário de Brasília (SLU, 2021) .....	43
Figura 4.2 - Fluxograma da metodologia aplicada.....	43
Figura 4.3 – Levantamento Planialtimétrico do Aterro Sanitário de Brasília (SLU, 2022) 47	
Figura 4.5 – Localização dos piezômetros, PZS12, PZS11 e PZD15-A em destaque (modificado de Geotech, 2022) .....	49
Figura 4.6 – Variação do parâmetro de poropressão ( $ru$ ) ao longo do tempo .....	50
Figura 4.7 – Locação das seções de estabilidade do ASB (Geotech, 2022).....	51
Figura 4.8 – Relação entre índice de confiabilidade e probabilidade de ruptura (US Army Corps of Engineers, 1995 <i>apud</i> FLORES, 2008) .....	53
Figura 5.1- Nuvem de pontos de pares de tensão normal e tensão cisalhante.....	63
Figura 5.2 - Regressão Linear representativa da Envoltória Média de Resistência .....	64

Figura 5.3 - Análise de estabilidade da seção C-C' com parâmetros de resistência médios para $ru=0,5$ .....	65
Figura 5.4 - Análise de estabilidade da seção C-C' com parâmetros de resistência médios para $ru=0,8$ .....	66
Figura 5.5 - Análise FS (--) para $ru=0,5$ .....	67
Figura 5.6 - Análise FS (+-) para $ru=0,5$ .....	68
Figura 5.7 - Análise FS(-+) para $ru=0,5$ .....	68
Figura 5.8 - Análise FS(++) para $ru=0,5$ .....	69
Figura 5.9 - Análise FS(--) para $ru=0,8$ .....	69
Figura 5.10 - Análise FS(+-) para $ru=0,8$ .....	70
Figura 5.11 - Análise FS(-+) para $ru=0,8$ .....	70
Figura 5.12 - Análise FS(++) para $ru=0,8$ .....	71
Figura 5.13 - Diagrama para obtenção de parâmetros de resistência para projetos de aterros sanitários de RSU (Sanchez-Alciturri <i>et al.</i> 1993).....	73
Figura 5.14 – Carta de risco para a seção C-C' (Carmo, 2021). .....	74
Figura 5.15 – Relação entre a variação dos parâmetros de resistência e o fator de segurança (Carmo, 2021).....	75

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Composição gravimétrica de RSU (modificado de Strauss, 1998).....	8
Tabela 3.2 - Valores de coeficientes de permeabilidade de aterros de RSU – (Modificado de Borgatto, 2010 e De Lamare Neto, 2004).....	10
Tabela 3.3 - Relação $kh: kv$ obtidos por ensaios de RSU em laboratórios (Beaven <i>et al.</i> , 2008).....	11
Tabela 3.4 – Dados utilizados na reavaliação da resistência ao cisalhamento dos RSU (modificado de Kavazanjian <i>et al.</i> 1995).....	14
Tabela 3.5 – Retro análises de taludes de aterros sanitários reais (Kavazanjian <i>et al.</i> 1995).....	15
Tabela 3.6 – Parâmetros de Resistência do Aterro Sanitário Bandeiras obtido através de retro análise em ruptura de 1991. Modificado de Kaimoto e Cepollina (1996, <i>apud</i> Campi e Boscov, 2011).....	16
Tabela 3.7 – Parâmetros de Resistência do Aterro de Sítio São João obtido através de retro análise em ruptura de 2007. Modificado de Ecurbis Ambiental S/A (2007, <i>apud</i> Campi e Boscov, 2011).....	16
Tabela 3.8 – Exemplos de propostas de envoltórias de resistência ao cisalhamento para os RSU (Daciolo, 2020 modificado de Ramaiah <i>et al.</i> 2017).....	18
Tabela 3.9 – Formulações baseadas no método das fatias (GeoRio, 2014 <i>apud</i> Penasso, 2019).....	33
Tabela 3.10 - Importância da análise probabilística de estabilidade de taludes, Duncan (2001 <i>apud</i> Silva, 2015). ....	35
Tabela 3.11 – Níveis de performance em termos de probabilidade de falha (Pf) e correspondentes índices de confiabilidade ( $\beta$ ) US Army Corps of Engineers (1995 <i>apud</i> Daciolo, 2020).....	39
Tabela 3.12 – Coeficiente de correlação de Pearson Bisquerra <i>et al.</i> (2004 <i>apud</i> Tomasetti, 2014).....	40
Tabela 4.1 – Coeficiente de correlação de Pearson Bisquerra <i>et al.</i> (2004 <i>apud</i> Tomasetti, 2014).....	46
Tabela 4.2- Representação esquemática do método das estimativas pontuais (modificado de Penasso, 2019) .....	52

Tabela 5.1 – Resultados de ensaios de cisalhamento direto com RSU obtidos da literatura .....	54
Tabela 5.2 – Tratamento Estatístico dos dados obtidos na literatura .....	64
Tabela 5.3 – Variação dos parâmetros de resistência para $ru=0,5$ .....	67
Tabela 5.4 – Variação dos parâmetros de resistência para $ru=0,8$ .....	67
Tabela 5.5 – Valores dos fatores de segurança (FS) obtidos nas análises realizadas.....	71
Tabela 5.6 – Cálculo do índice de confiabilidade ( $\beta$ ) e da probabilidade de ruptura (PR) .	72
Tabela 5.7 – Níveis de performance em termos de probabilidade de falha (Pf) e correspondentes índices de confiabilidade ( $\beta$ ) US Army Corps of Engineers (1995 <i>apud</i> Daciolo, 2020).....	72
Tabela 0.1 – Parâmetros de Entrada para o Tratamento Estatístico .....	1
Tabela 0.2 – Dados de entrada para o levantamento estatístico .....	1
Tabela 0.3 – Cálculo do MSE e Variância. ....	8
Tabela 0.4 - Desvio padrão e coeficiente de variação para o intercepto coesivo e ângulo de atrito.....	8

## LISTA DE EQUAÇÕES

3.1 – Resistência ao cisalhamento .....	12
3.2 – Critério de ruptura Mohr-Coulomb .....	17
3.3 - Probabilidade de ruptura (PR) por meio do índice de confiabilidade ( $\beta$ ) .....	37
3.4 - Margem de segurança (M) .....	38
3.5 - Probabilidade de ruptura (PR).....	38
3.6 - Função que representa a probabilidade de ruptura.....	38
3.7 - Função que representa a probabilidade de ruptura.....	38
3.8 - Função que representa a probabilidade de ruptura.....	38
3.9 - Função que representa a probabilidade de ruptura.....	38
3.10 - Escore – Z ou escore padronizado.....	38
3.11 - Combinação dos pontos $x_+$ e $x_-$ .....	41
3.12 - Combinação dos pontos $x_+$ e $x_-$ .....	41
3.13 - Função geradora de momentos.....	41
3.14 - Variância do Fator de Segurança .....	42
3.15 - Variância do Fator de Segurança .....	42
3.16 - Desvio padrão do Fator de Segurança.....	42
3.17 - Desvio padrão do Fator de Segurança.....	42
4.1 - Coeficiente de Variação .....	44
4.2 - Erro Médio Quadrado.....	44
4.3 - Média das Tensões Normais .....	45
4.4 - Variância da tangente do ângulo de atrito.....	45
4.5 - Variância do intercepto coesivo .....	45
4.6 - Desvio Padrão do intercepto coesivo .....	45
4.7 - Desvio Padrão do ângulo de atrito .....	45
4.8 - Coeficiente de Correlação de Pearson.....	46
4.9 - Índice de Confiabilidade .....	53

## LISTA DE ABREVIACÕES, SIGLAS E SÍMBOLOS

ABLP	Associação Brasileira de Resíduos Sólidos e Limpeza Pública
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ADASA	Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento do Distrito Federal
ASB	Aterro Sanitário de Brasília
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPT	Instituto de Pesquisa Tecnológica
MAL	Método da Análise Limite
MEF	Método dos Elementos Finitos
MEL	Método dos Equilíbrio Limite
PDGIRS	Plano Distrital de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos do Distrito Federal
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SLU	Serviço de Limpeza Urbana do Distrito Federal
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
$\varphi$	– Ângulo de Atrito
$c$	– Coesão
FS	– Fator de Segurança
$k$	– Permeabilidade
$ru$	- Parâmetro de Poropressão
MSE	- Erro Médio Quadrado
R	– Coeficiente de Correlação de Pearson
kPa	– kilo Pascal
$\varepsilon$	– Deformação
$\tau'$	- Resistência ao Cisalhamento
$\beta$	– Índice de Confiabilidade
PR	– Probabilidade de Ruptura
$\sigma[x]$	– Desvio Padrão de $x$
$V[x]$	– Variância de $x$
$E[x]$	– Valor Médio de $x$
CV	– Coeficiente de Variação

# 1. INTRODUÇÃO

Os Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) são os resíduos resultantes das atividades cotidianas da população urbana, principalmente a atividade doméstica e comercial. Podem ser classificados de maneira simplificada como matéria orgânica, papel e papelão, plásticos, vidro, metais, e outros como tecidos e eletrônicos. Os modelos de consumo e produção atuais são responsáveis por um aumento cada vez maior na geração de RSU (Godecke *et al.* 2012). A gestão dos resíduos sólidos é uma das ações de relevância na busca do desenvolvimento sustentável. No Brasil, estima-se que aproximadamente 80 milhões de toneladas de RSU são descartadas inadequadamente, por ano, correspondendo a mais de 40% do total dos resíduos coletados. Historicamente, a problemática relacionada à gestão dos resíduos sólidos tem resultado em expressivos prejuízos à saúde pública e ao meio ambiente (PDGIRS, 2018).

De acordo com os dados divulgados na Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios – PNAD (IBGE, 2015), cerca de 85% da população do Brasil é urbana. A grande concentração da população brasileira nos centros urbanos, e o aumento significativo da geração de RSU pela população nos últimos anos (Nascimento *et al.* 2015), tornou a destinação final desses resíduos um grande desafio para as municipalidades que, no Brasil, são responsáveis pelo manejo e gestão dos resíduos sólidos urbanos.

No dia 02 de agosto de 2010 passou a vigorar no Brasil a Lei 12.305 que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). De acordo com o art. 3º, VIII da Lei 12.305 (2010):

Disposição final ambientalmente adequada: distribuição ordenada de rejeitos em aterros, observando normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos.

No Brasil, os aterros sanitários de resíduos representam a solução mais comum para a disposição final dos RSU, como apresenta a Figura 1.1.

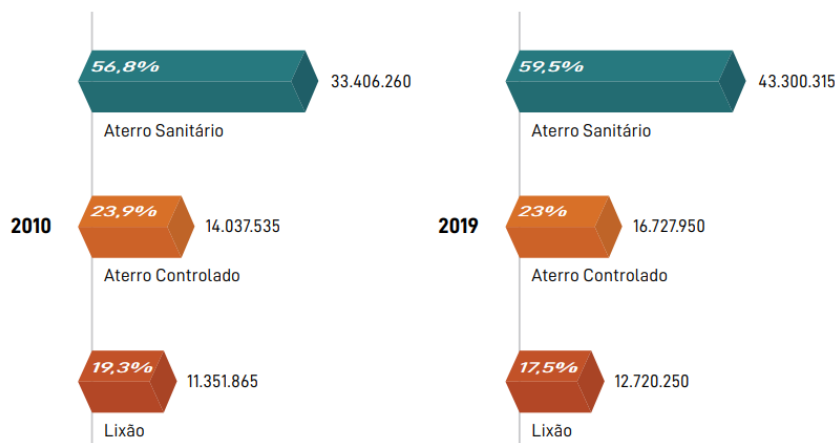


Figura 1.1 - Disposição final de RSU no Brasil, por tipo de destinação (t/ano) (SNIS, 2019).

De acordo com o Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos (SNIS, 2019) as unidades de disposição final de resíduos em solo são: lixão, aterro controlado e aterro sanitário. Entre esses apenas aterros sanitários são unidades de disposição final adequadas, por possuírem sistemas de proteção ambiental e de segurança do trabalho, tanto em sua operação quanto em seu monitoramento, como a impermeabilização de base, drenagem e tratamento de lixiviados e gases, camada de cobertura com solo, monitoramento geotécnico e ambiental.

Como o aterro sanitário é uma obra de engenharia, torna-se imprescindível conhecer as características e propriedades do material utilizado. Porém, poucos trabalhos experimentais têm sido desenvolvidos na área, principalmente no Brasil. Em geral, devido às dificuldades na obtenção dos parâmetros de resistência, os projetos de novos aterros sanitários, ou mesmo a avaliação da segurança de aterros antigos, utilizam parâmetros oriundos da literatura internacional que, na maioria dos casos, refere-se ao lixo de composição completamente diferente dos nossos, além de condições climáticas bastante diversas (Jucá, 2003).

Além dos ensaios experimentais, de laboratório e/ou de campo, para determinar os parâmetros de resistência ainda não serem normatizados para RSU (Daciolo, 2020), as principais propriedades geomecânicas dos RSU, como a resistência ao cisalhamento e a compressibilidade, sofrem grande influência da composição dos resíduos. Desse modo, os parâmetros geotécnicos obtidos de uma dada amostra de RSU serão representativos, apenas, daqueles resíduos com composição inicial e tempo de decomposição semelhantes ao da amostra utilizada (Strauss, 1998).



Um dos principais desafios geotécnicos enfrentados na gestão e operação de aterros é a estabilidade de taludes do maciço de RSU. Foram registrados vários casos de escorregamento e rupturas de aterros ao redor do mundo, ocorrendo em alguns deles, além do dano material e ambiental, a perda de vidas. A complexidade e importância do assunto tornou a estabilidade de taludes de aterros sanitários de RSU um dos tópicos de estudo mais importantes da área de geotecnia ambiental (Borgatto, 2010).

Além da dificuldade na obtenção dos parâmetros de resistência para as análises, Kölsch (1993 *apud* Borgatto 2010), atenta para o fato de que os resultados obtidos pelas análises de estabilidade de taludes de aterros sanitários de RSU, usando métodos da mecânica dos solos, podem ser equivocados, devido à diferença entre as propriedades geomecânicas dos solos e dos RSU, apesar de serem os métodos utilizados amplamente para essas análises.

Nos últimos anos os modelos mais difundidos para análise de estabilidade de taludes foram os modelos determinísticos, como de Bishop, Spencer, Morgenstern Price e Janbu, tendo ampla aceitação no meio técnico-científico. Porém, a abordagem determinística desconsidera uma série de incertezas importantes, referentes as propriedades dos materiais envolvidos nas análises, bem como as incertezas envolvidas nos ensaios para obtenção dos parâmetros desses materiais. Além disso, os métodos determinísticos exigem suposições por partes dos engenheiros responsáveis pelas análises, e fornecem um único resultado para análise da estabilidade do talude, o fator de segurança (FS).

Por outro lado, a abordagem probabilística considera e incorpora as incertezas em suas análises. Os parâmetros utilizados para as análises, geralmente obtidos da literatura disponível, são tratados estatisticamente, e avaliados quanto a sua representatividade e dispersão da realidade. Com a variação dos parâmetros durante a análise são obtidos intervalos de resultados, cada um com sua probabilidade de ocorrer. Sendo assim, essas técnicas probabilísticas auxiliam no entendimento das principais origens de risco, melhoram o julgamento de engenharia e permitem uma comparação racional entre a confiabilidade de projetos alternativos, melhorando o processo de tomada de decisão (Sandoval, 2012).

Desse modo, o presente trabalho propõe analisar um aterro sanitário pelo método probabilístico, com a finalidade de avaliar e discutir o método e sua aplicação para um caso real. A partir da obtenção da probabilidade de ruptura, por meio de análise de dados da literatura, foi possível discutir os principais pontos de divergência e convergência entre as análises determinísticas e probabilísticas. Como referência foram utilizadas a geometria e informações de monitoração geotécnica do Aterro Sanitário de Brasília (ASB).

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. OBJETIVO GERAL**

O presente trabalho tem por objetivo a realização de análises estatísticas dos parâmetros de resistência de RSU e probabilísticas da condição de estabilidade de uma seção de aterro sanitário, sendo utilizadas a geometria e informações de monitoração do Aterro Sanitário de Brasília (ASB).

### **2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Coletânea de valores de tensões normais e cisalhantes de ensaios de cisalhamento direto realizados em amostras de RSU;
- Obtenção de parâmetros de resistência de RSU considerando diferentes pares de tensão normal e cisalhante, por meio de análises estatísticas;
- Análise probabilística de uma seção de talude do ASB, considerando o tratamento dos parâmetros de resistência obtidos na literatura;
- Avaliação comparativa entre as análises determinísticas e probabilísticas de estabilidade de uma seção de talude do ASB.

### **3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **3.1. DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS – ATERRO SANITÁRIO**

O aterro sanitário de resíduos sólidos urbanos é definido pela norma ABNT:NBR 8419 (1992, p.01) como:

Técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar danos à saúde pública e à sua segurança, minimizando os impactos ambientais, método este que utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos à menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho, ou a intervalos menores, se necessário.

De acordo com Colomer-Mendoza (2013), os aterros são o método de disposição adequada mais simples, barato e de melhor custo-benefício de disposição final de resíduos, em comparação a métodos mais complexos como a incineração, por exemplo. Mesmo que, no futuro, grande parte dos resíduos seja desviada dos aterros por meio de programas de redução da geração de resíduos e reciclagem, os aterros ainda serão necessários para acomodar os rejeitos.

Segundo dados divulgados no Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil (Abrelpe, 2020), a maior parte dos RSU coletados segue para disposição em aterros sanitários, tendo registrado um aumento de 10 milhões de toneladas em uma década, passando de 33 milhões de toneladas por ano para 43 milhões de toneladas.

Os resíduos sólidos urbanos depositados num aterro sanitário caracterizam-se por formar um maciço heterogêneo e poroso com comportamento particular (Tapahuasco, 2009). Os processos de degradação química, física e biológica dos RSU dispostos nos aterros sanitários resultam na produção de chorume e gases. O líquido percolado do aterro sanitário, conhecido por lixiviado, é composto por substâncias com alta demanda biológica de oxigênio (DBO) que podem infiltrar no solo e contaminar as águas subterrâneas (Borgatto, 2010). Os aterros sanitários representam grande risco ambiental e à saúde humana se não forem projetados, implantados e operados da maneira adequada. No Brasil, as normas ABNT NBR 8419 (1992) e NBR 13896 (1997) definem as exigências mínimas para apresentação de projetos de aterros de RSU e os critérios para projeto, implantação e operação de aterros de RSU,

respectivamente. A Figura 3.1 a seguir apresenta um esquema básico de como deve ser projetado um aterro sanitário.



Figura 3.1 - Diagrama esquemático de um aterro sanitário (Fonte: IPT/CEMPRE, 2000)

Apesar dos aterros sanitários serem uma alternativa ambientalmente adequada para a disposição final de RSU, são estruturas complexas do ponto de vista geotécnico, principalmente pelo fato de os RSU comporem parte da estrutura da obra, devendo resistir às solicitações durante a construção, operação e pós-fechamento dos aterros (Daciolo, 2020).

### 3.2. CARACTERÍSTICAS DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Segundo definição encontrada na norma ABNT:NBR 10004 (2004, p.01), resíduos sólidos são:

Resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível.

Sendo os Resíduos Sólidos Urbanos definidos na norma ABNT:NBR 8419 (1992, p.02) como “resíduos sólidos gerados num aglomerado urbano, excetuados os resíduos industriais perigosos, hospitalares sépticos e de aeroportos e portos, já definidos anteriormente.”

A avaliação e conhecimento das principais características dos resíduos sólidos urbanos é fundamental para o entendimento do comportamento geotécnico de um maciço formado por

esse material. Propriedades mecânicas e hidráulicas dos RSU, que constituem parâmetros fundamentais para o dimensionamento e operação de aterros sanitários, dependem dessas características e da alteração delas, como a diminuição da compressibilidade e da permeabilidade do RSU com o tempo, o aumento do peso específico e a geração de gases (Borgatto, 2010).

A seguir são apresentadas algumas características fundamentais dos RSU para o trabalho em questão.

### 3.2.1. Composição Gravimétrica

Os resíduos sólidos urbanos podem ser classificados de maneira simplificada como matéria orgânica, papel, plásticos, vidro, metais, e outros como tecidos e isopor. A composição gravimétrica indica a porcentagem, em peso, de cada uma dessas categorias presentes no resíduo, em relação ao peso total de uma determinada amostra (SLU, 2015).

Muitos fatores são responsáveis pela composição dos resíduos gerados por determinada população, o que torna a composição dos RSU bastante variável. A composição desses pode variar baseada nas principais atividades comerciais desenvolvidas na região, na condição socioeconômica da população local, nas tecnologias de gestão e manejo de resíduos da região, na participação ou não da população em campanhas de coleta seletiva, compostagem, entre outras (De Lamare Neto, 2004).

Para o Distrito Federal, de acordo com o Plano Distrital de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos - PDGIRS (2018), a composição gravimétrica dos resíduos pode ser representada segundo a Figura 3.2.

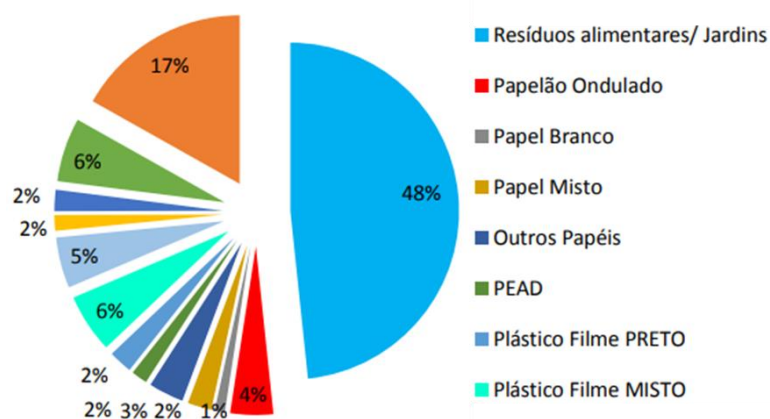


Figura 3.2 - Gráfico da composição gravimétrica dos resíduos sólidos domiciliares produzidos no Distrito Federal – resultados médios da coleta convencional no DF (modificado de PDGIRS, 2018)

Para representar a variação na composição gravimétrica dos resíduos urbanos a Tabela 3.1 apresenta dados reunidos por Strauss (1998) com relação a composição típica de resíduos sólidos urbanos do Canadá e dos Estados Unidos da América, e de Porto Alegre em duas épocas diferentes (Mitchell *et al.*, 1995; DMLU/Porto Alegre, 1980/1994).

Tabela 3.1 - Composição gravimétrica de RSU (modificado de Strauss, 1998)

Componentes	EUA e Canadá	Porto Alegre	Porto Alegre
	1989	1980	1994
	(% do peso seco)	(% do peso seco)	(% do peso seco)
Mat. Orgânica	25 – 40	72,4	58,6
Papel e papelão	40 – 60	14,0	21,3
Plástico	5 – 15	0,8	8,4
Metal	5 – 15	5,1	4,4
Vidro e Cerâmica	5 – 15	2,3	1,3
Outros	5 – 15	5,4	6,0

### 3.2.2. Peso Específico

O peso específico dos resíduos sólidos urbanos tem relação direta com a composição gravimétrica desse resíduo e o nível de compactação ao qual o resíduo foi submetido. Para o trabalho em questão considerou-se o peso específico do RSU no interior de um aterro.

De acordo com Kavazanjian *et al.* (1995), o peso específico dos RSU no interior do aterro sanitário varia dependendo das suas operações, do tipo de camada de cobertura adotada, da compactação dos resíduos na disposição e da sobrecarga aplicada pelo próprio resíduo ao longo do tempo. No estudo, os autores apresentam resultados de um estudo realizado no aterro de Puente Hills, próximo a Los Angeles, por meio de ensaios em laboratório e utilização de métodos geofísicos *in-situ*. O perfil de variação do peso específico obtido em relação à profundidade do aterro, juntamente com resultados de outros estudos compilados pelos autores, é apresentado na Figura 3.3.

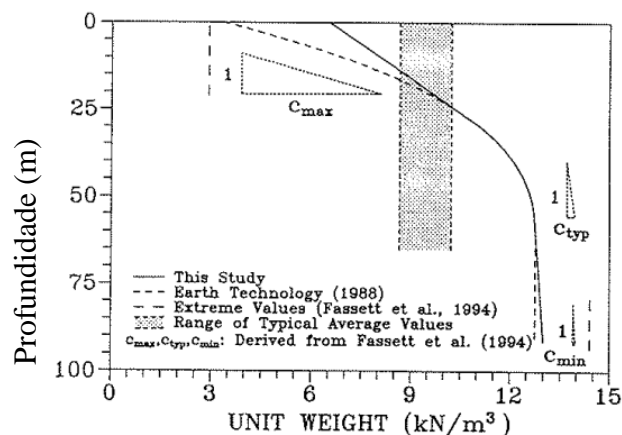


Figura 3.3 - Perfil de peso específico (Peso Específico (kN/m<sup>3</sup>) de Kavazanjian *et al.*, 1995)

### 3.2.3. Teor de Umidade

O teor de umidade dos RSU depende de vários fatores, como composição gravimétrica, distribuição granulométrica, biodegradabilidade, condições climáticas do local de geração e disposição, operações no aterro e a eficiência do sistema de drenagem de lixiviado e gases no aterro (Borgatto, 2010). Para determinar o teor de umidade dos RSU utiliza-se o método usual da geotecnia, apresentando uma relação entre massa de água e massa seca da amostra. Devido à grande heterogeneidade dos RSU, o teor de umidade em um aterro pode variar de uma zona para outra dentro do corpo do aterro (Borgatto, 2010).

A Figura 3.4 apresenta os resultados de ensaios realizados no aterro sanitário Bandeirantes, em São Paulo, por Carvalho (1999), demonstrando uma tendência de aumento do teor de umidade com a profundidade.

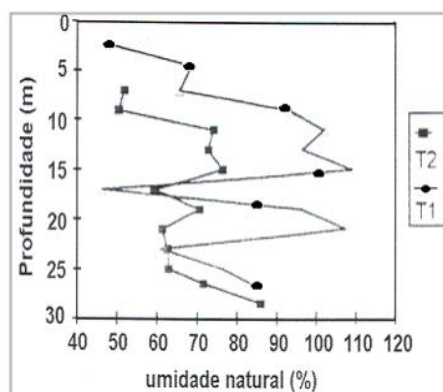


Figura 3.4 - Variação do teor de umidade dos RSU com a profundidade no aterro sanitário dos Bandeirantes, SP (Carvalho, 1999).

### 3.2.4. Permeabilidade

A permeabilidade (k) do RSU depende, principalmente, da composição gravimétrica e do grau de compactação da massa de resíduo. O coeficiente de permeabilidade do resíduo é um

importante parâmetro de projeto e operação de aterros de resíduos, tendo grande influência no dimensionamento do sistema de drenagem dos percolados e da estabilidade do maciço de resíduo (De Lamare Neto, 2004).

De acordo com De Lamare Neto (2004), para aterros no Brasil, são esperados valores de permeabilidade inferiores aos encontrados na literatura internacional, pelo fato da composição do RSU brasileiro, em geral, apresentar maior quantidade de resíduos orgânicos. A Tabela 3.2 apresenta resultados de ensaios *in-situ* realizados em furos de sondagem por Mariano e Jucá (1998), Santos *et al.* (1998) e Carvalho (1999), em aterros no Brasil, sendo possível observar os valores inferiores em relação aos valores de aterros internacionais.

Tabela 3.2 - Valores de coeficientes de permeabilidade de aterros de RSU – (Modificado de Borgatto, 2010 e De Lamare Neto, 2004).

Referência	Peso Específico (kN/m <sup>3</sup> )	Coeficiente de Permeabilidade k (m/s)	Método de Ensaio
Brandt, 1990	11 – 14	7x10 <sup>-6</sup> - 2x10 <sup>-5</sup>	Carga Variável
	13 - 16	5x10 <sup>-6</sup> - 3x10 <sup>-7</sup>	Ensaio de Poço
Ehrlich <i>et al.</i> 1994	8,0	1,0x10 <sup>-5</sup>	Ensaio <i>in-situ</i> em furo de sondagem
Beaven e Powier, 1995	5 - 13	1x10 <sup>-7</sup> - 1x10 <sup>-4</sup>	Laboratório
Mariano e Jucá, 1998	-	1,89x10 <sup>-8</sup> - 4,15x10 <sup>-6</sup>	Ensaio <i>in-situ</i> em furo de sondagem
Santos <i>et al.</i> 1998	14,0 – 19,0	1x10 <sup>-7</sup>	Ensaio <i>in-situ</i> em furo de sondagem
Carvalho, 1999	8,0 – 15,0	5,0x10 <sup>-8</sup> - 8,0x10 <sup>-6</sup>	-
Aguiar, 2001	-	9,39x10 <sup>-7</sup> - 1,09x10 <sup>-6</sup>	Permeâmetro Guelph
Heiss-Ziegler e Fehrer, 2003	-	8,83x10 <sup>-11</sup> - 1,1x10 <sup>-7</sup>	Ensaio Triaxial
Durmusoglu <i>et al.</i> , 2005	-	4,7x10 <sup>-6</sup> - 1,24x10 <sup>-4</sup>	Ensaio Coluna
Münnich <i>et al.</i> , 2006	-	2,0x10 <sup>-9</sup> - 4,0x10 <sup>-4</sup>	Laboratório
Carruba e Cossu, 2005	-	1,0x10 <sup>-8</sup> - 1,0x10 <sup>-4</sup>	Ensaio Oedométrico

Outra característica interessante sobre a permeabilidade no RSU é a relação entre permeabilidade horizontal e vertical. De acordo com Beaven *et al.* (2008), a permeabilidade horizontal é favorecida em relação à vertical devido à anisotropia dos maciços de resíduos



em aterros sanitários, onde os resíduos são dispostos em camadas. A Tabela 3.3 indica a prevalência da permeabilidade horizontal sobre a vertical.

Tabela 3.3 - Relação  $k_h:k_v$  obtidos por ensaios de RSU em laboratórios (Beaven *et al.*, 2008)

Referência	Tipo de Resíduo	Razão $k_h:k_v$
Landva <i>et al.</i> (1998)	Artificial	0.5 – 1.0
Landva <i>et al.</i> (1998)	Aterro <i>Spruce Lake</i>	8
Buchanan e Clark (1997, 2001)	Resíduo fino processado (<38mm)	1,24 a 2,25
Münnich <i>et al.</i> (2005)	Resíduo tratado mecânica- biologicamente	1 a 250

### 3.2.5. Biodegradação

A biodegradação dos RSU é influenciada pelo tamanho das partículas, idade de geração, composição, teor de umidade, temperatura no aterro, aspectos quantitativos e qualitativos de nutrientes, pH dos líquidos presentes, densidade e grau de compactação (Parker, 1983 *apud* Moretto, 2018).

Marques (2001) compara os aterros sanitários a reatores biológicos, os quais são alimentados pelos resíduos sólidos e água, e tem como elementos de saída o lixiviado e biogás. Ainda segundo o autor, ocorrem processos aeróbios e anaeróbios de degradação nos aterros sanitários, dependendo da disponibilidade de oxigênio no local.

De acordo com Reddy *et al.* (2011), acredita-se que a degradação do RSU é responsável por alterar a composição das suas fases sólida, líquida e gasosa. Devido à grande alteração na fase sólida do RSU e com o aumento do teor de umidade, espera-se que o comportamento geotécnico do RSU degradado seja diferente do RSU fresco. Essa diferença de comportamento deve ser levada em consideração ao se realizar qualquer análise de estabilidade geotécnica.

### 3.2.6. Compressibilidade

Os aterros sanitários são constituídos por diferentes tipos de resíduos sólidos que interagem formando um maciço heterogêneo e poroso. Os diferentes tipos de materiais constituintes do maciço do aterro apresentam comportamentos distintos, além de uma compressibilidade diferente devido à sobrecarga (Carmo, 2020). Assim, os aterros sanitários caracterizam-se por serem maciços com possibilidade de sofrer recalques consideráveis (Tapahuasco, 2009).

El-Fadel e Khoury (2000) dividem o processo de recalque em aterros sanitários em 3 estágios: compressão inicial, compressão primária e compressão secundária. Os autores apresentam cinco principais mecanismos responsáveis pelos recalques nos aterros, sendo eles:

- Mecânico: Após aplicação de um carregamento as partículas de resíduo dobram, quebram, e se realocam e acomodam;
- Emaranhamento: Devido à grande variedade no tamanho das partículas, as partículas menores tendem a se mover para dentro dos vazios entre as partículas maiores;
- Alteração físico-química: Processos de corrosão, oxidação e combustão;
- Degradação bioquímica: Processos de degradação biológica, principalmente da fração orgânica do resíduo, que causam uma diminuição na massa de resíduos, aumentando a deformação vertical;
- Interação entre os mecanismos: A interação pode provocar recalques ainda maiores, como por exemplo quando a consolidação mecânica gera um aumento do emaranhamento das partículas.

### **3.3. RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS**

De acordo com Braja (2006) a resistência ao cisalhamento do solo é a resistência interna, por unidade de área, que o próprio solo oferece para suportar rupturas e deslizamentos em qualquer plano no seu interior. O autor considera fundamental entender a natureza da resistência ao cisalhamento para analisar problemas de estabilidade de solo, como a estabilidade de taludes.

A resistência ao cisalhamento do solo é função do ângulo de atrito ( $\phi$ ) e da coesão ( $c$ ). O ângulo de atrito representa o maior ângulo que a força transmitida à superfície pode atingir em relação à normal ao plano de contato sem que ocorra deslizamento. A equação 3.1 representa matematicamente a resistência ao cisalhamento em função do ângulo de atrito e do intercepto coesivo (Souza Pinto, 2013).

$$T = N \times tg\phi \quad 3.1$$

Onde:

T: Força Horizontal

N: Força Vertical

A coesão é independente da tensão normal atuante, e representa a resistência devido a interação química entre as partículas do solo, que se dá pelo atrito dos grãos de solo durante

o deslizamento desses, se acomodando nos vazios criados pelo deslizamento (Souza Pinto, 2013).

De acordo com Oweis (1993) a utilização de um critério de ruptura Mohr-Coulomb adaptado para RSU é válido para caracterização dos parâmetros de resistência desse, contanto que se considere a diferença de comportamento geotécnico entre solo e RSU. Portanto, a resistência ao cisalhamento do RSU pode ser parametrizada em função do ângulo de atrito e da coesão, sendo função da tensão normal ao plano de ruptura (Manassero *et al.*, 1996 *apud* Strauss, 1998).

A principal dificuldade na determinação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos RSU, considerando a ruptura, pode ser explicada pelo fato desse material não apresentar um pico que defina claramente a ruptura (Jessberger & Kockel, 1993, *apud* Strauss, 1998).

Segundo Kockel *et al.* (1997), é necessária uma grande deformação para afetar a resistência dos RSU. A Figura 3.5 apresenta resultados de testes de compressão triaxial em larga escala (300 mm de diâmetro) com diferentes tipos de RSU.

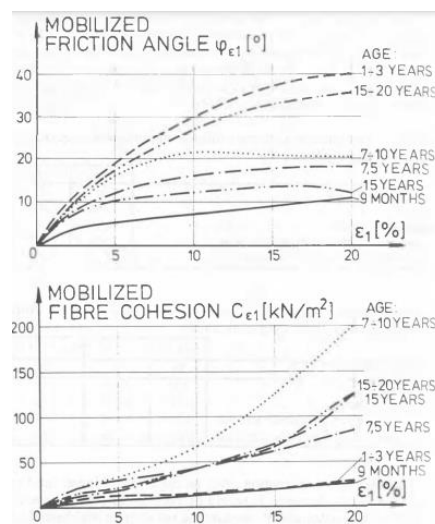


Figura 3.5 - Influência da deformação na resistência ao cisalhamento (Kockel *et al.* 1997)

Os RSU são materiais não coesivos, portanto a coesão apresentada é resultado da parcela fibrosa do material. Para o ângulo de atrito, observa-se um valor limite a tensão de compressão para uma deformação ( $\epsilon_1$ ) inferior a 20%, correspondendo ao valor do ângulo de atrito na condição limite de ruptura, portanto é um valor representativo para o material. Considerando-se a coesão, são necessárias deformações muito maiores, não sendo possível observar valores limites para a coesão mobilizada (Kockel *et al.*, 1997).

A variedade de parâmetros para coesão mobilizada em diferentes resíduos é muito grande. Na Figura 3.5 observa-se para  $\epsilon_1=20\%$  uma variação no ângulo de atrito entre  $10^\circ$  e  $40^\circ$ , e

para a coesão entre 25 e 200 kPa. Sendo assim, geralmente não se pode atribuir um par de parâmetros ( $\phi$ ;  $c$ ) para um RSU (Kockel *et al.*, 1997).

Outro fator que dificulta a obtenção de dados referentes aos parâmetros de resistência de RSU é que nem sempre os trabalhos indicam com clareza se os valores são referentes a parâmetros totais ou efetivos, dificultando a utilização desses para as análises (Campi e Boscov, 2011).

Kavazanjian *et al.* (1995) trazem em seu estudo uma variação do ângulo de atrito entre 10° e 53°, e de coesão entre 0 e 67 kPa. A fim de demonstrar que os valores mais baixos desses parâmetros eram contraditos pela observação de taludes de aterros sanitários estáveis em campo, os autores reavaliaram a resistência ao cisalhamento para os RSU, a partir de valores obtidos por retro análise e ensaios *in-situ*. Os valores utilizados para a reavaliação são apresentados nas Tabela 3.4 e Tabela 3.5.

Tabela 3.4 – Dados utilizados na reavaliação da resistência ao cisalhamento dos RSU (modificado de Kavazanjian *et al.* 1995)

Referência	Tipo de Dado	Resultados	Comentários
Pagotto e Rimoldi (1987)	Cálculos de retro análise em ensaio de placa	$\phi=22^\circ$ , $c=29\text{kPa}$	Sem dados sobre o tipo de resíduo ou procedimento dos ensaios
Landva e Clark (1990)	Testes de cisalhamento direto de RSU em laboratório	$\phi=24^\circ$ , $c=22\text{kPa}$ a $\phi=39^\circ$ , $c=19\text{kPa}$	Tensão normal até 480kPa. Resistências mais baixas correspondem a resíduo picado
Richardson e Reynolds (1991)	Testes de cisalhamento direto de RSU em larga escala <i>in-situ</i>	$\phi=18^\circ$ a $43^\circ$ e $c=10\text{kPa}$	Tensão normal de 14 até 38kPa. Peso específico do resíduo e cobertura estimado em $15\text{kN/m}^3$

Tabela 3.5 – Retro análises de taludes de aterros sanitários reais (Kavazanjian *et al.* 1995)

Aterro Sanitário	Talude médio		Talude Máximo		Ângulo de Atrito, $\phi$		
	Altura (m)	Inclinação (H:V)	Altura (m)	Inclinação (H:V)	FS=1.0	FS=1.1	FS=1.2
Lopez Canyon, CA	120	2,5:1	35	1,7:1	25°	27°	29°
OII, CA	75	2,0:1	20	1,6:1	28°	30°	34°
Babylon, NY	30	1,9:1	10	1,25:1	30°	34°	38°
Aterro Privado, OH	40	2,0:1	10	1,2:1	30°	34°	37°

Nota: Fator de Segurança (FS) para retro análise assumindo  $c = 5\text{kPa}$

Os valores obtidos para a resistência ao cisalhamento foram plotados em função da tensão normal na Figura 3.6. Os autores concluíram que os valores obtidos combinados com as observações em campo de taludes estáveis, suportam uma representação bi-linear da resistência ao cisalhamento dos RSU. Os parâmetros de resistência até a tensão normal de 30 kPa são  $\phi = 0^\circ$  e  $c = 24\text{ kPa}$ ; para valores de tensão normal maiores que 30 kPa são  $\phi = 33^\circ$  e  $c = 0\text{ kPa}$ . Portanto, os RSU apresentariam resistência dependente unicamente da coesão pelas fibras até 30 kPa, e dependente unicamente do atrito para valores de tensão normal acima de 30 kPa.

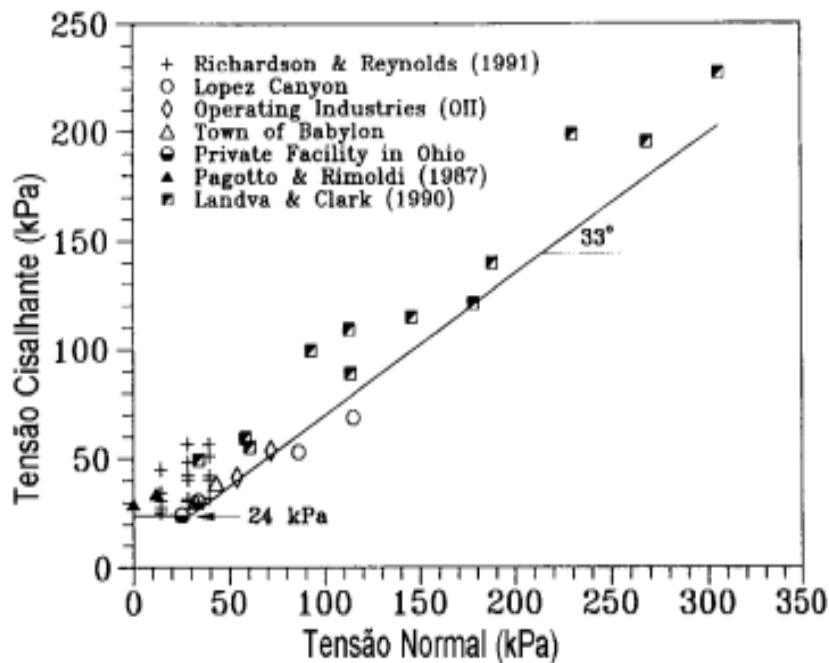


Figura 3.6 - Resultados tensão cisalhante x tensão normal (Strauss 1998 modificado de Kavazanjian *et al.*, 1995).

Como exemplo da dificuldade de obtenção de parâmetros, Campi e Boscov (2011) apresentam resultados de retro análises realizadas em dois grandes aterros da região metropolitana de São Paulo. Os valores obtidos aparentam ser muito próximos dos valores mínimos encontrados na literatura, porém alguns projetistas contestam a adoção desses valores, uma vez que os aterros foram projetados e operados seguindo especificações internacionais, e que para o caso da ruptura de Bandeirantes, essa ocorreu em uma parte antiga do aterro, que não contava com sistema de drenagem eficiente. Os valores obtidos são apresentados na Tabela 3.6 e Tabela 3.7.

Tabela 3.6 – Parâmetros de Resistência do Aterro Sanitário Bandeiras obtido através de retro análise em ruptura de 1991. Modificado de Kaimoto e Cepollina (1996, *apud* Campi e Boscov, 2011)

<b>Idade do Resíduo</b>	<b>Coesão (kPa)</b>	<b>Ângulo de Atrito (°)</b>
<b>Resíduo antigo</b>	13,5	22,0
<b>Resíduo com mais de 2 anos</b>	16,0	22,0
<b>Resíduo novo (menos de 2 anos)</b>	16,0	28,0

Tabela 3.7 – Parâmetros de Resistência do Aterro de Sítio São João obtido através de retro análise em ruptura de 2007. Modificado de Ecourbis Ambiental S/A (2007, *apud* Campi e Boscov, 2011)

<b>Idade do Resíduo</b>	<b>Coesão (kPa)</b>	<b>Ângulo de Atrito (°)</b>
<b>Resíduo antigo</b>	13,5	22,0
<b>Resíduo com mais de 2 anos</b>	16,0	22,0
<b>Resíduo novo (menos de 2 anos)</b>	16,0	28,0

Ainda que sejam constatadas diferenças e alterações nas propriedades e características dos RSU com o tempo, e que essas devem ser levadas em consideração nas avaliações de resistência dos maciços de RSU, a literatura é bastante inconclusiva quanto a essas mudanças nas propriedades mecânicas, principalmente em relação a resistência ao cisalhamento.

Bareither *et al.* (2012), trazem em seu estudo uma série de conclusões de outros autores com relação ao efeito da decomposição do RSU na resistência ao cisalhamento desse. Para

Landva e Clark (1990) não existe uma relação direta que evidencie essa influência da decomposição na resistência. De acordo com Van Impe (1998), Harris *et al.* (2006 *apud* Bareither *et al.* 2012) a resistência ao cisalhamento é maior para os RSU antigos do que para os RSU novos. Em contrapartida, Gabr *et al.* (2007) e Hossain e Haque (2009) indicam que o RSU perde sua resistência ao cisalhamento com o passar do tempo. Para Kockel *et al.* (1997), essa perda de resistência com o passar do tempo ainda não está comprovada.

### 3.3.1. Envoltória de Resistência de Mohr-Coulomb

O Círculo de Mohr é uma representação gráfica bidimensional (Figura 3.7) do estado de tensão em um ponto do meio contínuo, que auxilia no entendimento e visualização dos problemas de tensão e deformação (Ortigão, 2007). O critério de ruptura de Mohr- Coulomb segue a seguinte equação 3.2:

$$\tau' = c' + \sigma' \operatorname{tg}\varphi' \quad 3.2$$

Onde:

$\tau'$ = resistência ao cisalhamento;

$c'$ = coesão;

$\sigma'$ = tensão efetiva normal ao plano de ruptura; e

$\varphi'$ = ângulo de atrito interno do material.

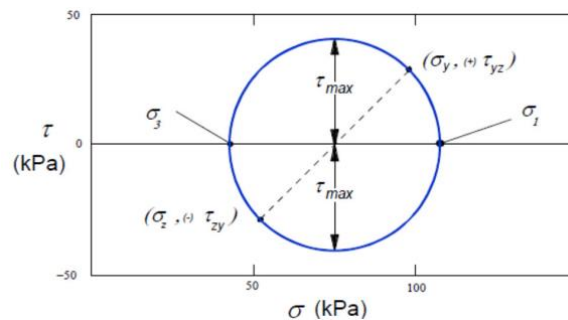


Figura 3.7 - Círculo de Mohr (Ortigão, 2007)

Segundo Braja (2006) é possível obter os parâmetros de resistência ao cisalhamento através de ensaios laboratoriais, tais como os ensaios de cisalhamento direto, cisalhamento simples, triaxial, triaxial de deformação plana e de cisalhamento anular. A partir dos resultados obtidos nos ensaios para determinação os parâmetros de resistência, para diferentes valores de tensão, é possível traçar os Círculos de Mohr correspondentes. A reta tangente aos círculos de Mohr é denominada envoltória de resistência de Mohr-Coulomb (Figura 3.8).

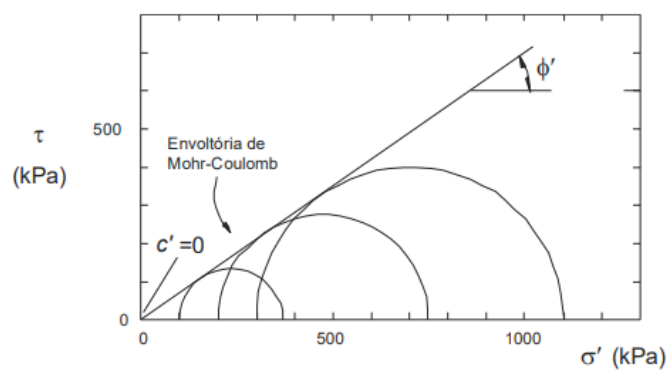


Figura 3.8 - Envoltória de resistência Mohr-Coulomb (Ortigão, 2007)

A interpretação do gráfico apresentado é dada pela sua divisão em duas regiões: os pontos abaixo da reta são estados de tensão anteriores à ruptura, já os pontos acima representariam um material já rompido, portanto a reta delimita a condição crítica de ruptura.

Apesar da consideração de envoltórias lineares ser predominante na literatura usual sobre parâmetros de resistência de RSU, diferentes autores constataam a influência da tensão normal confinante na envoltória de resistência dos RSU, podendo apresentar envoltórias bilineares, trilineares ou não lineares (Daciolo, 2020). A Tabela 3.8 a seguir apresenta os resultados de alguns desses autores.

Tabela 3.8 – Exemplos de propostas de envoltórias de resistência ao cisalhamento para os RSU (Daciolo, 2020 modificado de Ramaiah *et al.* 2017)

Referência	Envoltória de Resistência	Tensão Normal Confinante ( $\sigma$ )	Ângulo de Atrito ( $\phi$ )	Coesão (c)
Kavazanjian <i>et al.</i> (1995)	Bilinear	$\sigma < 30\text{kPa}$	$0^\circ$	24kPa
		$\sigma > 30\text{kPa}$	$33^\circ$	0kPa
Manassero <i>et al.</i> (1996)	Trilinear	$\sigma < 20\text{kPa}$	$0^\circ$	20kPa
		$20\text{kPa} < \sigma < 60\text{kPa}$	$38^\circ$	0kPa
		$\sigma > 60\text{kPa}$	$30^\circ$	20kPa
Stark <i>et al.</i> (2009)	Bilinear	$\sigma < 200\text{kPa}$	$35^\circ$	6kPa
		$\sigma > 200\text{kPa}$	$30^\circ$	30kPa
Bray <i>et al.</i> (2009)	Não-Linear	$\phi'_0 = 36^\circ$	$\phi' = \phi'_0 - \Delta\phi' [\log(\frac{\sigma'_n}{p_a})]$	15kPa

### 3.3.2. Ensaios

Segundo Stark *et al.* (2009), a realização de ensaios de resistência ao cisalhamento de RSU é difícil devido a sua composição heterogênea, dificuldade na preparação das amostras,



grande variabilidade do tamanho das partículas, propriedades dos RSU que variam com o tempo e grande variabilidade do peso específico do material.

Na obtenção dos parâmetros geotécnicos de RSU, Mitchell *et al.* (1995 *apud* Strauss, 1998) destacam, entre os maiores problemas, a dificuldade em obter e ensaiar amostras de dimensões suficientes para serem representativas das condições *in-situ*. Os procedimentos utilizados para a obtenção de parâmetros de resistência ao cisalhamento de RSU são divididos, segundo Mitchell & Mitchell (1992, *apud* Strauss, 1998), em Ensaio de Laboratório, Retro-Análise de Taludes já Rompidos e Ensaio *in-situ*.

Ensaio em laboratório são utilizados para caracterizar as propriedades básicas que interferem na resistência dos resíduos, os ensaios de campo são utilizados para entender como o efeito de escala afeta a resistência mensurada (Edinçiler *et al.* 1996).

#### 3.3.2.1. Ensaio de Cisalhamento Direto

O ensaio de cisalhamento direto é o método que predomina na literatura para determinação de parâmetros de resistência ao cisalhamento dos RSU. Segundo Kavazanjian *et al.* (1995) e Eid *et al.* (2000), quando comparados com valores obtidos de retro-análises de aterros já rompidos, os resultados desse método são o que mais se aproximam com a realidade.

Para ensaios de cisalhamento direto em RSU pode-se utilizar amostras maiores que os tamanhos padronizados de ensaios de solos no laboratório, pela maior representatividade do maciço de RSU, devido a composição heterogênea e a grande variabilidade de sua granulometria, podendo apresentar partículas muito grandes. Além disso, os ensaios podem ser realizados utilizando amostras reconstituídas de RSU, amostras artificiais e amostras coletadas diretamente nos aterros sanitários (Daciolo, 2020).

Del Greco & Oggeri (1994, *apud* Strauss, 1998) realizaram ensaios de cisalhamento direto utilizando dois fardos de RSU compactados, com dimensões de 40cm x 50cm x 60cm, conforme mostra a Figura 3.9. O procedimento utilizado para o ensaio consiste em aplicar uma tensão vertical sobre os fardos, e após o completo adensamento das amostras, aplicar carga horizontal.

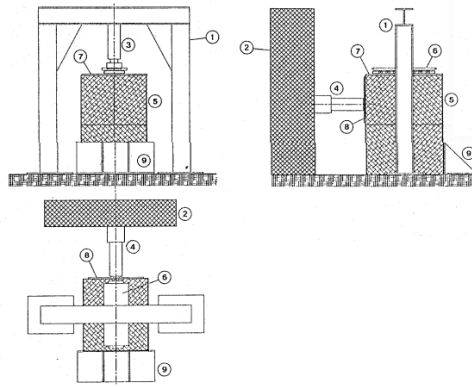


Figura 3.9 - Esquema do equipamento de cisalhamento direto (Del Greco & Oggeri, 1994, *apud* Strauss, 1998).

Edinçliler *et al.* (1996) apresenta em seu estudo outro aparato para realização de ensaio de cisalhamento direto, este já com um sistema de aquisição de dados computadorizado acoplado (Figura 3.10).



Figura 3.10 - Máquina para ensaio de cisalhamento direto de 0.3m de diâmetro (Edinçliler *et al.* 1996)

### 3.3.2.2. Ensaio de Compressão Triaxial

A avaliação do comportamento não drenado dos RSU também é importante, que está associado às sobrepressões geradas através de carregamentos rápidos no maciço, afetando a estabilidade desse (Reddy *et al.* 2009a, 2009b; e Shariatmadari *et al.* 2014). De acordo com os autores, a forma mais adequada de se avaliar esse comportamento é por meio dos ensaios triaxiais consolidados isotropicamente e não-drenados; garantindo a manutenção das sobrepressões em materiais de permeabilidade média ou elevada, como pode ser o caso dos RSU.

A Figura 3.11 apresenta a deformação em um corpo de prova de RSU após a realização de ensaio de compressão triaxial.

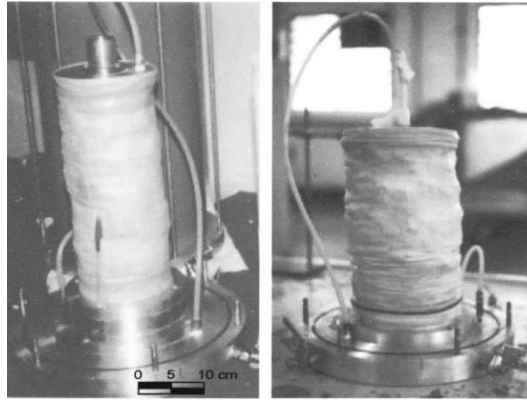


Figura 3.11 - Amostra de RSU antes e depois do ensaio de compressão triaxial (Machado *et al.* 2002)

### 3.3.2.3. Ensaio de Cisalhamento Direto *in-situ*

Os ensaios *in-situ* são mais desejáveis para a obtenção dos parâmetros de RSU, porém as limitações de recursos, como custo, tempo e mão-de-obra, e a dificuldade em se definir as cargas aplicadas e as condições de contorno de cada experimento reduzem a utilização desses métodos de ensaio no local (Edinçliler *et al.* 1996).

Gerber (1991, *apud* Edinçliler *et al.* 1996) realizou ensaios *in-situ* em um aterro em Maine após sua ruptura. Construiu uma caixa de cisalhamento quadrada, com 0.5m de lado. A tensão normal era aplicada através de blocos de concreto colocados em cima das amostras. Já Withiam *et al.* (1995, *apud* Edinçliler *et al.* 1996) realizaram ensaios de cisalhamento direto *in-situ*, em um aterro sanitário utilizando uma caixa de cisalhamento quadrada, com dimensões de 1,5m por 1,5m, envolvendo uma amostra escavada a 1,5m abaixo da superfície do aterro. A caixa inferior foi ancorada reaterrando material em sua volta e a superior foi deslocada horizontalmente por um cabo de aço fixado a um veículo. A tensão normal foi aplicada através de blocos de madeira e concreto. O ensaio é mostrado na Figura 3.12.



Figura 3.12 - Cisalhamento direto em RSU *in-situ* (Withiam *et al.* 1995, *apud* Edinçliler *et al.* 1996)

### **3.4. ESTABILIDADE DE TALUDES**

Para se realizar análises de estabilidade de taludes é necessário conhecer e considerar a geometria do talude, as possíveis cargas externas, as propriedades e o comportamento mecânico e hidráulico dos materiais constitutivos do talude e as condições hidrológicas do local (Gerscovich, 2012).

O fator de segurança (FS), em relação à resistência ao cisalhamento do solo, é definido como o valor da razão entre a resistência (tensão cisalhante máxima disponível) e a resistência mobilizada (tensão cisalhante atuante ao longo da superfície de ruptura) (ABNT, 2009).

Para determinar os esforços resistentes, definem-se os parâmetros de resistência ao cisalhamento, que são a coesão ( $c$ ) e o ângulo de atrito ( $\phi$ ), através de ensaios, sendo os mais utilizados o ensaio de cisalhamento direto e o ensaio de compressão triaxial (Souza, 2017).

É importante conhecer e considerar a influência da geologia e hidrologia local na geometria, mecanismos e causas de instabilidade, e os fatores que podem contribuir para a instabilidade, tais como a poropressão, pressão de percolação de água no interior do solo, supressão a partir de superfícies preferenciais de percolação em estratos subjacentes, à fim de se obter um modelo geológico-geotécnico representativo (ABNT, 2009).

#### **3.4.1. Estabilidade de Taludes de Resíduos Sólidos Urbanos**

Atualmente, devido a pequena quantidade de áreas disponíveis para a instalação de novos aterros, busca-se a melhor eficiência na utilização dos aterros sanitários já existentes. O alteamento das pilhas compactadas de RSU é a solução mais utilizada para melhorar esse aproveitamento, porém tem exigido projetos dimensionados com taludes cada vez mais íngremes, ocupando menor área. Desse modo, as avaliações das condições de segurança demandam o conhecimento dos comportamentos de tensão-deformação e da resistência do RSU (Cardim, 2008).

Na análise de estabilidade de taludes em aterros sanitários, geralmente são determinados o fator de segurança (FS) e a superfície crítica de ruptura, com programas usuais da área de geotecnia. Na entrada de dados utiliza-se a leitura dos piezômetros, e caso a densidade e a resistência ao cisalhamento dos resíduos tenham sido monitorados, esses dados são considerados nas análises (Boscov, 2008)

Os estudos geotécnicos dos RSU são, em sua maioria, realizados com base nos parâmetros e equacionamentos desenvolvidos para a mecânica clássica dos solos. Apesar da utilização dos procedimentos clássicos da mecânica dos solos na obtenção dos parâmetros e na

realização das análises de estabilidade e deformabilidade dos aterros sanitários, a diferença de comportamento entre solos e resíduos sólidos urbanos deve ser considerada sempre. Segundo Martins (2006), características dos RSU como o elevado índice de vazios, a heterogeneidade das partículas e sua granulometria, podem ser responsáveis por uma elevada compressibilidade volumétrica. Os processos de biodegradação resultam em grande variação das propriedades dos materiais com o tempo e em auto consolidação. Devido a essas características específicas referentes aos RSU existe a necessidade da busca de modelos de análise próprios.

De acordo com Motta (2011), um aterro de solo é submetido a uma determinada tensão normal efetiva e sofre deformações, a resistência ao cisalhamento consegue suportar os esforços até uma condição limite anterior a ruptura, sendo denominada “resistência de pico”. Os materiais fibrosos presentes nos RSU, como plásticos e tecidos, conferem um incremento nos parâmetros de resistência desse. Devido à composição dos RSU, os aterros sanitários apresentam comportamento semelhante ao de solos reforçados com fibras, e sua ruptura é, em geral, um fenômeno de cisalhamento associado a rupturas por tensão de tração.

Sendo assim, a resistência ao cisalhamento total pode ser entendida como duas componentes, uma resultante do atrito no plano de cisalhamento e a outra devido as forças de tração observadas nos materiais fibrosos do RSU (Kölsch, 1995). A interação entre essas duas componentes está representada na curva tensão x deformação da Figura 3.13.

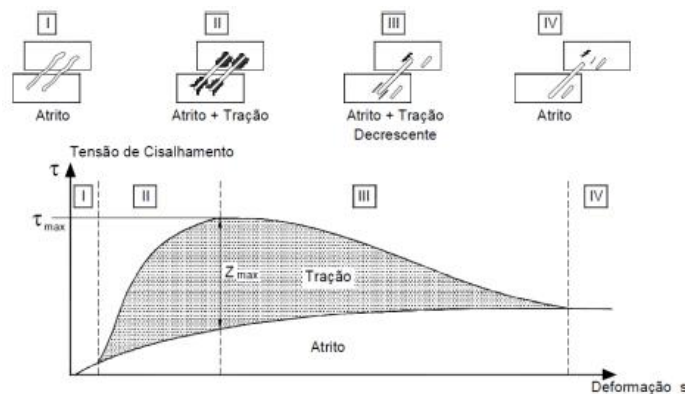


Figura 3.13 - Modelo de interação entre as forças de atrito e de tração das fibras (Strauss, 1998 modificado de Kölsch, 1995)

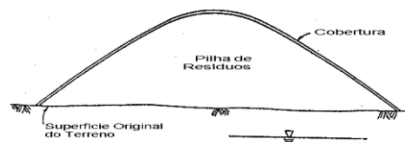
### 3.4.2. Mecanismos de ruptura em aterros sanitários

A estabilidade dos taludes do aterro sanitário está condicionada a diversos fatores, e a influência de um ou da combinação de alguns desses fatores pode levar a um mecanismo de

ruptura do maciço, atingindo condições críticas de estabilidade. De acordo com Jahanfar *et al.* (2017) os principais fatores são:

- Poropressão: Tem-se como exemplos os casos de ruptura do aterro sanitário de Payatas e do aterro biorreator de Bogotá. No primeiro aterro, foram 10 dias de chuvas intensas, enquanto no segundo a reinjeção de quantidade extra de lixiviado causaram o aumento excessivo da poropressão que contribuiu para a ruptura dos taludes (Blight 2008; Merry *et al.* 2005);
- Geometria: A altura e a inclinação lateral do talude são os principais parâmetros de geometria que influenciam a estabilidade (Omari 2012, *apud* Jahanfar *et al.* 2017; Babu *et al.* 2014). Por exemplo, a ruptura do aterro de Rumpke, em 1996, ocorreu quando a altura desse excedeu a altura máxima tolerável (Eid *et al.* 2000a). Da mesma maneira, o aterro de Payatas apresentava relação entre comprimento horizontal e vertical de 1.5 H:1 V logo antes de sua ruptura, quando o mais comum de se observar é uma relação de 3 H:1 V (Merry *et al.* 2005).
- Composição do Resíduo: A importância em considerar a composição do RSU constituinte do maciço do aterro pode ser exemplificada por Koelsch (2007) que enfatizou que a principal razão para a baixa densidade dos resíduos na ruptura em Payatas foi a retirada dos resíduos mais resistentes, como madeira, metais, papelão e garrafas por catadores, o que deixou o maciço de RSU composto basicamente por parcelas de material orgânico e plásticos leves.
- Compactação dos Resíduos: De acordo com Blight (2008), o resíduo pouco compactado pode levar a ruptura do aterro, porque uma compactação inconsistente e pouco efetiva, como no caso dos lixões de Istambul e Saravejo e aterros sanitários de Bogotá e Durban, apresentados em seu estudo, observa-se uma baixa resistência ao cisalhamento e um maciço sem coesão (Jahanfar *et al.* 2017).

Aterros sanitários municipais modernos geralmente tem uma das configurações apresentadas na Figura 3.14 (Mitchell & Filz, 1997 *apud* Strauss, 1998).



a. Pilha de Resíduos Sobre Superfície Existente de um Terreno



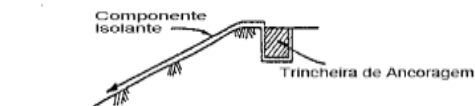
b. Aterro em uma Área Excavada ou Vale

Figura 3.14 - Configuração de aterros sanitários modernos (Mitchell e Filz, 1997 *apud* Strauss, 1998).

A ruptura do aterro sanitário pode ocorrer no solo de fundação, no próprio maciço de RSU, nas camadas de cobertura do aterro sanitário ou em interfaces, como resíduo-solo; resíduo-geomembrana ou geomembrana-solo (Strauss, 1998). A Figura 3.15 apresenta diagramas de possíveis modos de ruptura em aterros sanitários (Mitchell e Filz, 1997 *apud* Strauss, 1998).



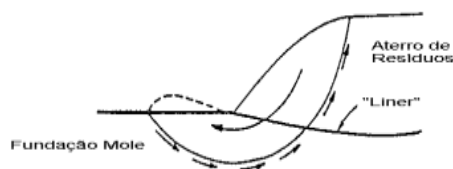
a. Ruptura da Base e Talude



b. Arrancamento dos Componentes do Sistema de Isolamento da Trincheira de Ancoragem



c. Ruptura Através da Massa de Resíduos



d. Ruptura Através da Massa de Resíduos, "Liner" e Fundação



e. Ruptura por Escorregamento ao Longo do Sistema de Isolamento ("Liner").

Figura 3.15 - Formas potenciais de ruptura em aterros sanitários (Mitchell & Filz, 1997 *apud* Strauss, 1998).

### 3.4.3. Impacto da Poropressão e Importância da Drenagem na Estabilidade

- Aterro Sanitário de Brasília (2019): Entre fevereiro e abril de 2019, a porção sul do ASB apresentou movimento excessivo associado com excesso de lixiviado, que chegou a transbordar por drenos de gás e até mesmo a extravasar pelos próprios taludes. Foi observada grande movimentação dos drenos de gás e processos erosivos severos nas camadas de cobertura. A Figura 3.16 e Figura 3.17 demonstram os extravasamentos de chorume observados no ASB.



Figura 3.16 – Lixiviado extravasando pelo sistema de drenagem de gás (Jucá *et al.* 2021)



Figura 3.17 – Lixiviado extravasando pelo talude (Jucá *et al.* 2021)

Após realização de retro análise para melhor entendimento da causa de ruptura, foi constatado que a falha ocorreu por excesso de poropressão. Uma das conclusões do estudo foi a limitação do sistema de drenagem em formato “espinha de peixe”, ficando recomendada a utilização de “colchão drenante”, preferencialmente.

### 3.5. CASOS DE RUPTURAS DE TALUDES EM ATERROS SANITÁRIOS

- Aterro Sanitário Bandeirantes (São Paulo/SP - 1991): Aproximadamente 65 mil m<sup>3</sup> (metros cúbicos) de resíduos sólidos urbanos aterrados no Aterro Sanitário Bandeirantes, desprenderam-se do maciço e escorregaram rapidamente até a sua base, como



apresentado na Figura 3.18. Foi o primeiro deslizamento em aterro sanitário de grande porte do Brasil, sendo considerado um ponto de inflexão na gestão e operação de aterros sanitários no país. Após estudos por meio de retro análise, concluiu-se que o sistema de drenagem era ineficaz para aliviar a poropressão no interior do maciço, provocada pelo aumento de percolado. Outro ponto identificado como problemático na operação do aterro foi a inclinação inadequada das seções durante o processo de alteamento do aterro (ABLP, 2019).

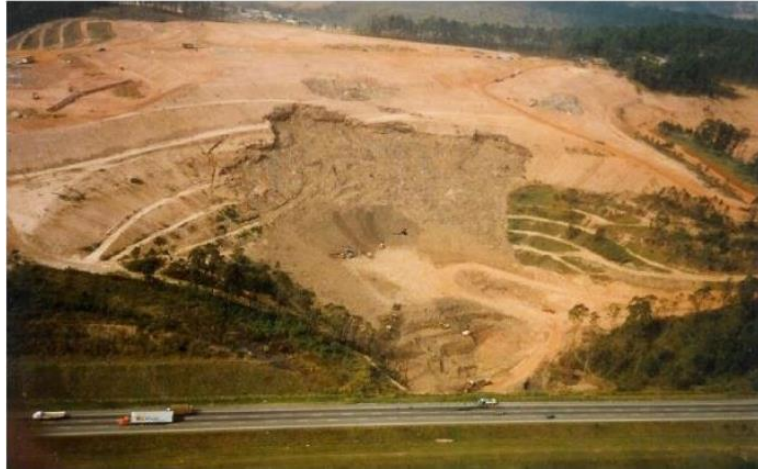


Figura 3.18 - Escorregamento do aterro de Bandeirantes em 1991, (IPT, 1991).

- Aterro Sanitário Pajoan (Itaquaquecetuba/SP – 2011): Em 2011, foram desprendidos do maciço mais de 300 mil m<sup>3</sup> (metros cúbicos) de resíduos após uma ruptura no Aterro Pajoan. Cogitou-se a possibilidade de o colapso ter ocorrido devido ao acúmulo de gases, mas constatou-se que as pressões de lixiviados estavam altas, causando a ruptura úmida. De acordo com laudo da Cetesb, o Córrego Taboãozinho, próximo do aterro, foi contaminado pelo chorume que escorreu do empreendimento. Outro deslizamento já havia sido registrado em 2000, quando a empresa responsável afirmou que o ocorrido teve relação com chuvas intensas. Porém, acredita-se que o mais provável é que a estrutura do sistema de drenagem tenha sido subdimensionada (ABLP, 2019). A Figura 3.19 apresenta as condições do aterro Pajoan após a ruptura.



Figura 3.19 – Aterro Sanitário Pajoan após ruptura (Juliana Cardilli/G1, 2011)

Jahanfar *et al.* (2017) apresenta uma série de eventos de ruptura de aterros sanitários e lixões em seu estudo, são eles:

- Aterro Sanitário de Rumpke (1996): O aterro de Rumpke, conhecido como a “Montanha Rumpke” é localizado no estado de Ohio e na época de sua ruptura era o maior depósito de resíduos dos Estados Unidos. A ruptura ocorreu em março de 1996, durante uma escavação ao pé do aterro com finalidade de expandi-lo, e é considerada a maior da história no Estados Unidos em questão de volume deslizado (Eid *et al.* 2000). Além disso, a instalação estava com uma altura cerca de 13 a 15 metros maior que o previsto, na época da ruptura. A Figura 3.20 indica as superfícies de ruptura desenvolvidas tanto na vertical quanto na horizontal, no maciço de RSU e no solo de fundação, respectivamente.

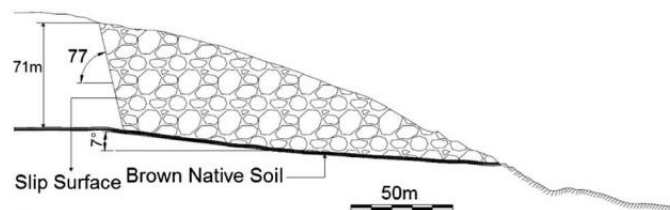


Figura 3.20 - Superfícies de ruptura no aterro Rumpke (Jahanfar *et al.* 2017)

Para esse caso de ruptura, os RSU apresentavam composição bastante fibrosa, devido ao tipo de consumo nos Estados Unidos, gerando muitos resíduos plásticos, embalagens, entre outros, o que conferiu uma boa resistência ao cisalhamento do maciço. Porém acredita-se que a superfície de ruptura se estendeu para porções mais profundas do aterro, levando a ruptura da fundação. Esse é um exemplo de que o projeto de fundação do aterro e conhecimento dos parâmetros desse solo são críticos para a estabilidade da estrutura. A Figura 3.21 apresenta a ruptura do aterro.



Figura 3.21 - Vista aérea da ruptura do aterro Rumpke, em 1996 (Eid *et al.* 2000).

- Aterro Sanitário de Durban (1997): O aterro de Durban fica localizado na cidade de Durban na África do Sul, e foi projetado para receber uma co-disposição com relação específica de resíduos líquido, lama industrial, e sólido, resíduos orgânicos e restos de alimento. Como o material disposto era não-fibroso foram construídas bermas de contenção nos pés do aterro. A ruptura ocorreu em 1997, sendo que os resíduos deslizaram em direção a uma fase de futura operação no aterro. De acordo com Blight (2008) a razão para a ruptura foi uma alta poropressão no local, devido à falta de um sistema de drenagem eficiente e a grande quantidade de líquidos disposta no aterro devido ao tipo de resíduo. A Figura 3.22 apresenta imagens do aterro de Durban antes e depois de sua ruptura.

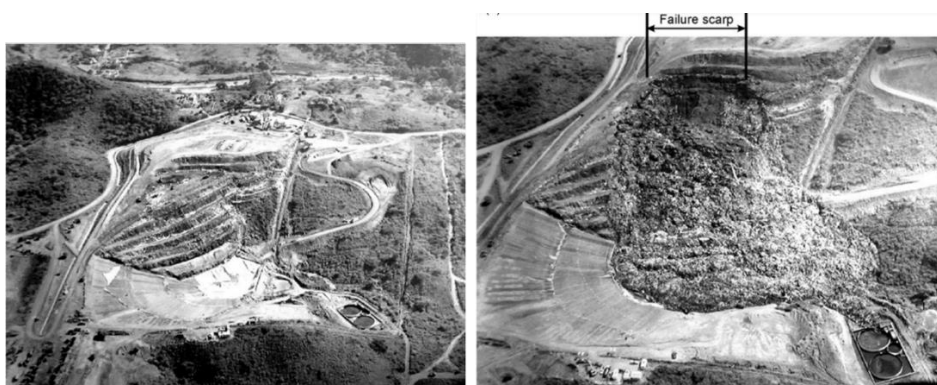


Figura 3.22 – Vista aérea do aterro de Durban antes e depois da ruptura (modificado de Blight, 2008)

Apesar dos lixões serem métodos de disposição inadequada de RSU, o estudo da ruptura dessas estruturas reforça a importância da utilização de métodos adequados, como o aterro sanitário, principalmente com relação aos elementos estruturais. A eficiência dos sistemas de impermeabilização de fundo e de cobertura tem grande importância no desempenho adequado dos aterros sanitários. As camadas de fundo evitam o fluxo de percolados para o solo, as camadas de cobertura são responsáveis por controlar a infiltração de água no aterro

e minimizar a migração de gases para fora do aterro (Costa, 2015). São apresentados exemplos de ruptura em lixões a seguir, causadas, principalmente, pela infiltração de água no lixão e aumento da poropressão no maciço.

- Lixão de Sarajevo (1977): O lixão de Sarajevo fica localizado na antiga Iugoslávia, atualmente Bósnia-Herzegovina, e foi o primeiro caso de ruptura documentado na literatura técnica. Ocorreu em dezembro de 1977, quando 200.000 m<sup>3</sup> de resíduos deslizaram por mais de 1 (um) quilômetro para fora do lixão, como apresenta o esquema da Figura 3.23. Apesar da característica fibrosa do material, que representava 74% da composição do maciço, não havia compactação desse no local. De acordo com Blight (2008), a ruptura resultou, provavelmente, de alta poropressão causada pela infiltração de chuva no material não compactado e sem camada de cobertura.

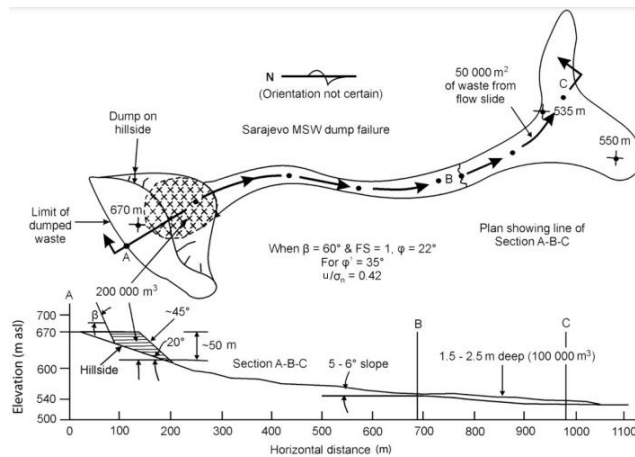


Figura 3.23 - Representação do deslizamento no lixão de Sarajevo, em 1977 (Blight, 2008)

Lixão de Istambul (1993): Localizado a 30 quilômetros da cidade de Istambul, Turquia, o lixão fica próximo à uma encosta íngreme, como apresenta o esquema da Figura 3.24.

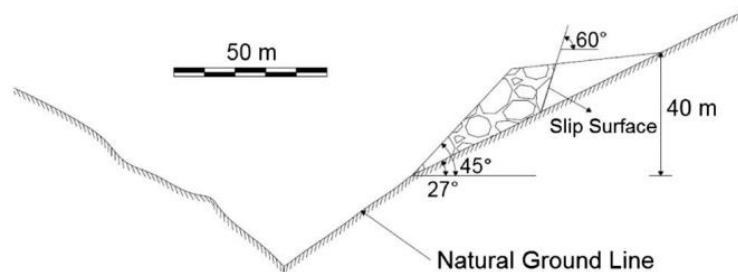


Figura 3.24 - Esquema da geometria e disposição do lixão de Istambul (Jahanfar *et al.* 2017)

O lixão não possuía nenhum tipo de impermeabilização ou proteção de base, e não havia compactação nem cobertura dos resíduos. De acordo com Blight (2008), em 1992 decidiu-se que o lixão deveria receber cobertura, o que ocorreu de forma não planejada, sendo coberto com resíduos de demolição e solo. A excessiva infiltração das chuvas no lixão e a repentina sobrecarga da cobertura são consideradas o gatilho para a ruptura. O deslizamento deixou 39 mortos. A Figura 3.25 a seguir apresenta a ruptura do lixão de Istambul.



Figura 3.25 - Ruptura do lixão de Istambul, 1977 (Blight, 2008)

### 3.6. ANÁLISE DE ESTABILIDADE

A avaliação quantitativa da estabilidade de taludes é fundamental para determinar se o talude é ou não estável. Considerando as propriedades, características e parâmetros de resistência previamente conhecidos do solo, é escolhido o método mais adequado para realizar os cálculos de estabilidade de taludes para a obtenção do fator de segurança (FS). De acordo com Sandoval (2012), os métodos disponíveis para realizar as análises de estabilidade são classificados em métodos de equilíbrio limite (MEL), métodos dos elementos finitos (MEF) e métodos da análise limite (MAL).

O método mais utilizado para as análises de estabilidade é o método de equilíbrio limite, obtendo-se um fator de segurança, que pode variar entre 1,2 e 1,5 a depender do nível de segurança contra danos a vidas humanas, danos materiais e ambientais (ABNT, 2009). Como os dados utilizados na análise costumam ser valores médios, nem sempre estes dados são os mais representativos, por isso o julgamento do engenheiro é fundamental para a determinação dos dados a serem utilizados, considerando as principais incertezas existentes (Flores, 2008).

A análise de estabilidade de taludes de aterro sanitário depende do conhecimento de valores confiáveis para os parâmetros de resistência do RSU *in-situ*. Com uma estimativa representativa da resistência ao cisalhamento do RSU é possível operar o aterro de acordo com as condições críticas de geometria e altura dos taludes e os níveis do lixiviado. Apesar

de existirem muitos fatores que podem ocasionar a ruptura de um aterro sanitário, um alto nível de lixiviado no maciço é um dos mais importantes (Colomer-Mendoza, 2013).

### **3.6.1. Análise Determinística**

A abordagem determinística de análise de estabilidade de taludes tem como princípio a utilização de valores médios de resistência e parâmetros do solo para a determinação de um valor para o fator de segurança (FS), que caso atendido garantiria a segurança no talude, teoricamente (Tomassetti, 2014).

Esse tipo de análise não considera em seus cálculos as incertezas presentes nos valores obtidos para os parâmetros do solo, a geometria do talude e as superfícies de ruptura. Essas incertezas referem-se à variabilidade intrínseca do solo, à quantidade de amostras ensaiadas e à qualidade desses ensaios e aos julgamentos e considerações do responsável pela realização da análise. Em função da presença dessas incertezas em projetos de taludes, a resposta obtida nas análises (fator de segurança) também está sujeita à presença de incertezas (Junior *et al.* 2018).

Para o caso dos RSU, somam-se a essas incertezas a heterogeneidade da composição, a biodegradabilidade e alteração das características ao longo do tempo, a grande variabilidade do tamanho das partículas, entre outros.

Além dessas análises fornecerem somente um valor de FS, que não indica nada sobre o funcionamento do talude ou sobre a influência de cada parâmetro na estabilidade, essa abordagem exige que o sejam feitas muitas considerações pelo engenheiro, o que torna a análise subjetiva (Flores, 2008).

#### **3.6.1.1. Método do Equilíbrio-Limite**

As análises determinísticas de estabilidade de taludes, usadas comumente na geotecnia, são baseadas em métodos de equilíbrio limite (Flores, 2008).

O Método do Equilíbrio Limite (MEL) é um dos métodos mais populares para análise de estabilidade de taludes. Considerando-se o comprimento das estruturas geotécnicas como sendo infinito, o MEL simplifica a análise de estabilidade de taludes reduzindo-a a um problema bidimensional (Sandoval, 2012).

As seguintes hipóteses são consideradas verdadeiras para o método do equilíbrio-limite (Massad, 2010):

- A ruptura do solo ocorre bruscamente, sem deformação, refletindo comportamento rígido-plástico do solo;

- As equações de equilíbrio elástico são consideradas válidas até a iminência de ruptura, desconsiderando o processo dinâmico nessa etapa;
- O coeficiente de segurança é constante ao longo da linha de ruptura, ignorando fenômenos de ruptura progressiva.

Há diversos métodos para analisar a estabilidade de um talude baseados na análise de equilíbrio-limite. A Tabela 3.9, apresentada por Penasso (2019) em seu estudo, exemplifica alguns desses métodos.

Tabela 3.9 – Formulações baseadas no método das fatias (GeoRio, 2014 *apud* Penasso, 2019).

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

### 3.6.2. Análise Probabilística

A abordagem probabilística permite conhecer, além do fator de segurança (FS), a probabilidade de ruptura do talude, e fornece informações sobre os parâmetros que influenciam mais significativamente o problema (Flores, 2008). Os métodos probabilísticos desenvolvidos para realizar as análises são divididos em três categorias: Métodos Analíticos, Métodos Aproximados e Simulação de Monte Carlo (Tomassetti, 2014).

Um fator de segurança indica a estabilidade relativa de um talude. Porém, não expressa o nível de risco do talude por conta da variabilidade dos parâmetros geotécnicos. Com as análises probabilísticas, dois índices são obtidos para quantificar risco de um talude, são eles a probabilidade de ruptura e o índice de confiança, o que auxilia no conhecimento dos riscos associados à utilização de determinado fator de segurança no projeto (Silva, 2006; Filho e Andrade, 2015).

A Figura 3.26 a seguir apresenta os resultados obtidos por Lacasse e Nadim (1998) em um estudo de incertezas sobre a capacidade de carga axial de uma estaca.

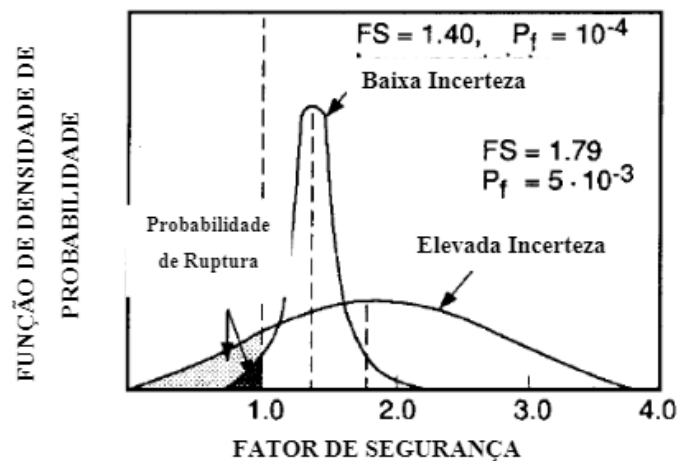


Figura 3.26 - Probabilidade de ruptura de estacas (modificado de Lacasse e Nadim, 1998 *apud* Flores, 2008)

É possível observar pelos resultados que um fator de segurança maior que 1,5 não garante, necessariamente, a segurança da análise. A probabilidade de ruptura se mostrou consideravelmente maior para a análise com fator de segurança FS=1,79 em comparação à análise com fator FS=1,4. A maior confiabilidade na análise de menor FS é garantida pela menor incerteza nos cálculos desse fator (Flores, 2008).

As análises de probabilidade de ruptura de taludes consistem na definição de dados para obter uma função de probabilidade representativa de cada parâmetro que represente uma incerteza na análise, ou pelo menos dos que tenham grande influência no resultado. Logo,



as distribuições de probabilidade dos parâmetros são integradas na análise de estabilidade para estimar a distribuição de probabilidade do fator de segurança, conforme apresentado no esquema da Figura 3.27 (Flores, 2008).

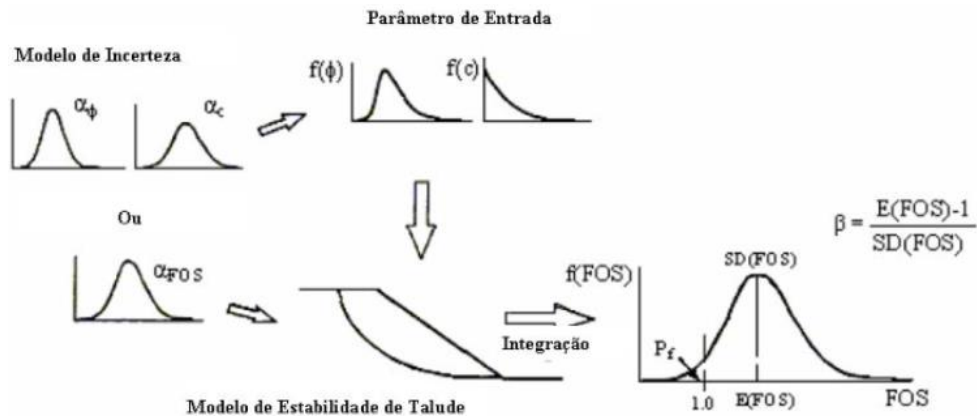


Figura 3.27 – Conceito de análise probabilística de estabilidade de taludes (Flores, 2008).

Silva (2015) apresenta em seu estudo um resumo das principais vantagens da análise de probabilidade aplicadas à geotecnia, por Duncan (2001) (Tabela 3.10).

Tabela 3.10 - Importância da análise probabilística de estabilidade de taludes, Duncan (2001 *apud* Silva, 2015).

Autor	Benefícios da Análise de Probabilidade, Confiabilidade
Christian e Baecher	Fornece uma estrutura para estabelecer apropriados fatores de segurança e dirige melhor a um entendimento da relativa importância das incertezas.
Ladd e Da Re	Fornece um método sistemático para avaliar combinadas influências de incertezas dos parâmetros que afetam o fator de segurança. Fornece um sistemático método de determinação do grau de segurança, ao menos em termos relativos.
Moriwaki e Barneich	Quantifica a contribuição de todas as incertezas de cada parâmetro.
Koutsoftas	Fornece uma ferramenta útil para avaliar o risco associado com recomendações de projeto.

Segundo Jahanfar *et al.* (2017) a abordagem probabilística tem sido utilizada em estudos de análise de estabilidade de taludes de aterros desde 2002. Os autores reúnem em seu estudo uma série de casos da utilização desses métodos na avaliação da estabilidade de taludes de RSU.

Daciolo (2020) aplicou o método probabilístico na análise da ruptura do aterro sanitário Sítio São João, localizado em São Paulo. A ruptura ocorreu em 13 de agosto de 2007, como apresenta a Figura 3.28, provocando deslizamento de cerca de 220.000 m<sup>3</sup> de RSU e outros materiais do aterro (Batista, 2010; Benvenuto *et al.* 2016, *apud* Daciolo, 2020). Foi observada uma elevação no parâmetro Ru superior a 0,6 (Oliveira *et al.*, 2015; Kamiji e Oliveira, 2019, *apud* Daciolo, 2020), que indica um aumento da poropressão no aterro. O parâmetro de poropressão  $r_u$  indica a razão entre a poropressão e a tensão vertical (geostática) em um determinado ponto da estrutura. Nos aterros sanitários, a contribuição do biogás nas poropressões é relevante, podendo ter contribuído para a ruptura do Aterro Sítio São João.

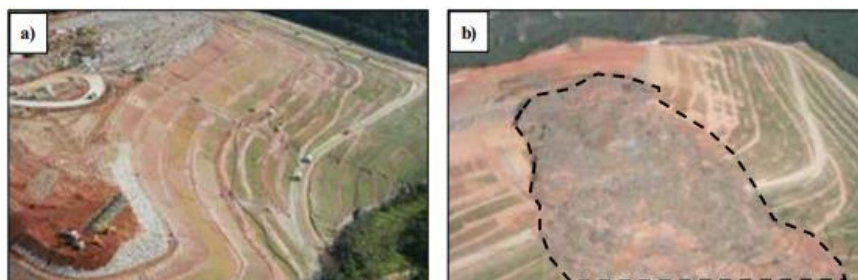


Figura 3.28 – Aterro sanitário Sítio São João antes e depois da ruptura (Daciolo, 2020 modificado de Benvenuto *et al.* 2016)

A Figura 3.29, apresenta os fatores de segurança e probabilidades de rupturas em cada fase de alteamento do aterro.

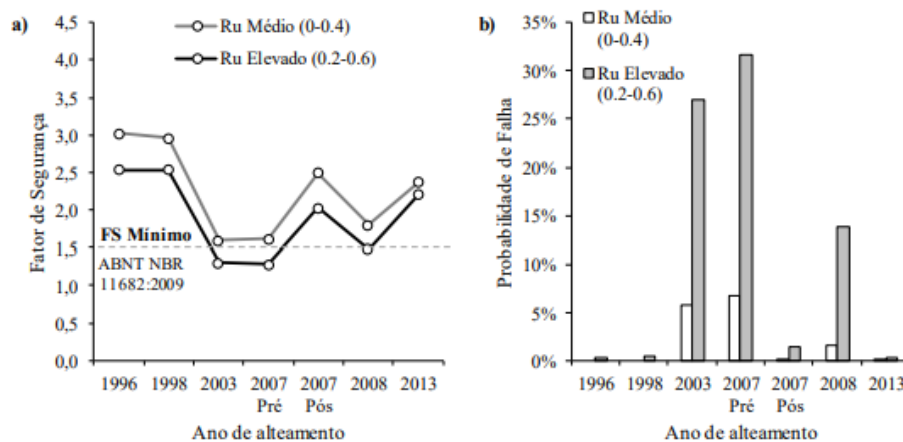
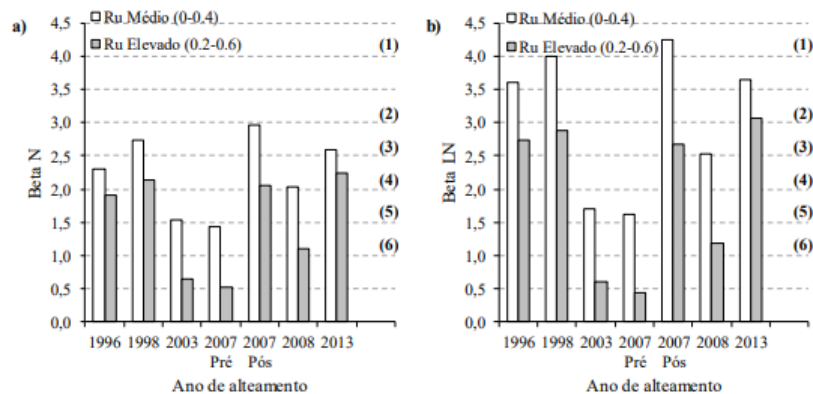


Figura 3.29 – Avaliação da estabilidade da seção crítica de ruptura do aterro Sítio São João: (a) análise determinística; (b) análise probabilística (Daciolo, 2020).

A Figura 3.30 apresenta a determinação dos índices de confiabilidade obtidos nas análises probabilísticas de estabilidade do aterro para o modelo Normal e Lognormal. Foi realizada uma comparação com índices de referência de confiabilidade do Corpo de Engenheiros do Exército dos EUA (USACE, 1997) para verificar os níveis de confiabilidade apresentados pelo aterro. É possível observar que elevação da geração de poropressões, e consequente aumento do Ru, impactou significativamente no índice de confiabilidade, que apresentou valores baixos durante as fases de alteamento, culminando em valores perigosos na fase de ruptura do aterro (Figura 3.30).



Nota: Confiabilidades-Alvo USACE (1997): (1) Bom, (2) Acima da média, (3) Abaixo da média, (4) Baixa, (5) Insatisfatória, (6) Perigosa.

Figura 3.30 – Índice de confiabilidade obtido: (a) modelo Normal; (b) modelo LogNormal (Daciolo, 2020).

### 3.6.2.1. Probabilidade de Ruptura

A probabilidade de ruptura expressa a probabilidade do valor da função de desempenho, fator de segurança, ultrapassar o limite de estado. Apesar desse limite de estado ser usualmente associado ao Fator de Segurança unitário (FS=1,0), em análise de estabilidade de taludes (Flores, 2008), o termo “probabilidade de performance insatisfatória” pode ser utilizado, em casos que o FS se encontra acima do FS unitário (condição crítica de ruptura), porém abaixo de um FS mínimo requerido para o projeto, por exemplo (U.S. Army Corps of Engineers, 1995).

Penasso (2019) apresenta em seu estudo como obter a probabilidade de ruptura (PR) por meio do índice de confiabilidade ( $\beta$ ), que pode ser definido conforme a equação 3.3.

$$\beta = \frac{\mu M}{\sigma M} \quad 3.3$$

Onde:

M: margem de segurança

$\mu M$ : valor médio

$\sigma M$ : desvio padrão da margem de segurança

A margem de segurança (M) é definida pela equação 3.4.

$$M = R - Q \quad 3.4$$

Onde:

R: resistência disponível

Q: carga ou tensão à qual o sistema é exposto

Desse modo, a probabilidade de ruptura é obtida pela equação 3.5.

$$Pr = 1 - \Phi(\beta) \quad 3.5$$

Onde  $\Phi(\beta)$  é obtido de funções de densidade de probabilidade normal N(0,1) com média nula e um desvio padrão igual a 1,0.

Desenvolvendo a equação inicial, obtém-se a função que representa a probabilidade de ruptura, obtida através da equação 3.6 à equação 3.9.

$$Pr = \int_{-\infty}^1 f(FS) dFS \quad 3.6$$

$$Pr = \int_{-\infty}^1 \frac{1}{\sigma FS \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(FS - \overline{FS})^2}{2 \cdot \sigma FS^2}} dFS \quad 3.7$$

$$Pr = 1 - \int_{-\infty}^1 \phi(Z) dZ \quad 3.8$$

$$Pr = 1 - \int_{-\infty}^{\beta} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{z^2}{2}} dz \quad 3.9$$

Onde:

FS: Fator de segurança

$\overline{FS}$ : Fator de segurança médio

$\sigma FS$ : Desvio padrão do fator de segurança

$\beta$ : Índice de confiabilidade

Onde Z é calculado pela equação 3.10.

$$Z = \frac{-(FS - \overline{FS})^2}{\sigma FS^2} \quad 3.10$$

A Figura 3.31 apresenta a relação entre a probabilidade de ruptura e o índice de confiabilidade. Observa-se que valores de índice de confiabilidade pequenos levam à probabilidade de ruptura maior, e que para valores de mesma probabilidade de ruptura, a

distribuição normal exige um índice de confiabilidade maior, verificando-se que a distribuição normal é a favor da segurança (Flores, 2008).

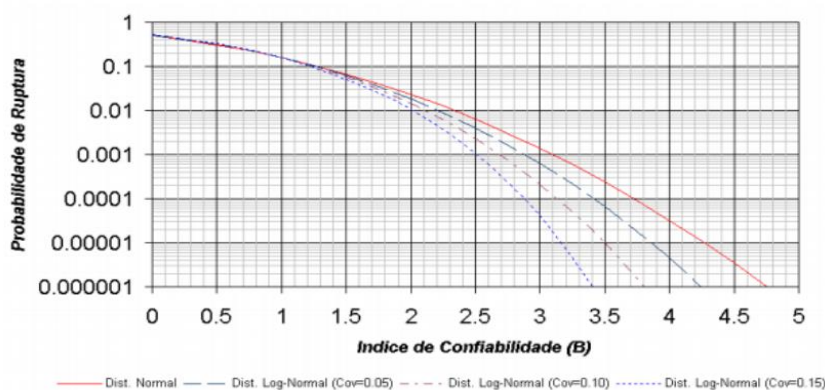


Figura 3.31 - Probabilidade de Ruptura versus Índice de Confiabilidade Sandroni e Sayão (1992 *apud* Flores 2008)

Após a obtenção do índice de confiabilidade e cálculo da probabilidade de ruptura, faz-se o gerenciamento do risco através da probabilidade de ruptura admissível (Flores, 2008). A aceitação ou não da probabilidade de ruptura depende de diversos aspectos, tais como aspectos sociais, regionais e estruturais (Silva, 2006).

Os engenheiros da *US Army Corps of Engineers* (USACE, 1995) estabelecem valores de confiabilidade-alvo de referência, e tem-se a probabilidade de ruptura de  $3 \times 10^{-5}$  como nível “bom” de performance para taludes.

A Tabela 3.11 apresentada exibe a probabilidade de ruptura em função do índice de confiabilidade.

Tabela 3.11 – Níveis de performance em termos de probabilidade de falha (Pf) e correspondentes índices de confiabilidade ( $\beta$ ) *US Army Corps of Engineers* (1995 *apud* Daciolo, 2020).

Nível de Performance Esperado	Índice de confiabilidade ( $\beta$ )	Probabilidade de Falha (Pf)
Alto	5,0	0,0000003
Bom	4,0	0,00003
Acima da Média	3,0	0,001
Abaixo da Média	2,5	0,006
Pobre	2,0	0,023
Insatisfatório	1,5	0,07
Perigoso	1,0	0,16

Por fim, é recomendado realizar tanto a análise determinística quanto a probabilística, a fim de se obter uma maior aceitabilidade do projeto (Flores, 2008).

### 3.6.2.2. Método das Estimativas Pontuais

O Método das Estimativas Pontuais faz parte do grupo dos Métodos Aproximados. De acordo com Flores (2008), para o caso de análise de estabilidade de taludes, o método das Estimativas Pontuais é uma alternativa que oferece resultado aceitável, ainda que seja relativamente simples. O método utiliza os valores médios dos parâmetros de resistência e os respectivos desvios (Tomasetti, 2014).

Considerando os ensaios de cisalhamento direto, realiza-se uma regressão linear nos parâmetros obtidos nos ensaios para construir uma envoltória média de resistência, obtendo-se os valores médios dos parâmetros de resistência. No caso de solos, a relação linear é do tipo:  $\tau = a.\sigma + b$ , onde “a” é o coeficiente angular da reta e “b” é o coeficiente linear.

Utiliza-se de tratamento estatístico para verificar a dispersão dos dados obtidos, a fim de garantir que sejam confiáveis, e que a regressão realizada é representativa para a amostra.

Os coeficientes de Pearson e coeficiente de variação (CV) podem ser utilizados para avaliar os resultados obtidos. De acordo com Fonseca e Martins (2008) o coeficiente de variação (CV) é a relação entre o desvio padrão e a média, e demonstra a dispersão dos dados em relação à média. Já o coeficiente de correlação de Pearson mede, segundo Devore (2006), o quanto o modelo de regressão linear ( $y = a.x + b$ ) representa a variação de y. A Tabela 3.12 apresenta a classificação do grau de correlação em função de faixas de valores de coeficiente de correlação (Bisquerra *et al.*, 2004 *apud* Tomasetti, 2014).

Tabela 3.12 – Coeficiente de correlação de Pearson Bisquerra *et al.* (2004 *apud* Tomasetti, 2014)

<b>Coeficiente</b>	<b>Interpretação</b>
R = 1	Correlação Perfeita
0,8 < R < 1,0	Muito Alta
0,6 < R < 0,8	Alta
0,4 < R < 0,6	Moderada
0,2 < R < 0,4	Baixa
0,0 < R < 0,2	Muito Baixa
R = 0	Nula

O Método das Estimativas Pontuais foi criado por Rosenblueth (1975). É um método que realiza uma aproximação numérica de técnicas de integração, através da transformação de uma variável contínua  $x$  em uma variável discreta, representada por dois pontos  $x_+$  e  $x_-$ , cada uma com concentrações de probabilidade  $P_+$  e  $P_-$ . A Figura 3.32 apresenta o conceito do método.

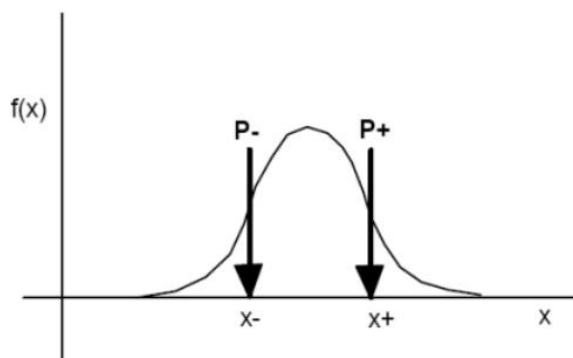


Figura 3.32 - Estimativas pontuais da função  $f(x)$  (Flores, 2008).

A média e a variância, conhecidas como os dois primeiros momentos probabilísticos da distribuição, são estimados a partir da função geradora de momentos, obtida através das análises determinísticas subdivididas em “ $2n$ ” análises, onde “ $n$ ” indica o número de variáveis aleatórias consideradas (Flores, 2008).

Penasso (2019) apresenta como obter as  $2n$  análises por meio da combinação dos pontos  $x_+$  e  $x_-$ , obtidos pela equação 3.11 e equação 3.12.

$$x_{i+} = E[x_i] + \sigma_{x_i} \quad 3.11$$

$$x_{i-} = E[x_i] - \sigma_{x_i} \quad 3.12$$

Onde:

$E[x]$ : valor médio do parâmetro  $x$

$\sigma_x$ : desvio padrão do parâmetro  $x$

A função geradora de momentos pode ser calculada através da equação 3.13.

$$E(FS^m) = P_+ FS_+^m + P_- FS_-^m \quad 3.13$$

Onde:

$E(FS^m)$ : função geradora de momentos

$m$ : ordem do momento probabilístico de interesse

Calcula-se primeiramente a média e a média dos quadrados e, em seguida, a variância do Fator de Segurança, para obter o desvio padrão, de acordo com equação 3.14 à equação 3.17.

$$E(FS) = \overline{FS} = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^{2n} FS_i \quad 3.14$$

$$E(FS^2) = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^{2n} FS_i^2 \quad 3.15$$

$$\sigma_{FS}^2 = V(FS) = E(FS^2) - [E(FS)]^2 \quad 3.16$$

$$\sigma_{FS} = \sqrt{V(FS)} \quad 3.17$$

Onde:

n: número de variáveis aleatórias

Por fim, faz-se o cálculo do índice de confiabilidade ( $\beta$ ) pelo desvio padrão e média do fator de segurança, a fim de obter a probabilidade de ruptura.



## 4. METODOLOGIA

Neste capítulo é apresentada a metodologia utilizada para realizar a análise de estabilidade da seção do Aterro Sanitário de Brasília (ASB), através da abordagem probabilística.

### 4.1. ÁREA DE ESTUDO

O Aterro Sanitário de Brasília (ASB) foi inaugurado no dia 17 de janeiro de 2017, com capacidade para atender todo o Distrito Federal (Figura 4.1). A área total do aterro é de aproximadamente 760.000 m<sup>2</sup>, sendo destinada à disposição de rejeitos de aproximadamente 320.000 m<sup>2</sup>. Ao lado do ASB existe um terreno de aproximadamente 600.000 m<sup>2</sup>, para futura ampliação do aterro, que terá sua vida útil aumentada em aproximadamente 20 anos (SLU, 2020).

Além dos resíduos sólidos urbanos provenientes das coletas, o aterro recebe resíduos sólidos não convencionais provenientes de caixas de gordura residenciais, do gradeamento primário e desarenador das Estações de Tratamento de Esgoto da Caesb (ETE) e os animais mortos originários do serviço de remoção em vias públicas.



Figura 4.1 – Aterro Sanitário de Brasília (SLU, 2021)

A metodologia utilizada para a realização do presente estudo está representada no fluxograma a seguir (Figura 4.2).

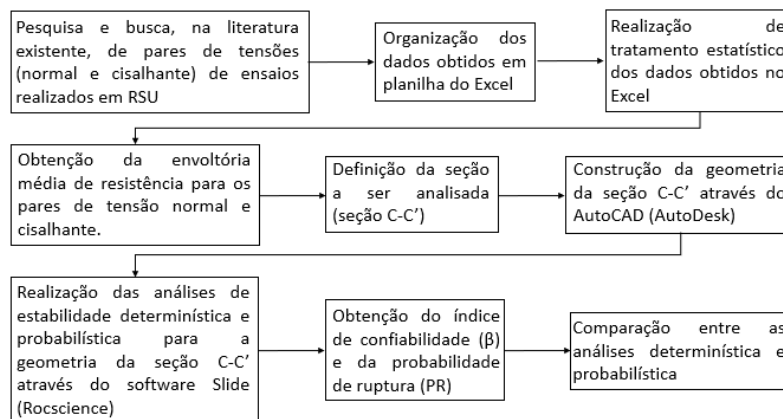


Figura 4.2 - Fluxograma da metodologia aplicada

Primeiramente, realizou-se uma busca na literatura com a finalidade de se obter dados disponíveis referentes a ensaios de cisalhamento direto, realizados em RSU. Além da compilação dos pares de tensões (normal e cisalhante) obtidos nos ensaios, a busca na literatura existente permitiu encontrar informações relevantes sobre os resíduos ensaiados, tais como o tipo de amostra de resíduo utilizada, a composição do resíduo amostrado, o tipo de ensaio realizado e os parâmetros de resistência obtidos, ângulo de atrito ( $\phi$ ) e intercepto coesivo ( $c$ ).

Após a organização dos dados em planilha Excel, realizou-se uma regressão linear nos pontos representativos dos pares de tensões normais e cisalhantes, com a finalidade de representar a envoltória média de resistência para aqueles pares. Percebeu-se que os pontos para tensão normal igual ou menor que 10 kPa estavam muito destoantes da regressão realizada, portanto esses foram excluídos da análise.

Com a envoltória média de resistência já representada pela regressão linear, realizou-se um tratamento estatístico nos dados, com a finalidade de se obter os valores do coeficiente de variação dos parâmetros de resistência, ângulo de atrito ( $\phi$ ) e intercepto coesivo ( $c$ ), e o coeficiente de correlação de Pearson ( $R$ ).

O coeficiente de variação (CV) é comumente entendido como a variabilidade dos dados em relação à média, ou seja, quanto menor esse coeficiente mais homogêneo é o conjunto de dados.

O coeficiente de variação (CV) é obtido através da relação apresentada pela equação 4.1.

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{x}} \cdot 100 \quad 4.1$$

Onde:

CV = Coeficiente de Variação

$\sigma$  = Desvio Padrão

$\bar{x}$  = Valor Médio

Dessa forma, os valores médios ( $\bar{x}$ ) foram obtidos através da equação da regressão linear, e o desvio padrão foi calculado seguindo as seguintes equações.

Primeiramente, calcula-se o Erro Médio Quadrado (MSE), de acordo com a equação 4.2.

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^N (S_i - S)^2}{N - 2} \quad 4.2$$

Onde:

MSE = Erro Médio Quadrado

N = Número de pares de tensão normal e tensão cisalhante

$S_i$  = Tensão cisalhante de ensaio

S = Tensão cisalhante média

Então, calcula-se a média das tensões normais, de acordo com a equação 4.3

$$\sigma_m = \frac{\sum_{i=1}^N \sigma_i}{N} \quad 4.3$$

Onde:

$\sigma_m$  = Média das tensões normais

$\sigma_i$  = Tensão normal

N = Número de pares de tensão normal e cisalhante

Em seguida, calcula-se a Variância dos parâmetros, de acordo com as equações a seguir.

Variância da tangente do ângulo de atrito (equação 4.4).

$$V[\text{tg}(\varphi)] = \frac{\sum_{i=1}^N (S_i - S)^2}{N - 2} \quad 4.4$$

Onde:

$V[\text{tg}(\varphi)]$  = Variância da tangente do ângulo de atrito

N = Número de pares de tensão normal e tensão cisalhante

$S_i$  = Tensão cisalhante de ensaio

S = Tensão cisalhante média

Variância do intercepto coesivo (equação 4.5)

$$V[c] = MSE \left[ \frac{1}{N} + \frac{\sigma_m}{\sum_{i=1}^N (\sigma_i - \sigma_m)^2} \right] \quad 4.5$$

Onde:

$V[c]$  = Variância do intercepto coesivo

MSE = Erro Médio Quadrado

$\sigma_m$  = Média das tensões normais

$\sigma_i$  = Tensão normal

N = Número de pares de tensão normal e cisalhante

Por fim, calcula-se o desvio padrão dos parâmetros de resistência de acordo com as equações a seguir.

Desvio padrão do intercepto coesivo (equação 4.6).

$$\sigma_c = \sqrt{Vc} \quad 4.6$$

Onde:

$\sigma_c$  = Desvio padrão do intercepto coesivo

Vc = Variância do intercepto coesivo

Desvio padrão do ângulo de atrito (equação 4.7)

$$\sigma_\varphi = \sqrt{V[\text{tg}(\varphi)]} \cdot (\cos\varphi)^2 \quad 4.7$$

De acordo com Fonseca e Martins (1996, *apud* Penasso, 2019), o coeficiente de variação é considerado baixo até 10%, médio entre 10% e 20% e grande quando for maior que 20%. Já o coeficiente de correlação de Pearson (R) tem importância na análise uma vez que expressa a capacidade da regressão linear realizada, no modelo “ $y = ax + b$ ”, representar a variação de “y”.

Para a obtenção do coeficiente de correlação calcula-se a raiz quadrada do  $R^2$  obtido na regressão linear realizada, como apresenta a equação 4.8.

$$R = \sqrt{R^2} \quad 4.8$$

A Tabela 3.12, apresentada anteriormente, representa uma possível relação entre o coeficiente de correlação de Pearson e sua capacidade de representar o comportamento de “y”.

Tabela 4.1 – Coeficiente de correlação de Pearson Bisquerra *et al.* (2004 *apud* Tomasetti, 2014)

<b>Coeficiente</b>	<b>Interpretação</b>
R = 1	Correlação Perfeita
0,8 < R < 1,0	Muito Alta
0,6 < R < 0,8	Alta
0,4 < R < 0,6	Moderada
0,2 < R < 0,4	Baixa
0,0 < R < 0,2	Muito Baixa
R = 0	Nula

A próxima etapa do presente trabalho consistiu na análise das seções do Aterro Sanitário de Brasília, à fim de definir qual seção seria utilizada para as posteriores análises de estabilidade. Para a realização dessa análise foi obtido, junto ao Serviço de Limpeza Urbana do Distrito Federal, o levantamento planialtimétrico mais recente do ASB, apresentado na Figura 4.3.

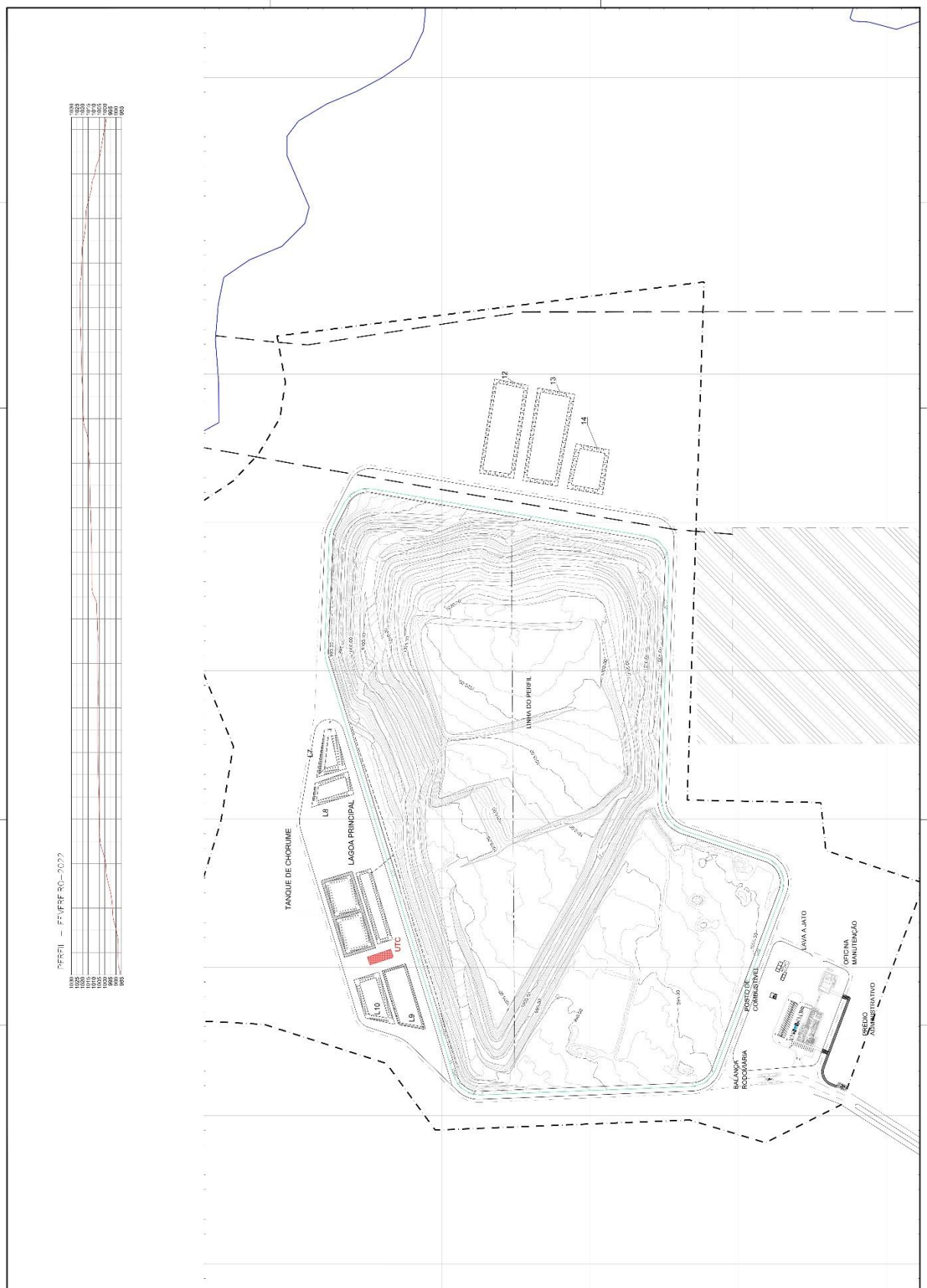


Figura 4.3 – Levantamento Planialtimétrico do Aterro Sanitário de Brasília (SLU, 2022)

As seções apresentadas contam com instrumentação apropriada para obtenção de dados, principalmente piezométricos, que foram representados nas análises por meio do parâmetro de poropressão ( $r_u$ ). Os resultados da monitoração dos níveis piezométricos e dos parâmetros de poropressão ( $r_u$ ) foram obtidos nos relatórios da empresa responsável pelo gerenciamento e operação do ASB. Os piezômetros considerados para adoção do  $r_u$  na seção C-C' foram os PZS11 (N), PZS12 (N), PZD15-A (N) e PZD15-B (N) indicados na Figura 4.4.

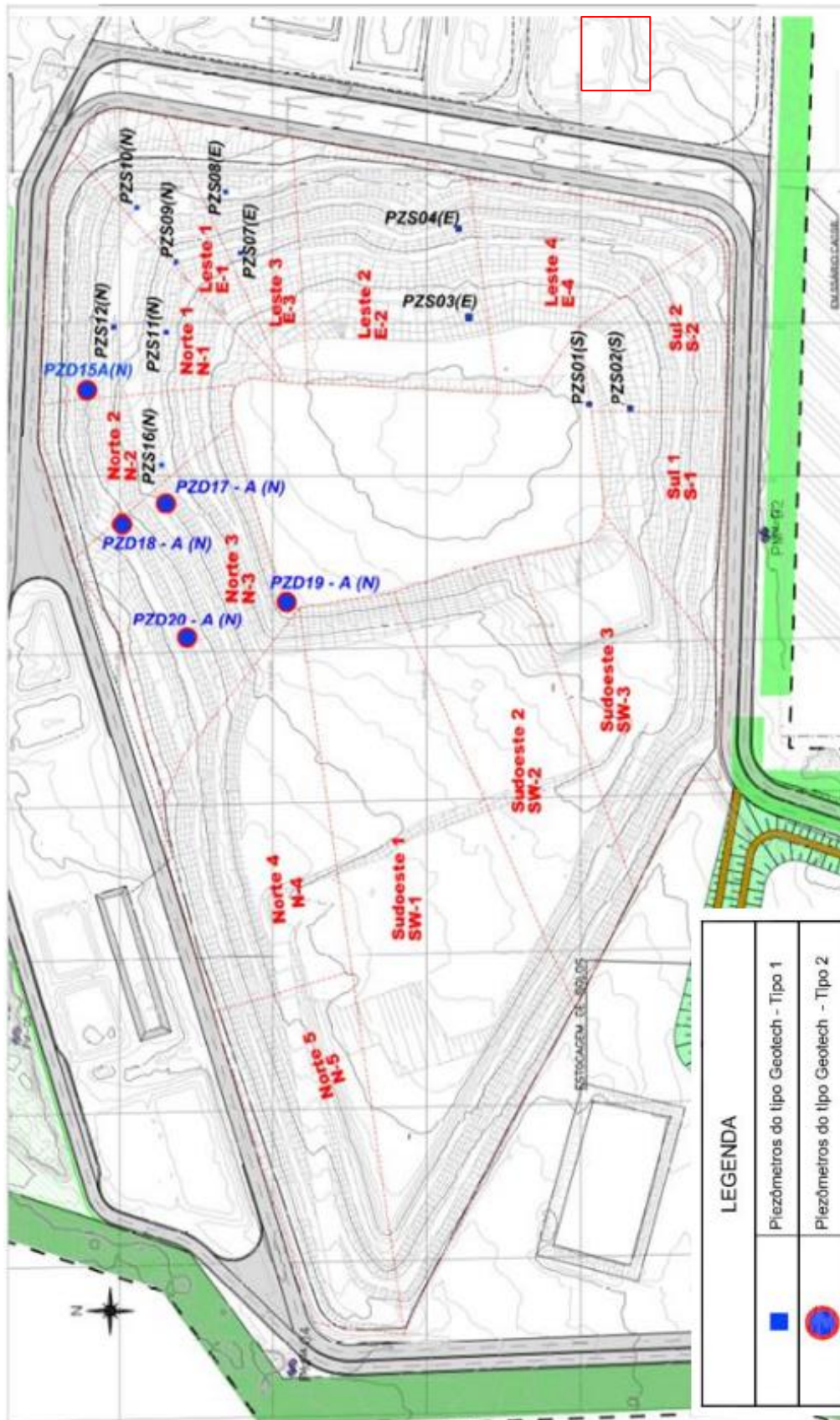


Figura 4.4 – Localização dos piezômetros, PZS12, PZS11 e PZD15-A em destaque (modificado de Geotech, 2022)

A Figura 4.5 apresenta a variação, ao longo do ano de 2021, do parâmetro de poropressão ( $r_u$ ) para os piezômetros considerados no estudo do  $r_u$  a ser adotado nas análises de estabilidade da seção C-C'.

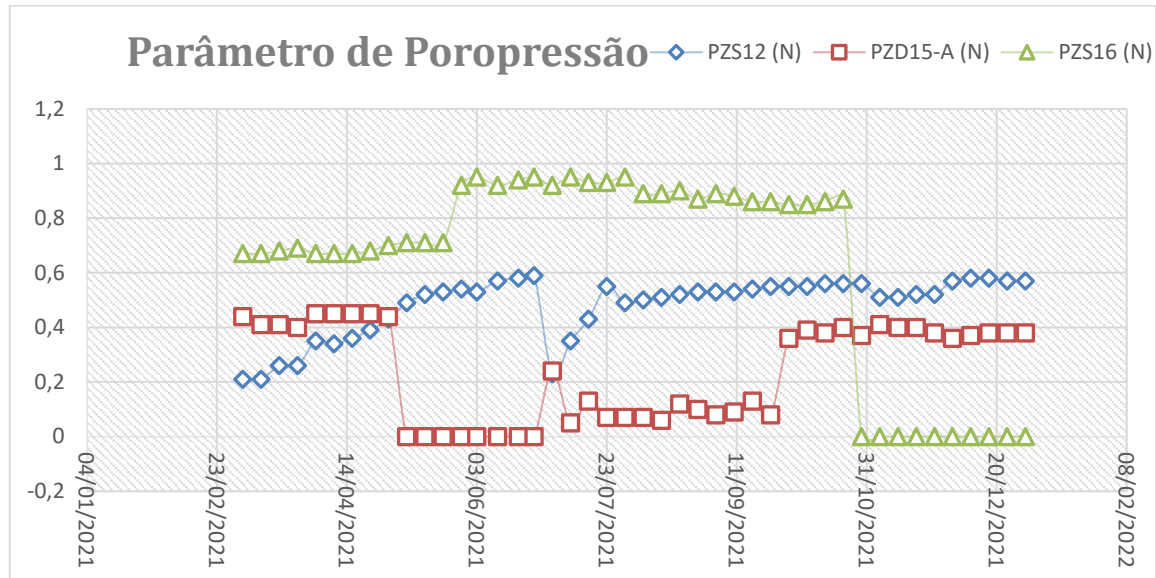


Figura 4.5 – Variação do parâmetro de poropressão ( $r_u$ ) ao longo do tempo

O parâmetro de poropressão ( $r_u$ ) foi adotado como 0,5 e 0,8, para valores mínimo e máximo, respectivamente. Apesar do piezômetro PZS16(N) não fazer parte da área de influência da seção C-C', foi adotado para a obtenção do  $r_u$  visto que apresentou os maiores valores durante o ano de 2021.

Já o valor de peso específico utilizado nas análises, foi obtido através de estudos realizados pela Adasa em parceria com instituições e empresas de consultoria, sendo adotado  $\gamma=9,6$  kN/m<sup>3</sup>. O acompanhamento da evolução da expansão e alteamento do ASB foi realizado por meio de levantamento planialtimétrico, disponibilizado pelo SLU.

Após análise detalhada das seções tanto por meio do levantamento planialtimétrico, com auxílio do *software* AutoCAD (Autodesk), quanto em relatórios geotécnicos do ASB, adotou-se a seção C-C' para a análise de estabilidade. As seções de análise de estabilidade do aterro são apresentadas na Figura 4.6.



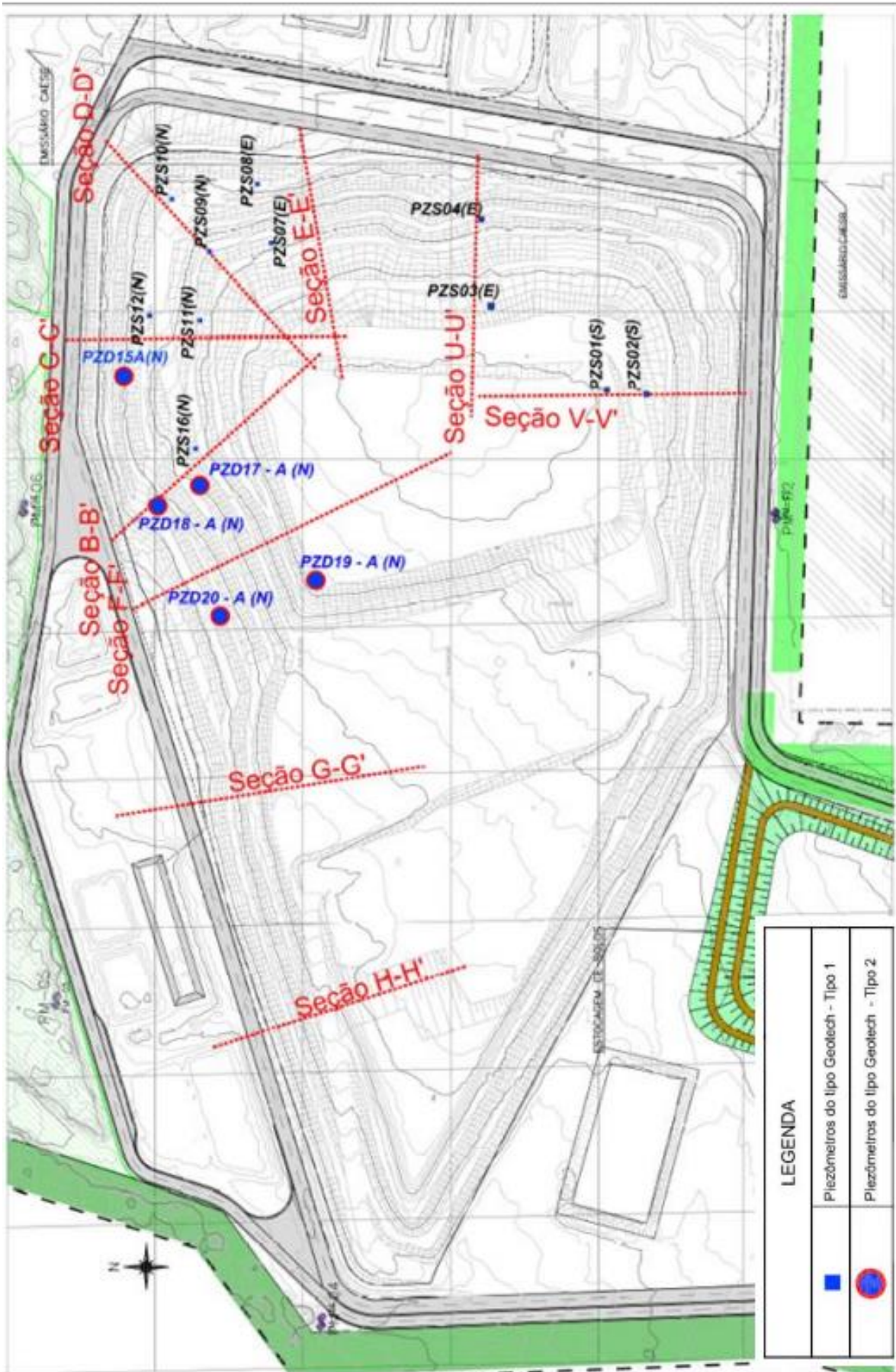


Figura 4.6 – Localização das seções de estabilidade do ASB (Geotech, 2022)

Então, com a seção C-C' adotada como objeto da análise de estabilidade, desenhou-se o perfil da seção no *software* Slide (Rocscience), com a finalidade de executar as análises bidimensionais de estabilidade de talude para aquela determinada geometria. Ressalta-se que foram realizadas 9 (nove) análises da seção em questão, sendo 1 (uma) com os parâmetros de resistência médios, obtidos através da regressão linear, e o parâmetro de poropressão ( $r_u$ ) igual a 0,8. as outras 8 variando-se os parâmetros de resistência de acordo com os valores de desvio padrão obtidos, tanto para ângulo de atrito ( $\varphi$ ) e intercepto coesivo ( $c$ ); fazendo-se 4 (quatro) análises para o parâmetro de poropressão ( $r_u$ ) igual a 0,5 e as outras 4 (quatro) para o  $r_u = 0,8$ . A Tabela 4.2 apresenta uma representação esquemática do método de estimativas pontuais para melhor entendimento da obtenção dos 4 (quatro) Fatores de Segurança distintos.

Tabela 4.2- Representação esquemática do método das estimativas pontuais (modificado de Penasso, 2019)

Análise	Valor de “c”	Valor de “ $\varphi$ ”	Fator de Segurança (FS)
1	$c + \sigma c$	$\varphi + \sigma \varphi$	FS++
2	$c + \sigma c$	$\varphi - \sigma \varphi$	FS+-
3	$c - \sigma c$	$\varphi + \sigma \varphi$	FS-+
4	$c - \sigma c$	$\varphi - \sigma \varphi$	FS--

Por fim, foram obtidos os Fatores de Segurança para as variadas análises realizadas. Para a análise determinística foram utilizados os parâmetros médios de resistência, obtidos através da regressão linear realizada. Então, deu-se prosseguimento no Método Probabilístico das Estimativas Pontuais, escolhido para ser utilizado na análise do presente trabalho, utilizando-se das equações 3.14 a 3.17, para obtenção do índice de confiabilidade ( $\beta$ ) e a probabilidade de ruptura.

Calcula-se primeiramente a média e a média dos quadrados e, em seguida, a variância do Fator de Segurança, para obter o desvio padrão, de acordo com equação 3.14 à equação 3.17.

$$E(FS) = \overline{FS} = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^{2n} FS_i \quad 3.14$$

$$E(FS^2) = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^{2n} FS_i^2 \quad 3.15$$

$$\sigma_{FS}^2 = V(FS) = E(FS^2) - [E(FS)]^2 \quad 3.16$$

$$\sigma_{FS} = \sqrt{V(FS)} \quad 3.17$$

Onde:

$E(FS)$  ou  $\overline{FS}$  = Valor médio dos fatores de segurança obtido

$E(FS^2)$  = Valor médio do quadrado dos fatores de segurança obtidos

$\sigma_{FS}$  = Desvio padrão do fator de segurança

$V(FS)$  = Variância do fator de segurança

$n$ : número de variáveis aleatórias

Por fim, faz-se o cálculo do índice de confiabilidade ( $\beta$ ) pelo desvio padrão e média do fator de segurança (equação 4.9), a fim de obter a probabilidade de ruptura.

$$\beta = \frac{\overline{FS} - 1}{\sigma_{FS}} \quad 4.9$$

Onde:

$\beta$  = Índice de confiabilidade

$\overline{FS}$  = Fator de segurança médio

$\sigma_{FS}$  = Desvio padrão do fator de segurança

Para obtenção da probabilidade de ruptura utiliza-se o gráfico a seguir (Figura 4.7).

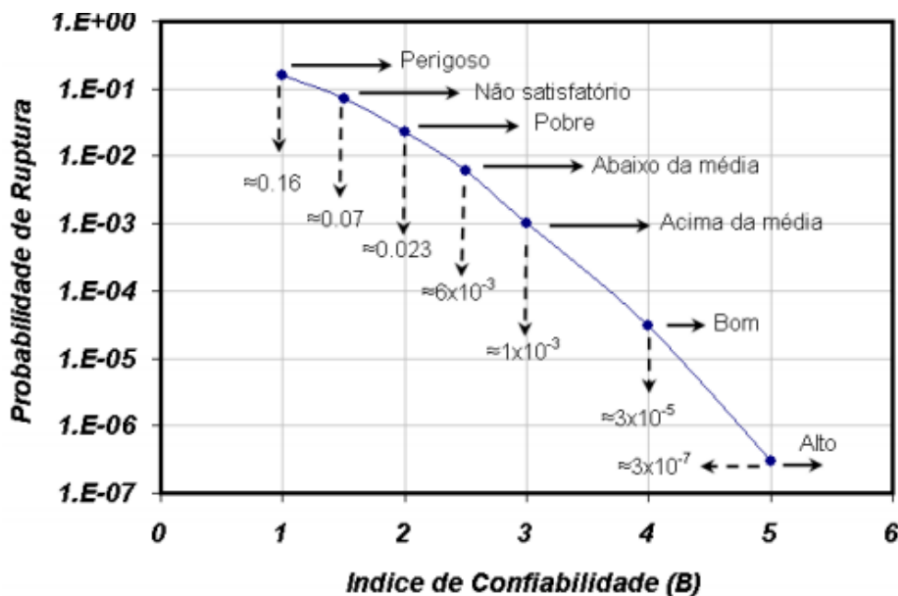


Figura 4.7 – Relação entre índice de confiabilidade e probabilidade de ruptura (US Army Corps of Engineers, 1995 *apud* FLORES, 2008)

Realizou-se uma comparação e uma discussão com relação aos resultados obtidos para as análises probabilísticas e para os valores obtidos pela abordagem determinística, com a finalidade de discutir se os valores obtidos para os fatores de segurança (FS) e probabilidade de ruptura dessas seções seriam adequados para a condição de estabilidade.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 PARES DE TENSÕES NORMAL E CISALHANTE

Nesta seção será apresentada a Tabela 5.1, utilizada para a compilação dos dados encontrados na literatura referentes aos resultados dos ensaios de cisalhamento direto realizados em RSU. Nela encontram-se os principais parâmetros de resistência para os RSU, bem como o tipo de resíduo amostrado e sua idade, o tipo de ensaio realizado e os pares de tensões, normal e cisalhante.

Tabela 5.1 – Resultados de ensaios de cisalhamento direto com RSU obtidos da literatura

Referência	País	Tipo de amostragem	Ensaio	Condição do RSU	Tensão Normal (kPa)	Tensão Cisalhante (kPa)
Abreu e Vilar (2017)	Brasil	AC, V, AE, AS	S1998 (DS)	WDW	50	28
					150	95
					250	148
			S1995 (DS)	WDW	50	34
					150	95
					250	168
			S2001 (DS)	WDW	50	39
					150	81
					250	151
			S2004 (DS)	WDW	50	34
					150	87
					250	143
S2007 (DS)	WDW	50	34			
		150	104			
		250	160			
S2011 (DS)	LDW	50	34			
		150	73			
		250	115			
Awad-Allah (2019)	China, Japão	V	JAP (DS)	JAP (DS)	8,2	14,5
					13,6	19
					19,1	27,8
			JAP (DS)	JAP (DS)	8,2	11,8
					13,6	16,4
					19,1	23,2
			CHA (DS)	7,5	10,5	

Bareither <i>et al.</i> (2012)	EUA	REA, AS	CHA (DS)		13,6	15,7	
					19,1	21,1	
			CHA (DS)	CHA (DS)		7,5	10,7
						13,6	17
					19,1	20,2	
			DS	Resíduo não degradado		16	32
						38	58
						57	70
						85	93
			DS	Resíduo não degradado <25mm		15	29
						26	42
						38	47
						49	63
					89	90	
			DS	Resíduo degradado em biorreator (2,9 anos)		21	39
						40	59
						60	79
						90	110
			DS	Pouco degradado		12	21
						25	38
	36	56					
	49	68					
		90	98				
DS	Degradado		12	29			
			24	45			
			36	60			
			48	72			
		90	99				
DS	Muito degradado		12	38			
			24	39			
			36	65			
			48	76			
		90	100				
DS	Resíduo de estação de transbordo		20	22			
			40	33			
			60	37			
			60	52			

					90	59
					90	71
					20	24
			DS	Degradação abiótica	40	41
					60	59
					90	74
					20	25
			DS	Biodegradação	40	34
					60	53
					90	78
					25	52
					50	90
			DS	A	100	148
					200	238
					300	334
Borgatto <i>et al.</i> (2014)	Alema nha	MBT			25	40
					50	80
			DS	B	100	132
					200	212
					300	318
					8	78
					8	84
Caicedo <i>et al.</i> (2002)	Colômbia	AS	DS		12	96
					54	106
					116	125
					15	13,6
			DS	1	30	17,5
					50	33
					15	6,2
Cardim (2008)	Brasil	COL	DS	2	30	16
					50	33,5
					15	13,6
			DS	3	30	20,9
					50	35
					48	43
					97	89
Cho <i>et al.</i> (2011)	China	SIN	(Peque na escala) DS	0% resíduo orgânico	145	125
					194	165
					290	241

Correa <i>et al.</i> (2015)	Brasil	SIN	(Larga escala)	40%	48	49
					97	73
					145	100
					194	148
					290	200
				58%	48	56
					97	66
					145	82
					194	115
					290	155
			80%	48	13	
				97	20	
				145	33	
				194	43	
				290	46	
			DS	0% resíduo orgânico	96	89
					192	172
					287	231
				40%	96	79
					192	149
287	178					
58%	96	73				
	192	100				
	287	150				
80%	96	36				
	192	50				
	287	89				
delocamento	PEAD 1%	150	113			
		200	137			
	2%	100	82			
		25	37			
	3%	75	58			
		150	96			
	4%	25	45			
		75	69			
	200	113				
	5%	100	65			
6%	25	24				
	50	45				

		100	83
	PEBD 1%	150	120
		200	153
		100	70
	2%	150	103
		200	133
		25	23
		50	36
	3%	75	50
		100	63
		150	90
		200	117
		25	30
	4%	100	70
		150	97
		200	127
		25	31
		50	51
	PEAD 1%	75	69
		100	82
		150	117
		200	147
	2%	150	137
		200	175
	3%	200	175
		25	60
DS 9%		50	79
desloca		75	93
mento	4%	100	106
		150	150
		200	168
		25	41
		50	60
		75	82
	5%	100	93
		150	123
		200	158
	PEBD 1%	50	44
		200	135



				2%	150	121				
					200	151				
				3%	150	111				
					200	145				
				4%	25	37				
					50	54				
					75	67				
					100	84				
					200	151				
				Dehdari <i>et al.</i> (2021)				Drenado	4	3
9	5									
13	8									
20	13									
Não drenado	4	3								
	9	7								
	13	10								
	20	16								
Feng <i>et al.</i> (2017)								profundidade de 0m	50	34
									100	58
				200	82					
				400	119					
				4m	50	41				
					100	65				
					200	92				
					400	143				
				11m	50	41				
					100	65				
					200	92				
					400	170				
				16m	50	34				
					100	58				
					200	87				
					400	180				
Hossain <i>et al.</i> (2009)				Razão entre raio do equipamento e comprimen	50	30				
				100	60					
				150	69					

			to da maior partícula 0,25		
				50	40
			0,5	100	44
				150	97
				100	100
<i>Jie et al.</i> (2013)	China	V		200	150
				300	177
				400	221
				20	24
			Fibra 0%	50	53
				100	91
				200	132
				20	24
			6%	50	44
				100	68
<i>Karimpour -Fard et al.</i> (2014)	Irã	AS		200	117
				20	20
			12%	50	35
				100	53
				200	98
				20	13
			100%	50	20
				100	24
			deslocame nto	50	33
<i>Martins</i> (2006)	Brasil	COL	horizontal	100	50
			10%	200	73
			peso	13,9	22
			específico	27,8	35
<i>Ojuri e Adegoke</i> (2015)	Nigéria	SIN	8,2kN/m <sup>3</sup>	41,7	48
				13,9	25
			11,1kN/m <sup>3</sup>	27,8	42
				41,7	60
				5	12
<i>Pandey et al.</i> (2017)	Índia	V		10	17
				15	24
				5	11

				10	17
				15	23
				5	11
				10	18
				15	27
				5	12
				10	19
				15	28
				50	60
	Finlândia,		Europa	100	97
	Pulati e			200	139
	Yukselen-			50	40
	Aksoy		EUA	100	99
	(2017)			200	115
	Itália,			50	60
	Turquia		Turquia	100	96
	e EUA			200	120
				176	160
			Umidade gravimétrica	266	190
			a 44%	538	342
				630	492
				176	150
			60%	266	190
				538	328
	Reddy et al. (2009a)	EUA	AS	774	362
				176	130
			80%	266	165
				538	302
				774	362
				176	140
			100%	266	175
				538	342
				774	390
				176	135
			Umidade gravimétrica	266	159
	Reddy et al. (2009b)	EUA	AS	538	350
			a 44%	774	490
				176	145
			60%	266	220

				538	390
				774	400
				176	175
			80%	266	255
				538	400
				774	420
				176	145
			100%	266	228
				538	378
				630	460
			(Grau de decomposição)	32	30
			Fresco	179	100
				271	278
				364	265
				32	40
			50%	179	140
				550	390
Reddy <i>et al.</i> (2011)	EUA	SIN		90	62
			53%	179	125
				271	172
				90	86
			70%	179	145
				271	200
				90	86
			86%	179	137
				271	200
				50	23
			Michigan	100	32
				200	63
Zekkos e Fei (2017)	EUA	AS		400	123
				50	23
			Texas	100	32
				200	59
				400	102
				2	13
Zekkos <i>et al.</i> (2010b)	EUA	AS	12%<20m	61	62
			m	187	142
				457	311
				2	13

	62%<20m	61	80
	m	187	150
		457	311
		2	13
	100%<20	61	80
	mm	187	150
		457	320

Notas: AC/AE/AS–Aterro Controlado/Experimental/Sanitário; COL–Coleta; MBT–RSU tratado; REA–Reator; SIN –Sintético; V–Vazadouro; DS-Cisalhamento direto; WDW-Resíduo bastante degradado; LDW-Resíduo pouco degradado; PEAD-Polietileno de alta densidade; PEBD-Polietileno de baixa densidade;

Os dados foram obtidos de 22 (vinte e duas) publicações, totalizando 314 (trezentos e quatorze) pares de tensão normal e cisalhante.

### 5.1. ENVOLTÓRIA MÉDIA DE RESISTÊNCIA

Para a obtenção da envoltória média de resistência, criou-se um gráfico no Excel apresentando uma nuvem de todos os pontos representantes dos pares de tensões (Figura 5.1). Assim que os dados foram plotados foi possível observar alguns valores muito discrepantes, principalmente para tensões normais menores que 10 kPa, dessa forma, os pares de tensões com valor de tensão normal menor que 10 kPa foram eliminados da análise.

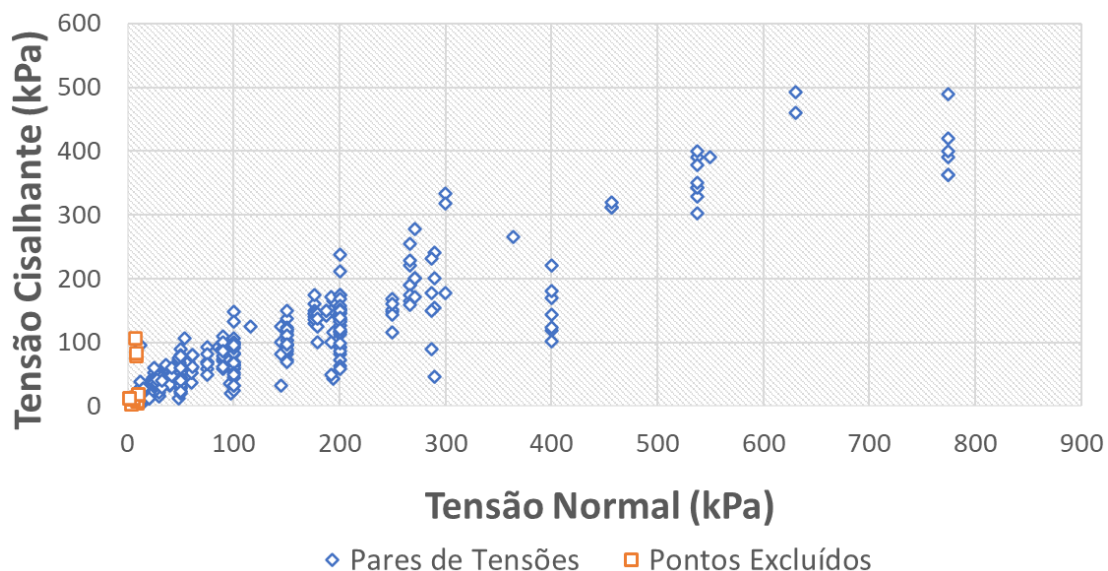


Figura 5.1- Nuvem de pontos de pares de tensão normal e tensão cisalhante.

Em seguida foi realizada a regressão linear para obtenção da envoltória média de resistência (Figura 5.2).

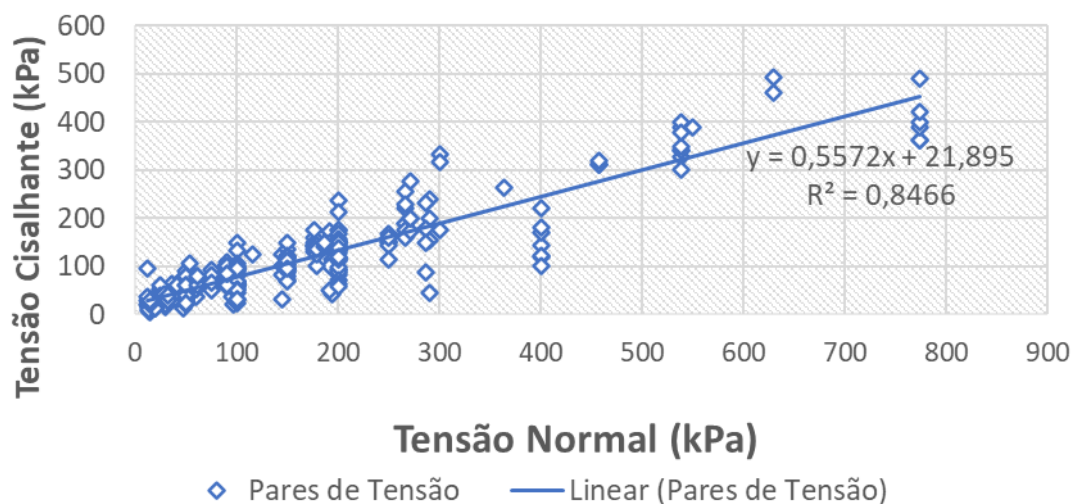


Figura 5.2 - Regressão Linear representativa da Envoltória Média de Resistência

Com relação a regressão linear foi possível observar que o  $R^2$  apresentou valor alto, indicando um bom ajuste dos pontos a regressão utilizada. Como supracitado, extraindo a raiz quadrado do valor de  $R^2$  obtém-se o coeficiente de correlação de Pearson (R), que para esse caso foi  $R = 0,92$ . De acordo com Bisquerria *et al.* (2004 *apud* Tomasetti, 2014), tem-se uma correlação muito alta para valores de  $0,8 < R < 1,0$ .

Através da equação obtida para a envoltória média encontrou-se coesão (c) de 21,9 kPa e ângulo de atrito ( $\varphi$ ) de 29,1°.

## 5.2 TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA

A Tabela 5.2 apresenta o valor médio, a variância, o desvio padrão e o coeficiente de variação para o intercepto coesivo (c) e o ângulo de atrito( $\varphi$ ), para os dados obtidos na literatura. Os cálculos estão apresentados no Apêndice A (p. 01).

Tabela 5.2 – Tratamento Estatístico dos dados obtidos na literatura

Parâmetro	Valor Médio	Variância (V)	Desvio Padrão ( $\sigma$ )	Coeficiente de Variação (CV)
c	<b>21,9kPa</b>	<b>8,23</b>	<b>2,87kPa</b>	<b>13,11%</b>
$\varphi$	<b>29,1°</b>	--	<b>0,6°</b>	<b>2,01%</b>

De acordo com Fonseca e Martins (1996, *apud* Penasso, 2019), o Coeficiente de Variação (CV) é considerado baixo para valores inferiores a 10%. Para o caso do tratamento realizado nos dados obtidos tem-se que os CV's são classificados como médio para o intercepto coesivo e baixo para o ângulo de atrito. Considerando a grande quantidade de dados

analisada, bem como a variabilidade da composição dos RSU a depender de sua fonte de geração, o tratamento foi considerado válido, mesmo para o valor de CV do intercepto coesivo, que ficou ligeiramente acima dos 10%.

### 5.3 ANÁLISE DETERMINÍSTICA

Para esse estudo foram adotados os valores médios obtidos através da regressão linear realizada nos dados da literatura. Dessa forma foram realizadas 2 (duas) análises variando-se apenas o parâmetro de poropressão ( $r_u$ ) de 0,5 para 0,8, apresentadas na Figura 5.3 e Figura 5.4.

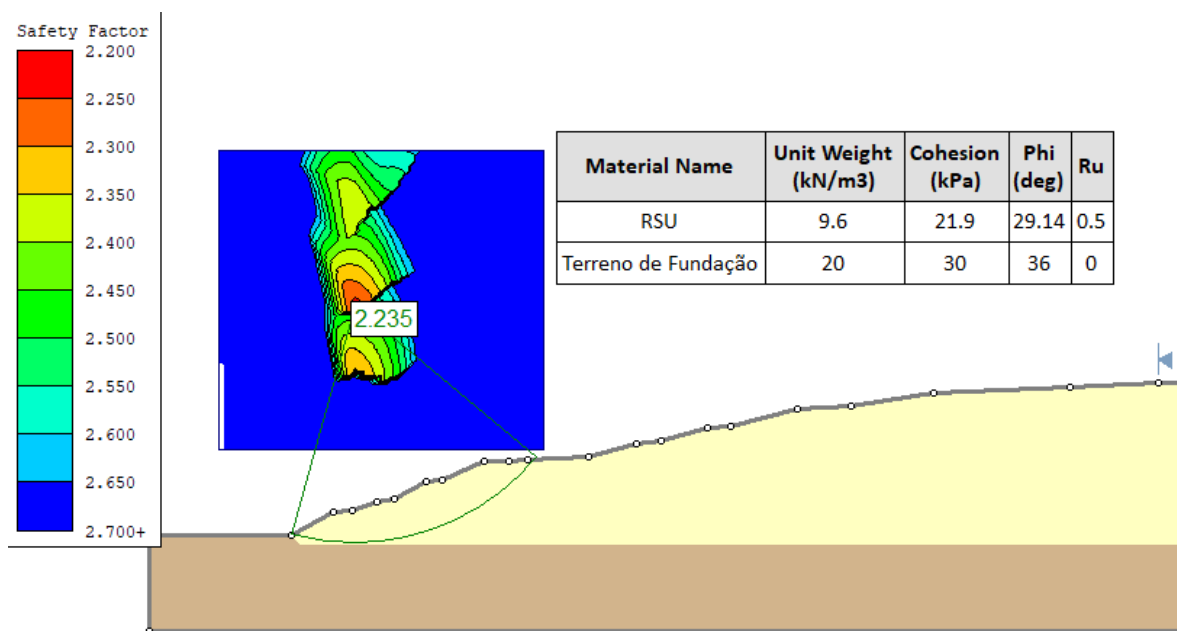


Figura 5.3 - Análise de estabilidade da seção C-C' com parâmetros de resistência médios para  $r_u=0,5$ .

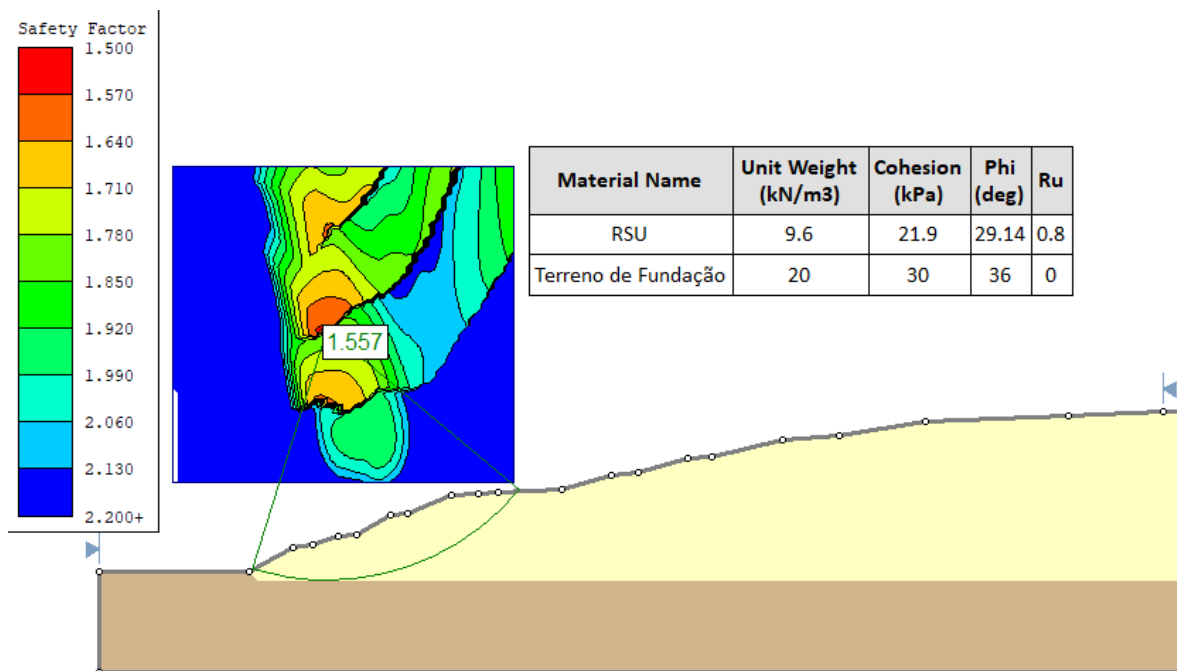


Figura 5.4 - Análise de estabilidade da seção C-C' com parâmetros de resistência médios para  $r_u=0,8$ .

Foram obtidos os Fatores de Segurança (FS) variando de 2,235 a 1,557 para os  $r_u$  variando entre 0,5 e 0,8, respectivamente. Para a condição crítica de poropressão, representada nas análises pelo parâmetro de poropressão  $r_u=0,8$ , a análise determinística da seção C-C' retornou um valor acima do FS para o fator de segurança FS = 1,557. De acordo com a norma ABNT NBR 11682 (2009), o fator de segurança mínimo para locais de segurança média, que é o caso do Aterro Sanitário de Brasília, é de FS=1,3, portanto o fator encontrado está acima da média.

#### 5.4 ANÁLISE PROBABILÍSTICA

Para esse estudo foram realizadas 8 (oito) análises, sendo 4 (quatro) para  $r_u=0,5$  e outras 4 (quatro) para  $r_u=0,8$ . Os parâmetros de resistência foram variados de acordo com a Tabela 5.3 e Tabela 5.4.



Tabela 5.3 – Variação dos parâmetros de resistência para  $r_u=0,5$

<b>Ru</b>	<b>Análise</b>	<b>Valor de c</b>	<b>Valor de <math>\phi</math></b>
<b>0,5</b>	1 (++)	24,77	29,73
	2 (+-)	24,77	28,55
	3 (-+)	19,03	29,73
	4 (--)	19,03	28,55

Tabela 5.4 – Variação dos parâmetros de resistência para  $r_u=0,8$

<b>Ru</b>	<b>Análise</b>	<b>Valor de c</b>	<b>Valor de <math>\phi</math></b>
<b>0,8</b>	1 (++)	24,77	29,73
	2 (+-)	24,77	28,55
	3 (-+)	19,03	29,73
	4 (--)	19,03	28,55

As análises para  $r_u=0,5$  são apresentadas na Figura 5.5, Figura 5.6, Figura 5.7 e Figura 5.8.

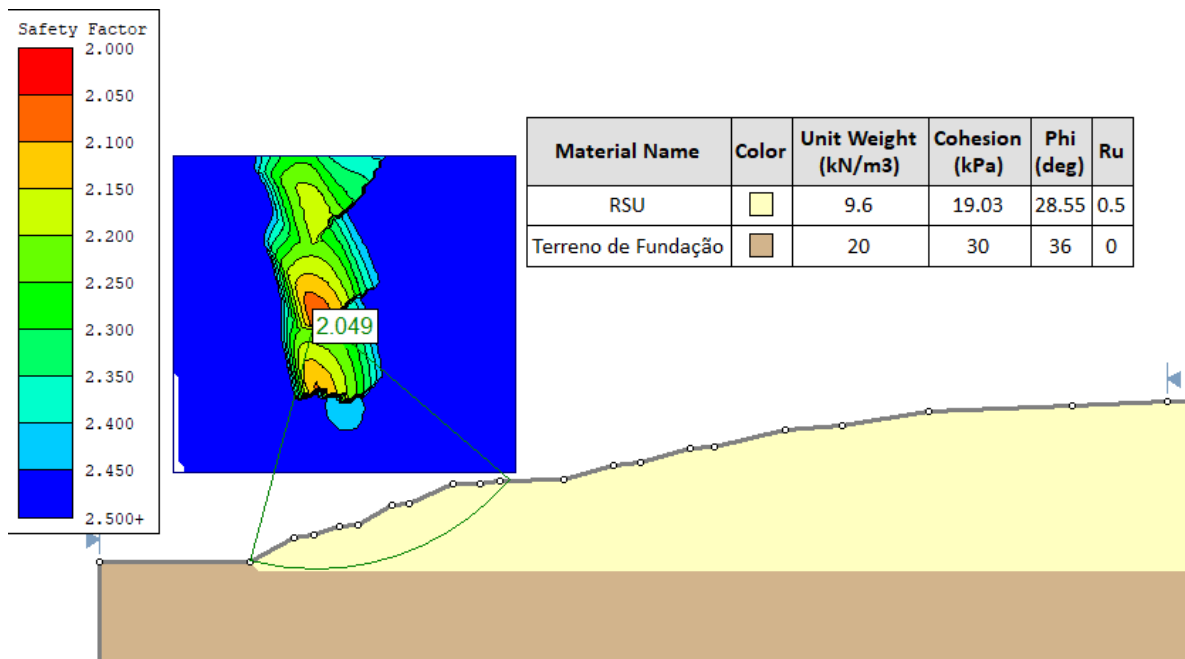


Figura 5.5 - Análise FS (--) para  $r_u=0,5$ .

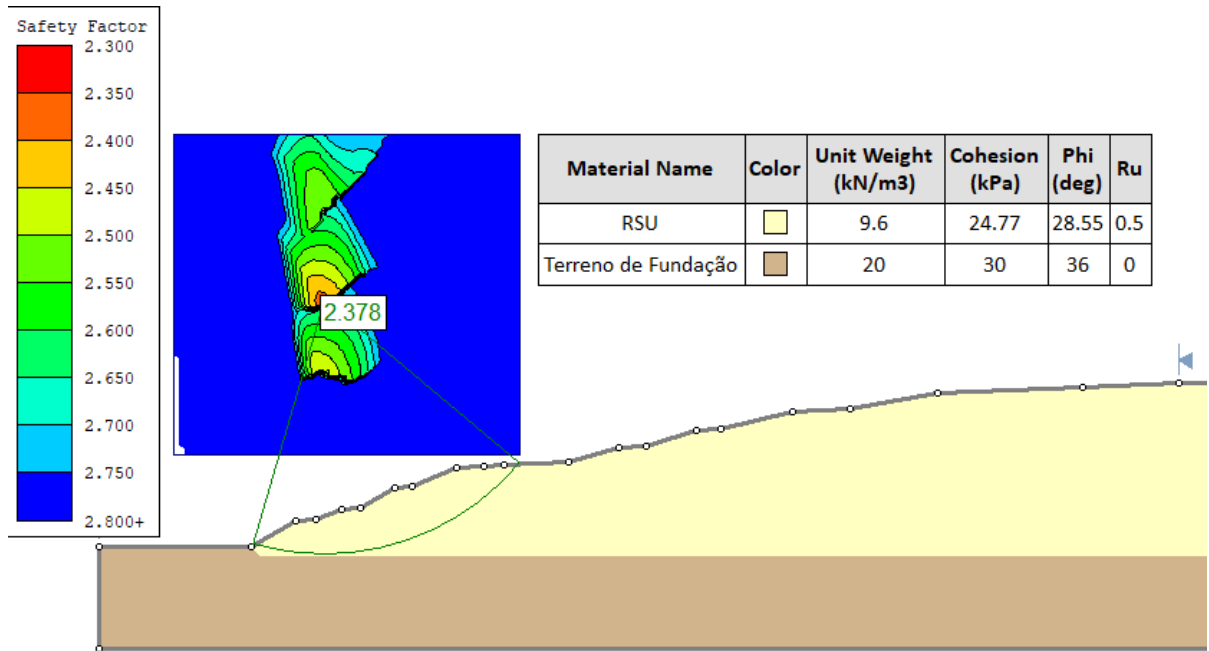


Figura 5.6 - Análise FS (+-) para  $r_u=0,5$ .

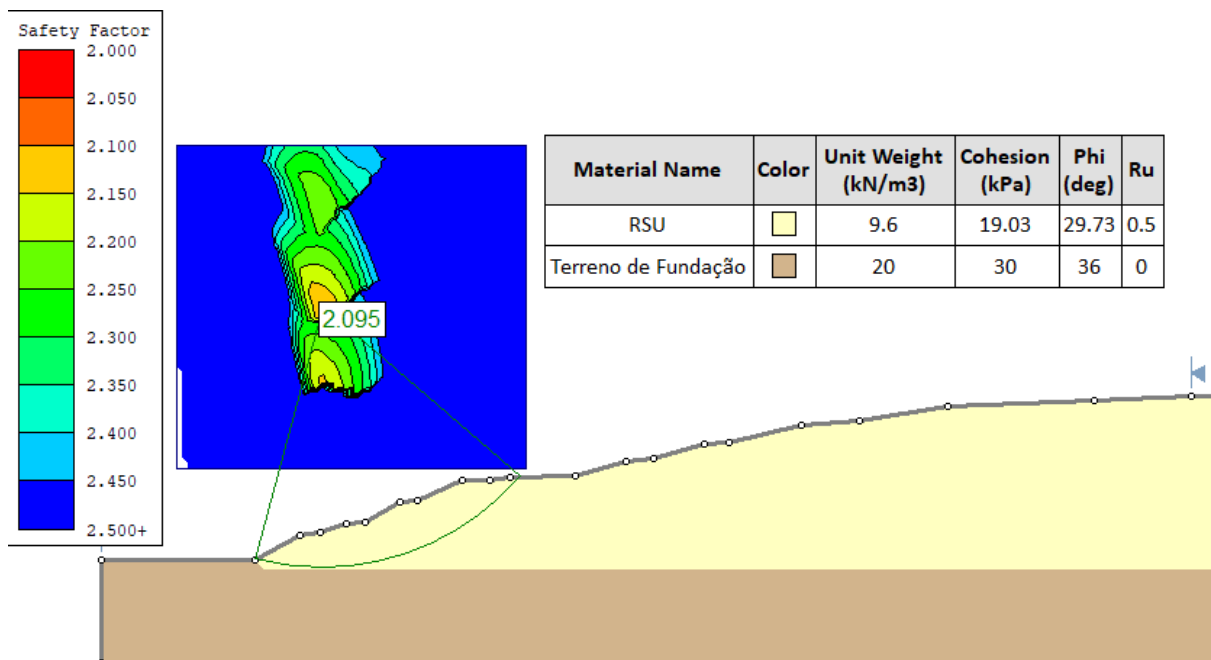


Figura 5.7 - Análise FS(++) para  $r_u=0,5$ .

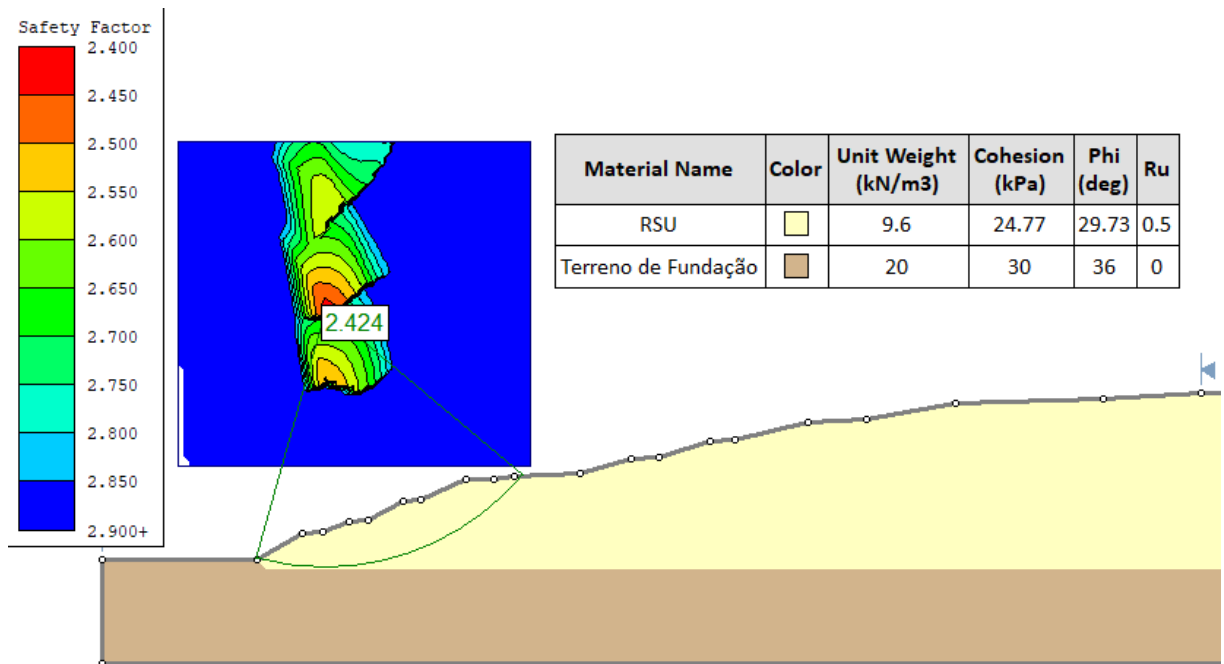


Figura 5.8 - Análise FS(++) para  $r_u=0,5$ .

As análises para  $r_u=0,8$  são apresentadas na Figura 5.9, Figura 5.10, Figura 5.11 e Figura 5.12.

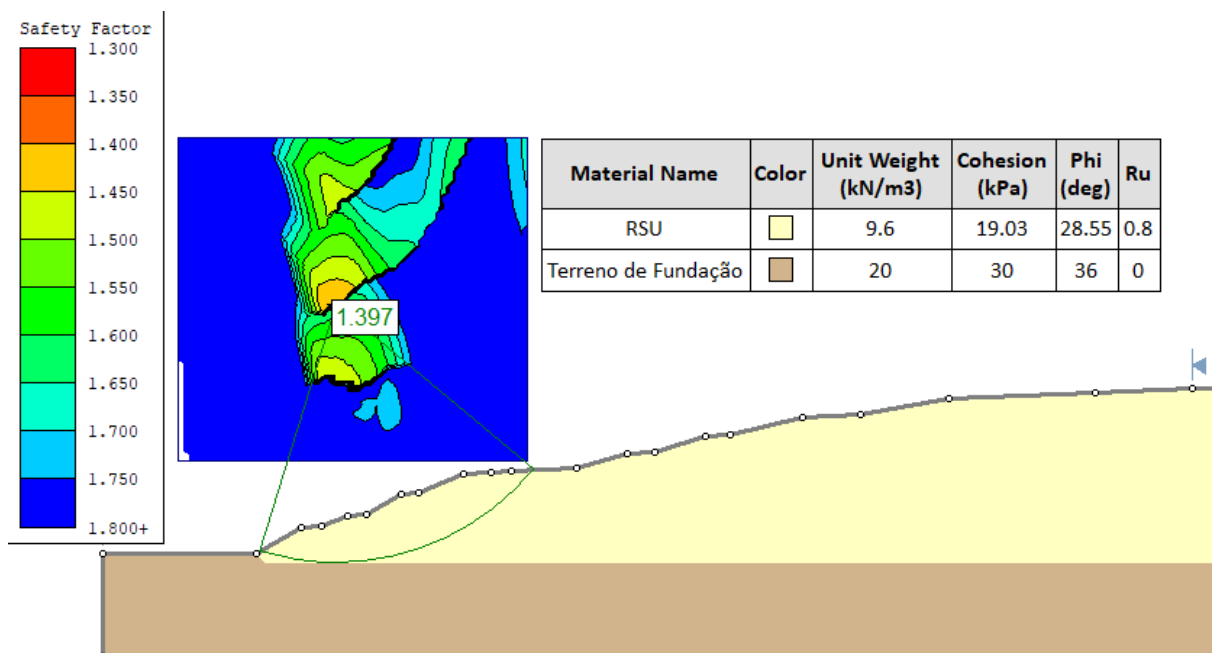


Figura 5.9 - Análise FS(--) para  $r_u=0,8$ .

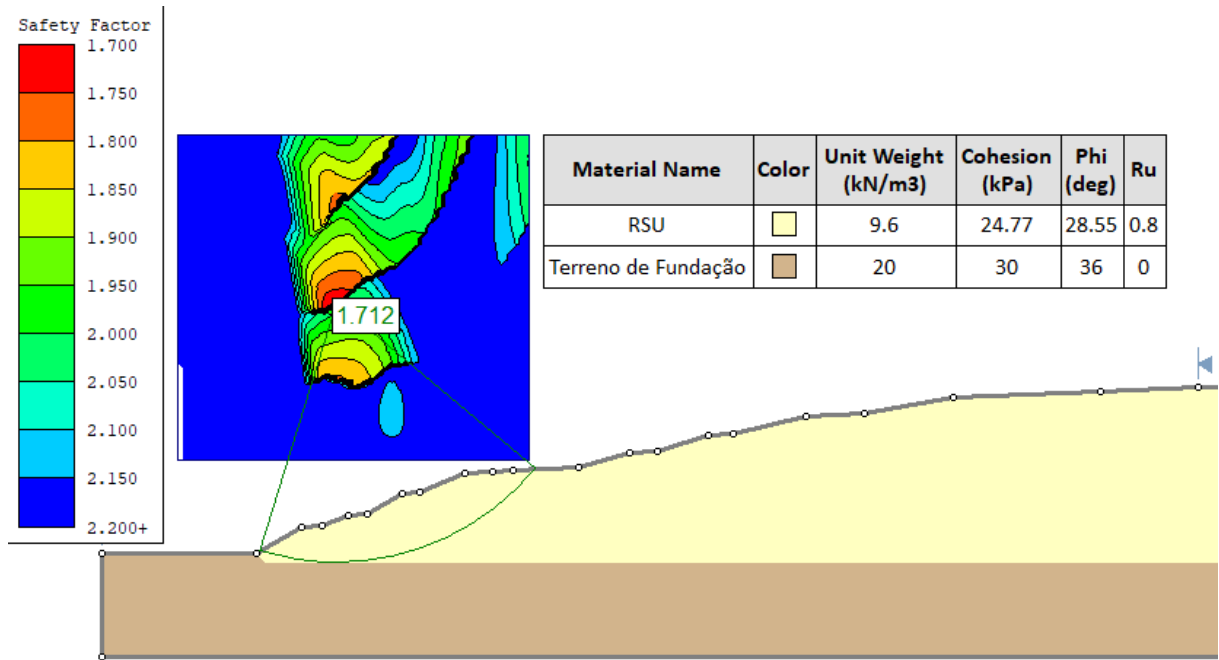


Figura 5.10 - Análise FS(+/-) para  $r_u=0,8$ .

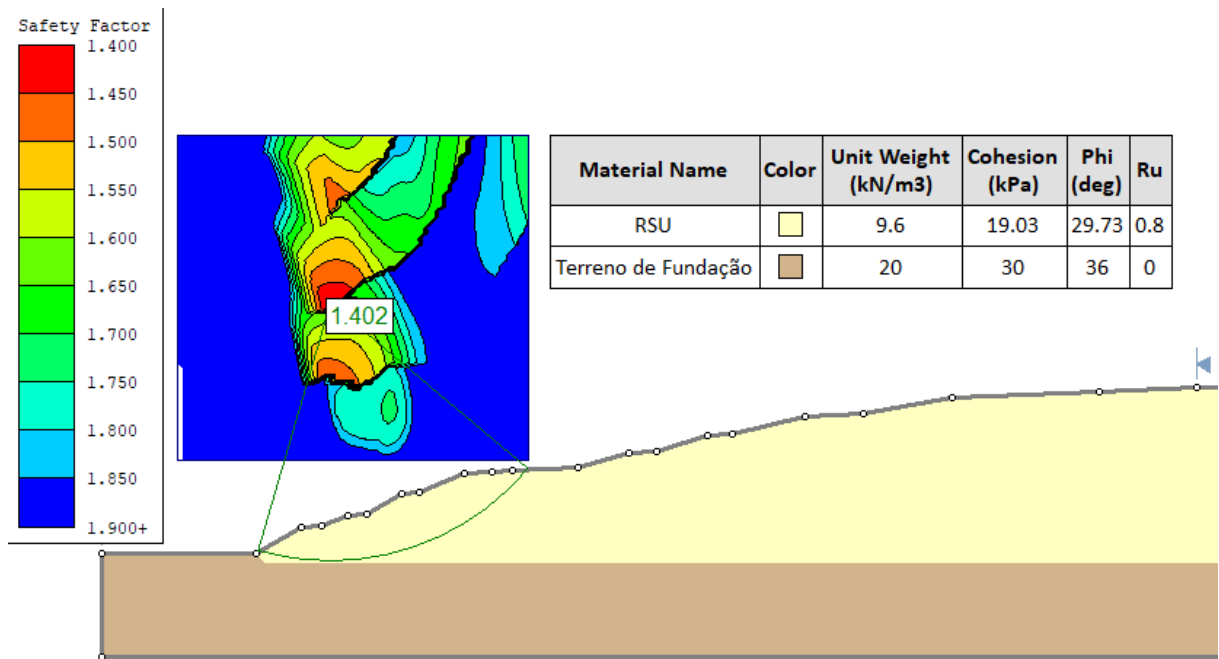


Figura 5.11 - Análise FS(-) para  $r_u=0,8$ .

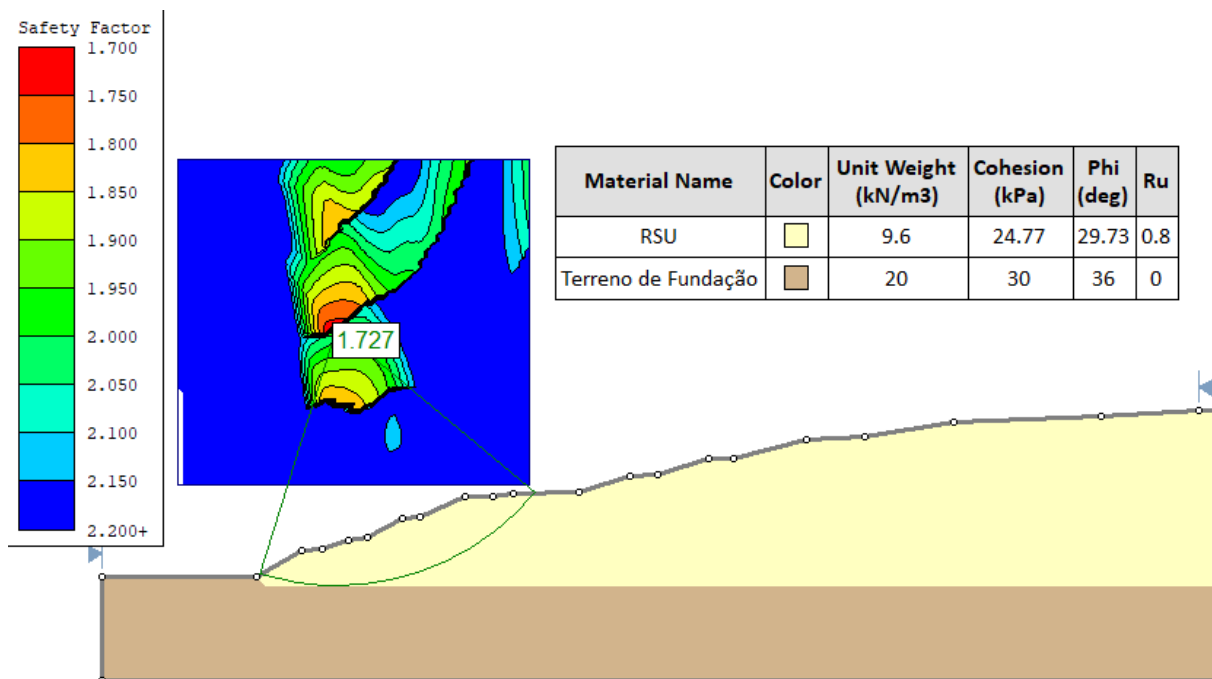


Figura 5.12 - Análise FS(++) para  $r_u=0,8$ .

Os valores de fator de segurança obtidos para as análises são apresentados na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Valores dos fatores de segurança (FS) obtidos nas análises realizadas

Ru	Análise	Valor de c	Valor de $\phi$	FS
0,8	1 (++)	24,77	29,73	1,734
	2 (+-)	24,77	28,55	1,719
	3 (-+)	19,03	29,73	1,413
	4 (--)	19,03	28,55	1,397
0,5	1 (++)	24,77	29,73	2,424
	2 (+-)	24,77	28,55	2,378
	3 (-+)	19,03	29,73	2,095
	4 (--)	19,03	28,55	2,049

A Tabela 5.6 apresenta o cálculo do  $\beta$  e da probabilidade de ruptura de acordo com os fatores de segurança médios analisados.

Tabela 5.6 – Cálculo do índice de confiabilidade ( $\beta$ ) e da probabilidade de ruptura (PR)

$r_u$	$FS^{\bar{}}$	$E(FS^2)^{\bar{}}$	$V(FS)$	$\sigma FS$	$\beta$	PR
0,5	2,237	5,029	0,028	0,166	7,44	$3 \times 10^{-7}$
0,8	1,566	2,477	0,026	0,161	3,51	$5 \times 10^{-4}$

Para a análise dos valores obtidos para probabilidade de ruptura foi utilizada a Tabela 3.11, que apresenta a probabilidade de ruptura em função do índice de confiabilidade.

Tabela 5.7 – Níveis de performance em termos de probabilidade de falha (Pf) e correspondentes índices de confiabilidade ( $\beta$ ) US Army Corps of Engineers (1995 *apud* Daciolo, 2020).

Nível de Performance Esperado	Índice de confiabilidade ( $\beta$ )	Probabilidade de Falha (Pf)
Alto	5,0	0,0000003
Bom	4,0	0,00003
Acima da Média	3,0	0,001
Abaixo da Média	2,5	0,006
Pobre	2,0	0,023
Insatisfatório	1,5	0,07
Perigoso	1,0	0,16

O valor da probabilidade de ruptura (PR) obtido para o  $r_u=0,5$  foi PR igual a  $3 \times 10^{-7}$ , portanto, espera-se um nível de performance alto do aterro. Com a variação do parâmetro de poropressão ( $r_u$ ) de 0,5 para 0,8, o valor obtido para a probabilidade de ruptura (PR) apresentou um aumento para  $5 \times 10^{-4}$ , esperando-se um nível de performance acima da média. Sendo assim, para a análise probabilística realizada, o nível de performance do Aterro Sanitário de Brasília continuaria acima da média mesmo para níveis altos de poropressão no maciço de resíduos.

Os parâmetros médios de resistência encontrados no presente trabalho foram plotados no diagrama (Figura 5.13) apresentado por Sanchez-Alciturri *et al.* (1993, *apud* Cardim, 2008). Verificou-se que os parâmetros médios utilizados nas análises são ligeiramente mais altos que o previsto para elaboração de projetos, porém se encontram na área de resultados de laboratório. Desse modo, é importante ressaltar que não é recomendada a utilização desses

parâmetros para o projeto e dimensionamento de um aterro sanitário, uma vez que esse seria dimensionado contra a segurança.

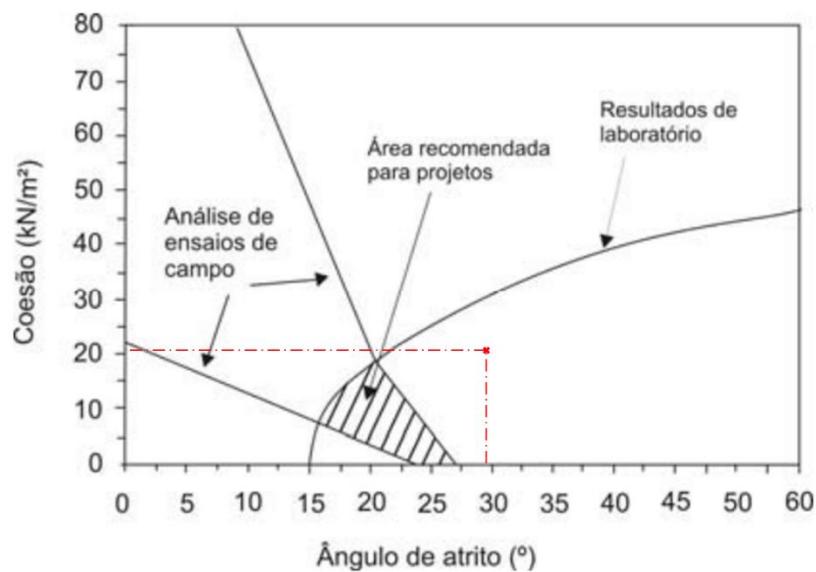


Figura 5.13 - Diagrama para obtenção de parâmetros de resistência para projetos de aterros sanitários de RSU (Sanchez-Alciturri *et al.* 1993)

Ainda que na análise probabilística, para a condição crítica de poropressão, a probabilidade de ruptura encontrada indicaria um nível de performance esperado acima da média, foi observado um fator de segurança  $FS = 1,397$  com a variação dos parâmetros de resistência. Esse valor está muito próximo do valor mínimo recomendado de  $FS = 1,3$ .

Em termos gerais, tanto a análise determinística quanto a probabilística indicaram que, mesmo para condição crítica de poropressão, o comportamento esperado para a seção C-C' estaria acima da média, em termos de estabilidade. Porém, enquanto a análise determinística retornou um valor de FS único, a análise probabilística retornou um valor médio após ter considerado uma série de valores possíveis para o FS.

## 5.5 POROPRESSÃO

Com a variação da condição de poropressão nas análises determinística e probabilística, representada pela variação do parâmetro de poropressão  $r_u$ , observou-se a importância desse fator para a condição de estabilidade do maciço.

Na análise determinística o fator de segurança (FS) apresentou redução de aproximadamente 30% com o aumento do  $r_u$  de 0,5 para 0,8.

Na análise probabilística observou-se que o FS obtido para o  $r_u = 0,5$  (FS = 2,049), com os menores parâmetros de resistência, foi aproximadamente 15% maior que o FS obtido para o  $r_u = 0,8$  (FS = 1,734), utilizando-se os maiores parâmetros de resistência.

Sendo assim, fica evidente a importância de se dimensionar e operar o Aterro Sanitário de Brasília de forma a manter a poropressão sempre controlada, de preferência abaixo de  $r_u = 0,6$ , como indica a carta de risco elaborada por Carmo (2021), para a seção C-C' do Aterro Sanitário de Brasília (Figura 5.14).

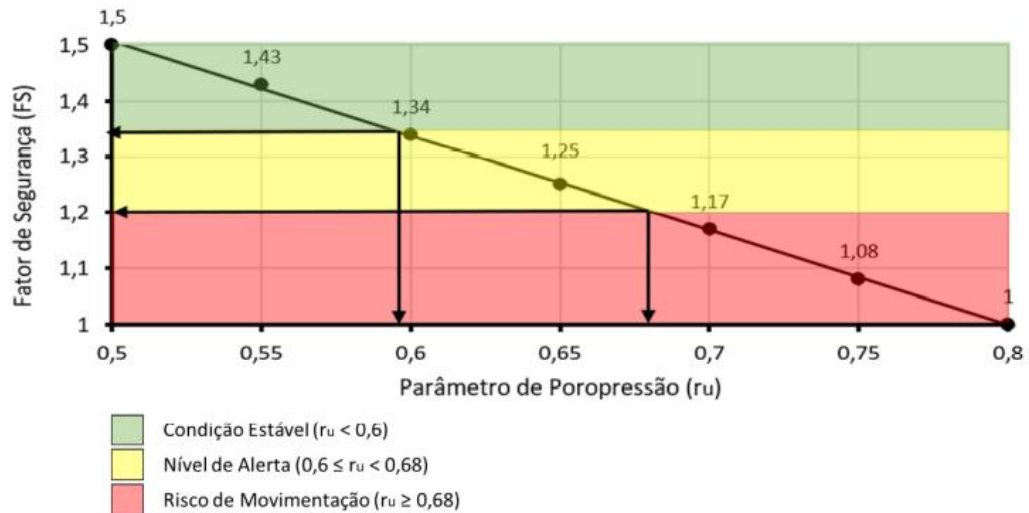


Figura 5.14 – Carta de risco para a seção C-C' (Carmo, 2021).

## 5.6 VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA

Para a realização da análise probabilística de estabilidade, por meio do Método das Estimativas Pontuais (Rosenbluth, 1975), foi necessário variar os parâmetros de resistência analisados, somando-se ou subtraindo-se desses seus respectivos desvios padrão.

Ao realizar essa variação, observou-se que a coesão apresentava maior parcela de importância na determinação da resistência ao cisalhamento, fator que também foi observado por Carmo (2021), ao verificar que para uma variação de  $10^\circ$  no ângulo de atrito, foi necessária uma diferença de aproximadamente 4 kPa apenas, para manter o fator de segurança inalterado, como apresenta a (Figura 5.15).



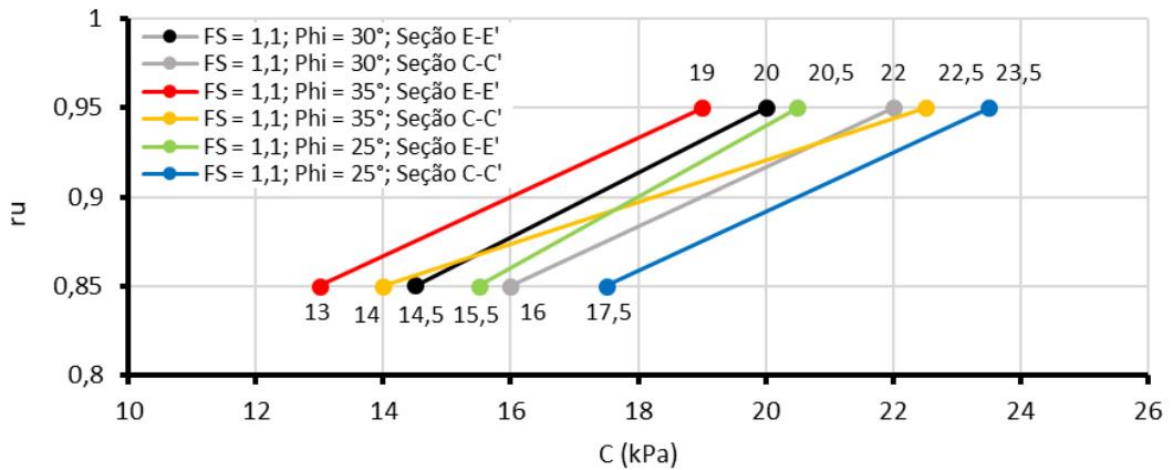


Figura 5.15 – Relação entre a variação dos parâmetros de resistência e o fator de segurança (Carmo, 2021).

Para o presente trabalho, a prevalência da coesão ao ângulo de atrito na determinação da resistência ao cisalhamento ficou evidenciada com a variação desses parâmetros. Mantendo-se o ângulo de atrito invariável, e realizando a variação de 5,74 kPa, observou-se uma redução de aproximadamente 19% no fator de segurança, para  $r_u = 0,8$ . Porém, mantendo a coesão invariável, e aplicando uma variação de  $1,18^\circ$  no ângulo de atrito, observou-se uma redução de menos 1% no fator de segurança, para  $r_u = 0,8$ .

Sendo assim, o parâmetro de resistência que rege o comportamento da resistência ao cisalhamento para RSU no presente trabalho é a coesão.

## 6. CONCLUSÃO

No presente Projeto Final discutiu-se a importância do conhecimento das variáveis de relevância para a estabilidade geral de aterros sanitários, sob a ótica de métodos de análise determinística e probabilística, com enfoque na estabilidade de taludes dessas obras de geotecnia.

A busca por valores de tensões normais e cisalhantes na literatura, obtidas por meio de ensaios de cisalhamento direto e simples, permitiu observar que mesmo com grandes diferenças de composição, local de geração, idade e condição dos Resíduos Sólidos Urbanos ensaiados, a distância desses dados de sua média não apresentou grande variação.

O tratamento estatístico avaliou que a adoção de uma envoltória média de resistência à partir de uma regressão linear dos dados obtidos representou de forma satisfatória o comportamento dos parâmetros de resistência para os variados RSU.

Ainda assim, é importante ressaltar que não foi possível encontrar informações significativas sobre a idade dos resíduos ensaiados, e que muitas das amostras eram resultantes de resíduos novos e poucos degradados, como amostras de coletas de resíduos e vazadouros. Dessa forma, os parâmetros médios de resistência ( $c$ ,  $\phi$ ) obtidos podem ser considerados para os primeiros anos de operação do aterro, sendo necessário a avaliação da redução desses parâmetros ao longo dos anos de vida útil do aterro, aproximadamente 30 anos.

Verificou-se, também, que a influência do parâmetro de poropressão ( $r_u$ ) na estabilidade dos taludes é bastante grande, uma vez que a alteração desse parâmetro nas análises, de 0,5 para 0,8, causou alterações significativas nos valores de Fator de Segurança obtidos. Esse ponto ressalta a importância da manutenção de um sistema de drenagem eficiente, à fim de evitar qualquer acúmulo de lixiviado no maciço de resíduos.

Por fim, com relação a comparação entre as análises por método determinístico e probabilístico, pode-se concluir que os valores de FS obtidos na análise determinística e a média dos valores de FS ( $\overline{FS}$ ) obtidos na análise probabilística ficaram bastante próximos, uma vez que a Variância (V) e Correlação (R) dos dados estavam muito boas. Ainda assim, enquanto a análise determinística apresentou valores de FS entre 2,235 e 1,557 para os diferentes valores de  $r_u$ , as análises probabilísticas apresentaram valores mínimos de FS entre 2,049 e 1,397, sendo o menor valor para o  $r_u=0,8$ . Essa consideração das incertezas, e incorporação dessas nas análises, permite um melhor entendimento das condições de estabilidade do aterro, que mesmo com parâmetros médios de resistência relativamente altos,

apresentou valores de FS abaixo de 1,5 para algumas análises considerando o Desvio Padrão ( $\sigma$ ) e Variância (V) dos parâmetros.

### **6.1. SUGESTÃO PARA PESQUISAS FUTURAS**

Como sugestão para pesquisas futuras, seria interessante a variação de outros parâmetros que tenham influência nas condições de estabilidade de aterros sanitários, e consideração desses parâmetros no método de análise probabilística. A variabilidade dos parâmetros de resistência dos RSU poderia ser analisada ao longo do tempo, encontrando-se dados com diferentes idades de resíduos ensaiados. Podem ser analisados outros tipos de ruptura de aterros, como ruptura na camada de base, ruptura global, interação entre a geomembrana e os resíduos, interação entre as camadas de cobertura e os resíduos, dentre outras possibilidades.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABLP – Associação Brasileira de Resíduos Sólidos e Limpeza Pública (2019). Revista Limpeza Pública. Deslizamentos em aterros sanitários. São Paulo/SP, 2019.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas ABNT NBR 8.419, 1992. NBR 8.419: Apresentação de projetos de Aterros Sanitários de Resíduos Sólidos Urbanos.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas ABNT NBR 10.004, 2004. NBR 10.004: Classificação de Resíduos Sólidos.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR 11.682, 2009. NBR 11.682: Estabilidade de Encostas. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- Abrelpe - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2020. <Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama/>>. Acesso em: 16 out, 2021.
- ABREU, A. E. S.; VILAR, O. M. (2017). Influence of composition and degradation on the shear strength of municipal solid waste. Waste Management, <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2017.05.038>.
- AWAD-ALLAH, M. F. (2019). Shear Strength Characteristics of Fibrous Solid Waste Materials in Landfill Sites. Department of Civil Engineering, National Research Center, Cairo, Egypt.
- BABU, G. L. S.; REDDY, K. R.; SRIVASTAVA, A. (2014). Influence of spatially variable geotechnical properties of MSW on stability of landfill slopes. J. Hazard. Toxic Radioactive Waste, 10.1061/(ASCE)HZ.2153-5515.0000177, 27–37.
- BAREITHER, C. A.; BENSON, C. H.; EDIL, T. B. (2012). Effects of Waste Composition and Decomposition on the Shear Strength of Municipal Solid Waste. *In: Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 138:1161-1174.
- BATISTA, H. P. (2010). Desenvolvimento de Diretrizes para Monitoramento Geotécnico e Plano de Contingência/Emergência em Aterros Sanitários. 160f.: Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- BEAVEN, R. P.; POWRIE, W.; ZARDAVA, K. (2008). Hydraulic properties of MSW. *In: International Symposium on Waste Mechanics. Geotechnical Characterization, Field Measurement, and Laboratory Testing of Municipal Solid Waste, Chapter 1.*
- BLIGHT, G. (2008). “Slope failures in municipal solid waste dumps and landfills: A review.” *Waste Manage. Res.*, 26(5), 448–463.

- BORGATTO, A. V. A. (2010). Estudo das propriedades geomecânicas de resíduos sólidos urbanos pré-tratados. Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil.
- BOSCOV, Maria Eugênia Gimenez. Geotecnia Ambiental. [S.l: s.n.], 2008.
- BRAJA, M. D. (2006). Fundamentos de Engenharia Geotécnica. Tradução da 6ª edição norte-americana. California State University, Sacramento. 561p.
- BRASIL. Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasil, 03 ago. 2010.
- CAICEDO, B.; SOLER, N.; GIRADO, E.; YAMIN, L. E.; CORONADO, O. (2002). Geomechanical properties of municipal solid waste in Dona Juana sanitary landfill.
- CAMPIL, T. O.; BOSCOV, M. E. G. (2011). Determination of Shear Strength Parameters of Municipal Solid Waste (MSW) by Means of Static Plate Load Tests. Geo-Frontiers, ASCE, 2011.
- CARDIM, R. D. (2008). Estudo da Resistência de Resíduos Sólidos Urbanos por Meio de Ensaio 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.
- CARMO, T.K. (2020). Avaliação de Monitoramento Geotécnico de Aterro de Resíduos Sólidos Urbanos. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 100 p.
- CARVALHO, M. F. (1999). Comportamento mecânico de resíduos sólidos urbanos. Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Doutor em Geotecnia.
- CHO, Y. M., KO, J. H., CHI, L.; TOWNSEND, T. G. (2009). Food waste impact on municipal solid waste angle of internal friction. doi: 10.1016/j.wasman.2010.07.018.
- CORREA, C.; JUCÁ, J. F.; MOTTA, E. (2015). Análise da influência do plástico mole na resistência ao cisalhamento de resíduos sólidos urbanos. DOI: 10.1590/S1413-41522015020000125006.
- COSTA, C.M.C. (2015). Avaliação da fissuração por ressecamento em camadas de cobertura de aterros sanitários utilizando materiais alternativos. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-108/15, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília-DF, 163 p.

- DACIOLO, L. V. P. (2020). Parâmetros de resistência de RSU: Abordagem probabilística para análises de estabilidade de taludes de aterros de resíduos. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para o título de Mestre em Engenharia Civil.
- DEHDARI, V.; AJDARI, M.; ROSTAMI, A. (2021). Experimental study on shear strength parameters of municipal solid waste employing a large direct shear apparatus. *Geomechanics and Geoengineering*, DOI: 10.1080/17486025.2021.1928763.
- EDINCLILER, A.; BENSON, C. H.; EDIL, T. B. (1996). Shear strength of municipal solid waste interim report – year 1. Environmental Geotechnics Program, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Wisconsin – Madison.
- EID, B. H. T., STARK, T. D., EVANS, W. D., and SHERRY, P. E. (2000<sup>1</sup>). “Municipal solid waste slope failure. I: Waste and foundation soil properties.” *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 10.1061/(ASCE)1090-0241(2000)126: 5(397), 397–407.
- EID, B. H. T., STARK, T. D., EVANS, W. D., and SHERRY, P. E. (2000<sup>2</sup>). “Municipal solid waste slope failure. II: Stability analyses.” *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 10.1061/(ASCE)1090-0241(2000)126:5(397), 408–419
- EL- FADEL, M.; KHOURY, R. (2000). Modeling Settlement in MSW Landfills: a Critical Review. *In: Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 30:3, pgs. 327-361.
- FENG, S.; GAO, K.; CHEN, Y.; LI, Y.; ZHANG, L. M., CHEN, H. X. (2016). Geotechnical properties of municipal solid waste at Laogang Landfill, China. *Waste Management*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2016.09.016>.
- FILHO, R. J. A. T.; ANDRADE, V. C. (2015). Comparação entre análises determinísticas e probabilísticas de estabilidade de taludes em barragens: estudo de caso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba.
- FLORES, E.A.F. (2008). Análises Probabilísticas da Estabilidade de Taludes considerando a Variabilidade Espacial do Solo. Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 170 p.
- GABR, M. A.; HOSSAIN, M. S.; BARLAZ, M. A. (2007). Shear strength parameters of municipal solid waste with leachate recirculation. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 133(4), 478–484.
- GODECKE, M. V.; NAIME, R. H.; FIGUEIREDO, J. A. S. (2012). O consumismo e a geração de resíduos sólidos urbanos no Brasil. *In: Rev. Elet. em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental*. v(8), nº 8, p. 1700-1712.

- HOSSAIN, M. D. S.; HAQUE, M. A. (2009). “The effects of daily cover soils on shear strength of municipal solid waste in bioreactor landfills.” *Waste Manag.*, 29(5), 1568–1576.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2015). *Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios. Coordenação de Trabalho e Rendimento*, Rio de Janeiro/RJ, 108p.
- JAHANFAR, A.; GHARABAGHI, B.; MCBEAN, E. A.; DUBEY, B. K. (2017). Municipal Solid Waste Slope Stability Modeling: A Probabilistic Approach. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 143, n. 8, p. 04017035, ago.
- JIE, Y.; XU, W.; DUNZHU, D.; WEI, Y.; PENG, T.; ZHOU, Z. (2013) Laboratory testing of a densified municipal solid waste in Beijing. DOI: 10.1007/s11771-013-1695-4.
- JUCÁ, J. F. T. (2003). *Disposição Final dos Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil*. 5º Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental – REGEO. Porto Alegre, RS.
- JUCÁ, J. F. T.; NORBERTO, A. S.; JÚNIOR, J. I. S.; MARINHO, F. A. M. (2021). Brasília municipal solid waste landfill: a case study on flow and slope stability. *Soils and Rocks. An International Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*.
- JUNIOR, A. J. G.; ASSIS, H. B.; NOGUEIRA, C. G. (2018). Comparação entre Abordagem Determinística e Probabilística na Avaliação da Estabilidade de Taludes. *In: XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia, Geotécnica Geotecnia e Desenvolvimento Urbano, COBRAMSEG, 2018, Salvador/BA, Brasil*.
- KARIMPOUR-FARD, M.; SHARIATMADARI, N.; KERAMATI, M.; KALARIJANI, J. (2014). An experimental investigation on the mechanical behavior of MSW. *International Journal of Civil Engineering*.
- KAVAZANJIAN, E.; MATASOVIC, N.; BONAPARTE, R. & SCHMERTMAM, G. R. (1995). Evaluation of MSW Properties for Seismic Analyses. *Geonviromental 2000. Geotechnical Special Publication n° 46, ASCE, vol.2, p.1126 – 1142*. Ed. Yalcin B. Acar and David E. Daniel, New Orleans.
- KOCKEL, R.; KONIG, D.; SYLLWASSCHY, O. (1997). Three basic topics on waste mechanics. *International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*.
- KOELSCH, F. (2007). Stability problems of landfills—The Payatas landslide. *Proc., 17th Int. Conf. on Solid Waste Technology and Management, Widener Univ. School of Engineering, Chester, PA, 1–7*.
- KÖLSCH, F. (1995). Material values for some mechanical properties of domestic waste. *5th International Landfill Symposium*.

- MARIANO, M. O.; JUCÁ, J. F. T. (1998). Monitoramento de recalques no aterro de resíduos sólidos da Muribeca – XI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Geotecnia, v.3 – nov. 1998, Brasília, p.1671-1678.
- MARQUES, A. C. M. (2001). Compactação e compressibilidade de resíduos sólidos urbanos - Volume 1. Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Doutor em Geotecnia.
- MARTINS, H. L. (2006). Avaliação da resistência de resíduos sólidos urbanos por meio de ensaios de cisalhamento direto em equipamento de grandes dimensões. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos.
- MASSAD, F. Obras de terra: curso básico de geotecnia. 2ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010. 216p.
- MERRY, S. M., KAVAZANJIAN, E., FRITZ, W. U. (2005). Reconnaissance of the July 10, 2000, Payatas Landfill Failure. *J Perform Constructed Facilities ASCE* 19(2):100–107.
- MORETTO, R. L. (2018). Análise de recalques do resíduo sólido urbano confinado em uma célula experimental e em lisímetros, considerando a biodegradação. Tese de Doutorado apresentada à Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Unicamp como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Doutora em Engenharia Civil na Área de Saneamento e Ambiente.
- 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 apresentada ao Programas de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ciência em Engenharia Civil.
- NASCIMENTO, V. F.; SOBRAL, A. C.; ANDRADE, P. R.; OMETTO, J. P. H. B (2015). Evolução e desafios no gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos no Brasil. *In: Ambiente & Água – na interdisciplinar Journal of Applied Science*.
- OJURI, O. O.; ADEGOKE, P. K. (). Geotechnical Characteristics of Synthetic Municipal Solid Waste for Effective Landfill Design. *Int. J. of GEOMATE*, Sept., 2015, Vol. 9, No. 1 (Sl. No. 17), pp. 1418-1427 *Geotech., Const. Mat. and Env.*, ISSN:2186-2982(P), 2186-2990(O), Japan.



- OTERO D'ALMEIDA, M. L.; VILHENA, A. (2000) "Lixo Municipal: Manual de Gerenciamento Integrado". 2ed. São Paulo: IPT/ CEMPRE, 2000.
- OWEIS, I. S. (1993). Stability of Landfills. In: Geotechnical Practice for Waste Disposal. Edited by David E. Daniel. Published in 1993 by Chapman & Hall, London.
- PANDEY, R. K.; TIWARI, R. P.; SHRIVASTAVA, R. (2017). Investigation of Shear Strength Properties of Municipal Solid Waste and Slope Stability Analysis. International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET).
- PENASSO, S. M. (2019). Comparação entre análise de estabilidade do talude da BR-267 pelos métodos determinístico, semi-probabilístico e probabilístico. Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.
- PULAT, H. F.; YUKSELEN-AKSOY, Y. (2017). Factors affecting the shear strength behavior of municipal solid wastes. Waste Management, <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2017.08.030>.
- REDDY, K. R.; HETTIARACHCHI, H.; PARAKALLA, N., S.; GANGATHULASI, J.; BOGNER, J. E. (2009a) Geotechnical properties of fresh municipal solid waste at Orchard Hills Landfill, USA. Waste Management, v. 29, n. 2, p. 952–959, 4 fev.
- REDDY, K. R.; HETTIARACHCHI, H.; PARAKALLA, N., S.; GANGATHULASI, J.; BOGNER, J. E.; LAGIER, T. (2009b). Compressibility and shear strength of municipal solid waste under short-term leachate recirculation operations. Waste Management & Research, v. 27, n. 6, p. 578–587, 7 set.
- REDDY, K. R.; HETTIARACHCHI, H.; GANGATHULASI, J.; BOGNER, J. E. (2011). Geotechnical properties of municipal solid waste at diferente phases of biodegradation. *In: Waste Management, Elsevier.*
- SANDOVAL, M. A. P. (2012). Análise determinística e probabilística da estabilidade de taludes. Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio.
- SANTOS, S. M.; JUCÁ, J. F. T. e ARAGÃO, J. M. S. (1998). Geotechnical Properties of a Solid Waste Landfill: Muribeca's Case. In: Proc. of the Third International Congress on Environmental Geotechnics, v.1, Lisboa, Portugal, Seco e Pinto (ed.), Balkema, Rotterdam, ISBN 90 5809 006x, pp. 181-184.

- SHARIATMADARI, N.; SADEGHPOUR, A. H.; RAZAGHIAN, F. (2014). Effects of aging on shear strength behavior of municipal solid waste. *International Journal of Civil Engineering*, v. 12, n. 3, p. 414–425.
- SILVA, C. C. (2015). Análise de estabilidade de um talude da cava de alegria utilizando abordagem probabilística. Dissertação apresentada ao Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica do Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Geotecnia, área de concentração em Geotecnia Aplicada à Mineração.
- SNIS. Ministério do desenvolvimento regional. Secretaria nacional de saneamento. Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos, 2019.
- SOUZA, T. F. (2017). Análise de estabilidade de talude por método probabilístico – BR116/Leopoldina. In: XII Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas – COBRAE, 2017, Florianópolis/SC, Brasil.
- STARK, T. D.; HUVAJ-SARIHAN, N.; LI, G. (2009). Shear strength of municipal solid waste for stability analyses. *Environmental Geology*, v. 57, n. 8, p. 1911–1923, 2009.
- STRAUSS, M (1998). Análise de estabilidade de talude do aterro sanitário da zona norte de Porto Alegre. Dissertação apresentada ao corpo docente do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia.
- TAPAHUASCO, W.C. (2009). Análise do Comportamento de Maciços Sanitários e Proposta de um Modelo de Previsão de Recalques Considerando a Parcela da Biodegradação. Tese de Doutorado, Publicação G.T.D-061/09, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 161 p.
- TOMASETTI, S. B. G. *et al.* (2014). Determinação de Parâmetros de Resistência ao Cisalhamento com Vistas à Aplicação em Análises Probabilísticas. In: XVII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica Geotecnia e Desenvolvimento Urbano – COBRAMSEG, 2014, Goiânia/GO, Brasil.
- U. S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. Introduction to Probability and Reliability Methods for Use In Geotechnical Engineering, Engineering Technical Letter ETL 1110-2- 547, Department of the Army, U. S. Army Corps of Engineers, Washington, DC 20314-1000, 1995.
- ZEKKOS, D.; ATHANASOPOULOS, G. A.; BRAY, J. D.; GRIZI, A.; THEODORATOS, A. (2010). Large-scale direct shear testing of municipal solid waste. *Waste Management*, doi:10.1016/j.wasman.2010.01.024.

ZEKKOS, D.; FEI, X. (2017). Constant load and constant volume response of municipal solid waste in simple shear. Waste Management, <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2016.09.029>.

## APÊNDICE A – TRATAMENTO ESTATÍSTICO

Os parâmetros de entrada obtidos da reta de regressão estão apresentados na Tabela 0.1

Tabela 0.1 – Parâmetros de Entrada para o Tratamento Estatístico

<b>Parâmetros de Entrada</b>		
N	R <sup>2</sup>	R
314	0,85	0,92
tg( $\varphi_{médio}$ )	$\varphi_{médio}$	$c_{médio}$
0,557537947	29,14	21,90

Através da reta de regressão linear, da equação 0.1

$$\tau' = 0,557x + 21,895 \quad 0.1$$

São calculados os dados de entrada para o levantamento estatístico, de acordo com a

Tabela 0.2.

Tabela 0.2 – Dados de entrada para o levantamento estatístico

$\sigma_n$ Ruptura	Tensão Cisalhante (kPa)		$(\tau_i - \tau)$	$(\tau_i - \tau)^2$	$(\sigma_{ni} - \sigma_n)$	$(\sigma_{ni} - \sigma_n)^2$
	Ensaio ( $\tau_i$ )	Média ( $\tau$ )				
50,00	28,00	49,77	-21,77	474,02	-100,12	10024,60
150,00	95,00	105,53	-10,53	110,79	-0,12	0,02
250,00	148,00	161,28	-13,28	176,34	99,88	9975,43
50,00	34,00	49,77	-15,77	248,75	-100,12	10024,60
150,00	95,00	105,53	-10,53	110,79	-0,12	0,02
250,00	168,00	161,28	6,72	45,17	99,88	9975,43
50,00	39,00	49,77	-10,77	116,03	-100,12	10024,60
150,00	81,00	105,53	-24,53	601,51	-0,12	0,02
250,00	151,00	161,28	-10,28	105,67	99,88	9975,43
50,00	34,00	49,77	-15,77	248,75	-100,12	10024,60
150,00	87,00	105,53	-18,53	343,20	-0,12	0,02
250,00	143,00	161,28	-18,28	334,14	99,88	9975,43
50,00	34,00	49,77	-15,77	248,75	-100,12	10024,60
150,00	104,00	105,53	-1,53	2,33	-0,12	0,02
250,00	160,00	161,28	-1,28	1,64	99,88	9975,43
50,00	34,00	49,77	-15,77	248,75	-100,12	10024,60
150,00	73,00	105,53	-32,53	1057,92	-0,12	0,02
250,00	115,00	161,28	-46,28	2141,79	99,88	9975,43
13,60	19,00	29,48	-10,48	109,78	-136,52	18638,51

19,10	27,80	32,54	-4,74	22,51	-131,02	17167,01
13,60	16,40	29,48	-13,08	171,02	-136,52	18638,51
19,10	23,20	32,54	-9,34	87,31	-131,02	17167,01
13,60	15,70	29,48	-13,78	189,82	-136,52	18638,51
19,10	21,10	32,54	-11,44	130,96	-131,02	17167,01
13,60	17,00	29,48	-12,48	155,69	-136,52	18638,51
19,10	20,20	32,54	-12,34	152,37	-131,02	17167,01
16,00	32,00	30,82	1,18	1,40	-134,12	17988,96
38,00	58,00	43,08	14,92	222,56	-112,12	12571,55
57,00	70,00	53,67	16,33	266,52	-93,12	8671,88
85,00	93,00	69,29	23,71	562,37	-65,12	4241,00
15,00	29,00	30,26	-1,26	1,58	-135,12	18258,21
26,00	42,00	36,39	5,61	31,46	-124,12	15406,50
38,00	47,00	43,08	3,92	15,36	-112,12	12571,55
49,00	63,00	49,21	13,79	190,04	-101,12	10225,85
89,00	90,00	71,52	18,48	341,66	-61,12	3736,01
21,00	39,00	33,60	5,40	29,12	-129,12	16672,73
40,00	59,00	44,20	14,80	219,14	-110,12	12127,06
60,00	79,00	55,35	23,65	559,45	-90,12	8122,14
90,00	110,00	72,07	37,93	1438,43	-60,12	3614,77
12,00	21,00	28,59	-7,59	57,54	-138,12	19077,94
25,00	38,00	35,83	2,17	4,69	-125,12	15655,75
36,00	56,00	41,97	14,03	196,94	-114,12	13024,04
49,00	68,00	49,21	18,79	352,90	-101,12	10225,85
90,00	98,00	72,07	25,93	672,19	-60,12	3614,77
12,00	29,00	28,59	0,41	0,17	-138,12	19077,94
24,00	45,00	35,28	9,72	94,56	-126,12	15906,99
36,00	60,00	41,97	18,03	325,21	-114,12	13024,04
48,00	72,00	48,66	23,34	544,90	-102,12	10429,09
90,00	99,00	72,07	26,93	725,04	-60,12	3614,77
12,00	38,00	28,59	9,41	88,63	-138,12	19077,94
24,00	39,00	35,28	3,72	13,87	-126,12	15906,99
36,00	65,00	41,97	23,03	530,55	-114,12	13024,04
48,00	76,00	48,66	27,34	747,65	-102,12	10429,09
90,00	100,00	72,07	27,93	779,89	-60,12	3614,77
20,00	22,00	33,05	-11,05	122,01	-130,12	16931,98
40,00	33,00	44,20	-11,20	125,36	-110,12	12127,06
60,00	37,00	55,35	-18,35	336,62	-90,12	8122,14
60,00	52,00	55,35	-3,35	11,20	-90,12	8122,14
90,00	59,00	72,07	-13,07	170,91	-60,12	3614,77
90,00	71,00	72,07	-1,07	1,15	-60,12	3614,77
20,00	24,00	33,05	-9,05	81,83	-130,12	16931,98
40,00	41,00	44,20	-3,20	10,22	-110,12	12127,06
60,00	59,00	55,35	3,65	13,34	-90,12	8122,14
90,00	74,00	72,07	1,93	3,71	-60,12	3614,77

20,00	25,00	33,05	-8,05	64,73	-130,12	16931,98
40,00	34,00	44,20	-10,20	103,97	-110,12	12127,06
60,00	53,00	55,35	-2,35	5,51	-90,12	8122,14
90,00	78,00	72,07	5,93	35,12	-60,12	3614,77
25,00	52,00	35,83	16,17	261,36	-125,12	15655,75
50,00	90,00	49,77	40,23	1618,30	-100,12	10024,60
100,00	148,00	77,65	70,35	4949,29	-50,12	2512,31
200,00	238,00	133,40	104,60	10940,62	49,88	2487,72
300,00	334,00	189,16	144,84	20979,67	149,88	22463,14
25,00	40,00	35,83	4,17	17,36	-125,12	15655,75
50,00	80,00	49,77	30,23	913,74	-100,12	10024,60
100,00	132,00	77,65	54,35	2954,05	-50,12	2512,31
200,00	212,00	133,40	78,60	6177,55	49,88	2487,72
300,00	318,00	189,16	128,84	16600,68	149,88	22463,14
12,00	96,00	28,59	67,41	4544,72	-138,12	19077,94
54,00	106,00	52,00	54,00	2915,78	-96,12	9239,62
116,00	125,00	86,57	38,43	1476,91	-34,12	1164,37
15,00	13,60	30,26	-16,66	277,49	-135,12	18258,21
30,00	17,50	38,62	-21,12	446,10	-120,12	14429,52
50,00	33,00	49,77	-16,77	281,30	-100,12	10024,60
15,00	6,20	30,26	-24,06	578,79	-135,12	18258,21
30,00	16,00	38,62	-22,62	511,72	-120,12	14429,52
50,00	33,50	49,77	-16,27	264,77	-100,12	10024,60
15,00	13,60	30,26	-16,66	277,49	-135,12	18258,21
30,00	20,90	38,62	-17,72	314,04	-120,12	14429,52
50,00	35,00	49,77	-14,77	218,21	-100,12	10024,60
48,00	43,00	48,66	-5,66	32,00	-102,12	10429,09
97,00	89,00	75,98	13,02	169,62	-53,12	2822,05
145,00	125,00	102,74	22,26	495,60	-5,12	26,24
194,00	165,00	130,06	34,94	1220,99	43,88	1925,20
290,00	241,00	183,58	57,42	3296,94	139,88	19565,59
48,00	49,00	48,66	0,34	0,12	-102,12	10429,09
97,00	73,00	75,98	-2,98	8,86	-53,12	2822,05
145,00	100,00	102,74	-2,74	7,50	-5,12	26,24
194,00	148,00	130,06	17,94	321,94	43,88	1925,20
290,00	200,00	183,58	16,42	269,58	139,88	19565,59
48,00	56,00	48,66	7,34	53,92	-102,12	10429,09
97,00	66,00	75,98	-9,98	99,52	-53,12	2822,05
145,00	82,00	102,74	-20,74	430,06	-5,12	26,24
194,00	115,00	130,06	-15,06	226,72	43,88	1925,20
290,00	155,00	183,58	-28,58	816,87	139,88	19565,59
48,00	13,00	48,66	-35,66	1271,41	-102,12	10429,09
97,00	20,00	75,98	-55,98	3133,33	-53,12	2822,05
145,00	33,00	102,74	-69,74	4863,39	-5,12	26,24
194,00	43,00	130,06	-87,06	7578,98	43,88	1925,20

290,00	46,00	183,58	-137,58	18928,53	139,88	19565,59
96,00	89,00	75,42	13,58	184,45	-54,12	2929,29
192,00	172,00	128,94	43,06	1853,97	41,88	1753,69
287,00	231,00	181,91	49,09	2409,99	136,88	18735,33
96,00	79,00	75,42	3,58	12,83	-54,12	2929,29
192,00	149,00	128,94	20,06	402,31	41,88	1753,69
287,00	178,00	181,91	-3,91	15,28	136,88	18735,33
96,00	73,00	75,42	-2,42	5,85	-54,12	2929,29
192,00	100,00	128,94	-28,94	837,66	41,88	1753,69
287,00	150,00	181,91	-31,91	1018,15	136,88	18735,33
96,00	36,00	75,42	-39,42	1553,83	-54,12	2929,29
192,00	50,00	128,94	-78,94	6231,88	41,88	1753,69
287,00	89,00	181,91	-92,91	8631,97	136,88	18735,33
150,00	113,00	105,53	7,47	55,87	-0,12	0,02
200,00	137,00	133,40	3,60	12,94	49,88	2487,72
100,00	82,00	77,65	4,35	18,93	-50,12	2512,31
25,00	37,00	35,83	1,17	1,36	-125,12	15655,75
75,00	58,00	63,71	-5,71	32,61	-75,12	5643,45
150,00	96,00	105,53	-9,53	90,74	-0,12	0,02
25,00	45,00	35,83	9,17	84,03	-125,12	15655,75
75,00	69,00	63,71	5,29	27,98	-75,12	5643,45
200,00	113,00	133,40	-20,40	416,27	49,88	2487,72
100,00	65,00	77,65	-12,65	159,99	-50,12	2512,31
25,00	24,00	35,83	-11,83	140,03	-125,12	15655,75
50,00	45,00	49,77	-4,77	22,77	-100,12	10024,60
100,00	83,00	77,65	5,35	28,64	-50,12	2512,31
150,00	120,00	105,53	14,47	209,51	-0,12	0,02
200,00	153,00	133,40	19,60	384,06	49,88	2487,72
100,00	70,00	77,65	-7,65	58,50	-50,12	2512,31
150,00	103,00	105,53	-2,53	6,38	-0,12	0,02
200,00	133,00	133,40	-0,40	0,16	49,88	2487,72
25,00	23,00	35,83	-12,83	164,70	-125,12	15655,75
50,00	36,00	49,77	-13,77	189,67	-100,12	10024,60
75,00	50,00	63,71	-13,71	187,97	-75,12	5643,45
100,00	63,00	77,65	-14,65	214,59	-50,12	2512,31
150,00	90,00	105,53	-15,53	241,05	-0,12	0,02
200,00	117,00	133,40	-16,40	269,04	49,88	2487,72
25,00	30,00	35,83	-5,83	34,03	-125,12	15655,75
100,00	70,00	77,65	-7,65	58,50	-50,12	2512,31
150,00	97,00	105,53	-8,53	72,69	-0,12	0,02
200,00	127,00	133,40	-6,40	40,99	49,88	2487,72
25,00	31,00	35,83	-4,83	23,36	-125,12	15655,75
50,00	51,00	49,77	1,23	1,51	-100,12	10024,60
75,00	69,00	63,71	5,29	27,98	-75,12	5643,45
100,00	82,00	77,65	4,35	18,93	-50,12	2512,31

150,00	117,00	105,53	11,47	131,66	-0,12	0,02
200,00	147,00	133,40	13,60	184,89	49,88	2487,72
150,00	137,00	105,53	31,47	990,63	-0,12	0,02
200,00	175,00	133,40	41,60	1730,34	49,88	2487,72
200,00	175,00	133,40	41,60	1730,34	49,88	2487,72
25,00	60,00	35,83	24,17	584,02	-125,12	15655,75
50,00	79,00	49,77	29,23	854,28	-100,12	10024,60
75,00	93,00	63,71	29,29	857,88	-75,12	5643,45
100,00	106,00	77,65	28,35	803,79	-50,12	2512,31
150,00	150,00	105,53	44,47	1977,96	-0,12	0,02
200,00	168,00	133,40	34,60	1196,98	49,88	2487,72
25,00	41,00	35,83	5,17	26,69	-125,12	15655,75
50,00	60,00	49,77	10,23	104,61	-100,12	10024,60
75,00	82,00	63,71	18,29	334,51	-75,12	5643,45
100,00	93,00	77,65	15,35	235,66	-50,12	2512,31
150,00	123,00	105,53	17,47	305,35	-0,12	0,02
200,00	158,00	133,40	24,60	605,03	49,88	2487,72
50,00	44,00	49,77	-5,77	33,31	-100,12	10024,60
200,00	135,00	133,40	1,60	2,55	49,88	2487,72
150,00	121,00	105,53	15,47	239,45	-0,12	0,02
200,00	151,00	133,40	17,60	309,67	49,88	2487,72
150,00	111,00	105,53	5,47	29,97	-0,12	0,02
200,00	145,00	133,40	11,60	134,50	49,88	2487,72
25,00	37,00	35,83	1,17	1,36	-125,12	15655,75
50,00	54,00	49,77	4,23	17,88	-100,12	10024,60
75,00	67,00	63,71	3,29	10,82	-75,12	5643,45
100,00	84,00	77,65	6,35	40,34	-50,12	2512,31
200,00	151,00	133,40	17,60	309,67	49,88	2487,72
13,00	8,00	29,14	-21,14	447,03	-137,12	18802,70
20,00	13,00	33,05	-20,05	401,83	-130,12	16931,98
13,00	10,00	29,14	-19,14	366,45	-137,12	18802,70
20,00	16,00	33,05	-17,05	290,56	-130,12	16931,98
50,00	34,00	49,77	-15,77	248,75	-100,12	10024,60
100,00	58,00	77,65	-19,65	386,08	-50,12	2512,31
200,00	82,00	133,40	-51,40	2642,23	49,88	2487,72
400,00	119,00	244,91	-125,91	15853,37	249,88	62438,55
50,00	41,00	49,77	-8,77	76,95	-100,12	10024,60
100,00	65,00	77,65	-12,65	159,99	-50,12	2512,31
200,00	92,00	133,40	-41,40	1714,17	49,88	2487,72
400,00	143,00	244,91	-101,91	10385,68	249,88	62438,55
50,00	41,00	49,77	-8,77	76,95	-100,12	10024,60
100,00	65,00	77,65	-12,65	159,99	-50,12	2512,31
200,00	92,00	133,40	-41,40	1714,17	49,88	2487,72
400,00	170,00	244,91	-74,91	5611,53	249,88	62438,55
50,00	34,00	49,77	-15,77	248,75	-100,12	10024,60



100,00	58,00	77,65	-19,65	386,08	-50,12	2512,31
200,00	87,00	133,40	-46,40	2153,20	49,88	2487,72
400,00	180,00	244,91	-64,91	4213,33	249,88	62438,55
50,00	30,00	49,77	-19,77	390,93	-100,12	10024,60
100,00	60,00	77,65	-17,65	311,48	-50,12	2512,31
150,00	69,00	105,53	-36,53	1334,13	-0,12	0,02
50,00	40,00	49,77	-9,77	95,49	-100,12	10024,60
100,00	44,00	77,65	-33,65	1132,24	-50,12	2512,31
150,00	97,00	105,53	-8,53	72,69	-0,12	0,02
100,00	100,00	77,65	22,35	499,58	-50,12	2512,31
200,00	150,00	133,40	16,60	275,47	49,88	2487,72
300,00	177,00	189,16	-12,16	147,78	149,88	22463,14
400,00	221,00	244,91	-23,91	571,70	249,88	62438,55
20,00	24,00	33,05	-9,05	81,83	-130,12	16931,98
50,00	53,00	49,77	3,23	10,42	-100,12	10024,60
100,00	91,00	77,65	13,35	178,25	-50,12	2512,31
200,00	132,00	133,40	-1,40	1,97	49,88	2487,72
20,00	24,00	33,05	-9,05	81,83	-130,12	16931,98
50,00	44,00	49,77	-5,77	33,31	-100,12	10024,60
100,00	68,00	77,65	-9,65	93,10	-50,12	2512,31
200,00	117,00	133,40	-16,40	269,04	49,88	2487,72
20,00	20,00	33,05	-13,05	170,19	-130,12	16931,98
50,00	35,00	49,77	-14,77	218,21	-100,12	10024,60
100,00	53,00	77,65	-24,65	607,56	-50,12	2512,31
200,00	98,00	133,40	-35,40	1253,34	49,88	2487,72
20,00	13,00	33,05	-20,05	401,83	-130,12	16931,98
50,00	20,00	49,77	-29,77	886,37	-100,12	10024,60
100,00	24,00	77,65	-53,65	2878,19	-50,12	2512,31
50,00	33,00	49,77	-16,77	281,30	-100,12	10024,60
100,00	50,00	77,65	-27,65	764,46	-50,12	2512,31
200,00	73,00	133,40	-60,40	3648,47	49,88	2487,72
13,90	22,00	29,64	-7,64	58,44	-136,22	18556,69
27,80	35,00	37,39	-2,39	5,73	-122,32	14962,90
41,70	48,00	45,14	2,86	8,15	-108,42	11755,53
13,90	25,00	29,64	-4,64	21,57	-136,22	18556,69
27,80	42,00	37,39	4,61	21,21	-122,32	14962,90
41,70	60,00	45,14	14,86	220,69	-108,42	11755,53
15,00	24,00	30,26	-6,26	39,16	-135,12	18258,21
15,00	23,00	30,26	-7,26	52,68	-135,12	18258,21
15,00	27,00	30,26	-3,26	10,62	-135,12	18258,21
15,00	28,00	30,26	-2,26	5,10	-135,12	18258,21
50,00	60,00	49,77	10,23	104,61	-100,12	10024,60
100,00	97,00	77,65	19,35	374,47	-50,12	2512,31
200,00	139,00	133,40	5,60	31,33	49,88	2487,72
50,00	40,00	49,77	-9,77	95,49	-100,12	10024,60

100,00	99,00	77,65	21,35	455,87	-50,12	2512,31
200,00	115,00	133,40	-18,40	338,66	49,88	2487,72
50,00	60,00	49,77	10,23	104,61	-100,12	10024,60
100,00	96,00	77,65	18,35	336,77	-50,12	2512,31
200,00	120,00	133,40	-13,40	179,63	49,88	2487,72
176,00	160,00	120,02	39,98	1598,27	25,88	669,62
266,00	190,00	170,20	19,80	392,04	115,88	13427,50
538,00	342,00	321,85	20,15	406,01	387,88	150448,62
630,00	492,00	373,14	118,86	14126,77	479,88	230282,00
176,00	150,00	120,02	29,98	898,70	25,88	669,62
266,00	190,00	170,20	19,80	392,04	115,88	13427,50
538,00	328,00	321,85	6,15	37,82	387,88	150448,62
774,00	362,00	453,43	-91,43	8359,33	623,88	389222,60
176,00	130,00	120,02	9,98	99,57	25,88	669,62
266,00	165,00	170,20	-5,20	27,04	115,88	13427,50
538,00	302,00	321,85	-19,85	394,04	387,88	150448,62
774,00	362,00	453,43	-91,43	8359,33	623,88	389222,60
176,00	140,00	120,02	19,98	399,13	25,88	669,62
266,00	175,00	170,20	4,80	23,04	115,88	13427,50
538,00	342,00	321,85	20,15	406,01	387,88	150448,62
774,00	390,00	453,43	-63,43	4023,29	623,88	389222,60
176,00	135,00	120,02	14,98	224,35	25,88	669,62
266,00	159,00	170,20	-11,20	125,44	115,88	13427,50
538,00	350,00	321,85	28,15	792,40	387,88	150448,62
774,00	490,00	453,43	36,57	1337,41	623,88	389222,60
176,00	145,00	120,02	24,98	623,92	25,88	669,62
266,00	220,00	170,20	49,80	2480,03	115,88	13427,50
538,00	390,00	321,85	68,15	4644,37	387,88	150448,62
774,00	400,00	453,43	-53,43	2854,70	623,88	389222,60
176,00	175,00	120,02	54,98	3022,62	25,88	669,62
266,00	255,00	170,20	84,80	7191,02	115,88	13427,50
538,00	400,00	321,85	78,15	6107,36	387,88	150448,62
774,00	420,00	453,43	-33,43	1117,52	623,88	389222,60
176,00	145,00	120,02	24,98	623,92	25,88	669,62
266,00	228,00	170,20	57,80	3340,83	115,88	13427,50
538,00	378,00	321,85	56,15	3152,78	387,88	150448,62
630,00	460,00	373,14	86,86	7543,98	479,88	230282,00
32,00	30,00	39,74	-9,74	94,79	-118,12	13953,03
179,00	100,00	121,69	-21,69	470,64	28,88	833,89
271,00	278,00	172,99	105,01	11027,57	120,88	14611,27
364,00	265,00	224,84	40,16	1612,92	213,88	45743,40
32,00	40,00	39,74	0,26	0,07	-118,12	13953,03
179,00	140,00	121,69	18,31	335,10	28,88	833,89
550,00	390,00	328,54	61,46	3777,22	399,88	159901,67
90,00	62,00	72,07	-10,07	101,47	-60,12	3614,77

179,00	125,00	121,69	3,31	10,93	28,88	833,89
271,00	172,00	172,99	-0,99	0,98	120,88	14611,27
90,00	86,00	72,07	13,93	193,95	-60,12	3614,77
179,00	145,00	121,69	23,31	543,16	28,88	833,89
271,00	200,00	172,99	27,01	729,66	120,88	14611,27
90,00	86,00	72,07	13,93	193,95	-60,12	3614,77
179,00	137,00	121,69	15,31	234,26	28,88	833,89
271,00	200,00	172,99	27,01	729,66	120,88	14611,27
50,00	23,00	49,77	-26,77	716,73	-100,12	10024,60
100,00	32,00	77,65	-45,65	2083,81	-50,12	2512,31
200,00	63,00	133,40	-70,40	4956,52	49,88	2487,72
400,00	123,00	244,91	-121,91	14862,09	249,88	62438,55
50,00	23,00	49,77	-26,77	716,73	-100,12	10024,60
100,00	32,00	77,65	-45,65	2083,81	-50,12	2512,31
200,00	59,00	133,40	-74,40	5535,75	49,88	2487,72
400,00	102,00	244,91	-142,91	20423,32	249,88	62438,55
61,00	62,00	55,90	6,10	37,15	-89,12	7942,90
187,00	142,00	126,15	15,85	251,08	36,88	1359,92
457,00	311,00	276,69	34,31	1177,19	306,88	94173,54
61,00	80,00	55,90	24,10	580,58	-89,12	7942,90
187,00	150,00	126,15	23,85	568,60	36,88	1359,92
457,00	311,00	276,69	34,31	1177,19	306,88	94173,54
61,00	80,00	55,90	24,10	580,58	-89,12	7942,90
187,00	150,00	126,15	23,85	568,60	36,88	1359,92
457,00	320,00	276,69	43,31	1875,77	306,88	94173,54

Então, calcula-se o erro médio quadrado (MSE) e a variância (V) do intercepto coesivo e da tangente do ângulo de atrito, como apresentado na Tabela 0.3.

Tabela 0.3 – Cálculo do MSE e Variância.

MSE	V(tgφ)	V(c)
1310,222	0,00018	8,236096

Por fim, calcula-se o desvio padrão ( $\sigma$ ) e o coeficiente de variação (CV) para o ângulo de atrito ( $\phi$ ) e o intercepto coesivo (c), como apresentado na Tabela 0.4.

Tabela 0.4 - Desvio padrão e coeficiente de variação para o intercepto coesivo e ângulo de atrito

<b>Desvio Padrão</b>	
c	φ
<b>2,87</b>	0,59
<b>Coeficiente de Variação</b>	

---

13,11%

2,01%

---